



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

Departamento de Ingeniería Civil. Transportes

**OPTIMIZACIÓN DINÁMICA DE
ESTRATEGIAS DE MOVILIDAD SOSTENIBLE
EN ÁREAS METROPOLITANAS**

LUIS ANGEL GUZMÁN-GARCÍA

Ingeniero Civil

Madrid, 2011

***OPTIMIZACIÓN DINÁMICA DE ESTRATEGIAS DE
MOVILIDAD SOSTENIBLE EN ÁREAS
METROPOLITANAS***

TESIS DOCTORAL

LUIS ANGEL GUZMÁN-GARCÍA

Directores

**DANIEL DE LA HOZ SÁNCHEZ
ANDRÉS MONZÓN DE CÁCERES**

Madrid, 2011

Departamento de Ingeniería Civil. Transportes
Universidad Politécnica de Madrid

Copyright: Copia permitida si la fuente es citada

ISBN: 978-84-694-3127-6 (versión impresa)

ISBN: 978-84-694-3128-3 (versión electrónica)



Tribunal nombrado por el Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día

Presidente D.

Vocal D.

Vocal D.

Vocal D.

Secretario D.

Suplente D.

Suplente D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2011 en la *E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la U.P.M.*

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Después de estos años, no tengo sino palabras de gratitud por todo lo que aprendido y conocido desde que estoy en España. Un agradecimiento especial para Andrés, sin quien no habría podido iniciar esta etapa de mi vida, que me ha ayudado a lo largo de estos años en la elaboración de esta investigación, y que sin su ayuda no habría podido realizar este trabajo de la misma manera. A Daniel, quien desde el principio me acogió como su pupilo y me enseñó y contagió el gusto por los temas de modelos de transporte. También tengo que mencionar su invaluable ayuda en la elaboración de la Tesis, que aunque a distancia y con todos los obstáculos que esto acarrea, ha sabido tener la paciencia suficiente para poder llegar al final. Tampoco puedo olvidar a Carmen, que aparte de aguantarme y ayudarme durante este tiempo, me dio los últimos ‘tips’ de edición.

A mis compañeros de TRANSyT, con quienes he compartido tan buenos momentos y me han ayudado en tantas cosas, también muchas gracias. Por último, aunque no menos importante, a mi esposa, que durante los dos últimos años ha sido mi apoyo en este enorme trabajo y que ha sabido tener la paciencia para estar conmigo y ayudarme en lo que le he pedido. A mis padres, por todo lo que me enseñaron y me han dado.

GRACIAS

RESUMEN

En los últimos años ha habido un debate a nivel europeo referente a la interacción entre la demanda de viajes y el entorno urbano. La alta dependencia y el uso intensivo del coche en las zonas urbanas son vistos con preocupación creciente ya que están conduciendo los sistemas de transporte hacia escenarios insostenibles. Estos escenarios hacen que la planificación a largo plazo tenga una gran relevancia para tratar de invertir esta tendencia.

Para poder alcanzar escenarios urbanos sostenibles, debe existir una planificación integrada que se base en el desarrollo de estrategias que busquen maximizar sus efectos positivos combinados (sinergias) y mitigar los negativos (superación de barreras).

Esta Tesis Doctoral se enmarca en este contexto proponiendo un nuevo método que sirva de apoyo al proceso de planificación y toma de decisiones a largo plazo, con el fin de alcanzar escenarios de movilidad sostenible.

En el proceso de planificación integrada del transporte se plantean problemas difíciles que requieren frecuentemente la aplicación de técnicas matemáticas complejas. Frente a una aproximación tradicional, donde se aborda el problema desde una perspectiva estática y a corto plazo, se quiere aprovechar las ventajas que brinda la combinación de un modelo dinámico de usos del suelo y transporte (LUTI) y una rutina de optimización a lo largo del tiempo. El hilo conductor de esta investigación se basa en el desarrollo e integración de dichos subsistemas que, aunque aplicados a escenarios distintos, conservan una entidad propia y podrían ser utilizados en diversos ámbitos.

Para la optimización de un problema existen varios algoritmos según la forma de la función objetivo, el conocimiento derivativo, la capacidad de cómputo y los requisitos para la tasa de convergencia, entre otros. En este caso, las funciones a optimizar no son explícitas, ya que las medidas pueden variar, lo que hace que el método sea flexible y permita adecuarse a necesidades específicas.

Después de haber realizado una revisión de métodos de optimización que se adecuen a esta problemática concreta y teniendo en cuenta la complejidad de las relaciones y ciclos causales del modelo LUTI utilizado (que en la mayor parte de los casos no son relaciones lineales) y una función objetivo compleja, cuya composición hace prácticamente imposible obtener derivadas (involucra un grupo de estrategias variadas), se ha escogido como algoritmo de optimización el método modificado de Powell, el cual es considerado como el más adecuado para este tipo de problemas.

La investigación ha desarrollado y comparado dos enfoques distintos para el diseño, la evaluación y la optimización de medidas de transporte urbano a nivel estratégico. El primer enfoque se ha basado en un análisis coste-beneficio (CBA) dinámico, aplicando valores monetarios a los diferentes componentes de la sostenibilidad: eficiencia, equidad y medio ambiente. Con esta evaluación se pretende maximizar el bienestar social según una función objetivo previamente definida. El segundo enfoque utiliza los mismos criterios de sostenibilidad y está definido por una función multicriterio (MCA), donde se pretende satisfacer el desarrollo sostenible de un sistema de transporte urbano, estableciendo prioridades según las percepciones de un panel de expertos locales. Finalmente, como un enfoque alternativo, se presenta un análisis de la eficiencia económica de políticas de transporte que implican el recaudo de nuevos ingresos.

En conclusión, el resultado general de esta investigación es una propuesta de un método de evaluación estratégica que permite la optimización de servicios de transporte urbano,

mediante la definición de escenarios de oferta, de movilidad, de medio ambiente y consumo energético, a largo plazo.

Este desarrollo ha sido aplicado en un caso de estudio a la Comunidad de Madrid, junto con el modelo LUTI estratégico y la rutina de optimización integrada y automatizada. Los escenarios estudiados en el caso práctico muestran evidencias de diferentes tipos de sinergias y en diferentes proporciones, lo cual ha permitido estudiar el comportamiento general y los impactos de diferentes grupos de medidas actuando en conjunto sobre un sistema dinámico y complejo, como lo es una zona urbana.

ABSTRACT

In the last few years there has been a debate on the interaction between travel demand and urban environment. The high dependence and intensive car usage in urban zones are a growing concern because they are switching the transport systems to unsustainable scenarios. These scenarios make the long-term planning relevant to reverse this trend.

To be able to reach sustainable urban scenarios, it should exist an integrated planning based on the development of strategies that look to maximize their positive combined effects (synergies) and to mitigate the negative ones (political and financial barriers). This doctoral thesis is proposing a new method that can support the process of long-term planning and decision making in order to reach scenarios of sustainable mobility.

While working on transport integrated planning, some difficulties arise that required a frequent application of complex math techniques. Facing a traditional approach, which the problem is considered from a static and short-term perspective, we would like to take the advantages from the combination of a dynamic model of land use and transport interaction (LUTI) and an optimization routine along the time. The line of research is based on the development and integration of the mentioned subsystems which, even though applied to different scenarios, keep a self identity and could be used in diverse fields.

To obtain the optimization of a certain problem, there are many algorithms according to the objective function, the derivative information, the calculation capacity and the convergence rate requirements, among others. In this case, the functions to be optimized are not explicit because the measures could vary, which makes the method flexible and able to adapt itself to specific needs.

Revising the adequate optimization methods for this concrete situation and taking into account the complexity of the relations and causal cycles of the used LUTI model and a complex objective function, which composition makes practically impossible to obtain derivatives, the modified Powell method has been chosen as the optimization algorithm. This method is considered as the most adequate for these types of problems.

The investigation has developed and compared two different approaches for designing, assessing and optimizing the urban transport policies to a strategic level. The first approach is based on a dynamic cost-benefit analysis (CBA), applying monetary values to the different components of sustainability: efficiency, equity and environment. This evaluation pretends to maximize social welfare according to an objective function previously defined. The second approach uses the same criteria of sustainability and it is defined by a multi criteria function (MCA). This perspective moves toward satisfying sustainable development of an urban transport system by establishing priorities according to the perceptions of local planners and decision makers. Finally, as an alternative approach, it is shown an analysis of economic efficiency of transport policy that implies the collection of new income.

In conclusion, the general result of this research is a proposal of a strategic assessment method that allows the optimization of urban transport services by defining the long-term scenarios of supply, mobility, environment and energy consumption.

This method has been applied in a study case in Comunidad de Madrid, together with LUTI strategic model and the routine of the integrated and automated optimization. The analyzed scenarios in this practical case show different types of synergies in diverse proportions. These demonstrations allow us to study the general behaviour and the impact of various measures by combining a complex and dynamic system, such as an urban area.

GLOSARIO

Las siglas que se enumeran a continuación se encuentran presentes a lo largo de toda esta Tesis Doctoral. Al nombrarse por primera vez se presentan con su nombre completo y posteriormente son presentadas por sus siglas.

La siguiente lista fue pensada como ayuda al lector, si tiene la necesidad de recordar el nombre completo al cual se está siendo referencia en el texto.

Acrónimo	Descripción
AHP	Proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process)
BU	Beneficio de los usuarios
CBA	Análisis coste-beneficio (Cost-Benefit Analysis)
CF	Costes fijos de operación del transporte público
CLD	Diagramas de flujo causales (Casual Loop Diagram)
CM	Comunidad de Madrid
CT	Costes totales de operación del transporte público
CV	Costes variables de operación del transporte público
DETR	Department of the Environment, Transport and the Regions (Reino Unido)
DTT	Administración de Francesa Transportes
EC	Excedente del consumidor
EEA	Agencia Europea del Medio Ambiente (European Environment Agency)
EU	Unión Europea
GIS	Sistemas de información geográfica (geographical information systems)
HP	Hora punta
HTM	Ministerio de Economía y Finanzas del Reino Unido (Her Majesty's Treasury)
HV	Hora valle
IC	Impuestos combustible
INE	Instituto de Estadística
ITS	Sistemas de transporte inteligentes (Intelligent Transportation Systems)
LUTI	Land Use Transport Interaction
MARS	Metropolitan Activity Relocation Simulator
MIFO	Ministerio de Fomento
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (Organisation for Economic Co-operation and Development)
OSE	Observatorio de la Sostenibilidad en España
PMUS	Planes de movilidad urbana sostenible
TP	Transporte público
VAN	Valor actual neto
veh·km	vehículos por kilómetro

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 EL CONTEXTO.....	3
1.2 OBJETIVOS Y APORTE CIENTÍFICO.....	5
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	6
CAPÍTULO 2. LA MOVILIDAD SOSTENIBLE	7
2.1 INTRODUCCIÓN.....	11
2.2 LA SOSTENIBILIDAD.....	12
2.2.1 Sostenibilidad Social.....	13
2.2.2 Sostenibilidad Económica (Eficiencia del Sistema).....	14
2.2.3 Sostenibilidad Ambiental.....	14
2.3 PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE SOSTENIBLES	15
2.3.1 La Planificación Sostenible en un Sistema de Usos del Suelo y Transporte.....	16
2.3.2 La Planificación Estratégica.....	17
2.3.3 Los Escenarios.....	18
2.3.4 Indicadores.....	19
2.4 ESTRATEGIAS SOSTENIBLES DE TRANSPORTE URBANO.....	21
2.4.1 Medidas de Infraestructuras.....	22
2.4.2 Medidas de Gestión de la Demanda.....	23
2.4.3 Medidas de Pricing.....	23
2.4.4 Medidas Espaciales.....	24
2.4.5 Medidas de Información.....	25
2.4.6 Otras Medidas: Instrumentos Operativos.....	25
CAPÍTULO 3. LA INTEGRACIÓN DEL TRANSPORTE Y LOS USOS DEL SUELO	27
3.1 INTRODUCCIÓN.....	31
3.2 LA RELACIÓN ENTRE LOS USOS DEL SUELO Y EL TRANSPORTE.....	33
3.2.1 El Transporte.....	33
3.2.2 El Territorio.....	35
3.2.3 Factores Relevantes e Impactos Esperados.....	36
3.2.4 La Interacción Transporte - Territorio.....	39
3.2.5 La Integración de Políticas.....	41
3.3 LA MODELIZACIÓN INTEGRAL DE LOS USOS DEL SUELO Y EL TRANSPORTE	44
3.3.1 Modelos LUTI.....	46
3.3.2 Éxitos y Fracazos de la Integración.....	52
3.4 RESUMEN Y DISCUSIONES	53
CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN: HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE POLÍTICAS SOSTENIBLES DE TRANSPORTE	55
4.1 INTRODUCCIÓN.....	59
4.2 SISTEMAS DINÁMICOS.....	61
4.2.1 Descripción de un Sistema.....	61
4.2.2 Diagrama Causal y Ciclo.....	62
4.3 OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DINÁMICOS.....	66
4.3.1 Marco Conceptual del Proceso de Optimización.....	68
4.3.2 Enfoque Integral Para el Análisis de Políticas en Modelos Dinámicos.....	68
4.3.3 Optimización sin Derivadas.....	69
4.3.4 Direcciones Conjugadas.....	71
4.3.5 Método de Powell.....	74
4.4 EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	79
4.4.1 Diseño de Estrategias Óptimas de Transporte.....	80

4.4.2 <i>Funciones Objetivo</i>	80
4.4.3 <i>Restricciones</i>	84
4.4.4 <i>Análisis de Sensibilidad</i>	84
4.5 RESUMEN Y DISCUSIONES	85
CAPÍTULO 5. PROPUESTA METODOLÓGICA. DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO DE OPTIMIZACIÓN ESTRATÉGICA	87
5.1 INTRODUCCIÓN	91
5.2 MARCO DE EVALUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	91
5.2.1 <i>Identificación del Problema</i>	92
5.2.2 <i>Planteamiento General de la Solución</i>	95
5.2.3 <i>La Planificación del Transporte como un Problema de Optimización</i>	97
5.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	99
5.3.1 <i>Objetivos Específicos</i>	100
5.4 PRINCIPIOS DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADA	100
5.4.1 <i>Indicadores</i>	101
5.4.2 <i>Selección del Modelo de Evaluación</i>	104
5.4.3 <i>Desarrollo de un Modelo Dinámico de Optimización Estratégica</i>	107
5.5 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA INTEGRADA	109
5.5.1 <i>Integración, Evaluación y Optimización de Estrategias</i>	112
5.5.2 <i>Formulación de Estrategias Integrales</i>	113
CAPÍTULO 6. DISEÑO DE HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN ESTRATÉGICA	117
6.1 INTRODUCCIÓN	121
6.2 FORMULACIÓN DEL MODELO DE EVALUACIÓN	121
6.2.1 <i>Proceso de Evaluación</i>	122
6.2.2 <i>Desarrollo del Módulo de Análisis Coste-Beneficio</i>	123
6.2.3 <i>Desarrollo del Módulo de Análisis Multicriterio</i>	124
6.2.4 <i>Escenarios</i>	130
6.3 PANEL DE INDICADORES.....	133
6.3.1 <i>Evaluación de Indicadores</i>	133
6.3.2 <i>Selección de Indicadores</i>	136
6.3.3 <i>Descripción de Indicadores</i>	139
CAPÍTULO 7. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA: CASO DE ESTUDIO DE LA COMUNIDAD DE MADRID ..	163
7.1 INTRODUCCIÓN	167
7.2 DISEÑO DE ESCENARIOS.....	167
7.2.1 <i>Horizontes Temporales</i>	168
7.2.2 <i>Hipótesis de Evaluación</i>	168
7.2.3 <i>Caracterización General del Área de Estudio</i>	168
7.2.4 <i>Definición de las Variables Exógenas</i>	174
7.2.5 <i>Diseño de la Medidas a Optimizar</i>	177
7.2.6 <i>Aplicación de Medidas en el Modelo</i>	178
7.2.7 <i>Escenarios a Optimizar</i>	181
7.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	182
7.3.1 <i>Escenario Base</i>	182
7.3.2 <i>Evaluación Coste-Beneficio</i>	185
7.3.3 <i>Evaluación Multicriterio</i>	194
7.3.4 <i>Análisis de Sinergias</i>	204
7.3.5 <i>Eficiencia Relativa del Sistema</i>	206
7.3.6 <i>Distribución de Beneficios</i>	209
7.3.7 <i>Análisis de Sensibilidad</i>	212
7.4 RESUMEN Y DISCUSIÓN	217
7.4.1 <i>Simulación del Modelo</i>	219
7.4.2 <i>Limitaciones de la Metodología</i>	219

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	221
8.1 CONCLUSIONES FINALES	225
8.1.1 <i>Contribuciones</i>	225
8.1.2 <i>Resultados y Recomendaciones Generales</i>	226
8.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	230
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA	233

ANEXOS

ANEXO 1. APLICACIÓN DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	A-01
ANEXO 2. DEFINICIÓN DE PESOS EN LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	A-15
ANEXO 3. VARIABLES EXÓGENAS DEL MODELO MARS EN MADRID.....	A-25
ANEXO 4. MARS EN LA COMUNIDAD DE MADRID.....	A-37
ANEXO 5. RESULTADOS ADICIONALES DEL CASO DE ESTUDIO.....	A-89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Reparto Modal en TP Según la Distribución de la Población en la Comunidad de Madrid	31
Figura 3.2	Ciclo de Retroalimentación Usos del Suelo y Transporte	40
Figura 3.3	Ritmo de Cambios en el Sistema Usos del Suelo y Transporte	45
Figura 3.4	Diagrama Agregado de Usos del Suelo y Transporte	47
Figura 3.5	Integrated Transportation and Land Use Package	50
Figura 4.1	Sistema Simplificado de un Sistema de Transporte	62
Figura 4.2	Diagrama Causal Simple con una Variable de Nivel y una Tasa de Flujo	63
Figura 4.3	Representación de un Flujo	65
Figura 4.4	Conexión de un Nivel N a los Flujos de Entrada FE y de Salida FS	65
Figura 4.5	La Variable B es una Función Lineal o Tabla de A	66
Figura 4.6	Generación de Viajes en Periodo Punta – Modelo MARS	67
Figura 4.7	Direcciones Conjugadas con Respecto a Q	73
Figura 4.8	Funcionamiento del Método de Powell	75
Figura 4.9	Representación Esquemática de la Función Objetivo	81
Figura 5.1	Proceso de Optimización	98
Figura 5.2	Estructura Básica de los Submodelos de MARS	105
Figura 5.3	CLD del Modelo de Transporte – Viajes en Coche en MARS	106
Figura 5.4	Configuración General de la Optimización	107
Figura 5.5	La Toma de Decisiones en la Realidad y su Transformación en un Marco Integrado de Evaluación y Optimización	111
Figura 5.6	Estructura del Proceso de Modelización y Optimización y su Integración	112
Figura 6.1	Normalización de Pesos en un MCA	129
Figura 6.2	Cambios en el Excedente del Consumidor	140
Figura 6.3	Cálculo del Beneficio del Usuario	147
Figura 6.4	Excedente del Operador	147
Figura 6.5	Cálculo del Beneficio de los Operadores	149
Figura 6.6	Estimación del Coeficiente de Gini	159
Figura 7.1	La Comunidad de Madrid	169
Figura 7.2	Evolución de la Población en la Comunidad de Madrid	171
Figura 7.3	Evolución del Suelo, Población y Densidad (1992-2006)	171
Figura 7.4	Viajes al Centro y Viajes Internos en la Comunidad de Madrid	172
Figura 7.5	Infraestructura de la Región	173
Figura 7.6	Red Visum Madrid	174
Figura 7.7	Evolución de la Población y del Índice de Motorización	175
Figura 7.8	Evolución de los Puestos de Trabajo por Sector	176
Figura 7.9	Evolución Flota Vehicular	176
Figura 7.10	Zona de Implementación del Peaje y Aparcamientos	180
Figura 7.11	Variación del Coste de Operación de la Oferta de Transporte Público	181
Figura 7.12	Reparto Modal Escenario Base (EO)	183
Figura 7.13	Emisiones Escenario Base (EO)	183
Figura 7.14	Evolución y Reparto Modal de Viajes Motorizados entre Coronas (Año 2034)	184
Figura 7.15	Función Objetivo CBA en el Modelo MARS	186
Figura 7.16	Resultados Escenarios Función Objetivo CBA	188
Figura 7.17	Distribución Modal al Centro (CBA)	190
Figura 7.18	Distribución Modal Entre Coronas (Excepto el Centro, CBA)	191
Figura 7.19	Distancia Media al Centro por Modo (CBA)	191
Figura 7.20	Distancia Media Entre Coronas por Modo (CBA)	192
Figura 7.21	Variación de los Viajes Realizados por Modo y Entorno (CBA)	192
Figura 7.22	Función Objetivo MCA en el Modelo MARS	196
Figura 7.23	Resultados Escenarios Función Objetivo MCA	198
Figura 7.24	Comparación de los Indicadores MCA por Escenario	200
Figura 7.25	Distribución Modal al Centro (MCA)	201
Figura 7.26	Distribución Modal Entre Coronas (Excepto el Centro, MCA)	201
Figura 7.27	Distancia Media al Centro por Modo (MCA)	202
Figura 7.28	Distancia Media Entre Coronas por Modo (MCA)	202
Figura 7.29	Variación de los Viajes Realizados por Modo y Entorno (MCA)	203
Figura 7.30	Combinación de Medidas y Sinergias	206
Figura 7.31	Eficiencia de las Medidas – CBA	208

Figura 7.32 Beneficios Netos por Zona	211
Figura 7.33 Sensibilidad en la Función Objetivo CBA (E1) al Variar el Peaje	213
Figura 7.34 Sensibilidad en la Función Objetivo MCA (E1) al Variar el Peaje	214
Figura 7.35 Sensibilidad Pesos Indicadores Función MCA	215
Figura 7.36 Sensibilidad Función CBA al Valor del Tiempo	216

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Impactos Teóricos de los Usos del Suelo.....	37
Tabla 3.2. Impactos Teóricos del Transporte	38
Tabla 3.3 Integración de Medidas.....	43
Tabla 3.4. Resumen General de los Modelos.....	52
Tabla 5.1. Criterios de Selección de Indicadores	101
Tabla 5.2. Clasificación y Evaluación de Indicadores	103
Tabla 5.3 Características del Modelo MARS	104
Tabla 6.1 Escala de Medidas del Método de Jerarquía Analítica.....	127
Tabla 6.2 Correspondencias de Escalas entre AHP y REMBRANDT.....	128
Tabla 6.3 Propuesta e Evaluación de Indicadores.....	137
Tabla 6.4 Criterios de Evaluación e Indicadores	138
Tabla 6.5 Valores Estimados CO ₂ *	153
Tabla 6.6 Valores Estimados de Accidentes*	156
Tabla 7.1 Características de la Zona de Estudio.....	169
Tabla 7.2 Escenarios Caso Práctico.....	182
Tabla 7.3 Resumen Valores Óptimos - CBA.....	187
Tabla 7.4 Resultados de la Optimización CBA, Respecto al Escenario Base [VAN, M€]	189
Tabla 7.5 Indicadores de Sostenibilidad y sus Pesos	195
Tabla 7.6 Resumen Valores Óptimos - MCA.....	197
Tabla 7.7 Valores Óptimos por Indicador y por Escenario (MCA)	199
Tabla 7.8 Resultados MCA por Escenario.....	200
Tabla 7.9 Combinaciones de Medidas y Posibles Sinergias.....	204
Tabla 7.10 Eficiencia Relativa de Medidas - CBA	207

CAPÍTULO 1.

PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

1.1 EL CONTEXTO

En 2020 según la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), aproximadamente el 80% de los europeos residirá en zonas urbanas. En siete países, la proporción será del 90% o más (EEA, 2006). Esto traerá como consecuencia inevitable un aumento en la demanda de suelo y de movilidad en las ciudades, consumiendo más recursos y generando más contaminación y congestión. Esta tendencia no será sostenible a largo plazo. Para lograr un desarrollo sostenible en el tiempo, el desarrollo urbano debe centrarse en un enfoque verdaderamente equilibrado y coherente. Este enfoque, de manera general, puede ser definido por dos características básicas:

- Tener en cuenta el bienestar de la sociedad actual y futura
- Hacer un uso racional de los recursos naturales

Los problemas de este modelo de desarrollo ya han sido identificados: según la EEA, la mayor preocupación en las ciudades europeas (de más de medio millón de habitantes) son la polución del aire, el ruido y la congestión, donde el incremento del tráfico vehicular es visto como la fuente principal de estos problemas. Autores como Banister (2005), dicen que la planificación del transporte está en crisis y que los grandes retos que las ciudades deben enfrentar son subestimados por los planificadores urbanos.

Desde el punto de vista de la movilidad sostenible, hay dos principios fundamentales que se integran a este enfoque: el primero consiste en definir un viaje como una actividad derivada de la actividad económica y que no es una actividad que la gente esté dispuesta a realizar por sí misma, ya que solo se hace por el posible beneficio que se obtendría en el destino. El segundo principio es que la gente trata de minimizar sus costes generalizados de viaje, a través de una combinación de costes y tiempos. Estos dos principios tienen importantes consecuencias, ya que son lo que se utilizan en la mayor parte de los estudios, incluida esta investigación.

A pesar que los tiempos de viaje se han mantenido más o menos constantes (Hupkes, 1982; Marchetti, 1994; Levinson y Kumar, 1994; Kölbl, 2000; Schafer, 2000), incluso en ciudades dispersas, tanto las distancias como las velocidades de recorrido han aumentado de forma considerable (Duranton, 2006; Kahn, 2006). En estos escenarios, el transporte público y los modos alternativos (bicicleta y caminar) se vuelven menos atractivos, lo que ocasiona que el coche se convierta en el modo preferido de viajar. La dependencia del coche y la creciente descentralización de actividades dentro de las ciudades dificultan que este proceso se revierta, siendo cada vez más difícil lograr un entorno sostenible, creando cada vez más y mayores problemas en lo referente a salud, medio ambiente y desarrollo social, entre otros campos.

Entonces vemos cómo el transporte es considerado como una de las mayores fuentes de insostenibilidad en zonas urbanas (May, Jopson y Matthews, 2003). Alcanzar un transporte urbano sostenible es complejo debido a los muchos factores que intervienen y que están relacionados entre sí a diferentes escalas temporales y espaciales. En muchos lugares se están usando enfoques integrados, en donde se combinan diferentes tipos de medidas de transporte con medidas de usos del suelo, medidas ambientales y en general políticas de tipo social. Aunque muchas de estos instrumentos ya se han estudiado con anterioridad, existe una falta general de entendimiento de los impactos de estos elementos a largo plazo. También existen problemas relacionados con la falta de conocimiento en la forma de diseñar estrategias que combinen de una forma más eficaz aspectos de infraestructura, gestión, regulación y fijación de tarifas (May, Kelly y Jopson, 2008).

En consecuencia, para alcanzar una movilidad sostenible, implementar un conjunto de medidas (estrategias) podría ser significativamente más efectivo que una sola medida. De este punto parte el concepto de integración el cual ha sido interpretado de diversas maneras por varios autores (Hine, 2000; Minken et al., 2003; Geerlings y Dominic, 2003; May, Kelly y Shepherd, 2006; Hull, 2008).

Si las estrategias urbanas no tuvieran un gran impacto a largo plazo, la sostenibilidad, en este caso, no sería un problema. Las acciones que se tomen hoy pueden limitar de una manera importante e incierta el desarrollo de las generaciones futuras, restringiendo su potencial de bienestar.

Al partir de un enfoque integrado, será necesario analizar todo el sistema en su conjunto, por lo cual se requiere disponer de un método consistente que pueda integrar todos los elementos que intervienen en la dinámica urbana y que permita seguir sus indicadores a lo largo del tiempo. De aquí surge la necesidad de una aproximación alternativa, como la **planificación estratégica**, la cual está cobrando una importancia creciente dentro de la planificación del transporte y que además puede ser utilizada en todos los niveles de la administración pública: local, regional y nacional (Kölbl, Niegl y Knoflacher, 2008).

Este enfoque alternativo requiere ideas claras e innovadoras sobre el futuro de la ciudad, en términos realistas (lo que existe) y en lo que se quiere hacer. Aquí, la planificación del transporte juega un papel clave.

Por ello, esta investigación doctoral titulada *Optimización Dinámica de Estrategias de Movilidad Sostenible en Áreas Metropolitanas* pretende desarrollar un modelo integrado de evaluación y optimización para analizar estratégicamente una serie de objetivos que contribuyan a la sostenibilidad de la movilidad urbana, entre los que se encuentran la protección del medio ambiente, la eficiencia económica, la equidad e integración social y la provisión de infraestructuras de transporte.

Este proceso de optimización utiliza como herramienta de apoyo un modelo dinámico, estratégico de usos del suelo y sistemas de transporte, es decir, un modelo LUTI (*Land Use Transport Interaction*). El modelo escogido para desarrollar la presente investigación es conocido como MARS (*Metropolitan Activity Relocation Simulator*), desarrollado por el profesor Paul Pfaffenbichler en su tesis doctoral realizada en la Universidad Politécnica de Viena (Pfaffenbichler, 2003).

La consideración de los diferentes aspectos de la movilidad sostenible y su interrelación serán el punto de partida para el desarrollo de una herramienta que sirva de ayuda a los planificadores en el proceso de toma de decisiones a largo plazo. Esta herramienta permite evaluar la efectividad de estrategias de movilidad en ámbito urbano, comparar sus posibles impactos en el largo plazo y permitir su combinación óptima con el objetivo de conseguir un transporte más eficiente, accesible y limpio, es decir, más sostenible. También ofrece una alternativa para investigar la complejidad de las ciudades y para reforzar los conocimientos de la interacción entre los usos del suelo y el transporte.

El punto de partida será disponer de una lista de los problemas de la ciudad (escenario de referencia), ya que con esta información inicial será más fácil identificar las posibles soluciones. De esta forma se puede hacer una aportación directa al desarrollo de estrategias alternativas ya sea para los problemas actuales, o para los que se podrían presentar en el futuro.

También se debe tener en cuenta que muchas políticas pueden tener efectos colaterales inesperados; por un lado, bajo cierta combinación, algunas pueden dar peores resultados que otras, o por otro lado, reforzarlos. También algunas medidas pueden ser mejores que otras según el ámbito de aplicación. Por lo tanto, la definición de políticas encaminadas a la

sostenibilidad urbana no es una tarea fácil, ni tiene un proceso único: los efectos causados deben ser medidos de una manera fácil, para que se puedan comparar resultados. Para poder desarrollar este proceso, se debe contar con una metodología coherente, clara y precisa.

El motivo principal de integrar los procesos de optimización y evaluación es que las grandes inversiones en transporte, entre otros elementos, implican riesgos importantes para la sociedad debido a sus altos costes o larga vida. Es por esto que esta herramienta cobra una gran importancia al evaluar las estrategias y mostrar los posibles escenarios tendenciales, prediciendo los impactos futuros de una estrategia o proyecto.

1.2 OBJETIVOS Y APOORTE CIENTÍFICO

Es aceptado dentro de la comunidad científica que la planificación debe hacerse con un enfoque integrado, pero la integración puede hacerse de diversas formas. Esta investigación se ha centrado en la **integración estratégica**. La evaluación de los efectos combinados de estrategias de transporte se había abordado desde perspectivas estáticas, lo que hace que no se tengan en cuenta efectos a largo plazo resultantes de la interacción dinámica del transporte y el territorio. Lo novedoso de esta investigación, es que la optimización estratégica de medidas se hace de una forma dinámica, con valores que cambian con el tiempo, permitiendo evaluar el desempeño del conjunto de medidas y sus sinergias a medio y largo plazo.

La integración a nivel estratégico tiene un gran potencial de mejorar la efectividad de las medidas, reforzando sus resultados mutuamente y, de este modo, superar mejor las barreras. Además, los objetivos se pueden alcanzar más eficazmente si se emplean conjuntos de instrumentos que intensifiquen los efectos de unos y otros sobre la demanda. También es posible reducir los impactos negativos que, sobre ciertos grupos de usuarios, producirían algunas medidas. Por todas estas razones, un conjunto de medidas puede resultar más efectivo que la aplicación de una medida de forma aislada.

La integración estratégica a través de un sistema dinámico permitirá obtener trayectorias para las variables incluidas en el modelo, mediante la aplicación de técnicas de integración numérica. Sin embargo, estas trayectorias nunca se interpretan como predicciones, sino como **tendencias**. El objetivo de un sistema representado mediante modelos dinámicos es, como ocurre en todas las metodologías de los llamados sistemas 'blandos', llegar a comprender cómo la estructura del sistema es responsable de su comportamiento. Esta comprensión normalmente debe generar un marco favorable para la determinación de las acciones que puedan mejorar el funcionamiento del sistema o resolver los problemas observados.

Las principales contribuciones científico-técnicas de esta investigación consistirán en el desarrollo de una herramienta de evaluación estratégica de medidas de transporte, mediante la optimización de una función multiobjetivo enfocada hacia la movilidad sostenible. En definitiva, la aportación de esta investigación doctoral consiste en:

- El uso de un **modelo de optimización** multiobjetivo, más adecuado que los métodos tradicionalmente utilizados, no solamente por la determinación del óptimo de funciones complejas, sino también para resolver problemas de diseño y operativos más generales.
- Desarrollar un **algoritmo de resolución** basado en el método de Powell modificado, que permite obtener soluciones del problema, a pesar de la complejidad y peculiaridad de la función objetivo y de las variables de decisión.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta investigación se ha dividido en tres bloques principales, compuestos por varios capítulos. El primer bloque se centra en describir el estado del arte actual de la movilidad sostenible y su implicación dentro de un sistema dinámico de transporte y usos del suelo (Capítulos 1, 2 y 3). El segundo bloque se centra en la optimización y modelización de estrategias de movilidad sostenible (Capítulos 4, 5 y 6). Finalmente, el tercer bloque se refiere a la prueba y puesta en marcha de la metodología desarrollada, así como a las conclusiones de la investigación (Capítulos 7 y 8).

En el Capítulo 2 se desarrolla el concepto de movilidad sostenible y su vinculación con el transporte y la movilidad. En el Capítulo 3, se habla acerca de la relación dinámica entre el sistema de transporte y el de usos del suelo. También se describen las bases de una modelización integral de estos dos sistemas.

En el Capítulo 4, se discute el uso de la optimización como una herramienta para el diseño de políticas sostenibles a largo plazo, dentro de un contexto de sistemas dinámicos; y su integración con el modelo de evaluación. En el Capítulo 5, se desarrolla la metodología propuesta, se plantean los problemas existentes, las soluciones previstas, una breve descripción del modelo de evaluación elegido y su interacción con el modelo de optimización. Esto se complementa con el Capítulo 6, donde desarrollan dos módulos de evaluación diferentes: un análisis coste-beneficio y uno multicriterio.

En el Capítulo 7, por medio de un caso práctico de aplicación, se prueba la metodología, se valida el proceso de optimización y se analizan sus resultados, según varios escenarios de planificación. En el Capítulo 8 se discuten las principales conclusiones y futuras líneas de investigación.

Adicionalmente, se han dispuesto varios anexos, donde se muestra un poco más en detalle el funcionamiento del algoritmo de optimización, el proceso de cálculo de pesos de las variables involucradas en el análisis multicriterio, los datos de entrada requeridos por el modelo y su descripción detallada. También se proporciona una descripción del entorno del caso de estudio y los resultados adicionales y complementarios al Capítulo 7.

CAPÍTULO 2.

LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

TABLA DE CONTENIDO

2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 LA SOSTENIBILIDAD	12
2.2.1 SOSTENIBILIDAD SOCIAL.....	13
2.2.2 SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA (EFICIENCIA DEL SISTEMA).....	14
2.2.3 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.....	14
2.3 PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE SOSTENIBLES	15
2.3.1 LA PLANIFICACIÓN SOSTENIBLE EN UN SISTEMA DE USOS DEL SUELO Y TRANSPORTE.....	16
2.3.2 LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA.....	17
2.3.3 LOS ESCENARIOS	18
2.3.4 INDICADORES.....	19
<i>Creación</i>	19
<i>Evaluación</i>	20
<i>Ponderación</i>	20
2.4 ESTRATEGIAS SOSTENIBLES DE TRANSPORTE URBANO	21
2.4.1 MEDIDAS DE INFRAESTRUCTURAS	22
2.4.2 MEDIDAS DE GESTIÓN DE LA DEMANDA	23
2.4.3 MEDIDAS DE PRICING	23
2.4.4 MEDIDAS ESPACIALES.....	24
2.4.5 MEDIDAS DE INFORMACIÓN	25
2.4.6 OTRAS MEDIDAS: INSTRUMENTOS OPERATIVOS.....	25

2.1 INTRODUCCIÓN

En el año 2005, la Revista *Transportation Research Part A* (39), dedicó dos de sus números (2 y 3) a la 'utilidad positiva de viajar', en donde su editorial habla que al suponer el viaje como una demanda derivada, se puede estar simplificando mucho la realidad y que si ésta se lleva demasiado lejos, pueden presentarse malentendidos (Mokhtarian, 2005). Por otro lado, el aumento constante de la accesibilidad (dada por la expansión de las infraestructuras de transporte), también tiene efectos negativos sobre los aspectos sociales, económicos y ambientales de una sociedad (Loo y Chow, 2006). En zonas urbanas, donde la necesidad de viajar es asociada con altas concentraciones de personas y actividades, estos impactos son mayores. En consecuencia, la sostenibilidad puede ser un concepto amplio y general, por lo que es necesario precisar primero el concepto de desarrollo sostenible, con el fin de definir el contexto de la presente investigación.

En este capítulo se pretenden describir los aspectos relevantes de un sistema del transporte urbano, desde la óptica de la sostenibilidad, que afectan el proceso de toma de decisiones, para poder definir una metodología de diseño e implementación de políticas de transporte. Es decir, se pretende describir el estado del arte del transporte urbano sostenible, al cual se pretende llegar a través de la implementación de una serie de estrategias conjuntas de usos del suelo y transporte, cuyos rangos de valores sean los mejores y sus niveles de sinergias, los más altos posibles.

En los países desarrollados, la demanda de movilidad en general crece de forma continua, al igual que el ingreso medio y el nivel de motorización. En cuanto al reparto modal, el transporte público va perdiendo la batalla frente el transporte privado. Esta distribución modal, en términos de reparto público-privado ofrece una clara pauta de variación espacial, según la cual la importancia del transporte público crece claramente en las zonas centrales y la del vehículo privado en la periferia, fomentando estructuras urbanas cada vez más dispersas.

Estas ciudades en expansión generalmente mantienen las longitudes de las distancias medias de viaje por encima de los umbrales máximos necesarios para que el uso de la bicicleta o el caminar puedan alcanzar todo su potencial. Es por esto que la planificación del transporte es un tema que necesita de la toma de decisiones eficaces para remediar la situación actual.

Con el fin de alcanzar un desarrollo sostenible del transporte, la Unión Europea (UE) sigue con la idea central de una política de transporte integrada (ver Capítulo 3). A pesar de que esta idea es ampliamente aceptada, la UE recientemente tuvo que admitir que desafortunadamente el sector transporte va en la dirección contraria (Schöller-Schwedes, 2010). Y peor aún, sigue en la dirección contraria, porque la idea de cooperación ha sido sustituida por la competencia económica.

De esta manera, en este capítulo se pretende describir el concepto de sostenibilidad en general y después ubicarlo dentro del sector transporte (§2.2). En la sección 2.3 se describe el estado del arte de los sistemas de transporte sostenibles, así como la forma de evaluarlos por medio de escenarios e indicadores. Finalmente, en la sección 2.4, se hace una breve descripción de las características generales de las estrategias encaminadas al desarrollo urbano sostenible, así como los tipos de medidas existentes que las conforman.

2.2 LA SOSTENIBILIDAD

La idea de un desarrollo sostenible ha estado presente desde la década de los años 70. Después de más de 30 años de discusiones e investigaciones, aún no hay una definición aceptada universalmente, en parte debido a la corta historia de este concepto y en parte, a la continua ampliación del ámbito de desarrollo sostenible (Loo y Chow, 2006). Sin embargo, siguiendo a Carey (2004), podemos sintetizar algunas definiciones de sostenibilidad, con referencia particular al sector transporte.

El objetivo de una movilidad sostenible es garantizar que las decisiones en cuestiones ambientales, sociales y económicas tengan en cuenta que afectan la actividad del transporte. Al tomar una decisión relacionada con el transporte, se deben considerar estos tres elementos con el fin de facilitar una evaluación global de sus impactos (Loo y Chow, 2006). La literatura existente en referencia a la movilidad sostenible es bastante extensa. Varias investigaciones anteriores abordan el tema acerca del significado de la movilidad sostenible como por ejemplo DeCicco y Delucchi (1997) y Richardson (1997), entre otros.

Las consecuencias del uso de los sistemas de transporte son tanto positivas como negativas y deben tenerse en cuenta en el momento de evaluar su sostenibilidad. Entre estas consecuencias se encuentran la seguridad, el consumo de suelo, la congestión, el consumo de combustible, las emisiones de vehículos y la accesibilidad.

Tal vez el concepto de sostenibilidad más utilizado surge a partir de la definición hecha por la Comisión Brundtland (United Nations, 1987), que dice que la movilidad sostenible puede definirse como la capacidad para satisfacer las necesidades actuales de transporte sin comprometer las del futuro.

Otro concepto de la sostenibilidad es el que se hizo en Europa, tras una encuesta realizada sobre el estado del medio ambiente (Wieringa, 1995). Los aspectos ecológicos de la sostenibilidad urbana se pueden expresar en términos de “satisfacer las necesidades de los ciudadanos sin imponer demandas insostenibles sobre los sistemas naturales tanto locales como globales”, lo que significa que el área total que se requiere para sostener la ciudad europea moderna es mucho más grande que la ciudad en sí misma, y que los impactos de su funcionamiento no quedan confinados dentro de sus fronteras (Richardson, 2005). Así que independientemente de la definición específica de movilidad sostenible y combinando los dos conceptos anteriores, es necesario hacer referencia a la ‘triple línea de acción’: sostenibilidad social, económica y ambiental (Schipper, 2001).

Dentro de esta triple línea de acción, por definición una ciudad no puede ser sostenible a menos que todos sus sistemas, o al menos los más importantes, sean sostenibles (Lautso et al., 2004). En este caso en particular, el concepto de sostenibilidad urbana se refiere a los componentes de movilidad y usos del suelo, vistos como elementos que interactúan entre sí a lo largo del tiempo. Partiendo de este punto es factible tratar de encontrar herramientas que permitan evaluar la sostenibilidad urbana. Los impactos que la aplicación de medidas sostenibles tienen sobre una ciudad, pueden ser medidos por medio de un conjunto de indicadores, e incluso se puede hacer una comparación entre diferentes políticas, con la ayuda de dichos indicadores.

Sin embargo, por otro lado hay una clara evidencia que los sistemas de transporte urbano de las ciudades europeas son insostenibles en lo que se refiere a sus crecientes niveles de contaminación, consumo de combustible, congestión, número de accidentes, efectos negativos sobre la economía y el creciente desequilibrio entre modos (Lautso et al., 2004), especialmente la cada vez mayor dependencia del automóvil.

Típicamente el nivel de sostenibilidad se ha relacionado con los aspectos ambientales: emisiones de contaminantes liberadas por los vehículos, por el consumo energético en el sector transporte o por los niveles de ruido. Otros aspectos son más difíciles de medir, como la distribución de los ingresos.

2.2.1 Sostenibilidad Social

Las políticas sociales en el transporte tradicionalmente se han centrado en cuestiones de seguridad y acceso a discapacitados, así como el acceso a los puestos de trabajo, por lo menos en Estados Unidos (Stanley y Vella-Brodrick, 2009). La introducción del concepto de inclusión social ha ampliado el debate a elementos relacionados con el acceso a las principales necesidades sociales. Cuestiones relacionadas con el concepto de equidad (Sen, 1987), no han tenido un impacto importante en el sector transporte. Y aunque este concepto que ha estado de moda en los últimos años, parece ser que las políticas de transporte no han hecho mucho por reducir la exclusión social (Preston, 2009).

En este caso, la inclusión social o la equidad, se ha relacionado con la distribución de los efectos (costes y beneficios) de las políticas de transporte y al grado en que se considera que dicha distribución es apropiada (Litman, 2007). Un sistema de transporte equitativo es uno en donde sus costes son asumidos por quienes se benefician y que no impide mejoras en el transporte a ciertos grupos demográficos (Ahmed y Huapu Lu, 2008). La equidad debe tener en cuenta que cualquier operador o usuario no debe pagar ni más ni menos que los demás integrantes del sistema (participaciones justas en igualdad de condiciones). Los efectos generados por las inequidades, deben ser contrarrestados en la medida de lo posible y los recursos destinados al desarrollo de infraestructura de vivienda y transporte, deben ser usados con precaución y eficiencia, ya que es dinero de los contribuyentes. Según Litman (2007), la planificación del transporte tiene un impacto importante sobre la equidad en:

- La calidad del transporte disponible, ya que afecta las oportunidades de las personas y la calidad de vida.
- Las infraestructuras de transporte, las actividades y los servicios imponen muchos costes indirectos y externos, como las demoras debido a la congestión, el riesgo de accidentes debido a otros usuarios, la financiación de infraestructuras, la contaminación y el uso inadecuado del suelo.
- Los gastos en transporte representan una parte importante del gasto de los hogares, empresas y gobiernos.
- Las decisiones en la planificación del transporte afectan la localización y el desarrollo de una zona, lo que a su vez impacta en la accesibilidad, el precio del suelo y los beneficios.
- Una parte importante (y valiosa) del suelo urbano se dedica a las infraestructuras del transporte. Este suelo está exento de pagos de alquiler e impuestos, lo que representa un subsidio adicional de la actividad del transporte.
- Las inversiones en transporte se utilizan frecuentemente para estimular el desarrollo económico. La ubicación y la naturaleza de estas inversiones, tiene un impacto distributivo.

De esta manera, la equidad en el transporte es un tema muy importante a tratar, ya que generalmente este tema es descuidado por los planificadores e investigadores (Ahmed y Huapu Lu, 2008); aunque esta tendencia está cambiando y su importancia está siendo reconocida de acuerdo con los miembros del comité ejecutivo del *Transportation Research*

Board, para quienes “la equidad será uno de los temas principales de la política de transporte para los próximos diez años” (Sanchez et al., 2003).

Pero por importantes que sean las políticas diseñadas para mejorar la equidad, como destinar viviendas asequibles para todos, mínimos niveles de consumo, de escolaridad, etc., combatir cualquier forma de exclusión social se considera fuera del alcance de esta investigación debido a su gran complejidad y dependencia de regulaciones públicas.

2.2.2 Sostenibilidad Económica (Eficiencia del Sistema)

La discusión acerca de la relación entre el transporte y la economía nace en el momento en que se toma en cuenta el significado exacto del transporte dentro del desarrollo económico. La dificultad de establecer una relación clara entre estos dos elementos, es que influyen en ella múltiples factores. Estos factores dentro de una zona urbana, donde la ciudad es parte de un sistema mucho más grande (un sistema de producción y comercio), son mucho más difíciles de definir y estimar.

En eficiencia económica el principal concepto es ofertar los servicios de transporte con el menor coste posible para el usuario y la sociedad. Así la economía, vista en este caso como la eficiencia del sistema de transporte, es uno de los factores que influye sobre el tamaño y tipo de transporte. Algunos modelos de transporte reflejan la influencia de la economía mediante la inclusión de datos regionales, como la renta y/o el empleo.

Los modelos de usos del suelo y transporte que especifican la interacción entre los servicios de transporte y la distribución espacial de actividades (Wilson, 1998; van der Hoorn et al., 2002), separan sus estudios en varias regiones, pero en general, la economía y otros datos de mayor escala espacial, son variables exógenas (Pfaffenbichler, 2003).

En los modelos de transporte y usos del suelo y en los basados en actividades, la economía, tomada de forma exógena, influye sobre sí misma. En los modelos de producción, de localización y en general en los de equilibrio, es el transporte quien influye sobre la economía (van de Vooren, 2004).

La economía tratada como una variable exógena, no se adentra en los aspectos de la eficiencia en el mercado de la vivienda, del transporte, del laboral, entre otros. En este caso, la sostenibilidad económica consiste en el máximo beneficio que los habitantes de una ciudad pueden obtener en estos mercados y que pueda ser medido a un nivel agregado como una función de bienestar; o también a nivel de cada mercado, pero esta vez medida como el excedente del consumidor y del productor (operador). Todo esto teniendo en cuenta los costes de funcionamiento y de provisión, es decir, para que haya beneficio, se debe contar con un sistema de transporte eficiente.

Si al utilizar la economía de forma exógena, se conduce a un desarrollo sostenible, es una pregunta cuyo alcance está mucho más allá del objetivo de esta investigación. Para este caso, es necesario realizar una serie de supuestos relacionados con el efecto que estrategias conjuntas del transporte-territorio pueden tener sobre el crecimiento económico de una ciudad. En este sentido, las mejoras de accesibilidad, de reducción de la congestión (un sistema de transporte eficiente) o de calidad ambiental pueden conducir a un incremento de la actividad económica y posibilitar un desarrollo económico sostenido (Bertolini et al., 2005).

2.2.3 Sostenibilidad Ambiental

El uso creciente de combustibles derivados del petróleo combinado con las actuales pautas de movilidad, está agravando la situación ambiental a nivel mundial. Esta situación hace

referencia a la lluvia ácida, el calentamiento global, la pérdida de ozono y a la contaminación atmosférica y acústica, donde el sector del transporte tiene una alta cuota de responsabilidad en el tema (Black, 1996). Esta situación puede revertirse, o por lo menos desacelerar su crecimiento teniendo en cuenta los siguientes objetivos (May et al., 2001a):

- Reducción del uso de recursos no renovables y aumento del uso de energías limpias.
- Reducción del consumo energético en el transporte y en las viviendas, para así contribuir a la disminución de emisiones de CO₂.
- Reducir las emisiones de contaminantes como son los NO_x y el SO₂ (óxidos de nitrógeno y de azufre, respectivamente).
- Reducir los problemas de sanidad causados por el material particulado (PM₁₀).
- Proteger los lugares de patrimonio cultural, hábitats naturales, zonas verdes, tierras agrícolas y zonas recreativas.
- Detener o retrasar la dispersión urbana y la ocupación de suelo para usos de vivienda, comercio y transporte.
- Reducir los efectos de fragmentación por construcción de infraestructuras.
- Reducir las actividades con consecuencias medioambientales en áreas sensibles.
- Reducir la cantidad de población expuesta al ruido y contaminantes.

En resumen, el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, por una parte, se centra en preservar la capacidad de recuperación y la dinámica de los sistemas naturales para adaptarse al cambio. Estos sistemas pueden definirse de tal manera que se pueda incluir toda la biósfera, incluyendo las ciudades. Un punto muy importante es mantener la viabilidad de los sistemas críticos del ecosistema mundial y proteger la biodiversidad (Perrings, 1991). Por otra parte, está la conservación de la salud humana y las condiciones nocivas derivadas de la excesiva exposición al tráfico automotor.

2.3 PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE SOSTENIBLES

La planificación de un sistema de transporte sostenible es un proceso complicado debido a que implica un alto grado de incertidumbre. Según Shiftan et al., (2003) esto se debe a:

- Un gran número de alternativas de medidas y estrategias posibles.
- Las formas de implementación.
- La respuesta de los viajeros a cada una de estas estrategias y medidas.

Además de estos puntos, también depende de cómo los planificadores y políticos definan el concepto de desarrollo sostenible.

La planificación del transporte generalmente utiliza un enfoque de coste/beneficio o un análisis multicriterio (Shiftan et al., 2003). En ambos casos, para evaluar los costes y beneficios de cada escenario, en la planificación del transporte por lo general se aplican estadísticas y modelos de comportamiento para analizar el desempeño del sistema de transporte en estos escenarios. En este sentido, Jonsson (2008) hace un análisis de sostenibilidad en un sistema de transporte y usos del suelo en la ciudad de Estocolmo, donde

se analizan las implicaciones de la equidad intergeneracional por medio de modelos. Estas herramientas, que inicialmente se desarrollaron para analizar los efectos de nuevas infraestructuras o de nuevos servicios de transporte público, se han ampliado para evaluar otros impactos de los proyectos de transporte.

Otros autores han sugerido diferentes enfoques referentes a la planificación del desarrollo sostenible, aunque no específicamente en el área del transporte. Por ejemplo, Rotmans et al., (2000) sugieren un marco de evaluación integrado de planificación urbana que combine un sistema de información y un modelo dinámico, que permita que las medidas puedan implementarse de forma operativa o estratégica. En el libro *Sustaining Cities* (Leitmann, 1999), se revisan diferentes métodos de evaluación utilizados en la planificación urbana, como el análisis multicriterio, la evaluación de riesgos y la valoración contingente. Por otra parte, Kelly (1998) habla de un sistema de identificación de los principales vínculos entre los indicadores de sostenibilidad como una herramienta que ayude a una mejor aplicación de la planificación sostenible y finalmente, Minns (1994) discute el uso de herramientas de modelización matemática para las decisiones de inversión en I+D dentro de un desarrollo sostenible del clima.

Más recientemente, ya dentro del área de transporte, Richardson (2005) propone un método que ilustra la interacción de los factores que influyen sobre los indicadores de sostenibilidad de transporte de carga y de pasajeros, identificando oportunidades para la implementación de medidas, mostrando las posibles consecuencias no deseadas de dicha intervención. Rodrigues da Silva et al., (2008) proponen un método para identificar los factores claves de la sostenibilidad urbana dentro de un contexto particular, basándose en un análisis multicriterio desde un enfoque constructivista, concluyendo que este método es capaz de capturar las diferentes opiniones y planteamientos debatidos en la formulación del concepto de la movilidad sostenible.

Según la literatura revisada, la mejor forma de evaluación de la sostenibilidad de un sistema es utilizar los escenarios como marco de planificación. Este enfoque permite cuantificar las variables y su importancia relativa, permite utilizar métodos multicriterio y de coste/beneficio y permite internalizar las incertidumbres.

Para evaluar la sostenibilidad de un sistema de transporte, es necesario partir de un estudio previo de los datos existentes y de la información disponible. Esta información debe ser suficientemente buena como para permitir un análisis en múltiples niveles (tipo de viaje, modo, grupos de población, zonificación del territorio, etc.) y que además permita un análisis comparativo (Nicolas et al., 2003). En segundo lugar es necesario disponer de un conjunto adecuado y eficaz de indicadores.

2.3.1 La Planificación Sostenible en un Sistema de Usos del Suelo y Transporte

Desde 1993 el Departamento de Transporte del Reino Unido recomendó a las autoridades locales de transporte considerar un paquete de soluciones que se complementen unas a otras en la búsqueda de objetivos concretos, con el fin de mejorar la planificación de sus ciudades. En las grandes zonas urbanas, estas posibles soluciones podían implicar la construcción de infraestructuras, restringir el uso del coche (por prohibiciones directas o por tasas) y la promoción de modos alternativos (Fowkes et al., 1998).

Partiendo de estas recomendaciones, en el enfoque de una planificación basada en la sostenibilidad, se debe abarcar desde la definición de los objetivos a monitorizar, hasta la evaluación de los resultados de las estrategias implementadas. Determinar una estructura lógica, que identifique los pasos clave del proceso de planificación, es una parte esencial del enfoque planificador (Jonsson, 2008).

De esta manera, un análisis de la sostenibilidad en un sistema de usos del suelo y transporte, se basa en la idea de la utilización de indicadores con el fin de medir un conjunto de objetivos. Estos objetivos se deben elegir de tal manera que cubran todos los aspectos asociados al desarrollo sostenible. Pero, ¿cuál sería el método más adecuado para analizar los componentes del sistema de transporte con el fin de encontrar caminos viables para un desarrollo sostenible? Un punto de partida sería prever la reducción de emisiones en los nuevos servicios de transporte, basados en la demanda del mercado y en las condiciones actuales, como lo describen Robèrt y Jonsson (2006).

Desde este enfoque inicial, y bajo el contexto de los tres principios de la sostenibilidad (medioambiente, económico y social), se puede concluir que los siguientes objetivos son necesarios para hacer una ciudad sostenible (May et al., 2001a):

- Minimizar el consumo de espacio y recursos naturales
- Racionalización y eficiencia en la gestión de los flujos urbanos
- Protección de la salud de los ciudadanos
- Asegurar la igualdad de acceso a recursos y servicios
- Mantener la diversidad cultural y social

De forma complementaria, en abril de 2001, los Ministros de Transportes de la Unión Europea definieron que un sistema de transporte sostenible es aquel que:

- Permite conseguir el acceso básico y el desarrollo de las necesidades de los individuos, empresas y sociedades, de manera segura y consistente con la salud del ecosistema y de las personas, y promete la equidad en y entre las generaciones sucesivas.
- Es asequible, opera justa y eficientemente, ofrece la posibilidad de elegir modo de transporte y contribuye a la competitividad económica, así como a un desarrollo regional equilibrado.
- Limita las emisiones y residuos dentro de la capacidad del planeta para absorberlos, emplea fuentes de energía renovables por debajo de su nivel de generación y utiliza asimismo fuentes no renovables por debajo del nivel de desarrollo de los sustitutos renovables, al tiempo que minimiza el impacto sobre el suelo y la generación de ruido.

Al plantear una estrategia, es común que no todos los objetivos se alcancen, ya que muchos pueden ser incompatibles entre ellos; por ejemplo, suele ser difícil mejorar la accesibilidad sin afectar al medio ambiente (May et al., 2000). Para poder resolver más fácilmente estos conflictos, es útil estudiar cómo la estrategia afecta a los diferentes objetivos. Según el proyecto PROSPECTS (Minken et al., 2003) la elección de los objetivos prioritarios es una cuestión política, responsabilidad de quien toma las decisiones. Aunque conviene no olvidar el punto de vista de otros afectados como parte de un proceso eficaz de participación pública.

2.3.2 La Planificación Estratégica

La planificación convencional del transporte se basaba en el enfoque *forecasting* (prever para proveer), que implica que la oferta simplemente debe responder a las tendencias de la demanda. Este es un enfoque en el que se le da una prioridad a los criterios económicos, un poco a los sociales, pero los ambientales solo aparecen en un segundo plano (en forma de estudios de impacto ambiental para mitigar los efectos de las “necesarias” actuaciones). Pero ahora, dentro del marco de movilidad sostenible, en los últimos años se ha pasado al

enfoque *backcasting*, en el que los criterios ambientales y sociales aparecen en el mismo plano que los económicos. No se trata por tanto de seguir a la demanda, sino de alcanzar un escenario deseable y posible de movilidad sostenible, reorientando la demanda mediante políticas proactivas. Entre esas políticas figuran como un nuevo elemento las territoriales, habida cuenta de la estrecha relación entre los usos del suelo y la movilidad.

Estas estrategias para que sean exitosas, deben contener incentivos y restricciones. Por ejemplo, mejorar las instalaciones y servicios para los usuarios de transporte público y modos de transporte alternativos, mientras se hace un control de la demanda de coches por medio de políticas de *pricing* y se reduce la capacidad en algunos tramos de vías por medio de la implementación de carriles-bus o carriles de alta ocupación, con el fin de inducir a cambios modales.

Los modelos de transporte juegan un papel importante en la simulación y planificación de las políticas escogidas dentro de un plan de acción, con el fin de evaluar el probable nivel de éxito de las estrategias diseñadas. Generalmente un modelo tradicional de cuatro etapas puede ser utilizado en estos casos, sin embargo, como el grado de complejidad de estos modelos ha aumentado considerablemente en los últimos años, necesitan a su vez información de gran calidad y cantidad para su calibración y validación, lo que es muy costoso y además, no siempre está disponible.

Y como dentro de un enfoque sostenible, el análisis del comportamiento macroscópico es mucho más importante que el que se adentra en niveles de detalle locales y además, los problemas de transporte no se deben a comportamientos individuales, sino a comportamientos colectivos, surgen los **modelos estratégicos**.

Estos modelos tienen grandes ventajas sobre los modelos tradicionales si lo que se busca es alcanzar un desarrollo sostenible, ya que éste es un objetivo a largo plazo, estratégico y en la evaluación de los efectos a largo plazo de diferentes estrategias, la precisión milimétrica no es la cuestión más importante.

Entonces, con un menor nivel de detalle y con un nivel de información básica y aceptable, se pueden obtener resultados válidos. Estas herramientas se utilizan para definir el eje principal de la planificación, sin tomar en cuenta los detalles locales, ya que como se ha mencionado, abordar este aspecto muchas veces es demasiado costoso.

2.3.3 Los Escenarios

De acuerdo con la definición de escenario del libro "*The year 2000: a framework for speculation on the next thirty-three years*" (Kahn y Wiener, 1967) y posteriormente definido también por Pearman (1998); un escenario es una secuencia hipotética de eventos lógicos y plausibles (pero no necesariamente probables), contruidos con el fin de centrar la atención en procesos causales y puntos de decisión. La planificación basada en escenarios se incluye dentro de métodos de previsión de conjeturas más comúnmente asociados con la investigación futura (Pearman, 1988). Ejemplos en la literatura del uso de escenarios en la planificación de transporte pueden verse en Huang et al., (1998), May et al., (2000), May et al., (2001b), van Wee, (2002), Zhang et al., (2006), Kölbl et al., (2008), Glachant y Bureau, (2008), Jonsson, (2008) y Eliasson, (2009), entre otros. También pueden verse en algunos proyectos europeos como PROSPECTS (Minken et al., 2003), PROPOLIS (Lautso et al., 2004) y STEPS (Fiorello et al., 2006).

Los escenarios pueden ser de carácter descriptivo o normativo según el libro "*Impact assessment and evaluation in transportation planning*" (Nijkamp y Blaas, 1994). Pueden formar parte de una predicción o de una prospección inversa (*backcasting*), según la orientación del proceso.

Los expertos pueden considerarse como una fuente legítima para el diseño de posibles escenarios futuros, ya que poseen un mejor conocimiento de los avances científicos, políticos, sociales y económicos en sus campos de interés (Shiftan et al., 2003).

2.3.4 Indicadores

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2003), un indicador es un parámetro que proporciona información o describe el estado de un fenómeno, un ambiente o una zona con una significancia más allá de la asociada al valor propio de dicho parámetro. Los indicadores son una creación intelectual con una precisión variable en función del contexto en el que se formulan y con distintos niveles de complejidad, con los que se pretende una visión integral y holística (González, de Lázaro y Torres, 2005). Un indicador debe ser claro y comprensible y por supuesto, debe ser útil para evaluar las estrategias implementadas.

Para diseñar un método de evaluación de tal forma que se puedan encontrar sinergias entre una o varias estrategias y que a su vez las expliquen, es necesario un análisis de los factores relacionados con la sostenibilidad de un sistema de transporte, para lo cual sería necesario (Nicolas et al., 2003):

- Un sistema medible de indicadores que representen el desarrollo sostenible de la movilidad urbana
- Una fuente de datos con información suficiente para poder llevar a cabo el análisis

Para seleccionar los indicadores adecuados que evaluarían cada estrategia, es necesario conocer primero los aspectos relevantes de la zona de estudio teniendo en cuenta sus características particulares. Cada uno de los indicadores seleccionados deberá responder a los problemas que se quieren resolver dentro de la ciudad.

Aparte de los objetivos, es conveniente fijar lo que podríamos denominar ‘metas’; es decir, concreción de los objetivos como apoyo en el proceso de evaluación del objetivo principal. Si el objetivo general es reducir el nivel del ruido del tráfico, la meta podría ser esa reducción a un nivel determinado. Esto vendría a ser, dentro de las definiciones que previamente hemos dado, ‘metas de resultado’ por lo que, por continuar con las similitudes, también cabría hablar de ‘metas de entrada’ y ‘metas de proceso’, en términos de indicadores.

En el proyecto PROPOLIS (Lautso et al., 2004) se dice que la mejor manera de construir un índice que pueda medir la sostenibilidad, es por medio de estos tres pasos:

- Creación del indicador
- Evaluarlo (método de cálculo)
- Ponderarlo (estandarizar el indicador para que sea comparable)

Creación

Un indicador debe abarcar las siguientes condiciones esenciales: debe ser coherente con respecto a la información base y, a su vez, debe ser simple en su manera de representación, de tal manera que sea de fácil interpretación; aunque la falta de información puede llegar a ser un factor importante en la creación y construcción de indicadores.

Dentro del contexto de esta investigación, los problemas de una ciudad se pueden agrupar fácilmente en términos de costes, presión ambiental y equidad social. Es necesario contar

con las características principales de la zona de estudio, como la infraestructura, el desarrollo económico y los sistemas de transporte. Algunos elementos como la velocidad, la flexibilidad, la posibilidad de conectar zonas aisladas, deben sopesarse frente a sus desventajas inherentes cuantificables. Esos elementos pueden considerarse por medio del volumen de viajes, las actividades, la distribución modal, las distancias recorridas y los tiempos de viaje (Nicolas et al., 2003).

Evaluación

Ya que los objetivos pueden ser conceptos abstractos que dificultan la medición de los resultados que persiguen, para cuantificarlos es preciso acudir a indicadores. Las características básicas que deben tener los indicadores 'clave' o estructurales, para que puedan ser evaluados, se muestran a continuación OECD (1999 y 2003):

- Ser representativos de los objetivos que se pretende alcanzar.
- Tener una definición clara.
- No solaparse con otros indicadores.
- Ser medibles con los métodos disponibles.

También se ha de evitar la 'doble contabilidad'; es decir, contar dos veces el mismo indicador, como sucedería por ejemplo, si se contase el dióxido de carbono y el combustible consumido, ya que el primero puede obtenerse por una simple multiplicación del segundo. Sin embargo, ambos pueden incluirse siempre que el primero se emplee en relación con el cambio climático y el segundo como indicador de consumo de recursos.

Por poner otro un ejemplo, el número de accidentes podría ser el indicador que sirviese para medir el objetivo seguridad vial; o, el número de población que excediese su exposición a un umbral de contaminación determinado, podrían medir un objetivo medioambiental. Este tipo de indicadores se conocen como 'de resultado' (output), puesto que miden parte de los resultados obtenidos con una estrategia.

Pero también existen indicadores 'de entrada' (input) que miden lo que se ha hecho, como por ejemplo el número de kilómetros de carril-bus implementado, e indicadores 'de proceso', que miden la respuesta del sistema de transportes (por ejemplo, el número de usuarios de autobús). Estos últimos, si bien son útiles para ayudar a comprender lo que ha ocurrido, no sirven demasiado a la hora de evaluar la actuación, puesto que no dicen nada sobre el impacto de las medidas sobre los objetivos clave.

Ponderación

Una fórmula general utilizada para la evaluación de sostenibilidad por medio de varios indicadores, es la mostrada por la ecuación (2.1) (ponderación de indicadores, Gerd et al., (2003) y Lautso et al., (2004)).

$$ES = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i(x_i) \quad (2.1)$$

Donde,

n = Cantidad de indicadores
 w_i = Pesos de los indicadores ($\sum w_i = 1$)

v_i = Valor de la función del indicador (si existe)
 x_i = Valor del indicador

A continuación, se presentan tres formas diferentes de obtener la ponderación de indicadores dentro de una función objetivo (Dodgson et al., 2009).

- **Método *Trade-off*.** Todas las relaciones entre los pesos de los indicadores (por ejemplo en el caso de tres indicadores: w_1/w_2 , w_2/w_3 , w_1/w_3) se estiman utilizando el criterio de “¿cómo debería ser la relación entre w_1/w_2 para que un cambio de una unidad en x_1 sea igual de significativo que una mejora de w_1/w_2 unidades de x_2 ?”.
- **Método de *Rating*.** Dentro de un rango determinado, por ejemplo [0,1], se distribuyen valores dentro de los indicadores según su relevancia.
- **Métodos de *Ranking*.** Los indicadores se ordenan según una escala predeterminada. En el caso de tres indicadores, los resultados se ordenan, por ejemplo, $w_1 \leq w_2 \leq w_3$.

2.4 ESTRATEGIAS SOSTENIBLES DE TRANSPORTE URBANO

En el reporte final de la Conferencia Europea de Ministros de Transporte sobre la implementación de políticas de movilidad sostenible (ECMT, 2003), se llegó a la conclusión que, si bien la mayoría de ciudades encuestadas (168) sabían cómo especificar una estrategia sostenible relacionada con el transporte urbano, su aplicación dejaba mucho que desear. La ECMT identificó los principales obstáculos para la implementación de estrategias sostenibles: las pobres políticas de integración y coordinación, los roles institucionales contraproducentes, los marcos regulatorios sin apoyo, las deficiencias en los esquemas de tarificación, la escasa información, el limitado apoyo público y la falta de voluntad política.

Viendo estas dificultades, dentro de los aspectos claves a tener en cuenta se encuentra la necesidad de entender mejor la forma de combinar la amplia gama de medidas disponibles. Las preguntas ahora se centran en cómo se puede identificar su combinación óptima, dado que la mayoría pueden variar sustancialmente en su forma de aplicación; en cómo afectan las limitantes financieras, las responsabilidades institucionales, la tecnología y la aceptación pública en su diseño; cómo desarrollar secuencias de implementación que mejoren su funcionamiento y desempeño; y hasta qué punto es posible transferir las estrategias y sus métodos de un lugar a otro. Estas cuestiones han sido abordadas en la actualidad (Shepherd et al., 2006; Zhang et al., 2006) y en trabajos previos (Fowkes et al., 1998), donde se han hecho avances importantes en el diseño de estrategias óptimas de transporte.

En cuanto a los obstáculos presentes en la implementación de dichas estrategias, investigaciones anteriores (Stewart et al., 1999; Goss, 2005), identificaron las dificultades de aplicación de las soluciones a los problemas sociales, las cuales trascienden las fronteras del sector de servicios. Esto no solo incluye barreras culturales y formas de trabajar, sino que también incluye las barreras institucionales, como los tiempos de planificación y la falta de sincronización de resultados oficiales (Hull, 2008).

Dentro de los estudios de transporte, una estrategia es un conjunto de instrumentos (medidas) que se utilizan para superar problemas y lograr objetivos concretos. Este concepto incluye tanto las acciones destinadas a cambiar los patrones de viajes (gestión de la demanda), como las soluciones técnicas que tratan con problemas asociados al transporte, como la seguridad, la congestión y el impacto ambiental (Rienstra et al., 1999). Existen diferentes tipos de medidas de transporte; por ejemplo, están las medidas de regulación, las económicas, de información, de educación, entre otras, (Gärling y Schuitema, 2007). Steg y

Vlek (1997) distinguen entre las medidas que castigan el uso modos de transporte menos beneficiosos y otras que incentivan modos alternativos y colectivos de transporte.

Las estrategias de transporte pueden implementarse en todas las zonas de una ciudad (una política de reducción de tarifas), o en un área en particular (como una nueva ruta de autobús), o en un momento en particular del día (restricción de acceso o de aparcamiento) y en muchos casos se pueden aplicar en diferentes niveles de intensidad. En consecuencia, esta sección se centra en las medidas de mayor relevancia en el contexto urbano, según revisiones realizadas en la literatura existente (May y Still, 2000; Geerlings y Stead, 2003; Marsden y Bonsall, 2006; Tight y May, 2006; Hull, 2008). Estas estrategias incluyen medidas tradicionales del transporte, como nuevas infraestructuras, gestión de la demanda y medidas de *pricing*, aunque cada vez más se incluyen medidas relacionadas con las nuevas tecnologías y cambios de comportamiento. De igual manera, medidas relacionadas con los cambios en los usos del suelo pueden contribuir en gran medida a mitigar los problemas del transporte.

Medidas que sean eficientes desde el punto de vista económico, son a menudo inviables en la parte social y política, ya que la distribución de los beneficios y costes, puede no ser equitativa entre los diferentes actores.

Debido a que se espera que el uso del coche siga en aumento, los planificadores urbanos deben aplicar los correctivos del caso a pesar que dichas decisiones sean impopulares. Eriksson et al., (2008) demuestran la importancia de combinar medidas restrictivas con incentivos, con el fin de aumentar su aceptación pública.

2.4.1 Medidas de Infraestructuras

Una infraestructura puede ser una gran solución a un problema urbano, aunque su coste puede hacer que sea inviable. Sin embargo, la implementación de nuevas infraestructuras para la reducción de la congestión cada vez más tiene mayores críticos, en particular si estas infraestructuras van destinadas a solucionar la movilidad individual.

Además de esto, hay determinados problemas ambientales asociados a la construcción de nuevas infraestructuras, como la ocupación del suelo, la destrucción de hábitats naturales y la pérdida de calidad del paisaje, sin incluir los efectos indirectos. También existe dentro del conocimiento general, que las nuevas infraestructuras se refieren particularmente a nuevas carreteras que favorecen casi en exclusividad al coche. Esto a su vez hace que el transporte público y los modos alternativos, sean menos atractivos, aumentando el consumo de combustible y la emisión de contaminantes.

Muchos estudios desde los años 80 han intentado cuantificar los efectos de las infraestructuras de transporte dentro de la economía (Cohen, 2010). Dos de los enfoques más populares han incluido evaluaciones de dichos impactos dentro de la productividad y los costes de producción. Dependiendo del contexto y los métodos empleados, hay una amplia gama de resultados de estos estudios que van desde grandes beneficios, beneficios cercanos a cero o impactos negativos.

De esta manera, May y Still (2000), muestran que las nuevas infraestructuras, en particular las nuevas carreteras (en entornos urbanos), no contribuyen a la equidad, ya que proporcionan más ventajas a aquellos que ya tienen las mayores ventajas en términos de transporte. Habría que hacer otro análisis si estas infraestructuras son para mejorar el transporte público.

Las infraestructuras de transporte público pueden contribuir positivamente a la accesibilidad, reduciendo las distancias y tiempos de acceso, los tiempos de espera y en particular,

umentando las velocidades de recorrido, si es que se dispone de exclusividad en la circulación. Sin embargo, su coste y tiempo de implementación, pueden ser obstáculos importantes a la hora de la toma de decisiones.

También existen otras medidas relacionadas con las infraestructuras, como por ejemplo, implementar un sistema de *park & ride*, construcción de terminales e intercambiadores, infraestructuras para los ciclistas y zonas peatonales, entre otras.

2.4.2 Medidas de Gestión de la Demanda

Las medidas de gestión convencionales, como los sistemas inteligentes de transporte (ITS) y la prevención de accidentes, siempre deben tenerse en consideración. Dar prioridad al desarrollo del transporte público, mejorar los niveles de servicio e implementar carriles exclusivos y de alta ocupación, son medidas por medio de las cuales se puede mejorar la prestación de este servicio. Las restricciones sobre el tráfico pesado, pueden ser medidas a tener en cuenta dentro de las zonas más congestionadas.

A medida que las ciudades luchan para reducir los crecientes efectos de la congestión, el interés en los niveles políticos y gerenciales va ganando espacio. A pesar de una larga historia de promoción de un amplio paquete de iniciativas de gestión de la demanda de viajes, muy pocas han tenido un impacto importante sobre los niveles de tráfico (Hensher y Puckett, 2007). Según estos mismos autores, las medidas de gestión de la demanda se han convertido en soluciones poco efectivas, en ausencia de estrategias claras de *pricing* que promuevan el uso eficiente del sistema y que además sirvan de soporte económico para el apoyo de infraestructuras complementarias y servicios esenciales, como el transporte público.

Así, aparte de las medidas tradicionales de gestión, como los sistemas de control de tráfico (UTC) y los sistemas inteligentes (ITS), se tienen instrumentos como los de calmar el tráfico, restricciones y regulaciones referentes al uso del coche, control de aparcamientos y los sistemas de *car sharing* o *car pooling*.

En cuanto al transporte público, las medidas más comunes son los carriles-bus, la exención de giros prohibidos, la detección selectiva en semáforos y los sistemas de control de tráfico con prioridades. Según May y Still (2000), al hacer esto se puede mejorar la eficiencia del sistema, la cual se traduce en un ahorro de tiempo de viaje de cerca de 25%. La segregación del tráfico normal, también mejora la seguridad. Otras medidas de gestión de transporte público, además de las mencionadas anteriormente, son los carriles de alta ocupación, prioridades para ciclistas y peatones y aparcamientos de bicicletas, entre otros.

2.4.3 Medidas de Pricing

Dentro de esta categoría, la implementación de peajes urbanos o interurbanos puede ser la medida más conocida. Como generalmente los viajes tienen como destino el centro de una ciudad y son viajes de movilidad obligada, la cuestión de tarificación del transporte, cobro por aparcamientos y cobros por congestión, son particularmente relevantes. Por el lado del transporte público, se pueden explorar la diferenciación tarifaria y los cambios en los cobros a los usuarios.

En la actualidad, hay un creciente interés en el uso de medidas de *pricing* en el transporte, con el fin de resolver algunos de sus problemas. Generalmente, se utiliza una combinación de medidas que van desde la modificación de los precios del combustible, a peajes y tasas de aparcamiento (Proost y Sen, 2006). En Europa, se han desarrollado gran variedad de proyectos relacionados con la eficiencia de este tipo de medidas (de Palma et al., 2006), de

tal manera que algunas de las conclusiones de relacionadas con este tema son (Sikow-Magny, 2003):

- Una medida eficiente de *pricing* pretende aumentar el coste del uso del coche en áreas urbanas congestionadas; así, el transporte público será más competitivo y necesitará de menos subvenciones. Como resultado de esta medida, habrá menos accidentes, menos tiempo perdido y mejorará la calidad ambiental, haciendo el sistema de transporte más eficiente y una sociedad mejor.
- Las medidas de *pricing* son efectivas para tratar de cambiar el comportamiento de las personas y los patrones de viaje. Estos cambios no tienen por qué ser dramáticos para que tengan algún efecto sobre el tráfico. Los usuarios del coche pueden cambiar con mayor facilidad su ruta, horario y destino, que cambiar su modo de transporte.

Estas conclusiones identifican los efectos que pueden esperarse de la implementación de medidas de este tipo. Estas medidas incluyen las tasas por aparcamiento, peajes urbanos e interurbanos, esquemas tarifarios del transporte público, impuestos y sobretasas, etc. A manera de ejemplo, en Laird et al., (2007) se puede ver el análisis de un cordón y el uso de sus ingresos en la ciudad de Edimburgo. En de Palma y Lindsey, (2007) se muestra el uso de tasas a los usuarios y la recuperación de costes. Finalmente en Safirova et al., (2004) se estiman los efectos en el bienestar social en un escenario de cobro por congestión.

2.4.4 Medidas Espaciales

Las ciudades europeas muestran similares tendencias en su desarrollo espacial, aunque en el caso particular de Madrid, se viene presentando una tendencia hacia la dispersión (Guzmán y de la Hoz, 2008). La dispersión es un fenómeno independiente del crecimiento de la población, ya que la gente se está moviendo desde el centro de las ciudades hacia su periferia, fomentando un crecimiento urbano basado en la dependencia del vehículo privado, el cual causa dos efectos que a la vez son causas: mayor crecimiento del parque vehicular y menor uso del transporte público. Adicionalmente a este fenómeno, la cantidad de espacio urbano por persona está aumentando, lo que también puede verse como una causa y una consecuencia de la dispersión urbana (Ver Anexo 4). Estos elementos vienen acompañados por la no existencia de usos mixtos, lo cual incrementa la necesidad de movilidad.

Es costoso construir la infraestructura necesaria para conectar las urbanizaciones periféricas y también significa una menor eficiencia en el uso de los recursos, por ejemplo la ampliación de los servicios públicos (tuberías, cableado, etc.), sin contar el de transporte. Las decisiones sobre la urbanización del suelo actúan como un insumo para la generación de demandas de viaje que deberán ser satisfechas por el sistema de transporte. De esta manera, es necesario entender las consecuencias de estas decisiones en relación con una política de transporte.

Las medidas de usos del suelo deben considerarse en cualquier estudio de transporte, siendo más eficaces en las soluciones a largo plazo. Las medidas tenidas en cuenta aquí, se basan en los principios establecidos por el *Department of Transport* inglés (DETR, 2001), los cuales consisten básicamente en la reducción de las distancias de los viajes motorizados, fomentar el transporte público y de modos alternativos y en general, reducir la dependencia futura del coche. Dentro de estas medidas se encuentran, además del aumento de densidades en los núcleos urbanos y desarrollos dentro y cerca de los nodos y corredores de transporte, incentivos a desarrollar usos mixtos, la flexibilización de los horarios de trabajo, subvenciones a las infraestructuras, financiación cruzada, planes de transporte de empresas, regulaciones de los aparcamientos y mejora en las comunicaciones. Ver descripciones y detalles en DETR, (2001) y May y Still, (2000).

2.4.5 Medidas de Información

La mayoría de estas medidas pueden ser muy relevantes en el contexto interurbano, particularmente la señalización, información en tiempo real y sistemas de gestión de flotas. Desafortunadamente, la información sobre la efectividad de este tipo de medidas no es muy amplia en la actualidad y se desconoce a ciencia cierta su impacto sobre el transporte. Información de aparcamientos e itinerarios, puede ser más efectiva en zonas urbanas. También puede utilizarse para campañas de sensibilización (DETR, 2001).

La señalización variable, las guías en ruta, la información de aparcamientos, las campañas de sensibilización pública, información en tiempo real y horarios para los usuarios del transporte público y los sistemas de información de operación, son medidas que se clasifican dentro de esta categoría.

2.4.6 Otras Medidas: Instrumentos Operativos

Desde la Unión Europea se está contribuyendo a disminuir la contaminación y los efectos negativos que origina el transporte. Con los objetivos de reducir sustancialmente las emisiones en los años futuros, mejorar la calidad ambiental y disminuir el ruido, la UE ha desarrollado directivas relativas a la emisión de CO₂, al consumo de energía y otras que promueven las energías renovables y la mejora medioambiental (EU, 2001). Además, existen directivas específicas del transporte que regulan la calidad de los combustibles y pretenden incrementar el uso de biocombustibles, o promueven facilitar información a los compradores de vehículos nuevos sobre la eficiencia energética de los mismos (EU, 2007).

Dentro de este grupo de medidas, existen unas directivas cuyo objetivo es hacer que el sistema de transporte y en general la ciudad, se desarrollen dentro de un entorno sostenible. Estas herramientas son conocidas como planes sectoriales de movilidad y planes de movilidad urbana sostenible (PMUS). Los objetivos principales de estas herramientas son:

- Mejorar la accesibilidad del usuario del sistema de transporte
- Mejorar la calidad del servicio de transporte
- Ampliar la participación del transporte público en la distribución modal
- Garantizar la rentabilidad financiera de los operadores

Los PMUS deben asegurar un equilibrio entre las necesidades de movilidad y accesibilidad, al tiempo que favorecen la protección del medio ambiente, la cohesión social y el desarrollo económico (principios de la movilidad sostenible) (Monzón et al., 2006). Estos planes son el instrumento básico para configurar las estrategias de movilidad sostenible de los municipios. La iniciativa para elaborar y aprobar los planes de movilidad urbana sostenible corresponde a los ayuntamientos.

El contenido de los planes de movilidad urbana sostenible debe adecuarse a los criterios y orientaciones establecidos por los planes directores de movilidad de su ámbito y, si procede, a los planes específicos. Los PMU incluirán un diagnóstico de la situación, los objetivos a conseguir, las medidas a adoptar y los mecanismos de financiación y programa de inversiones.

En el proceso de elaboración de los planes de movilidad urbana sostenible debe quedar garantizada la participación de los organismos, entidades y sectores sociales vinculados a la movilidad y al medio ambiente. Antes de aprobarlos, es preciso el informe de la autoridad territorial competente en materia de infraestructuras y servicios de transporte.

En resumen, un Plan de Movilidad Urbana Sostenible es “un conjunto de actuaciones que tienen como objetivo la implantación de formas de desplazamiento más sostenibles (caminar, bicicleta y transporte público) dentro de una ciudad; es decir, de modos de transporte que hagan compatibles crecimiento económico, cohesión social y defensa del medio ambiente, garantizando, de esta forma, una mejor calidad de vida para los ciudadanos” (Monzón et al., 2006).

Esto significa que es necesario dar alternativas a la ciudadanía con respecto al uso del coche. Estas alternativas deben ser cada vez más sostenibles, eficaces y confortables y a la vez, educar y concienciar a los usuarios del coche de darle un uso cada vez más racional.

CAPÍTULO 3.

LA INTEGRACIÓN DEL TRANSPORTE Y LOS USOS DEL SUELO

TABLA DE CONTENIDO

3.1 INTRODUCCIÓN.....	31
3.2 LA RELACIÓN ENTRE LOS USOS DEL SUELO Y EL TRANSPORTE.....	33
3.2.1 EL TRANSPORTE	33
3.2.2 EL TERRITORIO.....	35
3.2.3 FACTORES RELEVANTES E IMPACTOS ESPERADOS	36
3.2.4 LA INTERACCIÓN TRANSPORTE - TERRITORIO	39
3.2.5 LA INTEGRACIÓN DE POLÍTICAS	41
3.3 LA MODELIZACIÓN INTEGRAL DE LOS USOS DEL SUELO Y EL TRANSPORTE	44
3.3.1 MODELOS LUTI	46
<i>MEPLAN</i>	48
<i>TRANUS</i>	49
<i>Integrated Transportation and Land Use Package (ITLUP)</i>	49
<i>Modelo de Uso de Suelo de Santiago (MUSSA)</i>	50
<i>Comparación de los Modelos Existentes</i>	52
3.3.2 ÉXITOS Y FRACASOS DE LA INTEGRACIÓN	52
3.4 RESUMEN Y DISCUSIONES.....	53

3.1 INTRODUCCIÓN

Una ciudad altamente dependiente del coche permite una gran libertad de movimiento (en tiempo y espacio), dando la oportunidad a las personas de vivir casi en cualquier lugar y llegar rápidamente a todos los destinos, independientemente de su localización. En esos casos, los planificadores solo debían prever la infraestructura necesaria para sostener esta situación. Sin embargo, una ciudad con localizaciones individuales sin restricciones y deseos de movilidad individuales, significará un aumento exponencial del tráfico (Newman y Kenworthy, 1996).

Precisamente esta independencia y poder que da el coche tiene un coste, aunque dicho coste no sea asumido ni percibido totalmente por los usuarios. Es fácil reconocer que las zonas urbanas muy dependientes del coche son áreas contaminadas, ruidosas y con un uso del suelo poco eficiente debido al gran espacio que ocupan las infraestructuras. Además, problemas como la dispersión urbana se deben principalmente a la gran dependencia que las ciudades tienen de este modo de transporte (Guzmán y de la Hoz, 2008).

Con el fin de evitar estas tendencias, los nuevos enfoques en planificación urbana apuntan hacia una ciudad con un mayor uso del transporte público y con densidades más altas, además de usos de suelo mixtos. Las características principales de cómo el territorio no debería conectarse con los sistemas de transporte se puede ver en Figura 3.1, donde se observa una ciudad (Madrid) que entre 1996 y 2004 presenta un aumento de la población en zonas donde el uso de transporte público ha descendido. Al realizar un análisis de la localización de la población en función del reparto modal (uso del transporte público), se percibe que se está produciendo una localización de residentes en las zonas de menor potencial de uso de transporte público, lo que contribuye aún más a la dispersión de las actividades. Según los datos del Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM, 1996 y CRTM, 2004), las zonas en dónde la población crece con mayor rapidez, son las mismas zonas donde precisamente el uso del transporte público es menor, lo que refuerza la tendencia de una mayor dependencia del coche.

En general, a lo largo de la historia de la humanidad, el transporte y el territorio en las ciudades han estado estrechamente relacionados. Sin embargo, no se ha sacado verdadero provecho a esta relación a lo largo de los años. Solo hasta hace relativamente poco se han empezado a diseñar metodologías y desarrollar herramientas útiles en la planificación urbana.

En sus inicios, las ciudades eran densas y su territorio era de usos mixtos; además eran ciudades de ‘escala peatonal’, ya que su tamaño estaba limitado por la oferta y tecnología del transporte de la época. A medida que el transporte iba ganando en eficiencia, capacidad y velocidad,

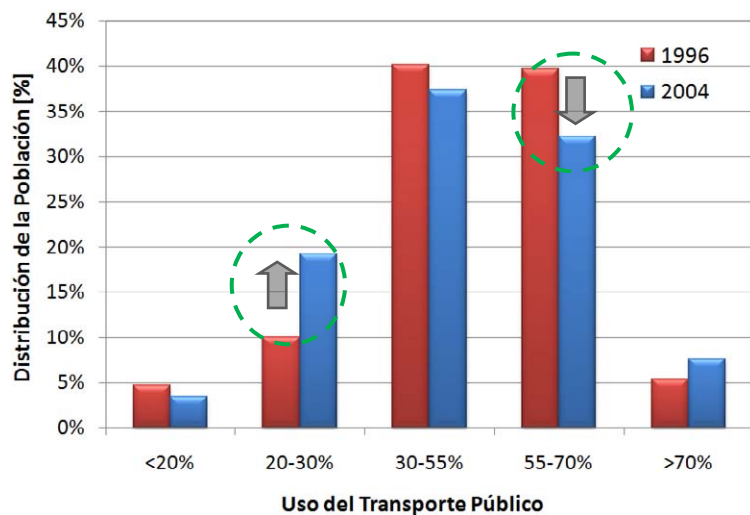


Figura 3.1 Reparto Modal en TP Según la Distribución de la Población en la Comunidad de Madrid

Fuente: Basado en datos de la EDM96, EDM04 y del Instituto Estadístico de la Comunidad de Madrid.

garantizaba que la expansión urbana se desarrollaría a lo largo de los corredores de transporte, por lo general bastante estrechos (Kenworthy y Laube, 1996). Pero la intensificación del uso del vehículo privado, tuvo como consecuencia una mayor libertad de la gente para escoger su lugar de residencia y en menor medida, de su empleo. Esto significó que las residencias y las empresas se podían ubicar casi en cualquier parte, ya que se disponía de un modo de transporte personalizado, rápido y que podía unir estos puntos con relativa facilidad. Esta situación rompió la relación entre transporte y territorio dentro de las ciudades, las cuales posteriormente se dieron cuenta del alto coste que esta situación les significaba (Newman y Kenworthy, 1996).

Una parte de estos costes consistieron en la construcción y ampliación de las infraestructuras de transporte, necesarios para absorber la creciente demanda de los usuarios del coche. Este proceso tuvo un gran impacto dentro de las ciudades, no solo por la alta utilización del suelo rural, o por el cada vez mayor consumo energético, sino por la degradación del ambiente urbano existente.

Esta combinación de costes sociales, económicos y ambientales, necesariamente hace que se deba replantear el hecho de la forma en que se están construyendo las ciudades en la actualidad (May et al., 2001). Ahora, las ciudades intentan reconstruir la conexión entre el transporte y el territorio, con el fin de reducir la dependencia del coche y sus efectos nocivos debido al abuso de su utilización (Geerlings y Stead, 2003), tal como sucedió en la ciudad alemana de Friburgo (Kenworthy y Laube, 1996; Buehler y Pucher, 2011) y en otras ciudades europeas (Monzón et al., 2006).

La tendencia actual en la modelización de usos del suelo y transporte está caracterizada por una gran desagregación, incluso por debajo del nivel de hogar. Este tipo de modelo tan detallado, independientemente de su atractivo teórico, es inapropiado para identificar estrategias sostenibles, precisamente por su evaluación al detalle (May et al., 2000). A pesar de la mayor capacidad de procesamiento de datos de los ordenadores, la evaluación de los modelos puede tardar mucho debido al gran número de variables que deben ser consideradas. Por otro lado, es necesario disponer de una gran cantidad de información, incluso se debe recurrir a estimar datos para alimentar el modelo según su nivel de desagregación. Los requerimientos de información son una de las razones por las cuales el uso de modelos integrados de usos del suelo y transporte no es tan extendido.

Por otro lado, las investigaciones de las últimas décadas han mostrado que los usos del suelo y la configuración de los sistemas de transporte están íntimamente relacionados de forma dinámica, lo que hace que integrar los usos del suelo y los modelos de transporte de esta forma, haga posible determinar el funcionamiento de las estrategias y políticas urbanas, también de forma dinámica. En la literatura existe una gran variedad de modelos de transporte y/o usos del suelo (Kriger et al., 1999; Wegener, 2003 y Sivakumar, 2007).

Estas nuevas tendencias marcan un interés creciente en el desarrollo de herramientas que integren estos dos aspectos fundamentales de una zona urbana. Este concepto se basa en investigaciones anteriores (May et al., 1992) y han demostrado que un enfoque integrado puede reducir significativamente el impacto negativo de los problemas del transporte urbano (May et al., 2000) y conducir a las ciudades hacia un desarrollo sostenible. Sin embargo, esto no será posible si los efectos de las medidas de transporte y usos del suelo no se pueden coordinar claramente.

De esta manera, en el presente capítulo se expone brevemente el estado del arte de la planificación e integración del transporte con los usos del suelo. En la sección 3.2, se describen el transporte y el territorio en el contexto de su interacción e integración. En la sección 3.3, se hace un recuento de algunos modelos de usos del suelo y transporte conocidos. También se hace una revisión de la integración de medidas de transporte y usos

del suelo, sus éxitos y sus inconvenientes. Finalmente, se presenta un breve resumen del capítulo con algunas discusiones al respecto (§3.4).

3.2 LA RELACIÓN ENTRE LOS USOS DEL SUELO Y EL TRANSPORTE

En los últimos años la relación entre los usos del suelo y el transporte ha experimentado un nuevo auge involucrando los aspectos ambientales y de sostenibilidad. Esta relación también ha sido ampliamente reconocida en otras disciplinas como la economía, la geografía y la planificación urbana y; aunque históricamente el transporte ha sido muy bien documentado, después de muchos debates científicos y políticos y del conocimiento de esta relación, aún no hay un consenso generalizado sobre el impacto de los usos del suelo en el transporte.

Hay muchas discrepancias entre los científicos acerca de esta relación: algunos concluyen que el uso del suelo puede causar un impacto significativo en el comportamiento del viajero; en cambio, otros no han encontrado nada (Hull, 2005). Algunos hablan acerca de la ilusión que es influir en los patrones de viaje a través de la planificación urbana. En fin, como se ha dicho, no hay conclusiones unánimemente aceptadas.

Dentro de IV Programa Marco de la Unión Europea, se incluyó el proyecto *TRANSLAND* (Paulley y Pedler, 2000) cuyo fin era crear políticas innovadoras y futuras necesidades de investigación en la planificación integrada del transporte y los usos del suelo a nivel urbano y regional. Algunas de las conclusiones fueron:

- Las políticas de usos del suelo y transporte solo tendrían éxito si se hacen los viajes en coche menos atractivos (más caros y lentos).
- Las políticas de usos del suelo que incentivan la densificación o el desarrollo mixto, no serán efectivas, a menos que se hagan los viajes en coche menos atractivos.
- Las políticas en contra del uso indiscriminado del coche son muy efectivas, pero dependen de una organización espacial no muy dispersa.
- Una estructura urbana cuyos centros de comercio y ocio no estén integrados, favorecerá el uso del coche debido al aumento en las distancias.
- Las políticas destinadas a mejorar la atractividad del transporte público, en general no conducen a una reducción del uso del coche. Solamente atraen un pequeño desarrollo alrededor de sus estaciones.

Al comparar diversas estrategias de usos del suelo y transporte, estas últimas son mucho más eficientes a la hora de reducir la necesidad de viajar y de hacer una movilidad más sostenible, pero las políticas de usos del suelo son necesarias para hacer ciudades que no dependan del coche.

3.2.1 El Transporte

El transporte es un parámetro causal en relación con los usos del suelo. Los sistemas de transporte tradicionalmente han sido diseñados de modo que respondan a las demandas de viajes creadas por el desarrollo de una zona. En teoría, nuevas infraestructuras de transporte proporcionan ventajas de ubicación con respecto a otros sitios (Cervero, 1998). Sin embargo, estas ventajas pueden traducirse en impactos negativos: degradación del ambiente y congestión. La idea general de la relación transporte-usos del suelo, es que el nivel de movilidad (expresado en vehkm) pueda reducirse por medio de la ordenación del territorio y que pueda realizarse un cambio modal del coche a modos alternativos o al transporte público.

Ambos efectos deberían reducir los impactos negativos (van Wee, 2002). Varias razones por las cuales los sistemas de transporte urbano en general no son sostenibles en la actualidad están descritas en Black (1996).

Cuanto más se provee oferta de transporte para satisfacer la demanda, más demanda es generada, lo que conduce a caer en el círculo vicioso del transporte (van Wee, 2002). Así que un paso inicial para empezar a resolver estos problemas es usar el suelo de una manera coordinada y más eficiente, teniendo en cuenta el diseño urbano y el diseño de los sistemas de transporte.

El crecimiento cada vez mayor de las zonas urbanas, ocasiona un aumento de los costes de los servicios públicos. La dispersión de las viviendas y los puestos de trabajo, se traduce en un aumento de la congestión, del coste del transporte y del aumento de la emisión de contaminantes; eso sin contar con la fragmentación del territorio, la destrucción de hábitats naturales y los espacios abiertos en general (Irwin y Bockstael, 2007).

Las decisiones sobre la urbanización del territorio actúan como un insumo para la generación de demandas de viaje, que deberán ser satisfechas por un sistema de transporte. Los sistemas de transporte afectan también los patrones sociales directamente. Tradicionalmente éstos han funcionado con el objeto de mejorar el acceso geográfico entre dos localidades y, por ende, mejorar el desarrollo económico.

Enfocando el transporte hacia la sostenibilidad y teniendo en cuenta su relación continua y dinámica con el territorio, éste puede considerarse como un examinador del grado de sostenibilidad urbana alcanzada, teniendo en cuentas sus impactos positivos y negativos y la evolución de las externalidades (Steg y Gifford, 2005).

Dentro de la planificación de los sistemas de transporte, la previsión de la demanda de transporte es un elemento crucial, ya que permite a los planificadores probar sus políticas y escenarios alternativos, proporcionando una base para comparar costes y beneficios de los escenarios probados (Meyer y Miller, 2001). La mayoría de los organismos de planificación reconocen que la modelización de la demanda de viajes es un componente muy importante en la planificación urbana (Hatzopoulou y Miller, 2009). Sin embargo, a pesar de la creciente importancia de los modelos, sigue existiendo un gran número de administraciones alrededor del mundo que no los utilizan o se basan en algunos ya obsoletos para apoyar la toma de decisiones (Shepherd et al., 2006). Esto puede deberse a la falta de recursos, experiencia e información base para su desarrollo.

En Europa, el diseño de medidas integrales de transporte ha venido ganado cada vez más atención. En el área del transporte, la necesidad de una integración con medidas ambientales y de usos del suelo, es evidente. La situación actual de las ciudades exige integración, cooperación y la participación de los gobiernos. Esta tendencia se ha desarrollado a lo largo de la última década, en parte como reacción a medidas anteriores que se caracterizaron por una centralización y jerarquización de las decisiones y un desarrollo de medidas aisladas (Geerlings y Stead, 2003).

Con base a este razonamiento, un sistema de transporte que no tenga en cuenta el desarrollo de su entorno, tiende a comportarse de la siguiente forma (IRIS PLAN, 1998):

- Una mayor oferta de infraestructura de carreteras, incentiva el mayor uso del coche.
- Al bajar el número de usuarios del transporte público, se suben las tarifas para tratar de alcanzar un nuevo equilibrio.
- Al aumentar las tarifas, muchos usuarios migran hacia el coche.

- Al descender el número de usuarios, se disminuye el número de servicios.
- Un nuevo aumento en las tarifas, empieza de nuevo el ciclo.

3.2.2 El Territorio

Múltiples y complejas son las causas de la descentralización de las ciudades modernas: aspectos como los socio-demográficos, económicos y estructurales, son algunos de ellos (Bertaud, 2004). En Madrid por ejemplo, entre los primeros cabe citar el aumento de la población y su estructura demográfica, en donde el grueso de la pirámide coincide con aquellos segmentos de edad que están en situación de conformar nuevos hogares, así como en disposición de comprar y utilizar un coche; el tamaño de los hogares, que desciende de forma continuada, mientras que el grado de motorización aumenta produciendo una mayor disponibilidad del vehículo privado. El aumento de la inmigración como segmento de usuarios con clara orientación hacia el transporte público, también condiciona su decisión de localización residencial, entre otros elementos. Entre los aspectos económicos influye de manera decisiva un mercado inmobiliario con costes que tienen un impacto significativo sobre la decisión de localización residencial (de la Hoz y Guzmán, 2006). También hay elementos estructurales como la densidad de los desarrollos urbanísticos, la planificación de la localización de los usos del suelo, el diseño del desarrollo hacia el transporte público o el vehículo privado, la estructuración de los servicios de transporte público, las medidas fiscales o tarifarias, etc.

Las metrópolis europeas han experimentado en los últimos años una expansión sin precedentes. Se trata, por lo tanto, de un crecimiento superficial desproporcionado en relación a la evolución de la población. Las ciudades crecen en extensión y sus límites son más inciertos que nunca (Kasanko et al., 2006). En conjunto las nuevas periferias metropolitanas de las ciudades occidentales se caracterizan por densidades residenciales bajas o medias asociadas a desarrollos de viviendas en edificaciones unifamiliares o en complejos residenciales de poca altura con equipamientos intersticiales (zonas ajardinadas, piscinas, pistas deportivas) y por la existencia de nuevas centralidades, nuevos núcleos de desarrollo, diferentes al tradicional centro de las ciudades. Áreas residenciales y piezas funcionales se sitúan de forma discontinua, dejando espacios intersticiales entre sí, de lo que resulta un paisaje fragmentado y disperso. El predominio de bajas densidades en las áreas residenciales y la dispersión de este tejido suburbano tienen el efecto conjunto de producir un territorio en el que también las bajas densidades de población son su nota característica (Meurs y Haaijer, 2001).

Al mismo tiempo se produce una descentralización de equipamientos y empresas, que si bien tienden a compensar el déficit de la periferia, también contribuyen a la fragmentación del espacio y constituyen un factor de segregación y especialización funcional. La periferia atrae equipamientos y actividades que llegan después que la población y se localizan en los bordes de los espacios edificados o incluso en espacios exteriores (las nuevas centralidades de la periferia), pero siempre buscando una adecuada conexión con la red de carreteras. Parques empresariales y de oficinas, parques industriales, nuevos polígonos industriales, parques tecnológicos, universidades y centros comerciales y de ocio, con frecuencia salpican el territorio metropolitano, incrementando esa sensación de paisaje fragmentario.

Según el proyecto PROPOLIS (Lautso et al., 2004) los principales rasgos que pueden apreciarse en estas estructuras espaciales en las periferias metropolitanas tienen que ver con:

- Alta rapidez de expansión.
- Límites cada vez más difusos (cinturones verdes).

- Dispersión residencial en baja densidad.
- Descentralización de actividades y nuevas centralidades.
- Fragmentación del territorio. Especialización de actividades.
- Redes de transporte basados en el vehículo privado.
- Vías públicas como lugares de paso. Ausencia de 'vida de barrio'.

La influencia de la estructura urbana en la eficiencia económica está presente de forma continua en la definición de las políticas urbanas, sobretudo en un escenario de creación de 'mega-ciudades'. La dispersión y el uso intensivo del vehículo privado están normalmente asociados a altos niveles de servicio en las infraestructuras y, por tanto, a un alto consumo de recursos, lo cual conduce a un escenario de menor eficiencia económica (Kenworthy y Laube, 1999).

3.2.3 Factores Relevantes e Impactos Esperados

En los últimos años se han tomado varias medidas en el mundo sobre los usos del suelo con la idea de solucionar algunos problemas causados por el alto índice de motorización; sin embargo, se presentan varios interrogantes respecto a la eficacia de dichas medidas. Varios autores han investigado este tema en particular Cervero (1996), Stead (2001), Greiving y Wegener (2001) y Meurs y Haaijer (2001).

La accesibilidad es un factor que tiene un gran impacto en esta relación: por ejemplo, las distancias a conexiones con el transporte público. Cuantos más centros de trabajo y de vivienda se localicen cerca de estaciones de transporte público, los tiempos de acceso serán menores para una mayor cantidad de viajeros, resultando en una mayor utilización del transporte público en comparación con el coche. Por esto, una correcta ubicación de estaciones de transporte público puede influir de gran manera en el comportamiento de los viajeros y en el desarrollo urbanístico de la zona (Bertolini et al., 2005).

Además de estas razones, la mejora de la accesibilidad puede considerarse como el principal contribuyente en la atracción de la demanda del transporte público y su desarrollo potencial. Hay políticas complementarias que hacen referencia al papel de la inversión y planificación del transporte a la hora de incentivar otro tipo de políticas, tales como:

- Reducción de los costes del desarrollo urbano, por medio de un aumento de densidad (o índice de ocupación), reducción de los impuestos ó reducción de las plazas de aparcamiento.
- Aumento de la atraktividad por medio de inversiones en redes de transporte público, aumento en seguridad, zonas peatonales, etc.

La promoción del desarrollo consiste en que las inversiones en transporte puedan ser catalizadores para desarrollar sectores próximos a dichas infraestructuras. Esto significa que el desarrollo atrae el desarrollo.

El mayor impacto del transporte sobre los usos del suelo es mediante un cambio en la accesibilidad del sector en cuestión. Cuanto mayor sea la accesibilidad, mayor será la atraktividad de la zona, aumentando así su desarrollo. Zonas más accesibles al empleo, al comercio, a la educación y a la recreación, serán más atractivas para el desarrollo residencial; de la misma manera que zonas con mayor accesibilidad a autopistas, centros y estaciones de transporte, serán más atractivas para el desarrollo de industrias y oficinas (Geurs y van Wee,

2004). En los dos casos el desarrollo será mayor con su consecuente aumento de precios del suelo.

De esta manera, los resultados de las teorías de la interacción transporte-territorio, en términos de los impactos esperados y de factores básicos, desde el punto de vista teórico, se resumen a continuación.

Tabla 3.1. Impactos Teóricos de los Usos del Suelo

Sentido	Factor	Impacto en	Resultados Esperados
Usos del Suelo ↓ Transporte	Densidad residencial	Distancia de viaje	Una mayor densidad de viviendas por sí sola no conseguirá viajes más cortos. Una mezcla de localización de viviendas con puestos de empleo si lo podría hacer, si se aumentan los costes del transporte.
		Frecuencia de viaje	Bajo impacto esperado. Si los viajes son cortos, se podrían hacer más viajes.
		Elección modal	Densidades mínimas de viviendas son prerequisite para un transporte público eficiente. Mayor utilización de modos alternativos (caminar y bicicleta) podría hacerse, si los viajes son cortos.
	Densidad de empleos	Distancia de viaje	La concentración de los puestos de empleo en pocos centros de trabajo tiende a aumentar la duración media de los viajes. Un balance entre empleos y vivienda en una zona, conduciría a hacer viajes más cortos de trabajo.
		Frecuencia de viaje	Bajo impacto esperado. Si los viajes son cortos, se podrían hacer más viajes.
		Elección modal	La concentración de los puestos de empleo en pocos centros de trabajo puede reducir los viajes en coche, sólo si se diseña un servicio público eficiente.
	Diseño de barrios	Distancia de viaje	Espacios públicos atractivos y gran variedad de servicios pueden inducir a más viajes locales.
		Frecuencia de viaje	Si los viajes son cortos, más viajes pueden realizarse.
		Elección modal	El diseño de calles, espacios públicos e infraestructuras para los ciclistas, pueden aumentar los viajes en modos alternativos.
	Localización	Distancia de viaje	Más zonas periféricas, inducen a viajes más largos.
		Frecuencia de viaje	No se esperan impactos.
		Elección modal	Zonas cercanas a estaciones de transporte público, tendrían más viajes en estos modos.
	Tamaño de la ciudad	Distancia de viaje	La distancia de viaje debería estar negativamente correlacionada con el tamaño de la ciudad.
		Frecuencia de viaje	No se esperan impactos.
		Elección modal	Las ciudades grandes pueden soportar sistemas de transporte público más eficientes, ya que al haber más viajes, muchos se realizan en estos modos.

Fuente: Wegener et al., (1999).

La Tabla 3.1 muestra el impacto de las medidas de usos del suelo sobre los patrones de movilidad. El impacto de una densidad residencial alta en la reducción de la distancia media de viaje, es probable que sea mínima si no se acompaña de medidas complementarias, como por ejemplo el aumento en los costes de viaje. Por otro lado, una alta densidad de empleos sí se correlaciona de forma positiva con una reducción en las distancias de recorrido. Instalaciones atractivas en los barrios pueden ser vistas como elementos de atracción que ayudan a reducir la generación de viajes largos.

Tabla 3.2. Impactos Teóricos del Transporte

Sentido	Factor	Impacto en	Resultados Esperados
Transporte ↓ Usos del Suelo	Accesibilidad	Localización residencial	Áreas con mayor accesibilidad a zonas de trabajo, centros educativos, comercio y ocio, serán más atractivos para el desarrollo residencial, tendrían altos precios de suelo y serían desarrollados rápidamente. La mejora en la accesibilidad a nivel local cambiaría la dirección de nuevos desarrollos residenciales, mejorando la accesibilidad de forma general para toda el área, lo que resultaría en un desarrollo disperso.
		Localización industrial	Áreas con mejor acceso a autopistas y estaciones de mercancías, serán más atractivas para el desarrollo industrial y su desarrollo será más rápido. Mejorando la accesibilidad local, cambiaría la dirección de los nuevos desarrollos industriales.
		Localización de oficinas	Áreas con mayor accesibilidad a aeropuertos, estaciones de alta velocidad y autopistas, serán más atractivos para el desarrollo de oficinas. Tiene precios de suelo altos. Mejorando la accesibilidad local, cambiaría la dirección de los nuevos desarrollos de oficinas.
		Localización de comercios	Áreas con mejor accesibilidad a los clientes y empresas de la competencia, serán más atractivos para este tipo de desarrollo. El precio del suelo será alto y se desarrollará rápidamente. Mejorando la accesibilidad local, cambiaría la dirección de los nuevos desarrollos comerciales.
Transporte ↓ Transporte	Accesibilidad	Distancia de viaje	Áreas con buena accesibilidad a muchos destinos, inducirían a realizar viajes más largos.
		Frecuencia de viaje	Áreas con buena accesibilidad a muchos destinos, inducirían a realizar viajes más largos.
		Elección modal	Áreas con buena accesibilidad en coche, producirán más viajes en coche. Áreas con buena accesibilidad en transporte público, producirán más viajes en transporte público.
	Costes de viaje	Distancia de viaje	Hay una fuerte relación inversa entre el coste de viaje y su distancia.
		Frecuencia de viaje	Hay una fuerte relación inversa entre el coste de viaje y su frecuencia.
		Elección modal	Hay una fuerte relación entre el coste de viaje y la elección del modo.
	Tiempo de viaje	Distancia de viaje	Hay una fuerte relación inversa entre el tiempo de viaje y la distancia de viaje.
Frecuencia de viaje		Hay una fuerte relación inversa entre el coste de viaje y su frecuencia.	
		Elección modal	Hay una fuerte relación entre el coste de viaje y la elección del modo.

Fuente: Wegener et al., (1999).

La densidad residencial y de empleo, en una zona de tamaño importante y una buena accesibilidad al transporte público, están correlacionadas positivamente con un mayor uso del transporte público. Si profundizamos en estas características, diseñando una mezcla de zonas con viviendas y lugares de empleo, haciendo viajes aún más cortos, se puede llegar a tener un impacto positivo en cuanto al uso de bicicletas y viajes a pie (Wegener y Fürst, 1999).

También se puede tener en cuenta la densidad como un concepto más amplio: se puede describir como el número de oportunidades (locales, familias, viviendas, escuelas, etc.) por unidad de área. Es claro que una mayor densidad facilita a las personas llevar a cabo un mayor número de actividades en un menor tiempo, debido a la disminución de las distancias de desplazamiento.

Los desarrollos mixtos son aquellos en donde varias categorías de usos del suelo se localizan en una misma zona. En estos desarrollos se reducen las distancias medias entre viviendas y demás destinos, disminuyendo así el número de veh-km y potenciando modos de transporte alternativos al coche.

En la Tabla 3.2 se muestra el impacto de las medidas de transporte sobre los usos del suelo. El impacto del transporte sobre los usos del suelo está medido por los cambios de accesibilidad. Una mayor accesibilidad aumenta la atraktividad de una zona independientemente del tipo de uso del suelo, lo que influye directamente en la orientación del desarrollo urbano. Sin embargo, si se aumenta la accesibilidad de toda una ciudad, el único resultado será una ciudad más dispersa.

Los impactos de las medidas de transporte sobre los patrones de movilidad son más claras y más fuertes en comparación con la interacción transporte-usos del suelo. Mientras los costes y tiempos de viaje tienden a tener un impacto negativo en la duración y frecuencia del viaje, la accesibilidad tiene el efecto contrario. La elección modal depende de la atraktividad relativa de un modo comparado con los demás. Es probable que el modo más rápido y barato, sea el que tenga una mayor participación.

3.2.4 La Interacción Transporte - Territorio

El principio fundamental del análisis y previsión del tráfico radica en que la separación espacial de las actividades de las personas, les acarrea la necesidad de desplazarse y de transportar mercancías (Wegener, 1994). Siguiendo este principio, resulta fácil entender que la aparición de zonas suburbanas de las ciudades guarde relación con la creciente división espacial de los lugares de trabajo y por supuesto, con el aumento de la movilidad.

Los principales enfoques teóricos que explican esta interacción mutua entre el uso del suelo y el transporte en las áreas metropolitanas incluyen teorías de carácter técnico (sistemas de movilidad urbana), teorías económicas (la ciudad como un mercado) y teorías sociales (sociedad y espacio urbano) (Wegener y Fürst, 1999).

Al presentarse cambios en los usos del suelo (vocación, intensidad), también se presentan cambios en las actividades humanas y en los flujos de personas y mercancías sobre dicha zona, lo que hace necesario ajustar la accesibilidad a las nuevas necesidades. Por ejemplo, al implementarse una gran infraestructura urbana de transporte (estación de tren, intercambiador, etc.), ésta generará una mayor accesibilidad a la zona, modificando de alguna manera los patrones de viaje. Los desarrollos urbanísticos (ya sean residenciales o comerciales) aumentarán y las personas realizarán más viajes desde y hacia estos lugares. Como consecuencia de este desarrollo, el precio del suelo aumentará, así como la oferta de diferentes bienes y servicios, lo que a su vez, atraerá más viajeros. Este cambio en la estructura urbana de la zona en cuestión, depende de cuánto se mejore la accesibilidad, del aumento de oferta de los bienes y servicios de la zona dada por la mejora del transporte y de las condiciones del mercado de la región.

La idea de que las decisiones acerca del transporte y del uso del suelo ejercen una influencia mutua y de que, por tanto, la planificación del transporte y del uso del suelo ha de ser un proceso coordinado nos lleva al concepto de 'ciclo autoalimentado del uso del suelo y el transporte' (Greiving y Wegener, 2001). Las relaciones implicadas en esta idea se pueden resumir brevemente de la siguiente forma (ver Figura 3.2):

- La distribución de los usos del suelo, como puede ser el uso residencial, industrial o comercial en el área urbana, determina las zonas en las que encuadran las distintas actividades del ser humano, tales como la residencia, el lugar de trabajo, las compras, la educación o el ocio.
- La distribución de las distintas actividades en un espacio determinado requiere que se produzca una interacción entre distintas zonas o que se realicen desplazamientos a través del sistema de transporte, con el fin de salvar la distancia entre las distintas ubicaciones de sus actividades.

- La distribución de la infraestructura en el sistema de transporte crea oportunidades para que se produzca la interacción espacial y se pueda medir en términos de accesibilidad.
- La distribución de accesibilidad dentro del espacio determina las decisiones sobre ubicación y esto tiene como consecuencia cambios en el sistema del uso del suelo.

Por otro lado, el impacto contrario, el que el transporte causa sobre el territorio es menos conocido. Según se describe en el capítulo 9 de *Transport Geography and Spatial Systems* (Wegener, 2003), la forma exacta en que el desarrollo de un sistema de transporte influye sobre las decisiones de localización de las personas y empresas, aún no es del todo claro. La planificación urbana ayuda a ver el desarrollo de estos fenómenos de una forma más clara.

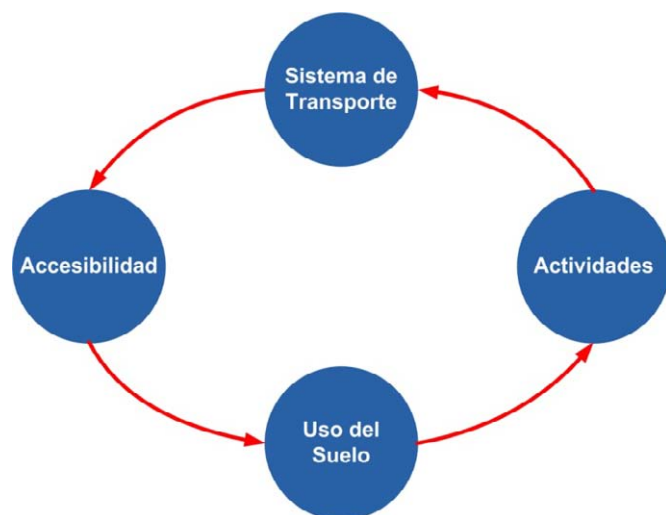


Figura 3.2 Ciclo de Retroalimentación Usos del Suelo y Transporte

Una de las razones de esta falta de información, puede hallarse en que los cambios en los usos del suelo ocurren muy lentamente debido a sus características inherentes, mientras que los cambios en los patrones de viaje ocurren más rápidamente. Habría tres formas en que el transporte puede influir sobre los usos del suelo: la primera de ellas es la mejora en la accesibilidad, la segunda se refiere al fomento de políticas complementarias de inversión y por último, promover desarrollos y crear expectativas que influyan sobre el territorio (Polzin, 1999).

Los efectos causados por políticas de transporte sobre los patrones de

transporte son mayores y más claros si se les compara con la interacción que se produce entre el territorio y el transporte. Mientras que el coste y la duración de un viaje influyen negativamente tanto en la longitud del mismo, como en su frecuencia; la accesibilidad influye en estos mismos factores de forma positiva (Wegener y Fürst, 1999). La elección del modo de transporte depende de lo atractivo que resulte un modo en comparación con el resto. Cuanto más rápido y barato sea un determinado modo de transporte, más usuarios se decantarán por él.

Investigaciones anteriores han llegado a conclusiones muy parecidas: la relación entre el transporte y los usos del suelo es clave en el momento de la planificación y ordenación urbana. Meurs y Haaijer (2001) afirman que la estructura espacial urbana puede tener efectos directos e indirectos en la movilidad y en la elección del modo de transporte: las características espaciales afectan directamente las características personales y de las familias de cierta zona residencial y tienen un efecto indirecto, en términos de accesibilidad, sobre los diversos modos de transporte. Es decir, el sistema de transporte a diseñar debe estar integrado, en lo posible, dentro del espacio urbano.

Por otro lado, Vold (2005) afirma que la implementación de estrategias integradas puede causar efectos directos e indirectos sobre el comportamiento de los viajeros, en particular si estas estrategias reducen costes por un lado y lo aumentan por otros. En la ciudad de Estocolmo, después de implementar medidas de *pricing*, se tuvo evidencia que las mejoras en los tiempos de viajes fueron lo suficientemente grandes como para que fueran percibidas por el público en general (Eliasson et al., 2009). Esto es un punto de inflexión en relación con el

cambio de actitud de los ciudadanos con miras a reformas permanente acerca de este tipo de medidas.

Como la interacción entre el uso del suelo y el transporte cada vez es más compleja, la utilización de herramientas que nos ayuden a tomar decisiones acertadas para alcanzar el objetivo general de sostenibilidad, es muy importante. Investigaciones recientes muestran que estrategias y políticas aisladas no son suficientes para alcanzar la sostenibilidad, ya que dichas estrategias deben utilizar varios instrumentos para ser exitosas (May et al., 2001). El uso de modelos y métodos de optimización son recomendables para identificar la mejor estrategia de ejecución.

Se ha mostrado en los párrafos anteriores que el desarrollo del territorio determina la necesidad de una interacción espacial con el transporte, el cual a su vez, debido a la accesibilidad que proporciona, también influye en el desarrollo territorial (Halden, 2002). Sin embargo es difícil aislar empíricamente los efectos de los usos del suelo en el transporte y viceversa, debido a la multitud de factores intervinientes. Esto supone un problema si se desea predecir los efectos de las políticas integradas de transporte y territorio en la reducción de viajes.

3.2.5 La Integración de Políticas

Actualmente se busca una mayor integración de políticas en diferentes áreas. Esto se da en un momento en que los procesos de toma de decisiones se enfrentan a la complejidad cada vez mayor como resultado de la simultaneidad de varias tendencias. Algunas de estas tendencias apuntan hacia la globalización y una mayor centralización de la toma de decisiones, mientras que otras tendencias se inclinan en el sentido contrario (Geerlings y Stead, 2003). A pesar de este enfoque, hay muy poca evidencia acerca del funcionamiento de medidas innovadoras y del proceso de innovación (Tight y May, 2006).

En el Reino Unido por ejemplo, han decidido que una política de transporte debe participar en combinación con otros sectores para ofrecer un enfoque verdaderamente integrado, de tal manera que el 'nuevo realismo' (Goodwin et al., 1991), sea un objetivo nacional. Las medidas integradas de transporte del futuro han de abarcar diversas áreas, de tal manera que se coordine un '*New Deal*' (Hine, 2000) para el transporte de tal manera que:

- La integración dentro y entre los diferentes modos de transporte sea una realidad, de forma tal que cada uno alcance su máximo potencial y la gente pueda moverse fácilmente entre ellos.
- La integración con el medio ambiente.
- La integración con la planificación de los usos del suelo, a nivel nacional, regional y local, para que el transporte y la planificación trabajen de manera conjunta, con el fin de apoyar modos de transporte más sostenibles.
- La integración con políticas de educación, salud y bienestar, de manera que el transporte contribuya a hacer una sociedad más justa e incluyente.

Las estrategias integradas de transporte han sido promovidas como un enfoque más realista y eficaz para resolver los problemas del transporte urbano, en lugar de utilizar medidas aisladas. La dificultad, desde la perspectiva de la investigación, es comprender cómo diferentes paquetes de medidas interactúan entre sí: si son una simple suma de efectos, o existen sinergias de algún tipo; y, posteriormente identificar las combinaciones más exitosas (Tight y May, 2006). May et al., (2006) exploran las sinergias en un estudio donde utiliza varios modelos. Estos resultados muestran poca evidencia de la existencia de sinergias en los

paquetes de medidas frente a los objetivos, aunque se vislumbran algunos efectos de este tipo dentro del sistema de transporte. También demuestra que la evidencia acerca del desempeño de medidas integradas es limitada, además de ser totalmente dependiente de los estudios que utilizan modelos multimodales.

El término 'sinergia' se usa de forma general para describir los efectos positivos de la interacción de diferentes medidas. A continuación se presentan cuatro definiciones principales que describen la forma en que diferentes medidas pueden combinarse: hay sinergias de complementariedad, aditividad, sinergia como tal y sustitución perfecta (Mayeres et al., 2003).

- ***Complementariedad***

Este caso se presenta cuando el uso de dos medidas resulta en un mayor beneficio que el de una sola. Esto puede representarse según la siguiente expresión:

$$\text{Beneficio } (A + B) > \text{Beneficio } (A) \text{ y};$$

$$\text{Beneficio } (A + B) > \text{Beneficio } (B)$$

- ***Aditividad***

La aditividad existe cuando el beneficio debido a la combinación de dos o más medidas es igual a la suma del beneficio obtenido de cada una de ellas de forma aislada, de acuerdo con:

$$\text{Beneficio } (A + B) = \text{Beneficio } (A) + \text{Beneficio } (B)$$

- ***Sinergia***

La sinergia ocurre cuando la combinación simultánea de dos o más medidas resulta en un beneficio mayor que la suma de los beneficios de dichas medidas, de forma separada. Esto puede representarse de la siguiente forma:

$$\text{Beneficio } (A + B) > \text{Beneficio } (A) + \text{Beneficio } (B)$$

La aditividad y la sinergia, puede considerarse como casos especiales de complementariedad.

- ***Sustitución Perfecta***

La sustitución perfecta existe cuando el uso de una medida elimina totalmente el beneficio debido a otra medida. Esto puede representarse según la siguiente expresión:

$$\text{Beneficio } (A + B) = \text{Beneficio } (A) = \text{Beneficio } (B)$$

En este caso, el término 'beneficio' se utiliza de forma genérica con el fin de reflejar todo el rango de beneficios netos debido a la implementación de un determinado conjunto de medidas. Este beneficio puede obtenerse por cualquier metodología, pero debe estar relacionado directamente con los objetivos propuestos.

La mayoría de medidas tendrán por lo menos una pequeña contribución positiva dentro del objetivo final, que es alcanzar un desarrollo sostenible (Minken et al., 2002). Estos efectos positivos pueden percibirse en la reducción de tiempos de viaje, en el impacto ambiental o en los accidentes, aunque también es posible que tengan efectos negativos en la accesibilidad o la equidad.

Como complemento a la definición de sinergia, en la Tabla 3.3, extraída de *A Decision Makers' Guidebook* (May et al., 2005), se muestra el posible valor agregado que puede tener una integración de diferentes tipos de medidas. Esta información debe ser tomada como referencia y sólo sirve como una guía general de diseño, aunque puede ayudar a estimular a los responsables políticos a considerar un rango más amplio de soluciones a los problemas del transporte.

Tabla 3.3 Integración de Medidas

Medidas	Contribución de Medidas					
	Usos del Suelo	Infraestructuras	Gestión	Información	Comportamiento	Pricing
Usos del Suelo		+				+
Infraestructuras	+ ●		◆			◆
Gestión	+ ●	+ ◆ ●			+	+ ◆ ●
Información	+	+ ◆	+ ◆ ●			+ ◆ ●
Comportamiento	+ ◆	+ ◆	+ ◆		+	◆
Pricing	+ ●	+ ■ ●	+ ■ ●	■ ◆	+	

+ Refuerzo de beneficios.

■ Reducción de barreras financieras.

◆ Reducción de barreras políticas.

● Compensación para "perdedores".

Por otro lado, resultados particulares de investigaciones recientes (Shepherd et al., 2006 y Zhang et al., 2006), han demostrado la importancia de los cambios tarifarios del transporte público, de sus niveles de servicio y de la aplicación de sobrecostes al uso del coche, como elementos que mejoran el funcionamiento del sistema de transporte. También emergen una serie de recomendaciones a partir de proyectos de investigación europeos y literatura teórica en diversos campos (Geerlings y Stead, 2003):

- **Toma de Decisiones.** Algunos proyectos recientes han revisado desde enfoques y contextos diferentes, mecanismos de toma de decisiones y han demostrado la gran variedad que existe. Es necesario investigar más en este tema, en particular para los países menos desarrollados.
- **Medidas e Integración.** Investigaciones recientes han ayudado a comprender mejor el funcionamiento de diferentes estrategias de transporte. Sin embargo, es necesario una mayor comprensión acerca de la transferibilidad de resultados de un contexto a otro. Más importante aún, la comprensión de cómo integrar las diversas medidas está en sus etapas iniciales, en particular en las áreas de transporte, usos del suelo y medio ambiente.
- **Barreras.** Algunos proyectos han identificado diferentes tipos de obstáculos para una implementación eficaz de las políticas, aunque aún es necesario estudiar estrategias que puedan ser más exitosas. Las principales áreas de preocupación son las finanzas y la aceptación pública.
- **Mejores Prácticas.** Las investigaciones actuales se han centrado más en las medidas que hay que implementar, que en la forma de hacerlo. Todavía existe una comprensión

limitada acerca de lo que hace que una medida sea exitosa en un sitio y en otro no, quedando un vacío importante en la forma de transferir la experiencia de las mejores prácticas.

El desarrollo de medidas innovadoras es un aspecto muy importante para la comprensión del transporte urbano y su integración con otras áreas. Ongkittikul y Geerlings (2006) hablan sobre los cambios de regulación en Gran Bretaña y Holanda relacionados el transporte público. Su estudio investigó un periodo de cambio bastante radical en Gran Bretaña debido a la desregularización y lo comparó con un periodo más moderado en cuanto a cambios en Holanda. Este periodo incluía la descentralización de competencias hacia las autoridades provinciales y la introducción gradual de las licitaciones para concesiones. En este caso, los autores dicen que las reformas más radicales apuntan hacia desarrollos más innovadores, no solo para la explotación del servicio, sino también para el desarrollo de la infraestructura y del material móvil.

La conclusión que se desprende del estado de arte de este tema, es que el paradigma de la sostenibilidad debe ser compartido (en implementación y control) por parte de todo el sector público, si se desea lograr un cambio importante en los resultados de un transporte sostenible (Hull, 2008).

3.3 LA MODELIZACIÓN INTEGRAL DE LOS USOS DEL SUELO Y EL TRANSPORTE

El uso de una plataforma de sistemas dinámicos para la modelización del transporte se justifica por el hecho de que la interacción entre ambos sistemas (transporte y territorio) es en doble sentido y cambia continuamente debido a su ciclo de retroalimentación. Hay muchas formas de modelar las relaciones entre los elementos de este sistema. La más conocida es sin duda la llamada dinámica de sistemas, desarrollada en el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) en los años cincuenta.

De acuerdo con esta metodología siempre se puede representar cualquier proceso, no importa cuál sea su naturaleza, por medio de una red o grafo cuyos nodos o vértices son procesadores elementales y cuyos arcos representan las conexiones e interrelaciones que aseguran los flujos entre los diferentes procesadores que garantizan que el sistema sea activo y que sus diferentes subsistemas evolucionen simultáneamente (Sarabia, 1995).

La interacción entre los usos del suelo y el transporte tiene implicaciones que solo pueden percibirse a largo plazo, lo cual hace que en un escenario temporal un concepto no pueda tenerse en cuenta sin el otro (Lautso et al., 2004). Es decir, que es necesario una determinada accesibilidad para la generación de una actividad en un espacio dado, pero al mismo tiempo, un incremento de la accesibilidad crea una mayor atractividad en la localización de actividades en dicha zona. Sin una conceptualización de esta interacción, nuestra visión quedaría estática, por tanto se asume que existe una interacción dinámica entre ambos sistemas.

Sin embargo, esa interacción tiene diferentes velocidades de cambio. Esto quiere decir que mientras el cambio en la configuración de los usos del suelo o en la red de infraestructuras de transporte es relativamente lento, éstos producen transformaciones en la localización de actividades algo más rápidas y a su vez, esta relocalización induce a cambios en las pautas de movilidad aún más rápidas. En definitiva, las velocidades de cambio de un sistema y otro son diferentes. La velocidad de cambio del sistema de transporte, por lo menos en cuanto a la demanda se refiere, es rápida, mientras que la velocidad de relocalización de actividades derivadas de un cambio en las infraestructuras u oferta de transporte es mucho más lenta (ver Figura 3.3). Estas diferencias de velocidades de cambio es otro de los principales argumentos para el uso de sistemas dinámicos.

De esta manera, el interés actual por los modelos integrados está motivado por los siguientes factores (Kriger et al., 1999):

- Reconocer que mientras el transporte y los usos del suelo están estrechamente relacionados, aún son limitados los medios para analizar esta situación. Esto es especialmente claro en la relación entre transporte público y usos del suelo.
- Los requerimientos legislativos que buscan mejorar la calidad del aire, necesitan una adecuada comprensión y por tanto, representación de la cadena de interacciones transporte-usos del suelo-calidad del aire y del papel que el transporte público puede jugar como una alternativa viable al transporte privado.
- Reestructuración del proceso de estimación de la demanda de viajes.

Para abordar estas necesidades, es necesario disponer de una herramienta que incluya elementos en donde se puedan probar los impactos de las inversiones del transporte en los usos del suelo (y viceversa), el impacto de políticas urbanas (como por ejemplo ciudades compactas o dispersas) y las respuestas a mecanismos de gestión de la demanda, vistos desde el punto de vista del comportamiento de los usuarios.

La interacción general en el sistema transporte-territorio, así como la velocidad en que los cambios son producidos, se puede ver en la Figura 3.3, donde los ocho subsistemas mostrados interactúan entre sí debido a las múltiples relaciones con su entorno. Por ejemplo, la localización de puestos de trabajo, depende de la localización de empresas, de los clientes y los trabajadores, teniendo en cuenta su acceso al transporte de bienes y viajeros, además de la disponibilidad de suelo, servicios públicos y vivienda. Estos subsistemas son en parte influenciados por el mercado y en parte por las políticas de regulación (Wegener, 1994).

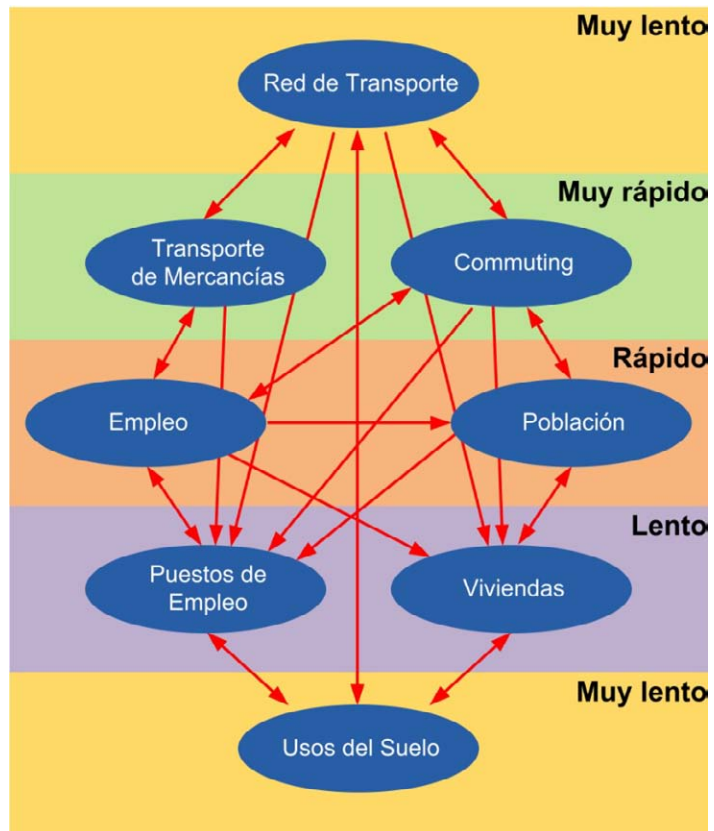


Figura 3.3 Ritmo de Cambios en el Sistema Usos del Suelo y Transporte

Fuente: Wegener (1999).

Además, esta interacción, a través de un sistema dinámico permite obtener trayectorias para las variables incluidas en el modelo mediante la aplicación de técnicas de integración numérica. Sin embargo, estas trayectorias nunca se interpretan como predicciones, sino como **proyecciones** o **tendencias**. La ventaja de usar un sistema dinámico consiste en este caso, en que estas acciones pueden ser simuladas, con lo que es posible valorar sus resultados sin necesidad de ponerlas en práctica sobre el sistema real.

La predicción de los impactos de medidas integrales es una tarea difícil debido a la multitud de cambios simultáneos de las variables del sistema. En general estos impactos se podrían predecir de tres maneras (Wegener y Fürst, 1999): el primero consiste en preguntar a la gente su posible reacción frente a algunos cambios posibles; como por ejemplo, el aumento de los costes del transporte o las restricciones en el uso del suelo (encuestas de preferencia declarada). La segunda posibilidad es extraer conclusiones del comportamiento observado empíricamente basándose en datos recolectados (preferencia revelada). La tercera forma consiste en utilizar modelos matemáticos que simulen las decisiones tomadas y sus consecuencias. Si bien estas tres posibilidades de análisis tienen ventajas y desventajas, los modelos matemáticos son la única herramienta que puede predecir situaciones aún no conocidas.

Uno de los procesos complejos en la modelización de grandes áreas urbanas con fines de planificación, es la de representar adecuadamente la interacción entre el sistema de transporte y la distribución espacial de las actividades residenciales y no residenciales, ya que esta conexión es de doble sentido (Martínez et al., 2009). Esta modelización integral tiene el potencial de lograr beneficios de diferentes maneras. La primera de ellas es involucrar medidas que se complementen en sus impactos sobre los usuarios (sinergias). La segunda forma involucra medidas que haga posible que otras puedan realizarse (el cobro de una tarifa por congestión para aumentar los servicios del transporte público). La tercera consiste en la aceptabilidad por parte de la sociedad.

En términos simples, los modelos de transporte requieren como inputs, datos de los usos del suelo, que anteriormente se obtenían de forma exógena, mientras que los modelos LUTI (*Land Use Transport Interaction*) generan sus propios datos y se retroalimentan, con base en las medidas aplicadas y en los cambios ocasionados por el modelo de transporte (DETR, 2005).

En resumen, el comportamiento de un sistema dinámico no es solo un elemento, sino un conjunto de relaciones. De los parámetros que intervienen, algunos son internos, inherentes al sistema en sí. Pero también los hay externos: variables exógenas.

3.3.1 Modelos LUTI

En los años 50 nació la idea de que los modelos computacionales de usos del suelo y transporte urbano podrían contribuir a una planificación urbana más racional. Esto podría haber representado el ambicioso deseo de entender más profundamente el complejo mecanismo del desarrollo urbano y de esta manera, poder predecir y tener un mayor control sobre el desarrollo de las ciudades. A partir de este punto, nacieron los modelos LUTI (por sus siglas en inglés, *Land Use Transport Interaction*).

Las relaciones del transporte con otros elementos del territorio llevaron a poner dentro de un modelo los flujos de personas y mercancías, considerando los viajes y su relación con su entorno territorial, como viviendas, servicios y empleos, entre otros. Estos modelos de tipo integral, son capaces de predecir los usos del suelo, la evolución de la población y de la economía en el área de estudio. Al referirse a un sistema 'integrado', se hace referencia a un sistema de retro alimentación entre el sistema de transporte y el de sistemas de usos del suelo urbano. Ver Figura 3.4.

De acuerdo con la localización de las viviendas y de los puestos de trabajo, el sistema de usos del suelo alimenta al de transporte mediante el volumen de viajes que dichas zonas generan. El sistema de transporte representa las infraestructuras físicas y los servicios proporcionados por los diferentes modos de transporte. El sistema de usos del suelo representa los tipos e intensidades de actividades localizadas en cada área de estudio, así como el área física de la ciudad y sus infraestructuras inherentes a dicho servicio. Los costes de los viajes entre cada par origen-destino, resultantes de la interacción entre estos dos sistemas, son necesarios

para alimentar los modelos de localización residencial y de empleos. Esta interacción permite que los cambios producidos en el sistema de transporte afecten los usos del suelo, lo que a su vez retroalimenta el sistema.

Un paso más adelante en este tipo de modelos consiste en la generación de viajes basándose en las actividades, pero es necesario una información más detallada de la demografía y las características socioeconómicas. Además, es necesario que los modelos predigan los impactos medioambientales de las políticas de usos del suelo y transporte aplicadas (Bowman y Ben-Akiva, 2000). Los modelos varían en su nivel de sofisticación y tecnología y se están aplicando en las áreas metropolitanas con el propósito de evaluar estrategias de desarrollo urbano (Hatzopoulou y Miller, 2009).

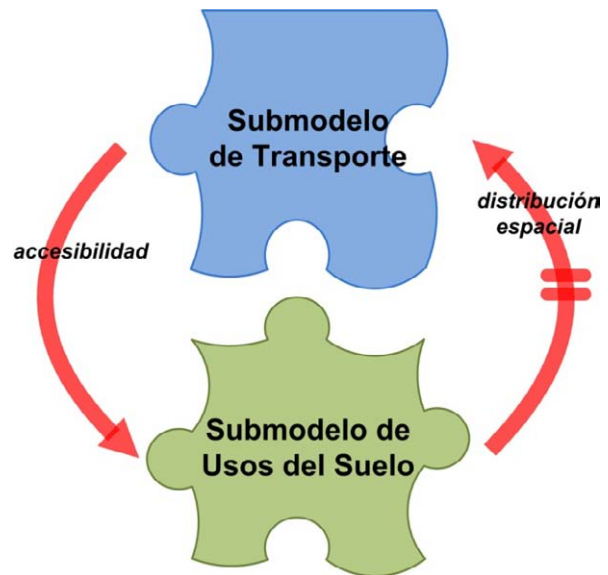


Figura 3.4 Diagrama Agregado de Usos del Suelo y Transporte

La teoría económica moderna de los usos del suelo urbano empezó con los trabajos de Wingo y Alonso en 1961 (Wingo, 1961). Este modelo propone el principio de 'complementariedad' entre los costes de transporte y costes de vivienda: "cualquiera que sea la ubicación de un hogar, el dinero gastado en transporte y alquiler será el mismo". Esta afirmación se basa en la hipótesis que el territorio es homogéneo, que todos los hogares son iguales en alquiler y preferencias, que los empleos y servicios se concentran en el centro, que los precios de los bienes son los mismos en todo lugar excepto la renta y que el coste del transporte es una función lineal de la distancia al centro.

En 1964, la teoría de la localización de Alonso, dice que la localización residencial obedece a la maximización de la utilidad del individuo, sujeta a la restricción impuesta por su nivel de ingresos (Alonso, 1964). También dice que los gastos de una persona dependerán de su localización.

Aunque estos modelos no estaban orientados a la planificación, su teoría ha conducido a modelos más innovadores. En 1960 el modelo de Herbert y Stevens (1960) fue el primero que se basó en los principios económicos aplicados a un área metropolitana real.

Uno de los modelos más usados en el área de integración espacial y localización de actividades, debido a su sencillez, es el modelo de metrópolis de Lowry desarrollado en 1964 (Lowry, 1964). Este modelo relaciona varios submodelos entre sí de forma iterativa, lo que permite modelar estructuras más complejas.

Aunque se han desarrollado diferentes versiones y expansiones de este modelo, Garin (1966) mejoró este modelo en varios aspectos. Éste demostró que las relaciones entre empleo y residencia y entre residencia y servicios, son flujos de transporte, cuantificando dichos flujos. Este es un modelo operacional que logra reproducir distribuciones espaciales observadas de las distintas actividades y analizar los impactos de los cambios regionales.

A su vez, este modelo fue mejorado por Echenique (1975) cuando desarrolló su modelo MEP (de stocks y actividades), el cual incluye un proceso de localización de stocks y se permite la

desagregación de la población por su nivel económico y sus modos de viajes. La última versión de este modelo se conoce como MEPLAN y se usa en la actualidad.

En general, todos los modelos integrales requieren algún nivel de agregación de las principales variables: grupos socioeconómicos, tipos de edificaciones, zonificación del área de estudio, tipos de actividades y periodos de tiempo, entre otros. Uno de los problemas de la modelización es cómo agregar la compleja información asociada con el patrón de viajes, teniendo en cuenta para cada viaje el beneficio de la interacción de las actividades en el destino y su coste final (Hunt et al., 2005). La simplificación más generalizada es reducir a un único tipo de viaje, por ejemplo el viaje al trabajo.

Los modelos actuales incorporan los procesos más importantes del desarrollo espacial, incluyendo transporte y usos del suelo. Muchos de los submodelos de transporte no aplican técnicas avanzadas de modelización basadas en actividades, sino que utilizan el método tradicional del modelo de cuatro etapas, el cual según algunos autores (Recker, 2001), no es muy conveniente para la modelización del comportamiento derivado de las diferentes políticas de gestión de la demanda usadas en la actualidad. En este mismo sentido, Ortúzar y Willumsen (2008) critican que este tipo de modelo se centra en un solo espectro limitado de las decisiones que pueden adoptar los usuarios. Es por esto que la tendencia actual es analizar una gama más amplia de respuestas a los problemas de este tipo, especialmente porque a largo plazo se pueden tener comportamientos mucho más complejos que este tipo de modelos no recogería.

En la actualidad existen diversas alternativas para modelizar las interacciones entre el transporte y el territorio. Entre unos y otros existen variaciones significativas relacionadas con la estructura general, la integralidad, los fundamentos teóricos, las técnicas de modelización, la dinámica, las necesidades de información y la calibración. A pesar de los avances en este campo, aún quedan algunos retos por superar.

Por tal motivo, en este punto se hará una breve referencia a cuatro de los modelos más reconocidos, con el fin de conocer las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, sin que esto signifique necesariamente que uno sea mejor que otro. Estos modelos, *MEPLAN*, *TRANUS*, *MUSSA* e *ITLUP*, se describirán brevemente según su representación física, aplicación, procesos y toma de decisiones. Estos modelos han sido comparados con anterioridad en publicaciones anteriores (Hunt et al., 2005 y Sivakumar, 2007).

MEPLAN

Este es un modelo agregado que adopta muchos conceptos de la teoría de los modelos monocéntricos (Anas, 1987). Este modelo incluye los tiempos de viaje y su coste, precios del suelo, el ingreso y la elasticidad de la demanda del suelo. Se caracteriza principalmente por:

- El transporte es una demanda derivada de las interacciones económicas entre las actividades.
- El transporte ejerce una influencia sobre la localización de actividades. De esta manera, los cambios en el transporte hacen que los lugares sean más accesibles, aumentando así la demanda de productos, servicios y trabajos producidos en dichos lugares.
- Los usos del suelo y el transporte son tratados como mercados donde la interacción entre la oferta y la demanda establece el precio del transporte y del suelo.

Otra característica principal consiste en una matriz input/output espacialmente desagregada y ampliada con el fin de incluir factores adicionales, como espaciales y de empleo (Hunt et al., 2005). En este modelo se establece una estructura urbana con cuatro niveles de desagregación. El primer nivel lo forman las actividades humanas (trabajar, estudiar,

comprar) y los stocks físicos (suelo con destinación a varios usos, edificios y canales de comunicación). En el segundo nivel se encuentra dos tipos de actividades: las que se desarrollan en un determinado lugar, llamadas localizadas (residir, trabajar) y las llamadas actividades de flujo (viajar) que se llevan a cabo entre lugares. En este mismo nivel, los stocks físicos se dividen en espacios adaptados (donde se desarrollan las actividades localizadas) y los canales de comunicación (donde se distribuyen los flujos). Los flujos producidos entre las actividades se pueden modelizar por medio de modelos sencillos como generación-atracción; sin embargo, para modelizar las complejas relaciones del tercer nivel, son necesarios modelos de tipo integral.

En 1997 se desarrolló una aplicación de MEPLAN en la Comunidad de Madrid, conocido como MECAM. Este modelo ha servido de herramienta de análisis económico y planificación territorial en varios estudios en Madrid, destacando las nuevas autopistas de peaje y el Plan Regional de Estrategia Territorial de la Comunidad de Madrid.

En general, *MEPLAN* es flexible y su análisis está basado en teorías económicas sólidas. La utilización de modelos logit de comportamiento es interesante en la práctica y en la teoría, haciendo que la interpretación de los resultados y la selección de los parámetros sea relativamente sencilla. El uso de la teoría de maximizar la utilidad de los hogares es coherente con la literatura de las ciudades monocéntricas y el uso de matrices input/output, hace que sea fácil aplicarlo a problemas regionales.

Su modelo de transporte, permite examinar en detalle la planificación de las infraestructuras de transporte, lo que produce resultados prácticos a los problemas planteados.

TRANUS

Este modelo combina varios modelos, como el de la localización de actividades, usos del suelo y el mercado inmobiliario con un modelo multimodal de transporte flexible. La utilización conjunta de estos dos modelos es lo que genera los mayores beneficios, aunque el componente de transporte puede utilizarse independientemente. Las principales características del sistema son (www.modelistica.com):

- Modelo de transporte con capacidad para representar los movimientos de carga y/o pasajeros con intermodalidad.
- Tiene un proceso de asignación multimodal probabilística tipo logit.
- Puede realizar evaluaciones económicas, financieras y ambientales.
- Es posible aplicarlo a cualquier escala, desde urbano detallado hasta modelos regionales y nacionales.

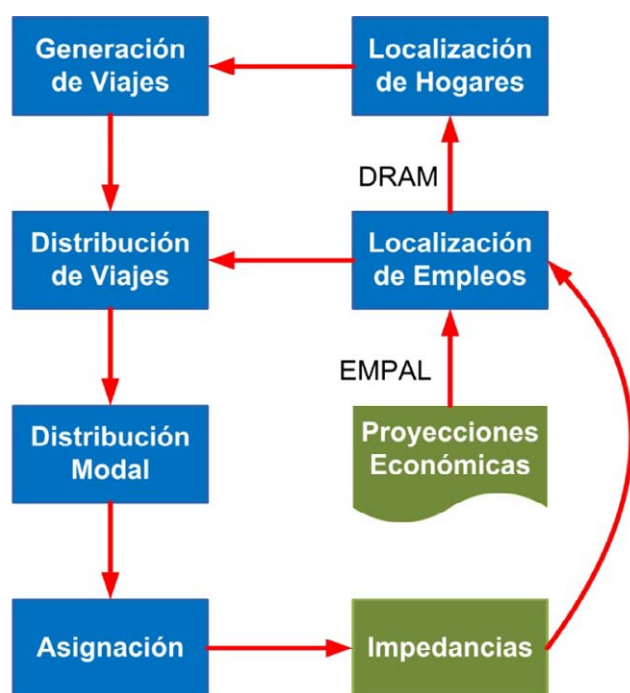
La característica más destacable del sistema es la forma verdaderamente integrada en que se representan los principales componentes del sistema urbano o regional, tales como la localización e interacción de actividades, el mercado inmobiliario y el sistema de transporte. De esta manera el fenómeno de la movilidad de personas y mercancías se explica por las relaciones económicas y espaciales entre las actividades que las generan. A su vez, la accesibilidad que resulta del sistema de transporte afecta la forma en que interactúan las actividades entre sí, se localizan en el espacio e interactúan con el sistema inmobiliario.

Integrated Transportation and Land Use Package (ITLUP)

Este modelo fue desarrollado y aplicado por el profesor Stephen Putman de la Universidad de Pennsylvania, hace cerca de 25 años. El modelo está desarrollado como una extensión del

modelo de Lowry y consta de tres componentes internos conocidos como *EMPAL* (modelo de locación de empleo, por sus siglas en inglés), *DRAM* (modelo de localización residencial desagregado) y la demanda de viajes (ver Figura 3.5).

- *EMPAL*. A partir de una proyección económica externa, su función es predecir la localización de los puestos de empleo en cada zona de estudio.
- *DRAM*. Con el proceso anterior, en este módulo se calcula la ubicación de los hogares generalmente como una función descendente basada, entre otros factores, en el tiempo de viaje. Posteriormente, se calculan los tiempos casa-trabajo, casa-compra y trabajo-compra.
- *Demanda de Viajes*. Es el modelo clásico de cuatro etapas, el cual proporciona información acerca de la impedancia (basada en la distancia), la localización de empleos y la asignación de viajes.



ITLUP trabaja también con un logit multinomial para el submodelo de distribución modal, así como un submodelo de asignación de viajes que puede soportar varios tipos de algoritmos de red. La generación y distribución de viajes se hace por medio de *DRAM*, a la vez que la localización residencial. Aunque *DRAM* y *EMPAL* trabajan separadamente, actualmente tienen interfaces de conexión con software de transporte como EMME/2 o TRANSPLAN. Comparado con otros modelos, es conciso en cuanto a los requerimientos de información, lo puede ser una ventaja en cuanto a su recolección. Pero por otro lado esto puede verse como una debilidad del modelo, ya que no se tienen en cuenta otros parámetros, como por ejemplo el mercado o precio del suelo (Hunt et al., 2005).

Figura 3.5 Integrated Transportation and Land Use Package

Modelo de Uso de Suelo de Santiago (MUSSA)

MUSSA es un software y un modelo matemático, desarrollado por la Universidad de Chile, el cual representa el mercado inmobiliario urbano y permite predecir y simular sus estados de equilibrio económico ante una gran variedad de posibles escenarios.

El modelo utiliza un enfoque microeconómico para representar el comportamiento de la oferta y la demanda inmobiliaria y el equilibrio económico que ellos alcanzan. Los gustos y percepciones propias de los distintos agentes, las restricciones que actúan sobre ellos y sus interacciones y muy especialmente las externalidades, son consideradas por el modelo para efectuar sus predicciones (Martínez, 1997).

El comportamiento de la demanda y la oferta, el equilibrio económico de ellas y sus restricciones, tienen una fundamentación económica rigurosa. A continuación se hace una breve descripción de sus principales fundamentos (Universidad de Chile, 2009).

- *Comportamiento de la Demanda.* Según el modelo, todo consumidor en el mercado inmobiliario urbano, se localiza en aquel inmueble donde su posición supera a la de todos los demás postores de tal bien, de manera que los inmuebles son asignados a su uso según una regla del que más esté dispuesto a pagar. Este remate es una característica propia de los mercados donde se transan bienes únicos, que no se pueden producir en serie, como es el caso del suelo. Según esta perspectiva, las posturas son las funciones que definen el comportamiento de la demanda, son propias de cada consumidor y, a diferencia de otros mercados económicos, determinan los precios de los bienes transados. En particular, se consideran atributos socioeconómicos y otros que definen el ciclo de vida de los hogares y la calidad de las viviendas y de sus barrios, en términos de su accesibilidad al sistema de transporte, su calidad medio ambiental y las externalidades de localización, como el nivel socioeconómico de sus residentes, su nivel de equipamiento o la existencia de ciertos tipos de actividades industriales molestas.
- *Comportamiento de la Oferta.* En este caso, los desarrolladores inmobiliarios deciden el número de inmuebles de cada tipo que deben generar en cada zona de la ciudad, teniendo en consideración los costes que ello significa y los ingresos que percibirían, basados en los valores esperados de las rentas inmobiliarias. Considerando estos antecedentes, el modelo de oferta inmobiliaria está basado en un análisis de la tendencia histórica de la oferta inmobiliaria y la variedad de ofertas y rentas inmobiliarias que ocurren en la ciudad. En consecuencia, para cada periodo de tiempo y dado un nivel de rentas de los inmuebles, este modelo predice la distribución de la oferta por zona y tipo de vivienda
- *Regulaciones, Subsidios e Impuestos.* El modelo incluye herramientas que permiten simular la influencia que ejercen en el desarrollo del mercado inmobiliario la existencia de normativas legales que regulan o restringen la oferta inmobiliaria y la localización de actividades en cuanto a variedad y en concentración espacial. Adicionalmente, permite que el usuario incorpore instrumentos de gestión urbana destinadas a incentivar (subsidijs) o no (impuestos), la localización de actividades en la ciudad.
- *Equilibrio Económico.* El modelo predice para un periodo de tiempo dado el estado factible de equilibrio entre la oferta y la demanda en el mercado inmobiliario, entendiendo que este estado representa el componente tendencial del estado real del mercado inmobiliario. Se asume que la modificación de un conjunto de variables en un periodo futuro, provocará que la oferta y la demanda inmobiliaria se ajusten tratando de alcanzar el equilibrio. El modelo reconoce la existencia de un conjunto de restricciones que actúan sobre la oferta y demanda inmobiliaria y que condicionan o incluso, en casos extremos, llegan a impedir el equilibrio en el mercado. Estas restricciones pueden agruparse en dos grandes tipos: restricciones sobre la oferta y sobre la localización de actividades.
- *Interacción con el Sistema de Transporte.* El modelo ha sido diseñado para ser compatible con un modelo de transporte de cuatro etapas, tanto en los principios económicos que caracterizan a la oferta y la demanda inmobiliaria, como en los niveles de agregación con las cuales ellas son tratadas. Esta compatibilidad permite la interacción entre ambos modelos ya que la información de uso de suelo que utiliza el modelo de transporte es suministrada por éste, en particular para la evaluación de los modelos de generación y atracción de viajes y, como retroalimentación, el modelo de transporte entrega información a *MUSSA* para el cómputo de las medidas espaciales de accesibilidad y atractividad del sistema urbano de transporte. En general, este modelo puede interactuar con cualquier modelo de transporte que le entregue alguna medida o índice de

los niveles de accesibilidad y atractividad en cada zona. La única condición es que estas medidas sean concordantes con la noción de accesibilidad que perciben los residentes y empresas.

Comparación de los Modelos Existentes

Es seguro que cada modelo tiene un gran grupo de seguidores, así como detractores. En la Tabla 3.4 se hace un resumen en donde se comparan estos modelos según su utilidad y aplicabilidad.

Históricamente este tipo de modelos han tenido la tendencia a ser agregados espacialmente, y los que no lo son, su nivel de desagregación ha hecho que sea muy difícil y costoso alimentarlos. Sin embargo, la tendencia actual es refinar un poco esa zonificación tan amplia que se daba anteriormente, como es el caso del modelo utilizado en esta Tesis Doctoral, cuya descripción general se verá en el Capítulo 5 y en detalle en el Anexo 4. En general, todos los modelos están en capacidad de analizar y evaluar diversas políticas urbanas.

Tabla 3.4. Resumen General de los Modelos

Modelo	Requerimientos	
	Información	Salidas
TRANUS	Un poco más sencillo que MEPLAN. Tiene un importante requerimiento de información, pero su calibración es más sencilla que en MEPLAN.	Completo módulo de evaluación económica (tiempos, beneficios, flujos, precios)
MUSSA	Relativamente sencillo en los requerimientos de información. Se puede calibrar con datos de un año. Los recursos para aplicarlo en una ciudad fuera de Santiago no son claros. El modelo asume la existencia de un buen modelo de transporte de cuatro etapas.	Las salidas son almacenadas en una base de datos (Access), lo que facilita la interacción con otros modelos. Se puede evaluar una amplia gama de políticas de transporte y territorio.
MEPLAN	Estructura compleja. Tiene importantes requerimientos en cuanto a información y calibración. Es mucho más completo que TRANUS.	Completo módulo de evaluación económica (tiempos, beneficios, flujos, precios)
ITLUP	Estructura sencilla, fácil calibración y poco esfuerzo en conseguir información.	Con la interfaz de ArcView, se pueden obtener salidas gráficas en Windows

Fuente: Hunt et al., (2005).

3.3.2 Éxitos y Fracasos de la Integración

Los siguientes hallazgos de medidas de usos del suelo y transporte exitosas basadas en teorías, estudios empíricos y modelizaciones, pueden resumirse de la siguiente forma (Wegener y Fürst, 1999):

- Las medidas de usos del suelo y transporte tienen éxito con respecto de criterios esenciales de la movilidad sostenible (reducción de distancias y tiempos de viaje, y reducción de la dependencia de vehículo privado), si se hace que el uso del coche sea menos atractivo; es decir, más caro o más lento.
- Las medidas de usos del suelo orientadas a aumentar la densidad urbana o el suelo de uso mixto, sin acompañamiento de medidas que hagan el uso del coche menos atractivo, estarán condenadas a que sus efectos sean inocuos, ya que la gente continuará haciendo viajes largos tratando de maximizar sus oportunidades dentro de sus presupuestos de

viaje (tiempo y costes). Sin embargo, la mayor importancia de estas medidas se encuentra en el largo plazo, ya que su implantación proporciona las condiciones previas para una menor dependencia del coche en el futuro.

- Las medidas de transporte orientadas a hacer del coche un modo menos atractivo son muy eficaces en el logro de los objetivos de reducir las distancias y tiempos de viaje, así como su participación modal. Sin embargo, su efectividad también depende de una estructura espacial que no esté muy dispersa.
- Las grandes superficies comerciales y de ocio, generalmente ubicadas en las periferias urbanas, aumentan las distancias de recorrido en coche, así como uso. Las medidas de usos del suelo encaminadas a prevenir el desarrollo de este tipo de servicios, son más eficaces que las medidas de tipo ordenación (aumento de densidades y usos mixtos).
- Los temores relacionados con que las medidas de usos del suelo y transporte sean destinadas exclusivamente a limitar el uso del coche en los centros urbanos, son perjudiciales para la viabilidad económica de dichas zonas.
- Las políticas generales destinadas a mejorar el transporte público, no conducen a una reducción significativa del uso del coche, si no van acompañadas de otras medidas complementarias.

En resumen, al comparar las medidas de usos del suelo y de transporte, las de transporte son mucho más directas y eficientes en el logro de un transporte urbano sostenible. Sin embargo, un acompañamiento y apoyo a medidas de usos del suelo en el largo plazo, es esencial para el desarrollo de ciudades no dependientes del coche.

Es por esto que el renacimiento de la idea central de una política renovada de integración de medidas, puede suponer un cambio de paradigma de una movilidad sostenible (Banister, 2008). Sin embargo, es de esperar, que al igual que en el pasado, las políticas de transporte se seguirán utilizando como medida correctora a situaciones en donde sus aplicaciones tienen efectos limitados. En este caso habría que admitir que la expectativa del desarrollo del transporte sostenible, asociado a la idea de una política integrada, se enfrenta a factores limitantes, en las condiciones actuales de la sociedad (Schöller-Schwedes, 2010).

3.4 RESUMEN Y DISCUSIONES

Al revisar el estado del arte de la integración y planificación transporte-territorio, es claro que los asuntos que tienen que ver con el medio ambiente y la igualdad social jugarán un papel muy importante en el futuro, cuando se analicen en mayor profundidad. La ya descrita en múltiples ocasiones, insostenibilidad del estilo de vida y de los patrones de movilidad actuales de las zonas urbanas modernas, es motivo suficiente y necesario para que esta tendencia cobre cada vez mayor vigencia. También es claro que existe una aceptación generalizada acerca de que las decisiones tomadas a través de la integración de estos elementos, son cruciales para alcanzar un desarrollo sostenible.

En Europa, la planificación integral está ganando cada vez más atención y la necesidad de implementar estrategias integrales es evidente. La situación actual exige nuevas formas de planificación, de cooperación y de participación gubernamental, basadas en nuevas ideas, como una gestión más eficiente de la red de transporte y de los nuevos asentamientos urbanos, haciendo uso de las nuevas tecnologías y regulaciones, sin permitir caer en la especulación urbana. Esta tendencia, que se ha desarrollado a lo largo de la última década, debe revertirse para evitar prácticas antiguas, centrándose en el desarrollo de estrategias descentralizadas y autónomas, según las necesidades del caso.

En general la línea actual de políticas en el sector transporte es muy conservadora, ya que muchos de sus esfuerzos se orientan en el refuerzo de medidas tradicionales, es decir, restringir el uso del coche y aumentar la oferta de transporte público, muchas veces sin tener en cuenta la estructura y la forma de crecimiento de la ciudad, dando a lugar sistemas de transporte público subutilizados y con la necesidad de grandes subvenciones.

En la actualidad hay una serie de investigaciones internacionales que se ocupan de encontrar mejores métodos de aplicación de estrategias integradas para el desarrollo de una movilidad urbana sostenible (EU, 2010). El desafío ahora es garantizar que los resultados de este tipo de investigaciones sean explotados al máximo en los próximos años, permitiendo el intercambio ágil y eficiente de información, la búsqueda de consensos acerca de las mejores prácticas y promover la introducción de nuevas medidas y herramientas en la planificación urbana, como la aquí desarrollada.

En un análisis final, se ha visto que nunca se debe separar la planeación del transporte de la planeación urbanística. El objetivo principal de este análisis integrado es alcanzar o preservar una movilidad sostenible, pero a su vez reducir la necesidad del transporte, en el sentido de reducir el número de viajes y su longitud, para así mejorar la congestión, el consumo energético y las emisiones, entre otros impactos.

CAPÍTULO 4.

OPTIMIZACIÓN: HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE POLÍTICAS SOSTENIBLES DE TRANSPORTE

TABLA DE CONTENIDO

4.1 INTRODUCCIÓN	59
4.2 SISTEMAS DINÁMICOS	61
4.2.1 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA	61
4.2.2 DIAGRAMA CAUSAL Y CICLO	62
<i>Variables de Nivel</i>	64
<i>Variables de Flujo</i>	64
<i>Variables Auxiliares</i>	65
4.3 OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DINÁMICOS	66
4.3.1 MARCO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	68
4.3.2 ENFOQUE INTEGRAL PARA EL ANÁLISIS DE POLÍTICAS EN MODELOS DINÁMICOS	68
4.3.3 OPTIMIZACIÓN SIN DERIVADAS	69
<i>Métodos de Búsqueda Directa</i>	70
<i>Método Simplex</i>	70
<i>Método de Patrones de Búsqueda</i>	71
4.3.4 DIRECCIONES CONJUGADAS.....	71
4.3.5 MÉTODO DE POWELL.....	74
<i>El Algoritmo de Optimización</i>	75
<i>El Método de Powell Modificado</i>	76
<i>Limitaciones del Método</i>	77
<i>Ventajas del Método</i>	78
4.4 EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	79
4.4.1 DISEÑO DE ESTRATEGIAS ÓPTIMAS DE TRANSPORTE.....	80
4.4.2 FUNCIONES OBJETIVO	80
<i>Función de Bienestar</i>	82
<i>Función de Sostenibilidad</i>	83
4.4.3 RESTRICCIONES	84
4.4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	84
4.5 RESUMEN Y DISCUSIONES	85

4.1 INTRODUCCIÓN

En los procesos de toma de decisiones dentro de la planificación del transporte hay una larga historia basada en la formulación matemática y en el empirismo científico. Esto se debe, en parte, a la complejidad de los problemas que los planificadores deben enfrentar (Lowry, 2010). Tradicionalmente, las ciudades han intentado determinar la mejor estrategia para la solución a sus problemas de transporte, a través de un proceso de identificación de resultados de políticas urbanas, probándolas, evaluándolas y, posteriormente, buscando la forma de mejorar los resultados. Sin embargo, este proceso presenta ineficiencias: el tiempo utilizado en la comprobación de estrategias poco convenientes o la posibilidad de que la mejor estrategia pueda no ser encontrada. De esta manera, los beneficios de la optimización se reflejan tanto en el desarrollo de estrategias más efectivas y rápidas. Por ejemplo, en la ciudad de Edimburgo, dentro del proyecto OPTIMA (May et al., 2000a), un estudio inicial necesitó cerca de 70 iteraciones del modelo para desarrollar la 'mejor' estrategia posible, pero un estudio posterior utilizando otros métodos de optimización encontró una combinación de medidas óptimas, las cuales incrementaron la eficiencia económica un 20%, después de 25 iteraciones del modelo.

La optimización es un concepto relativamente nuevo en el análisis integrado de estrategias de usos del suelo y transporte. Esto significa que para evaluar y optimizar dichas estrategias, es necesario contar con un modelo integrado de usos del suelo y transporte que al interactuar con una función objetivo, permita obtener valores óptimos (máximos o mínimos) según los objetivos planteados. Las variables pueden ajustarse para encontrar el valor deseado de dicho objetivo según las medidas implementadas. Este proceso de optimización puede aplicarse a funciones basadas en análisis multicriterio (MCA) y/o de coste-beneficio (CBA); aunque independientemente del método aplicado, este proceso es una poderosa herramienta para la planificación estratégica a largo plazo, lo que será de gran utilidad para tener una visión más clara en el futuro, en lo referente a los impactos de las medidas evaluadas (Coyle, 2000).

Un proceso de optimización es una buena manera de elegir la mejor estrategia. Comparando las medidas óptimas bajo diferentes escenarios alternativos, con diferentes supuestos acerca de limitaciones y objetivos, o incluso bajo diferentes suposiciones de valores en la función objetivo (incertidumbre), se puede lograr una nueva y mejor comprensión acerca de las interacciones involucradas en la formulación de estrategias.

Cuando en una ciudad se tiene un número relativamente pequeño de medidas, o simplemente se desea proponer una nueva, puede que sea poco probable que se requiera un proceso formal de optimización. Sin embargo, si la cantidad de escenarios a comprobar es importante, sería mucho más rápido y menos costoso utilizar un modelo estratégico e integrado con un módulo de optimización, que usar solamente el modelo (Ferrari, 2002). Donde existan varios escenarios por considerar, o restricciones cuyos impactos deben ser evaluados, un proceso de optimización puede resultar valioso. Durante este proceso es probable que se aprenda cómo algunas medidas pueden ser más efectivas en combinación con otras (sinergias), cuáles elementos de la estrategia son los que más impacto generan sobre los objetivos finales y cuáles son los más sensibles; o (si los resultados de la optimización son poco convincentes) cuáles son las fortalezas y debilidades de nuestro escenario de evaluación.

Dentro de la parte matemática, en líneas generales la optimización se puede definir como un intento de dar respuesta a un tipo general de problemas donde se desea elegir el mejor de los resultados entre un conjunto de elementos (Walters et al., 2001). La optimización consta de dos líneas de desarrollo dentro de un modelo: en primer lugar, se encuentra el problema de la calibración mediante el ajuste de las variables adecuadas según series de datos temporales

observados. En segundo lugar, está la cuestión de medir la eficacia de unas medidas según criterios definidos previamente (Dangerfield y Roberts, 1996).

En cuanto al ajuste de datos, si bien la dinámica de sistemas se basa principalmente en la **simulación comparativa** de los resultados de un modelo, con el fin de comprender mejor el comportamiento del sistema y evaluar el impacto de diferentes medidas, un ajuste razonable del modelo a datos observados en el pasado (o de los que se tenga disponibilidad), es generalmente recomendable, como una medida de reforzar su credibilidad.

En el desarrollo de un marco de optimización y evaluación de proyectos de transporte, la optimización puede resultar muy útil para acotar el rango y combinación de las posibles estrategias a implementar. En un modelo de optimización, los aspectos importantes radican en algunas variables que se pueden elegir para maximizar un objetivo.

Un proceso de optimización como herramienta de evaluación de estrategias, se puede realizar a partir de un escenario base, es decir, de un conjunto de supuestos (valores y situaciones iniciales) dentro del modelo de usos del suelo y transporte. La estrategia óptima puede ser probada comparando su robustez y eficiencia bajo otros escenarios. Una posibilidad puede ser utilizar la optimización para tratar de encontrar la estrategia con el mayor valor esperado de una función objetivo, teniendo en cuenta que los resultados serían diferentes según el escenario asumido y el objetivo propuesto. Sea cual sea la situación, el problema es garantizar el mejor desempeño posible de cara a una fuerza incontrolable, utilizando las variables disponibles que se pueden controlar (Dangerfield y Roberts, 1996).

Para la optimización de un problema, como se verá más adelante, existen varios algoritmos según la forma de la función objetivo, el conocimiento derivativo, la capacidad de cómputo y los requisitos para los criterios de convergencia, entre otros. En este caso, la función con que se ha trabajado no es explícita, ya que el conjunto de medidas a implementar puede variar, lo que causa que la carga de cómputo se incremente con el número de escenarios y de políticas implementadas.

En consecuencia, el propósito de este capítulo es desarrollar un proceso de optimización integrado con un modelo LUTI y además, demostrar que el algoritmo de optimización funciona y de hecho, que funciona mejor que otros algoritmos similares en este contexto.

Para terminar esta pequeña introducción, según el libro *Essays in Transportation Economics and Policy* (Small, 1999), con frecuencia las grandes inversiones de capital tendrán repercusiones positivas, aunque haya que incurrir en gastos de mantenimiento durante mucho tiempo. En estos casos las políticas de transporte, en especial las relacionadas con inversiones en infraestructura, son muy sensibles para la sociedad, ya sea por sus altos costes o por su larga vida. Debido a estos riesgos, esta herramienta de optimización cobra una gran importancia debido a que evalúa las estrategias y muestra los posibles escenarios tendenciales hacia el futuro, dando como resultados los valores de implementación que posiblemente tendrán un mejor resultado.

De esta manera, el presente capítulo empieza con una descripción introductoria a los elementos que conforman un sistema dinámico (§4.2) y posteriormente se centra en poner en contexto la optimización en medio de un sistema de estas características (§4.3). Dentro de esta sección se describe el método de optimización elegido, su modo de funcionamiento y una descripción y definición teórica de la forma en que se recomienda integrar las estrategias con un proceso de optimización. Finalmente, en la sección 4.4, se analiza la optimización como una herramienta para el diseño y evaluación de medidas óptimas de transporte a la vista de esos complejos procesos de interacción, junto con el diseño de las funciones objetivo, sus características y limitantes. Conceptualmente hablado, la optimización puede mostrarse como una herramienta bastante útil para tomar decisiones referentes a los objetivos que se quieran lograr, dentro de un proceso de toma de decisiones.

4.2 SISTEMAS DINÁMICOS

Antes de hablar acerca del sistema de interacción de transporte y usos del suelo, es necesario describir la estructura básica que se encuentra en cualquier sistema dinámico. Para modelizar el comportamiento dinámico de un sistema, existen unos elementos jerárquicos que componen la estructura:

- Límites del sistema.
- Diagramas causales (bucles o ciclos que se retroalimentan). Es la estructura básica dentro de los límites del sistema.
- Variables de estado (niveles) que representan el estado actual del sistema.
- Flujos, que determinan las variaciones en los niveles.

Con el fin de poder desarrollar un concepto completo de la relación transporte-territorio-optimización, sus límites deben establecerse dentro de la zona donde las interacciones de dicho sistema estén trabajando y separarlo del medio donde se encuentre inserto. Estos límites son escogidos para que contengan solo aquellos elementos que tengan una influencia razonable en el comportamiento del sistema.

Que este sistema tenga límites, no quiere decir que no puede llegar a ser afectado por elementos externos. Esto significa que estos elementos externos pueden verse como ocurrencias aleatorias que afectan el sistema y no como elementos dados por el propio sistema con características intrínsecas de crecimiento y equilibrio (Aracil, 1995). En este caso, los elementos externos están controlados por el planificador.

Las relaciones causa-efecto entre el sistema y el modelo de optimización son bidireccionales, al igual que los elementos dentro del sistema tienen una fuerte relación de retroalimentación entre ellos. Esto quiere decir que el medio está formado por todos los objetos fuera de los límites del sistema de tal manera que un cambio en ciertos atributos afecta al sistema y también se da el caso que otros atributos (diferentes a los del primer caso) sean afectados por el comportamiento del sistema. Es claro que un mismo atributo no puede afectar y ser afectado por el sistema, si esto llegara a suceder, significa que el atributo está dentro del sistema.

Para poder construir y simular un modelo de ordenador de un sistema cualquiera, se debe primer conocer los elementos que lo forman y las relaciones que existen entre ellos. Para comprender el funcionamiento de sistemas complejos es necesario prestar atención a las relaciones entre los elementos que forman dichos sistemas. Por estos motivos, en este aparte se presentan instrumentos que permiten construir la estructura básica de un sistema para convertirlo en un objeto matemático, que programado en un ordenador, permitirá generar los comportamientos que representan el comportamiento de los sistemas.

4.2.1 Descripción de un Sistema

La descripción mínima de un sistema viene dada por la descripción de sus componentes y por la relación que define la influencia entre dichos componentes. Mediante un ejemplo sencillo descrito en la Figura 4.1, se muestra el círculo vicioso del transporte de una forma simplificada. En este diagrama se indican los elementos más importantes que intervienen en el proceso y que representan el nivel de congestión alcanzado en una carretera cualquiera, la velocidad de operación del transporte público (atractividad del TP), y el nivel de uso del coche (número de coches que entran en la carretera) que modifica directamente el nivel de

congestión. Estos elementos básicos del sistema están unidos entre sí mediante flechas que indican las relaciones que se establecen entre ellos.

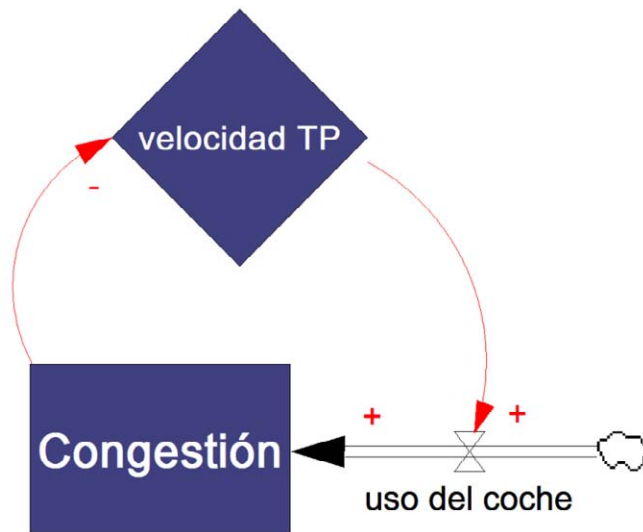


Figura 4.1 Sistema Simplificado de un Sistema de Transporte

resulta de la acumulación del cambio implícito en el tiempo en la variable dX/dt . Esto significa que siempre que exista una variable como dX/dt habrá una X , y entre ambas se establecerá una relación como la ya descrita. Haciendo una analogía con el ejemplo de la Figura 4.1, la variable X se llamará variable de nivel y la variable dX/dt variable de flujo. En la literatura matemática a la variable de nivel se la conoce también como variable de estado (Aracil, 1995).

Según lo visto anteriormente, ahora se puede hacer una clasificación de las variables que aparecen en el diagrama de la Figura 4.1, en tres grupos diferentes: variables de nivel o estado, variables de flujo y variables auxiliares.

Las anteriores consideraciones nos llevan a postular una clasificación de las distintas variables que aparecen en un diagrama de influencias en tres grupos: variables de nivel o estado, variables de flujo y variables auxiliares. Las variables de nivel son generalmente las variables más importantes y representan las magnitudes cuya evolución es importante y cuyos valores se acumulan en el tiempo. Por cada variable de este tipo, se encuentra asociada una o varias variables de flujo, las cuales determinan sus cambios a lo largo del tiempo. Por último, las variables auxiliares son el resto de las variables que aparecen en el diagrama, y representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel (Drew, 1995).

4.2.2 Diagrama Causal y Ciclo

El comportamiento dinámico de un sistema es generado a través de los diagramas causales. Un diagrama causal es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos. En la Figura 4.2 se muestra el diagrama causal más simple, el cual es equivalente al mostrado en la Figura 4.1. Este diagrama permite conocer la estructura de un sistema dinámico que viene dada por la especificación de las variables del sistema y de la relación entre ellas.

Partiendo de este esquema, la variable *uso del coche* representa la variación del nivel de congestión alcanzado en la vía con respecto al tiempo. Así, hay una clara influencia de unas variables sobre otras, por ejemplo:

$$\text{uso del coche} \rightarrow \text{congestión}$$

Esta influencia es un caso particular de uno general que se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dX}{dt} \rightarrow X$$

En donde dX/dt expresa la variación de X con respecto al tiempo (la congestión). Entonces, la variable X

La estructura de un diagrama causal tiene un punto de control de decisión (la ecuación de la variable de flujo) de la acción que el sistema esté llevando a cabo en dicho punto. La acción se acumula generando una variable de nivel. Una vez conocidas las variables del sistema y las posibles relaciones causales existentes entre ellas, se pasa a la representación gráfica de las mismas. En dicho diagrama, las diferentes relaciones están representadas por flechas entre las variables afectadas por ellas. Esas flechas van acompañadas de un signo (+ ó -) que indica el tipo de influencia ejercida de una variable sobre otra. Un signo “+” significa que un cambio en la variable origen de la flecha producirá un cambio en el mismo sentido en la variable de destino. El signo “-” quiere decir que el efecto producido será en sentido contrario.

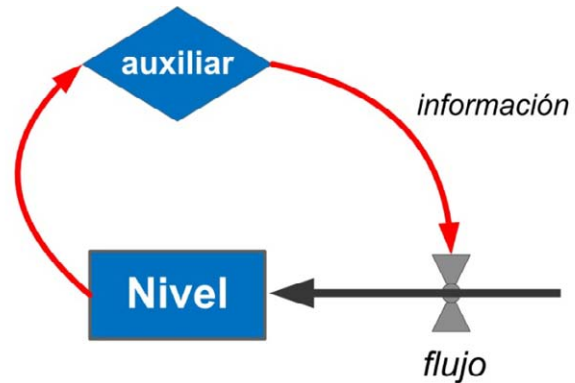


Figura 4.2 Diagrama Causal Simple con una Variable de Nivel y una Tasa de Flujo

Un ciclo es una cadena cerrada de relaciones causales, el cual también se conoce como retroalimentación o ‘*feedback*’. Los ciclos pueden definirse como positivos cuando el número de relaciones negativas es par y negativos, si es impar.

Los ciclos negativos llevan al modelo hacia una situación estable, mientras que los positivos lo hacen inestable, independientemente de la situación de partida. Todos los sistemas contienen ambos tipos de ciclos y su comportamiento final dependerá de cuál ciclo es el dominante en un momento determinado.

El concepto de ciclo es muy útil porque nos permite partir desde la estructura del sistema que analizamos y llegar hasta su comportamiento dinámico. Si un sistema oscila persistentemente o se halla en equilibrio, o decae rápidamente, podemos identificar las razones estructurales y decidir como cambiar los ciclos causales que lo van a modificar.

La utilidad más importante de este concepto es comprender cómo la estructura de los sistemas influye en su comportamiento. Por ejemplo, en un mismo mercado, en un mismo año, varias empresas ofrecen el mismo producto pero presentan resultados económicos muy diferentes. Para saber el porqué de este comportamiento se debe mirar la estructura del sistema que cada empresa controla.

En la construcción de un diagrama causal debe procederse con gran cuidado con el fin de evitar posibles errores. Para esto, es necesario tener en cuenta estas recomendaciones:

- Evitar ciclos ficticios
- Usar elementos que sean fáciles de caracterizar con números
- No emplear dos veces la misma relación en un mismo modelo
- Evitar ciclos redundantes
- No usar el tiempo como un factor causal

El concepto de Diagramas de Flujo Causales (*causal loop diagrams*, CLD) son la base de la definición y explicación de las relaciones causa-efecto de las variables de un modelo dinámico.

Variables de Nivel

La evolución de las variables de nivel (o estado) es muy importante para el estudio de un sistema. Los niveles representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado. Esta función de acumulación puede asimilarse a la del nivel alcanzado por un líquido en un depósito; de ahí proviene su nombre.

Este tipo de variables, equivalen a las variables de estado en la teoría de sistemas, es decir, el estado de un sistema se representa por medio de variables de nivel. La elección de los elementos que se representan por niveles depende del problema específico que se esté considerando. En la elección de estas variables juega un papel primordial la experiencia del diseñador del modelo. Una característica común a todos los niveles es que cambian lentamente en respuesta a las variaciones de otras variables.

En un diagrama, las variables de estado, generalmente se representan por medio de rectángulos (ver Figura 4.2). La variación de un nivel se produce gracias a las variables de flujo. A cada nivel **N** se le puede asociar un flujo de entrada **FE** y un flujo de salida **FS**, de manera que la ecuación que representa la evolución del nivel sea la siguiente:

$$N(t) = N(0) + \int_0^T (FE - FS)dt \quad (4.1)$$

O lo que es lo mismo,

$$\frac{dN}{dt} = FE - FS$$

Variables de Flujo

Las variables de flujo determinan las variaciones en los niveles del sistema. Estas variables caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes niveles. Determinan cómo se convierte la información disponible en una acción dentro del sistema.

Debido a sus características particulares, este tipo de variables se miden por los efectos que producen en las variables de estado con las que están relacionadas. Se representan por medio de los símbolos como se indican en la Figura 4.3. Estos símbolos están inspirados en un símil hidrodinámico, según el cual las variables de flujo se pueden asociar a válvulas que regulan los caudales que alimentan determinados depósitos, cuyos niveles materializan el estado del sistema.

A las variables de flujo se asocian ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. El bloque representativo de un flujo, admite como señal de entrada la información proveniente de los niveles o de variables auxiliares. Como salida, suministra el flujo que alimenta una variable de estado. Por ejemplo, en la Figura 4.3 se tiene un bloque que representa un flujo, al que se puede asociar una ecuación de la forma que se muestra en la Figura 4.3. Donde $A(t)$, $B(t)$ y $DD(t)$ pueden ser variables de nivel o auxiliares. Las ecuaciones asociadas a una variable de flujo se conocen como ecuaciones de flujo. La ecuación de flujo calcula en cada instante la abertura de la válvula, o sea el flujo.

A todo nivel, o variable de estado, se asocia al menos una variable de flujo, lo que gráficamente se puede representar como la Figura 4.4. Una forma que toma muy frecuentemente la ecuación de un flujo es la que se representa en la Figura 4.3.

Las decisiones que aparecen en una ecuación de flujo pueden ser abiertas si implican la intervención de un agente externo al sistema, o implícitas, si están completamente determinadas por las variables internas al sistema.

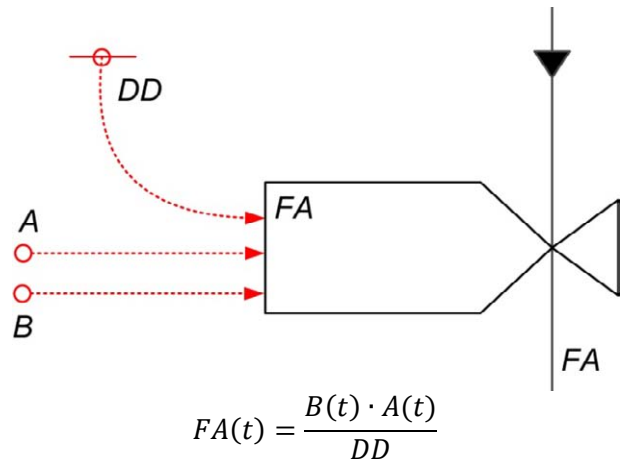


Figura 4.3 Representación de un Flujo

Las unidades en que se miden las variables de flujo deben ser consistentes con las variables con que se relacionan. En particular, una variable de flujo vendrá siempre medida por la unidad del nivel al que alimenta, por unidad de tiempo.

Las variables de flujo tienen como entradas exclusivamente a variables de estado y variables auxiliares. Es decir, dos variables de flujo no pueden conectarse entre sí. La evolución del sistema en el tiempo conlleva variaciones en los distintos niveles. Estas variaciones se deben no solo a la acción de factores externos (variables exógenas) sino, y especialmente, a decisiones en un sentido amplio, tomadas en el interior del sistema, las cuales se interpretan con ayuda de las ecuaciones de flujo. En este sentido, el sistema genera su propio comportamiento y la existencia de unos límites para el mismo.

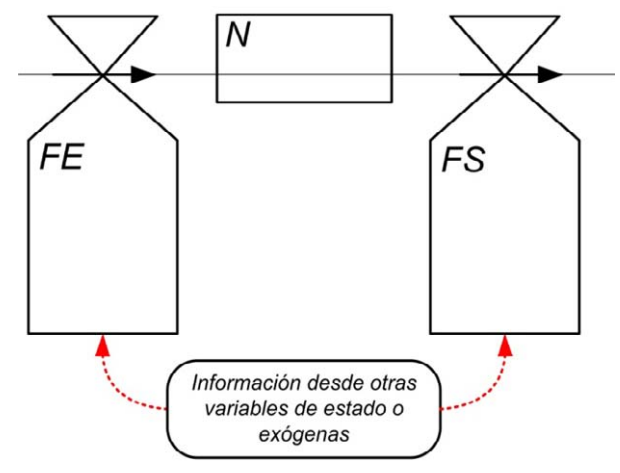


Figura 4.4 Conexión de un Nivel N a los Flujos de Entrada FE y de Salida FS

Variables Auxiliares

Las variables auxiliares representan pasos o etapas en que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por las variables de estado. Las variables auxiliares unen los canales de información entre variables de estado y de flujo, pero en realidad son parte de las variables de flujo. Sin embargo, se distinguen de ellas en la medida en que tengan un significado real por sí mismas y también porque hacen más fácil la comprensión de las ecuaciones de flujo.

Este tipo de variables son de gran ayuda para representar las no linealidades que aparecen en el sistema. Si las variables A y B están ligadas por una expresión de la forma $B=f(A)$, en donde $f(A)$ es una expresión no lineal, entonces se emplea una variable auxiliar que describe esta relación.

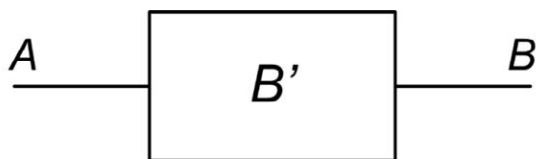


Figura 4.5 La Variable B es una Función Lineal o Tabla de A

Partiendo de estas definiciones, existen varios modelos de evaluación de estrategias que combinen medidas de transporte y territorio, aunque no todos se basan en la dinámica de sistemas. Nuestra intención es presentar la situación actual de la práctica en este campo y las herramientas disponibles desarrolladas en los últimos años.

4.3 OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DINÁMICOS

La movilidad en una zona urbana, la integración de políticas, la interacción entre el transporte y el territorio, entre otros elementos, son fenómenos difíciles de evaluar y controlar debido a su relación con variables externas desconocidas, como el clima, la economía, el empleo, el comportamiento de los viajeros, etc. Estas dificultades aumentan cuando se relacionan todas estas variables entre sí. El carácter dinámico de muchas de estas variables y su impacto dentro del sistema urbano a largo plazo no es bien representado por los modelos tradicionales (Elmahdi et al., 2005). Aunque no es un enfoque nuevo, los sistemas dinámicos ofrecen una nueva forma de modelar los sistemas complejos a largo plazo (Sarabia, 1995), basándose en la teoría de una estructura del sistema y en un conjunto de herramientas para la representación de sistemas complejos y el análisis de su comportamiento dinámico (Aracil, 1995).

La optimización dinámica ofrece un medio para hacer que los problemas sean menos abrumadores, desglosándolos en partes más pequeñas y manejables y luego organizando sus relaciones causales de forma sistemática y entendiendo cada parte con rigor y lógica. Un enfoque de este tipo, es decir un enfoque racional, puede ser atractivo ya que se presenta a sí mismo como neutral y objetivo, abordando en consecuencia o, al menos mitigando las tensiones de los procesos de toma de decisiones presentes en las fases de planificación del transporte (Lowry, 2010).

Aunque es conocido que las técnicas de optimización han sido un campo importante de la investigación en planificación del transporte (May et al., 2000a; May y Timms, 2000; Shepherd et al., 2010; entre otros), durante los últimos años su implementación y evaluación exitosa en problemas prácticos de transporte aún no ha sido validada, debido en parte a que la mayoría de aplicaciones e investigaciones se han ocupado de sistemas simples y agregados (Timms et al., 2002).

Una de las características más importantes de los sistemas dinámicos es que ayudan a dilucidar la estructura endógena del sistema y demuestran la interacción entre las diferentes variables. Estas particularidades facilitan la experimentación, el análisis de las relaciones dentro del sistema y reflejan los impactos de las decisiones (García, 2007).

Los componentes de un sistema dinámico se pueden ver en un ejemplo más elaborado mostrado en la Figura 4.6, donde se observa una parte del modelo de transporte del modelo MARS (Pfaffenbichler, 2003). En este caso, la variable de flujo es la llamada *increase employed* que es la que regula la tasa de crecimiento de la población empleada por zonas. La variable *employed population* acumula periodo a periodo el total de la población empleada. El resto de parámetros son variables auxiliares que sirven de apoyo dentro de este pequeño ciclo, aunque las que se encuentran en color son datos externos dispuestos directamente por el planificador. Finalmente, los conectores son las flechas que establecen las relaciones causales dentro del ciclo y sus dependencias.

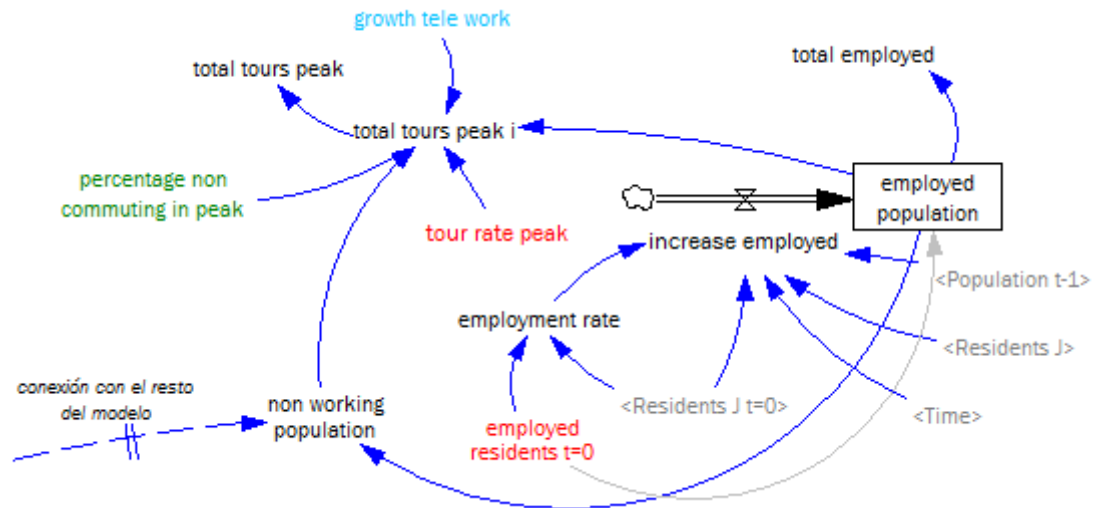


Figura 4.6 Generación de Viajes en Periodo Punta – Modelo MARS

En varias etapas de un sistema dinámico, el planificador puede enfrentarse al reto de averiguar los valores de algunos parámetros del modelo con el fin de alcanzar unos objetivos deseados. En este caso, considerando el número de parámetros que pueden ser manipulados dentro del modelo de usos del suelo y transporte y de las interacciones no lineales, la búsqueda de valores óptimos puede consumir bastante tiempo y el proceso de cálculo ser ineficiente. El conocimiento de la estructura del modelo por parte del planificador puede ser de gran utilidad en el caso de una búsqueda manual, obteniendo en general resultados aceptables. Sin embargo, también es posible que en estos casos, una búsqueda intuitiva y limitada pueda dejar de lado algunas combinaciones deseables. Utilizando algoritmos de optimización en este tipo de búsquedas, se crea una aplicación muy prometedora en términos de proporcionar una opción más eficiente y automatizada al planificador.

Debido a la complejidad matemática de los modelos de sistemas dinámicos, no es posible obtener una representación de estos sistemas que permitan el uso directo de métodos de optimización lineal (Yücel y Barlas, 2007). Por esta razón, una posibilidad es utilizar enfoques de optimización basados en simulaciones, en donde la función objetivo se optimiza por medio de una simulación continua del sistema.

Aunque no hay una gran cantidad de investigaciones de optimización basadas en simulaciones, en la literatura existen algunas referencias cuyo objetivo es combinar la optimización con los sistemas dinámicos: Graham et al., (1992), Miller (1998), Dangerfield y Roberts (1999), Coyle (2000) y Pfaffenbichler y Shepherd (2003). En la presente Tesis Doctoral, se trabaja con un paquete de simulación de sistemas dinámicos conocido como Vensim® (Ventana Systems Inc., 2010) el cual incorpora una búsqueda heurística para optimizar y/o mejorar la función objetivo, basándose en un modelo dinámico dado.

Una de las razones principales por la que la optimización no es muy utilizada en investigaciones relacionadas con sistemas dinámicos está relacionada directamente con las características básicas del enfoque de los sistemas dinámicos: es **más importante** el patrón dinámico observado (las tendencias del modelo), en lugar de un valor que una variable del sistema toma en un determinado periodo durante la simulación.

Dentro de la definición general de optimización se encuentran una gran cantidad de métodos y procedimientos. Sin embargo, en este caso el enfoque se orientará hacia los métodos de

optimización que no requieren el cálculo de derivadas, ya que hoy en día es ampliamente reconocido que este tipo de técnicas de optimización son las más adecuadas para este tipo de modelos (Torczon et al., 2000; Burns y Janamanchi, 2007).

4.3.1 Marco Conceptual del Proceso de Optimización

Muchas aplicaciones en la vida real, como la planificación, producción, finanzas y programación involucran la optimización de variables de decisión. La mayoría de los problemas de optimización son no lineales y es conocido que pueden tener más de una solución debido a los óptimos locales (Woon y Rehbock, 2010). Esto sugiere la necesidad de técnicas de optimización que busquen la solución dentro de múltiples óptimos locales. Estos problemas pueden tener o no restricciones y se han desarrollado diferentes algoritmos dependiendo de su naturaleza.

En la teoría básica de la optimización dinámica, antes de empezar, es necesario completar dos pasos. El primero de ellos es formular una función objetivo dentro del modelo, que resuma el comportamiento que queremos evaluar. Como segundo paso, se debe seleccionar un grupo de parámetros como candidatos a optimizar, todos dentro de un rango factible de valores para cada uno (Keloharju y Wolstenholme, 1988).

Cuando el proceso de optimización empieza, cada iteración dentro de la simulación calcula el valor de la función objetivo, bajo las condiciones iniciales escogidas. Luego, el algoritmo de optimización trata los parámetros escogidos como variables de optimización y los optimiza de forma heurística (Keloharju y Wolstenholme, 1988). Esto quiere decir que va cambiando sus valores uno a la vez utilizando la función objetivo como una medida de desempeño.

Los resultados de este proceso consisten en un nuevo conjunto de valores de dichos parámetros. Las iteraciones siguientes repiten este ciclo desde el principio, calculando durante la simulación un nuevo valor de la función objetivo usando los valores modificados de los parámetros escogidos. Al final del ciclo, el algoritmo compara el valor de la función objetivo con el correspondiente valor de la mejor simulación realizada. A pesar de que la función objetivo puede presentar variaciones de una iteración a otra, la solución óptima queda almacenada.

Según el método de optimización utilizado, el número de simulaciones necesarias para un resultado apropiado depende, según el caso, del modelizador o del método escogido. Cualquier parámetro existente dentro del modelo, ya sean constantes o funciones, pueden escogerse como candidatos a la optimización (Wolstenholme y Al-Alusi, 1987). Sin embargo, se debe tener mucho cuidado en este proceso de selección y en la definición del rango de valores factibles para cada parámetro.

4.3.2 Enfoque Integral Para el Análisis de Políticas en Modelos Dinámicos

Se ha adoptado un enfoque integral para analizar las políticas de transporte, ya que con un sistema dinámico se identifica de una forma más clara el comportamiento problemático de un sistema, sus causas y sus consecuencias. Así, las soluciones estructurales y las políticas necesarias para tratar de resolver dichos problemas pueden identificarse y aplicarse. Este enfoque se basa en modelos de simulación formal que capturan, a un nivel de detalle suficiente, la compleja realidad de un sistema urbano y hace supuestos confiables de su comportamiento. En este campo se ha dedicado gran atención a la validación de modelos y a explicar las diferentes pruebas que un modelo de este tipo debe pasar (Serman, 2000; Oliva, 2003).

Por otro lado, los métodos automáticos de optimización no ofrecen una interpretación intuitiva de los resultados, lo que podría ocasionar que el modelo sea tratado como un modelo de ‘caja negra’ (Oliva et al., 2010). Esto es una limitación en el sentido de que no sería un instrumento transparente que sirva como herramienta de aprendizaje y comunicación. Por esta razón, el método de optimización sugerido se presenta más adelante, observando, paso a paso, la manera en que el algoritmo busca el punto óptimo, así como su integración con el resto de la metodología.

El objetivo de un enfoque integrado es proporcionar una comprensión entre los cuatro elementos principales de la metodología propuesta (ver Figura 5.5 del Capítulo 5): los instrumentos (políticas), la función objetivo, el modelo LUTI y el módulo de optimización, así como su comportamiento a lo largo del tiempo, particularmente en las variables claves. Estos cuatro elementos se complementan entre sí y proporcionan la base para un proceso continuo de evaluación y análisis. Entonces, este enfoque permite evaluar y optimizar las políticas al considerarlas como intervenciones específicas (cambios en los parámetros) en el modelo que afectan la respuesta del sistema integrado en el tiempo.

Cada vez más y mejores herramientas articuladas dentro de la teoría de los sistemas dinámicos han sido desarrolladas y están disponibles (Kampmann y Oliva, 2008; Kampmann y Oliva, 2009). En consecuencia este capítulo se ha centrado en la vinculación de la estructura del modelo LUTI con el modelo de optimización.

4.3.3 Optimización sin Derivadas

No hay necesidad de resaltar la importancia del problema de encontrar los valores de n parámetros x_1, x_2, \dots, x_n , de tal modo que el valor de una función $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, sea óptimo. En sus inicios, los métodos de optimización sin derivadas fueron diseñados para resolver problemas de minimización de una función, suficientemente regular, de varias variables sin restricciones y donde fuera muy complicado obtener sus derivadas (Powell, 1965). Por ejemplo, si se tiene una función convexa, sabemos que cada punto estacionario puede corresponder a un mínimo global, pero el trabajo de cálculo requerido para establecer la ‘convexidad’ puede ser bastante arduo (Mordecai, 2003).

De forma similar, son frecuentes los casos en que es muy difícil o prácticamente imposible calcular las primeras o segundas derivadas de dichas funciones, razón por lo que es necesario contar con un algoritmo de optimización que no las requiera. Estas consideraciones justificaron la aparición de diferentes algoritmos multidimensionales sin restricciones en donde sólo se calculan los valores de la función. Aunque a partir de la segunda mitad del siglo XX se han desarrollado varios métodos de este tipo (Rosenbrock, 1960; Spendley et al., 1962; Smith, 1962; Spang, 1962), M. Powell desarrolló en 1964 un nuevo método, debido principalmente a que, de los anteriores procedimientos, solo el método de Smith podía encontrar el mínimo de una forma cuadrática general en un número finito de pasos.

Powell supera algunas deficiencias de los desarrollos anteriores y tiene la ventaja adicional de que es prácticamente invariante en las transformaciones lineales del espacio de coordenadas (Powell, 1964). Aunque en la actualidad existen métodos muy avanzados en este campo, se ha investigado el uso de modelos de segundo grado con funciones objetivo sin restricciones (Press et al., 2007); la simplicidad de las técnicas empíricas y sus principios subyacentes las hacen muy útiles en ciertos casos (Mordecai, 2003).

Para un perfecto desarrollo de esta síntesis, es necesario enfocar simultáneamente y desde dos puntos de vista, el desarrollo de este capítulo: por un lado, como lógica extensión de la programación matemática y por otro, como generalización de un problema particular de optimización. Por lo tanto, se describirán brevemente algunos algoritmos existentes muy conocidos, con el fin de identificar las técnicas que pueden optimizar funciones sin utilizar

derivadas de una manera efectiva. Por otro lado, el concepto de las direcciones conjugadas se describe brevemente con el fin de entender el método de Powell sin derivadas, el cual es considerado el mejor método empírico (Mordecai, 2003), particularmente cuando se hace uso del método modificado, atendiendo las modificaciones sugeridas por Zangwill (1967) y Brent (1973).

Métodos de Búsqueda Directa

Los métodos de búsqueda directa se han utilizado para describir un análisis secuencial de soluciones de prueba que involucran comparaciones de cada una de estas soluciones con el mejor punto hallado hasta el momento junto con una estrategia que determina (en función de resultados previos), la próxima y mejor solución posible (Torczon et al., 2000).

Por definición, una búsqueda directa consiste en optimizar una función $f(X)$ sin restricciones, donde se considera que ésta es continua y derivable. Sin embargo, la información acerca del gradiente de f puede no estar disponible o ser poco confiable.

Estos métodos se centran exclusivamente en los valores de la función objetivo, aunque esta propiedad no los distingue de otros métodos de optimización. Por ejemplo, si se desea hallar un punto mínimo rápidamente, pero no es posible calcular las derivadas parciales, lo que se suele hacer es estimar las pendientes que sustituyen el gradiente real. Si es posible observar los valores exactos de la función objetivo, la derivada puede estimarse por diferenciación finita, el cual sería un caso de optimización numérica. Pero, si la evaluación de la función es incierta, la derivada suele ser estimada por un método adecuado y un análisis de regresión.

En la literatura, la optimización se encuentra en numerosos ejemplos que no requieren derivadas, ni centrarse en la función objetivo sin recurrir a las aproximaciones de Taylor. En Torczon et al., (2000) se puede encontrar una explicación detallada de los métodos clásicos de búsqueda directa.

Método Simplex

Durante mucho tiempo la forma de encontrar el mínimo de una función era por medio de conceptos simples, como por ejemplo construir una cuadrícula y evaluar la función en cada punto de ella, o buscar el mínimo utilizando movimientos aleatorios, lo que es poco eficiente. Alrededor de la década de los años 60 emergieron mejores métodos de optimización, el primero de los cuales se conoció como el método Simplex (Spendley et al., 1962) que posteriormente fue mejorado en Nelder y Mead (1965). Este método es un procedimiento iterativo que permite ir mejorando la solución a cada paso. El proceso concluye cuando no es posible seguir mejorando más dicha solución.

En su enfoque básico, el método Simplex es una figura geométrica cuyo número de vértices es igual al número de dimensiones, más uno, del espacio factorial. Si k es el número de dimensiones del espacio, un Simplex se define como $k+1$ puntos en este espacio (Walters et al., 2001). Al utilizar este método en la optimización de sistemas, cada vértice corresponde a un conjunto de condiciones de dicho sistema. Partiendo del valor de la función objetivo en un vértice cualquiera, el método consiste en buscar sucesivamente otro vértice que mejore al anterior. La búsqueda se hace siempre a través de los lados del polígono (o de las aristas del poliedro, si el número de variables es mayor). Como el número de vértices (y de aristas) es finito, siempre se podrá encontrar la solución.

El método Simplex se basa en la siguiente propiedad: si la función objetivo f , no toma su valor máximo en el vértice A , entonces hay un vértice que parte de A , a lo largo de la cual f aumenta. Deberá tenerse en cuenta que este método sólo trabaja para restricciones que tengan un tipo de desigualdad \leq y coeficientes independientes mayores o iguales a cero y

habrá que estandarizar las mismas para el algoritmo (Dantzig y Thapa, 1997). En caso de que después de este proceso, aparezcan (o no varíen) restricciones del tipo “ \geq ” ó “ $=$ ” habrá que emplear otros métodos.

Método de Patrones de Búsqueda

El método de patrones de búsqueda crea un conjunto de direcciones de búsqueda de manera iterativa. Fue desarrollado en Hooke y Jeeves (1961) y fue uno de los primeros algoritmos en incorporar la historia previa de una secuencia de iteraciones en la generación de una nueva dirección de búsqueda. Este método también utiliza los valores de la función objetivo $f(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$, sin derivadas y se diseñó para converger rápidamente (Powell, 2007).

La idea básica de este algoritmo es combinar movimientos ‘exploratorios’ del tipo ‘una variable a la vez’ con movimientos de ‘patrones’ o aceleraciones, los cuales se regulan mediante algunas reglas heurísticas. Los movimientos exploratorios examinan la vecindad del punto actual para encontrar el mejor punto alrededor del mismo. Posteriormente, se usan estos dos puntos (el actual y el mejor en su vecindad) para realizar un movimiento de ‘patrones’.

De esta forma, los movimientos exploratorios examinan el comportamiento local de la función y buscan localizar la dirección de cualquier pendiente existente en la zona. Los movimientos de patrones utilizan la información generada en la exploración para escalar rápidamente las pendientes.

Al buscar el mínimo de la función $f(x)$, se tiene un punto base (solución actual) como x_c . También se tiene la variable x_i^c , donde se realiza una secuencia de movimientos exploratorios alrededor de x_i^c ; es decir, se perturba por Δ_i , con lo que se tiene (Mordecai, 2003):

1. Se hace $i = 1$ y $x = x_c$
2. Encontrar un $f = f(x)$, $f^+ = f(x_i + \Delta_i)$ y $f^- = f(x_i - \Delta_i)$
3. Encontrar un $f_{\min} = \min(f, f^+, f^-)$ y hacer que x corresponda a f_{\min}
4. Si $i = N$, el mínimo es x
5. Si $x \neq x_c$, se ha encontrado un mínimo
6. Si $i \neq N$, hacer $i = i + 1$ y empezar de nuevo

En el movimiento exploratorio, el punto actual es perturbado en la dirección positiva y en la dirección negativa a lo largo de cada variable, a razón de una variable a la vez. El mejor punto obtenido se almacena. Al final de la perturbación de cada variable por parte de Δ_i se cambia el punto actual por el mejor punto encontrado. Si el punto encontrado al final de todas las perturbaciones de las variables es diferente al punto original ($x \neq x_c$), el movimiento exploratorio se considera exitoso. De lo contrario, se considera fallido (Coello, 2000).

4.3.4 Direcciones Conjugadas

El método direcciones conjugadas o del gradiente conjugado es un algoritmo para resolver numéricamente los sistemas de ecuaciones lineales cuyas matrices son simétricas y definidas positivas. Las técnicas desarrolladas para este problema se extienden extrapolando, a problemas más generales: como cerca del punto solución, todo problema es aproximadamente cuadrático, el comportamiento de la convergencia es similar al de la situación cuadrática pura (Vall-Ilossera, 1994). Al ser un método iterativo, se puede aplicar a

los sistemas que son demasiado grandes para ser tratados por métodos directos (Press et al., 2007). Powell desarrolló un método de convergencia cuadrática que produce N direcciones mutuamente conjugadas, razón por la cual es importante conocer la base del funcionamiento de este procedimiento.

Por esta razón, se introduce el concepto de direcciones conjugadas y su importancia dentro del contexto de esta Tesis Doctoral. La demostración de las definiciones aquí realizadas se puede hallar en Luenberger (1989).

Ahora se describe un importante concepto para las funciones cuadráticas: dos vectores $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^n$ se dice que son direcciones conjugadas con respecto a una matriz A , positiva, de dimensiones $n \times n$, si:

$$\mathbf{x}^T A \cdot \mathbf{y} = 0 \quad (4.2)$$

Así, si $A=0$, cualquier par de vectores serían conjugados. Sin embargo, si $A=I$, la expresión equivale a la notación usual de ortogonalidad.

Cuando la relación de la ecuación (4.3) se mantiene en pares para todos los miembros de un conjunto de vectores, se dice que es un conjunto conjugado. El éxito de este método es llegar a un grupo de N direcciones mutuamente conjugadas linealmente independientes (Press et al., 2007). Así que si A es positiva y el conjunto de vectores distintos a cero $\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k$, son ortogonales a A , entonces estos vectores son independientes.

El concepto de las direcciones conjugadas es una generalización de la ortogonalidad; es decir, cuando A es la matriz identidad I de dimensión $n \times n$. Es bien conocido que una matriz simétrica de $n \times n$, tiene n vectores propios. Este conjunto de n vectores es también mutuamente conjugado, si $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ son vectores propios de A ; luego $A\mathbf{x}_2 = \alpha\mathbf{x}_2$, donde α es el valor propio correspondiente y,

$$(\mathbf{x}_1)^T A \mathbf{x}_2 = (\mathbf{x}_1)^T \alpha \mathbf{x}_2 = \alpha (\mathbf{x}_1)^T \mathbf{x}_2 = 0 \quad (4.3)$$

Esto es para cada matriz simétrica positiva donde al menos hay un conjunto de N direcciones mutuamente conjugadas (Mordecai, 2003).

Se pueden construir N direcciones mutuamente conjugadas con respecto a la matriz A a partir de un conjunto de n vectores linealmente independiente s_1, s_2, \dots, s_n a través de un procedimiento similar al método de ortogonalización de Gram-Schmidt (Golub y Van Loan, 1996). Si tenemos,

$$z_1 = s_1 \quad (4.4)$$

$$z_j = s_j - \sum_{k=1}^{j-1} \frac{(s_j)^T A z_k}{(z_k)^T A z_k} z_k \quad (4.5)$$

Los vectores z_1, z_2, \dots, z_n son mutuamente conjugados con respecto a A . Una interpretación geométrica de vectores conjugados puede ser la siguiente: definimos a f como una función

cuadrática (4.6) y se asume que Q es la matriz positiva. Llamamos x^* al punto que minimiza $f(x)$ para todos los $x \in \mathbf{R}^n$.

$$f(x) = a + b^T x + \frac{1}{2} x^T Q x \tag{4.6}$$

De esta manera, las superficies $f(x) = c$ (constante) son generalmente elipsoides con centro en x^* . Llamamos x_0 al punto que satisface $f(x_0) = c$. Luego se construye el hiperplano tangente a la superficie $f(x) = c$ en x_0 . Entonces, el vector que une a x_0 y x^* es conjugado con respecto a Q para cada vector en el hiperplano tangente. Este caso se puede ver en la Figura 4.7

Básicamente, se utilizan las direcciones conjugadas para obtener información acerca de la curvatura de la función objetivo y así hallar los óptimos locales y globales en cada iteración.

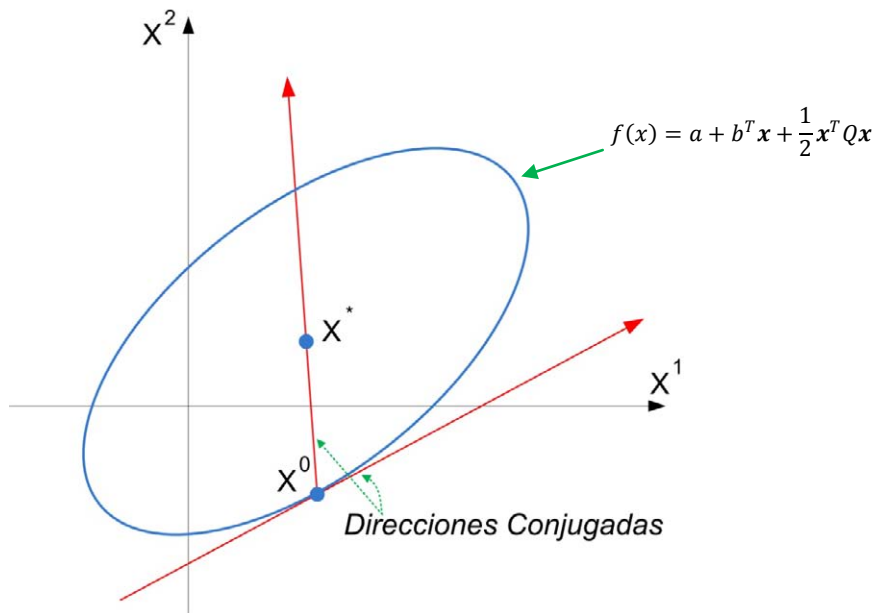


Figura 4.7 Direcciones Conjugadas con Respecto a Q

Fuente: Mordecai (2003).

En el caso de funciones cuadráticas, en donde la matriz asociada A , es definida positiva, el procedimiento del gradiente conjugado es muy rápido (Puy Huarte, 1997).

Supóngase que ahora se tienen m vectores (no ceros) z_1, z_2, \dots, z_m en \mathbf{R}^n , con $m \leq n$, mutuamente conjugados con respecto a una matriz positiva Q . Estos vectores son linealmente independientes y abarcan un sub-espacio de m dimensiones, dada por los vectores que satisfacen,

$$x = \sum_{j=1}^m \alpha_j z_j \tag{4.7}$$

Donde α_j son números reales aleatorios. Para un punto dado $x_0 \in \mathbf{R}^n$, el grupo de vectores satisface

$$x = x_0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j z_j \quad (4.8)$$

Donde z_j son m vectores linealmente independientes y α_j son número aleatorios, es un conjunto afín o lineal múltiple. Se dice que son generados por el punto x_0 y los vectores z_1, z_2, \dots, z_n . Para $m = n$, conjuntos afines pertenecen a todo el espacio \mathbf{R}^n .

La ventaja principal de utilizar este método en un proceso de optimización, radica en que si se realizan minimizaciones sucesivas de una función a lo largo de un conjunto de direcciones conjugadas, no es necesario volver a realizar cálculos sobre ninguna de esas direcciones (Vallllosera, 1994). Esto significa que en un espacio de n dimensiones, un conjunto de n minimizaciones lineales a lo largo de cada una de estas direcciones conjugadas consigue llegar al mínimo exacto de una función cuadrática, pues son direcciones linealmente independientes. Cuando las funciones no son exactamente cuadráticas, no se consigue el punto óptimo exacto en n iteraciones. Sin embargo, varios ciclos de n minimizaciones lineales pueden conseguir una convergencia cuadrática hacia el mínimo.

Ahora se ha demostrado un importante resultado, debido a que en Powell (1964), se relacionan las direcciones conjugadas con una optimización sin restricciones de funciones cuadráticas (Mordecai, 2003).

4.3.5 Método de Powell

El método de Powell es un algoritmo que busca un mínimo local de una función dada para un conjunto de vectores lineales independientes, sin utilizar derivadas, y conocido como uno de los métodos de direcciones conjugadas (Kamola y Miazga, 2001). Este método se caracteriza por proporcionar una rápida convergencia en el marco de los métodos de búsqueda directa. La idea básica consiste en dividir la minimización de dimensión N en N problemas independientes de minimización unidimensionales. Así, para cada problema unidimensional se implementa una búsqueda binaria para encontrar el mínimo local en un determinado rango. Además, en sucesivas iteraciones, se estiman las mejores direcciones que pueden seguir las búsquedas unidimensionales (Kishihara et al., 2005).

Este algoritmo usa de forma efectiva datos de las iteraciones anteriores para construir nuevas direcciones de búsqueda para la aceleración y, al mismo tiempo, evita degenerar en una secuencia de búsquedas coordinadas. Además, el método se basa en el uso de una función cuadrática, por lo cual cuenta con una base teórica sólida. Según Renders y Bersini (1994), este método es el más preciso cuando se tiene la necesidad de un número elevado de evaluaciones de la función objetivo.

Supóngase que la función $Z=f(x,y)$, en dos dimensiones, y sus curvas de nivel pueden dibujarse según se muestra en la Figura 4.8. En un principio, siempre se puede minimizar la función en la dirección de x e y , sucesivamente. Sin embargo, esto podría involucrar demasiados pasos para hallar el mínimo global de la función, razón por la cual se necesita un mejor conjunto de direcciones de búsqueda.

Si se examina la imagen de la Figura 4.8 se puede apreciar que la función tiene un mínimo local en el punto (3,2) y un máximo local en (-1,0). También su conjunto de curvas de nivel puede dar más información sobre sus valores extremos. Analizando la Figura 4.8 se nota que

los desplazamientos desde el punto (-1,2) hacia abajo, implican un crecimiento de las curvas de nivel de la superficie. Esto significa que se estaría ascendiendo hacia el punto de máximo. De la misma forma, desplazamientos desde el punto (3,0) hacia arriba, implican un decrecimiento de las curvas de nivel de la superficie lo que indica que se estaría descendiendo hacia el punto de mínimo.

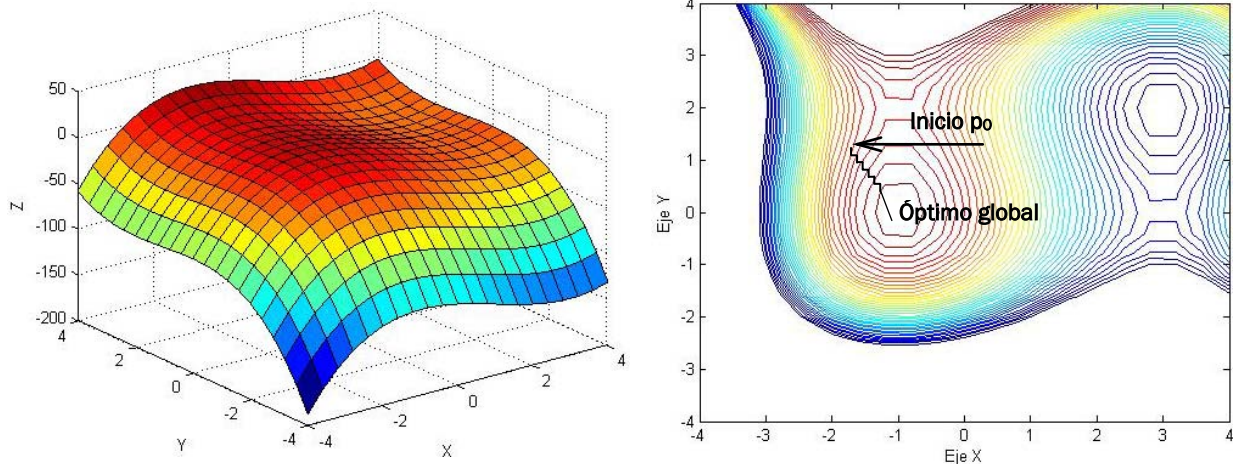


Figura 4.8 Funcionamiento del Método de Powell

En la primera iteración, se busca el mínimo de la función en la dirección x , luego en la dirección y . Después de esto, se hace una minimización a lo largo de una dirección promedio, generada mediante la conexión del punto inicial y el mínimo local recién hallado. Esta dirección promedio es $\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0$ y se utiliza como una nueva dirección de búsqueda para el mínimo en cada iteración. En la siguiente iteración, se minimiza la función en la dirección y , luego en la última dirección promedio y , después, de nuevo a lo largo de la nueva dirección promedio (Lu et al., 1995). Este proceso se repite hasta que se halla el óptimo global (ver Anexo 1).

Desafortunadamente, la función objetivo no siempre es una función cuadrática. Sin embargo, al mirar de cerca la función alrededor del punto óptimo, se podría suponer que la función objetivo se aproxima a una cuadrática. Por lo tanto, si se puede encontrar un punto de partida cerca al óptimo, entonces se puede encontrar un resultado satisfactorio. A pesar de estos resultados, existen otros inconvenientes con este método, los cuales se discuten más adelante.

El Algoritmo de Optimización

Cada iteración de este método empieza con una búsqueda de n direcciones linealmente independientes s_1, s_2, \dots, s_n , a partir la aproximación del punto mínimo conocido \mathbf{p}_0 (Figura 4.8). Estas direcciones son elegidas para ser inicialmente las direcciones coordenadas (*coordinate directions*), lo que quiere decir que el inicio de la primera iteración es idéntico a una iteración del método que cambia un solo parámetro a la vez. Este último método es modificado para generar unas direcciones conjugadas haciendo que cada iteración defina una nueva dirección s y, eligiendo las direcciones linealmente independientes para la próxima iteración s_2, s_3, \dots, s_k, s . La forma en que se define s asegura que si una función cuadrática se minimiza, después de k iteraciones, el último k de las n direcciones elegidas para la $(k+1)$ -ésima iteración son mutuamente conjugadas (Powell, 1964). Después de n iteraciones todas

las direcciones son mutuamente conjugadas y se probará que el mínimo exacto de la función es encontrado.

Esto quiere decir que este método genera las direcciones conjugadas utilizando solo una búsqueda en una dimensión en cada iteración: si s_1 y s_2 son dos vectores generados por una búsqueda unidimensional en la misma dirección u , pero desde diferentes puntos, quiere decir que $s_1 - s_2$ son mutuamente conjugados de u (Delaurenti, 1999).

Como se mencionó anteriormente, la dirección $p_n - p_0$ representa la dirección promedio de búsqueda sobre la cual se mueve el algoritmo hasta encontrar un mínimo. Entonces, el punto x_1 se determina como el punto en donde la función f es mínima a lo largo del vector $p_n - p_0$.

De esta manera, si tenemos $\{s_k, k=1, 2, \dots, n\} \in P \subseteq \mathbb{R}^n =$ un conjunto de vectores linealmente independientes en P , y siendo p_0 punto de partida, la iteración del procedimiento básico es (iniciando con $i = 0$):

1. Hacer $p_0 = x_i$
2. Para $k=1, 2, \dots, n$ se calcula α_k de tal manera que $f(x_{k-1} + \alpha_k s_k)$ sea un mínimo definido por $x_k = x_{k-1} + \alpha_k s_k$
3. Para $k=1, 2, \dots, n-1$ se reemplaza s_k por s_{k+1} y reemplazar s_n por $(x_n - x_0)$
4. Hacer $i = i + 1$
5. Elegir un α de modo que $f(x_i + \alpha(x_n - x_0))$ sea mínimo y reemplazar x_0 por $x_0 + \alpha(x_n - x_0)$
6. Repetir hasta que se alcancen los criterios de convergencia.

Este algoritmo es equivalente a una búsqueda unidimensional hecha de forma secuencial a lo largo de direcciones mutuamente conjugadas.

El Método de Powell Modificado

El procedimiento básico descrito en la sección anterior se modifica con el fin de garantizar que la tasa de convergencia al mínimo sea satisfactoria, aún cuando la aproximación inicial sea bastante pobre. El motivo por el cual este cambio se debe tener en cuenta es porque en ocasiones, el procedimiento básico puede escoger direcciones casi dependientes, lo que puede ser un asunto serio si la función a optimizar tiene más de cinco variables.

En particular, en el paso 3 del procedimiento anterior, el primer vector s_1 se descarta y la nueva dirección media $x_n - x_0$ se adiciona a los vectores de búsqueda. También, si α_1 es cero, las direcciones resultantes no abarcarán todos los parámetros del espacio. De hecho, lo mejor sería descartar el vector s_n a lo largo de la dirección donde se presenta la mayor disminución de la función f .

El procedimiento de dejar de lado en cada iteración, s_n a favor de $x_n - x_0$, tiende a producir conjuntos de direcciones que pueden ser linealmente dependientes. Cuando esto pasa, el método encuentra el mínimo de la función f solamente en un sub-espacio de todas las N dimensiones del caso; es decir, el resultado es erróneo. De manera que en el procedimiento básico, en el paso 3 se asume que el vector de dirección media $x_n - x_0$ representa una buena dirección de búsqueda. Aunque no siempre puede ser así.

Como consecuencia de esto, una de las direcciones mutuamente conjugadas puede ser desechada, lo que implica que se requieren más iteraciones para encontrar el mínimo exacto de una función. Aunque esto es desafortunado, es una modificación esencial para optimizar

una función de muchas variables. La prueba de que la convergencia es siempre eficiente se puede consultar en Powell (1964).

Así que el nuevo procedimiento descrito a continuación permite a una dirección que no sea s_n ser desechada, de manera que la nueva dirección deberá contener siempre una parte considerable de la que se perdió. El proceso iterativo de este proceso quedaría de la siguiente forma:

1. Hacer $p_0 = x_i$
2. Para $k=1, 2, \dots, n$ se calcula α_k de tal manera que $f(x_{k-1} + \alpha_k s_k)$ sea un mínimo definido por $x_k = x_{k-1} + \alpha_k s_k$
3. Hacer $\Delta f_k = f(x_k) - f(x_{k-1})$; para $k=1, 2, \dots, n$. Encontrar el subíndice r ...

De manera que $\Delta f = |\Delta f_r| = \max\{|\Delta f_r|\}$ sea la magnitud del máximo descenso de f ; y s_r la dirección de la disminución máxima sobre las direcciones del paso anterior

4. Hacer $i = i + 1$
5. Hacer $f_k = f(x_k) - f(x_{k-1})$; para $k=1, 2, \dots, n$

Dejar $f_3 = f(2x_n - x_0)$ el valor de la función en la nueva dirección $2(x_n - x_0)$ desde x_0

Si cualquiera $f_3 \geq f_0$ y/o $(f_0 - 2f_n + f_3)(f_0 - f_n - \Delta f)^2 \geq \frac{1}{2} \Delta f (f_0 - f_s)^2$ usar las viejas direcciones s_1, s_2, \dots, s_n , para la siguiente iteración y volver al paso 1. De lo contrario, seguir con el paso 6.

6. Hacer $s_r = x_n - x_0$ con el subíndice r obtenido en el paso 3
7. Definiendo $s_r = (x_n - x_0)$, se calcula α_{min} de modo que $f(x_n + \alpha_{min} s_r)$ sea mínimo y hacer $x_i = x_0 + \alpha s_r$ como el punto de inicio de la nueva iteración.
8. Repetir hasta la convergencia.

Si las condiciones en el paso 5 se satisfacen, el conjunto de direcciones de búsqueda se mantiene inalterado. La primera desigualdad en el paso 5 indica que no hay más disminución en el valor de la función f en la dirección $x_n - x_0$. La segunda desigualdad se refiere a que la disminución en la función f en la dirección de mayor descenso s_r no era una parte importante en la disminución de f en el paso 2. Si las condiciones en el paso 5 no se satisfacen, la dirección de mayor disminución s_r se reemplaza por la dirección de búsqueda calculada en el paso 2, $x_n - x_0$. Luego, la función es minimizada en la dirección calculada en el paso 7. Los criterios de convergencia se basan en las diferencias entre $|x_i - x_{i-1}|$.

Limitaciones del Método

Para solventar el problema de dependencia de las direcciones de búsqueda, Powell revisó su método, introduciendo nuevos criterios para la formación de vectores de dirección independientes linealmente (Powell, 1968). Posteriormente, se introduce una mejora en el método de Powell que evita la posibilidad de que existan direcciones conjugadas linealmente dependientes (Zangwill, 1967).

La manera de solucionar el problema de la dependencia lineal puede solucionarse de varias formas, entre otras (Press et al., 2007):

1. Reinicializar el conjunto de direcciones \mathbf{s}_i al vector base \mathbf{e}_i después de cada N o $N+1$ iteraciones del procedimiento básico. Esto produce un procedimiento útil si las funciones son de forma cuadrática y si se desea una precisión alta.
2. Brent (1973) señala que el conjunto de direcciones puede ser restablecido a las columnas de cualquier matriz ortogonal. En lugar de desechar la información ya obtenida de las direcciones conjugadas, Brent reinicia la dirección establecida para calcular las direcciones principales de la matriz A . El cálculo es esencialmente una particularización del algoritmo de descomposición por valores simples (Lawson y Hanson, 1974). La modificación de Brent al método de Powell es probablemente la mejor hasta el momento (Press et al., 2007) y es el método utilizado en la presente Tesis Doctoral.
3. Se puede renunciar a la propiedad de la convergencia cuadrática a favor de un esquema más heurístico, que trate de encontrar unas pocas, pero buenas direcciones a lo largo de estrechos valles, en lugar de necesariamente N direcciones conjugadas.

Ventajas del Método

La motivación principal para usar el algoritmo de Powell modificado se deriva de la observación de que si una función cuadrática de N variables se puede transformar de tal forma que sea simplemente la suma de cuadrados perfectos, entonces puede obtenerse el óptimo después de efectuar exactamente N búsquedas sobre una variable, cada una de ellas con respecto a cada una de las variables transformadas. De esta manera, a continuación se describen las principales características del método de optimización escogido para esta tesis doctoral:

- No usa derivadas
- Se parte de un punto \mathbf{p}_0 y N direcciones $\{\mathbf{s}_i\}$ arbitrarias
- Se elimina \mathbf{s}_1 y se agrega un nuevo \mathbf{s}_N , de tal manera que $\mathbf{s}_N = \mathbf{p}_N - \mathbf{p}_0$
- Un nuevo \mathbf{p}_0 es mínimo a lo largo del nuevo \mathbf{s}_N
- Las direcciones se van haciendo conjugadas, y se llega al mínimo de forma cuadrática tras N iteraciones del ciclo
- Si se presenta el inconveniente de la aparición de una tendencia a una dependencia lineal de $\{\mathbf{s}_i\}$ (convergencia a mínimo de subespacio):
 - Se reinicia $\{\mathbf{s}_i\}$ tras $\approx N$ iteraciones

Hay dos razones principales para elegir un modelo cuadrático: es el tipo más simple de función no lineal a minimizarse (las funciones lineales no pueden manejar óptimos interiores), y por tanto, cualquier técnica general debe trabajar bien en una función cuadrática si esta tiene éxito con una función general.

Cerca del óptimo, todas las funciones no lineales pueden aproximarse mediante una cuadrática (esto se debe a que, en ese caso, la parte lineal de la expansión de Taylor debe desvanecerse). Por tanto, el comportamiento del algoritmo en la función cuadrática dará alguna indicación sobre cómo convergerá el algoritmo en el caso de funciones generales.

4.4 EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El proceso de optimización de un modelo de un determinado sistema dinámico se inicia a partir de la construcción de un diagrama causal, CLD (Drew, 1995). En un principio, el CLD no tendrá especificado el carácter de los distintos elementos que en él se relacionan, es decir, en esta etapa no se sabe si se trata de niveles, flujos o variables auxiliares. De hecho, la asignación de tipos a las variables es uno de los puntos más importantes en la construcción de un modelo y en el que cobra importancia la experiencia y conocimientos del diseñador del modelo.

Una vez identificadas las variables de nivel, las de flujo y las auxiliares, se construye el diagrama, disponiendo los bloques y sus ecuaciones. El proceso de modelización del comportamiento dinámico de un sistema puede resumirse diciendo que se procede de forma secuencial y progresiva al establecimiento de:

- Los límites del sistema (variables endógenas y exógenas).
- Los ciclos de retroalimentación.
- Las variables de nivel (estado) que representan las acumulaciones de los ciclos.
- Las variables de flujo que representan la actividad dentro de los ciclos.

Del diagrama realizado se puede obtener el modelo matemático del sistema en forma analítica. Para ello lo único que se requiere es tener las no linealidades que aparecen en el sistema de forma analítica. A partir del diagrama se puede escribir:

$$\dot{x} = f(x, g) \quad (4.9)$$

En donde x es un vector que representa todos los niveles que aparecen en el diagrama, es decir, $x^T = [N_1, N_2, \dots, N_k]$, y g representa el conjunto de variables exógenas al sistema. Las variables de flujo y las auxiliares se han eliminado, dejando solamente las variables de nivel y las exógenas. Si se prefiere escribir las ecuaciones en tiempo discreto, en lugar de en tiempo continuo, se tiene:

$$x(t + \Delta t) = \Phi[x(t), g(t)] \quad (4.10)$$

En donde el significado de x y de g es el mismo que se describió anteriormente. En general, cuando se va a simular un modelo matemático no tiene interés la forma analítica, ya que lo que interesa es escribir el modelo de una forma fácilmente programable en un ordenador. Sin embargo, la forma analítica si es de gran importancia en ciertos problemas de optimización y de estimación de parámetros por ajuste de datos. En cualquier caso, el interés de la forma analítica es que permite aplicar la teoría moderna de control a los modelos matemáticos de los sistemas.

Un proceso formal de optimización es mucho más útil si se considera como un conjunto de instrumentos estratégicos, de los cuales se espera que tengan un impacto significativo sobre el resultado. Varias medidas tienen diferentes escalas las cuales pueden presentar una variación, como los precios. En un entorno urbano, algunas otras como una carretera o una línea de metro, puede estar incluidos, o no. Una vez el conjunto de medidas se ha definido, otras secundarias pueden añadirse con el fin de mejorar la estrategia general.

Partiendo de las ecuaciones que definen el sistema dinámico, se desarrolla el problema general de optimizar una función objetivo, bajo un escenario particular y con sus variables exógenas. La escala temporal del problema, los retos planteados por las diferentes políticas, así como sus restricciones, serán discutidos más adelante.

4.4.1 Diseño de Estrategias Óptimas de Transporte

El concepto de un diseño óptimo de estrategias de transporte, tiene su base en una serie de estudios que han demostrado que un enfoque integrado, en donde la provisión y gestión de la infraestructura y las medidas de *pricing*, entre otras, debe tener políticas coordinadas. Adoptar este concepto puede reducir significativamente los problemas del transporte urbano según el *Department for Transport* del Reino Unido (DETR, 1998).

La clave para el desarrollo exitoso de una estrategia de transporte integrado es la especificación de los objetivos y, demostrar que pueden obtenerse beneficios a partir de utilizar un enfoque integrado, en comparación con la implementación de medidas individuales (May et al., 2000b); es decir, demostrar la existencia de sinergias. Los objetivos estratégicos varían de un estudio a otro, aunque los más comunes y generales son la eficiencia en el uso de los recursos, la mejora de la accesibilidad, la protección ambiental, la sostenibilidad y la seguridad, teniendo presente una estabilidad financiera. Diversos estudios realizados en diferentes ciudades europeas con diferentes modelos, han demostrado que algunas estrategias óptimas son insensibles a los costes de las externalidades, ya que cuando estos costes se basan en valores aceptados y asimilados en la realidad, las estrategias óptimas son similares a aquellas que no dan valor a dichas externalidades (Timms et al., 2002). Entonces, podría decirse que las estrategias que son más efectivas en lograr un balance entre lo económico y la sostenibilidad, también se desempeñan mejor cuando los objetivos se amplían al medio ambiente y a la seguridad (reducción de accidentes), entre otros elementos.

Es probable que los niveles óptimos de algunas medidas sean políticamente imposibles de implementar, lo que puede causar un impacto negativo dentro de la meta de reducción de otros objetivos, como las emisiones, los accidentes, la mejora de la equidad, el equilibrio financiero, etc. De este modo, en la práctica es necesario buscar estrategias que optimicen los objetivos dentro de los límites aceptables, con valores y rangos de medidas reales (Vold, 2005).

En general, los estudios de transporte se han centrado en identificar listados de medidas y evaluarlas en una serie de combinaciones, utilizando un modelo estratégico. La experiencia profesional se usa para determinar el conjunto inicial de medidas a ser evaluadas, así como las variantes necesarias para mejorar el desempeño de dichas medidas. En este caso, se proponen dos métodos diferentes de evaluación por medio de funciones objetivo claras y analíticas, para la posterior optimización de las estrategias.

4.4.2 Funciones Objetivo

Visto lo anterior, es notable la necesidad de explorar herramientas alternativas que sirvan de apoyo en la evaluación de los complejos sistemas urbanos y las relaciones entre sus diferentes agentes. Aquí se utilizan funciones que sirvan de herramientas para este fin. Estas funciones son los vínculos que relacionan el procedimiento de optimización y el modelo LUTI, funcionando como ciclos de retroalimentación.

Una función objetivo es una función compuesta por una serie de elementos (indicadores, medidas, estrategias), la cual se utiliza para evaluar una serie de políticas mediante un proceso formal de optimización. En este caso, la función objetivo debe responder acerca de cuáles son las fortalezas del escenario evaluado frente a un escenario base o un punto de

referencia. Para el propósito de esta investigación, partiendo de un proceso dinámico como una colección de ecuaciones diferenciales no lineales (ecuación (4.9)), se dispone de una función objetivo general con condiciones iniciales para cada estado (estrategias), de la siguiente manera:

$$f(X) = f(x, \mathbf{U}, g, t) \quad U(t) = u_0, u_1, \dots, u_n \quad (4.11)$$

Donde x es el vector de las variables de estado, \mathbf{U} es el vector de control de inputs, g representa las variables exógenas y t es la variable independiente del tiempo. El vector \mathbf{U} se selecciona de un espacio M de posibles medidas de control. M controla los valores de entrada de los parámetros de u_i , con el fin de prevenir soluciones poco realistas. Para poner en contexto al lector, x son las variables de estado que describen el sistema, \mathbf{U} son las estrategias sostenibles a implementar en el modelo, las cuales están compuestas por u_i medidas, cuyos valores se mueven dentro de un rango de valores M .

Así, optimizando la función $f(X)$ en una dirección, el problema se convierte en uno de una sola dimensión, lo que se podría considerar como una optimización lineal. La idea en este caso es tratar de encontrar cada mínimo de la función $f(X)$ en diferentes direcciones hasta que la función deje de disminuir. La forma en que se debe elegir la siguiente dirección de búsqueda del mínimo, es el principal argumento del método de Powell modificado y se ha demostrado que después de repetidos ciclos de evaluaciones, el proceso de optimización converge en su mínimo.

Dentro de este contexto, se empleará la técnica de optimización descrita en este capítulo con el fin de optimizar una función objetivo del tipo coste-beneficio (CBA) o multicriterio (MCA), sujeta a las restricciones inherentes a las medidas y a algunas limitaciones físicas. El enfoque que se le da a este problema es tratar a los componentes del vector \mathbf{U} como un conjunto de parámetros constantes y luego utilizar el procedimiento de búsqueda multidimensional para encontrar el ajuste de valores que minimiza la función.

Los limitantes de una medida u_i pueden ser tratados como los límites aceptables de las estrategias a implementar o como restricciones del problema de optimización. Otro caso sería repetir el proceso de optimización sin estos límites para demostrar el beneficio de remover estos valores límites.

Al utilizar la convergencia cuadrática para alcanzar el mínimo global (si se quiere maximizar, se cambia de signo la función) por medio de la búsqueda de direcciones conjugadas, se sigue el esquema mostrado en la Figura 4.9, de tal forma que se buscan los valores óptimos dentro de la función objetivo.

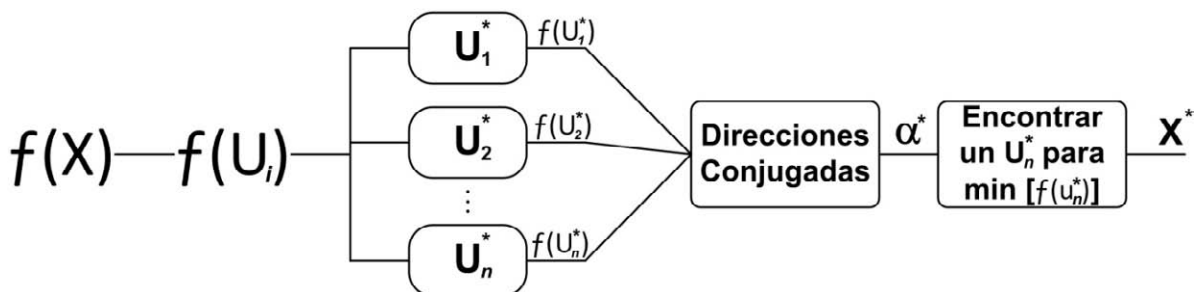


Figura 4.9. Representación Esquemática de la Función Objetivo

Se debe tener cuidado en incluir todos los indicadores relacionados con los objetivos dentro de la función. Si todos los indicadores se incluyen en la función, seremos capaces de evaluar todos los escenarios así como conocer las posibles restricciones en los procesos de optimización.

Las funciones utilizadas en este caso, están definidas en relación a una estrategia base, es decir una estrategia donde se proponer dejar la situación tal como está, lo que representa que sus planes en los próximos 30 años, serán mínimos. De esta manera, por definición, el valor de cada función objetivo evaluada en relación con la estrategia base, o punto de referencia es **cero**.

A continuación, se ha dispuesto de un par de funciones objetivo, las cuales incluirán los indicadores seleccionados, lo que nos llevará a tener una comprensión global de los escenarios y una completa clasificación de las estrategias implementadas. Existen las funciones de bienestar las cuales son diseñadas con el fin de estimar la eficiencia social de los objetivos, con base en un CBA estándar (Timms et al., 2002). Por otro lado, están las funciones de sostenibilidad, las cuales consisten en estimar los beneficios netos del transporte urbano, teniendo en cuenta otros indicadores que no pueden ser monetarizados, o que es muy difícil hacerlo. Por esta razón se le da un peso proporcional a cada uno de ellos dentro de la función objetivo. Así, es posible decir que estas funciones representan (dentro de los alcances de cada indicador) los intereses de las generaciones futuras, quienes deberán ajustarse a un consumo sostenible y a reducir, en la medida de lo posible, las emisiones relacionadas con el transporte urbano.

Función de Bienestar

La perspectiva en la evaluación de diferentes políticas de transportes en este punto es el beneficio de la sociedad en su conjunto. Esto significa que en la medida de lo posible, todos los costes y beneficios que se derivan de la implementación de una política de transporte deben incluirse dentro de la función objetivo, y además deben asignarse a su respectivo agente, en este caso, gobierno, operadores, usuarios del sistema o externalidades.

En el caso de la función objetivo tipo CBA, la cuestión de quién recibe los beneficios y quien debe incurrir en los costes debe dejarse claro. En este caso se hace la evaluación por sectores y también para la sociedad en su conjunto.

Como es sabido, el principio fundamental de un CBA es utilizar evaluaciones individuales (para determinar los impactos sobre la sociedad que causa la implementación de una estrategia cualquiera). Estos cambios en el bienestar de dicha sociedad se expresan en términos de dinero. Los beneficios netos de los usuarios de un sistema de transporte están asociados a los costes generalizados de viaje, los cuales incluyen los costes monetarios (tarifas, combustible, entre otros), el valor del tiempo utilizado en viajar, además de otros tiempos adicionales, como tiempos de espera, transbordo y caminata, entre otros. De esta manera, un viaje (ir del punto A al B) está definido como una función de los gastos del desplazamiento en sí, cuya curva de demanda está relacionada directamente con nuestro modelo de transporte, el cual puede utilizarse con costes generalizados diferentes.

La función objetivo CBA será enfocada desde el punto de vista de estimar el impacto que sobre el bienestar general influyen los diferentes actores del transporte y así obtener una clasificación general en términos de contribución. Aunque este análisis tiene algunas dificultades en el momento de establecer valores monetarios para algunos impactos ambientales y sociales, ya sea porque algunos indicadores son bastante difíciles de cuantificar, o porque cambian su valor a lo largo del tiempo, en esta investigación se utilizaron valores dados por la literatura existente.

La función objetivo CBA facilita la incorporación de aspectos de sostenibilidad social y ambiental, así como evaluar la eficiencia económica y la equidad. Entonces, se define $U_t = (u_t^1, u_t^2, \dots, u_t^n)$ como el vector de n diferentes medidas en el año t , y $U = (U_1, U_2, \dots, U_{30})$ como el vector de vectores de estrategias durante todo el periodo de la evaluación. Cualquier variable U es lo que anteriormente se consideró como una estrategia. Así, la forma general en que se puede expresar la función objetivo de eficiencia económica a optimizar es de la siguiente manera:

$$W(U) = \int_0^{30} \sum_i \frac{1}{(1+r)^t} \cdot [b_{it}(U_t) - c_{it}(U_t) - I_{it}(U_t) - e_{it}(U_t)] dt \quad (4.12)$$

Donde,

- i = Representa la medida i
- b_t = Beneficios totales en el año t
- c_t = Costes totales en el año t
- I_t = Inversiones de capital en el año t
- e_t = Costes por emisiones en el año t
- r = Tasa social de descuento [%]
- t = Tiempo

Como se puede ver, la ecuación está en función del conjunto de estrategias U , y no necesariamente en función de políticas puntuales en un año en particular U_t .

El valor de la función objetivo se calculará para cada conjunto de estrategias U . El punto importante en este paso es identificar el conjunto de medidas que maximicen la función objetivo, en lugar de tratar de buscar un óptimo individual, al final del periodo de evaluación.

Función de Sostenibilidad

En este caso, la función de sostenibilidad se basa en un análisis multicriterio MCA. La denominada decisión multicriterio es un campo interdisciplinario alimentado por fuentes muy diversas. En esencia, el análisis multicriterio es una optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un único agente decisor.

$$\min_{u \in M} F(U) = \sum_1^n \omega_i \cdot y_i \quad (4.13)$$

Donde,

- U = Es el vector $[u_1, u_2, \dots, u_n]$ de las variables de decisión. El problema de decisión es el de asignar los "mejores" (mejores en el sentido que las funciones objetivo definen valores a estas variables).
- M = Es la denominada región factible del problema (el conjunto de posibles valores que pueden tomar las variables).
- y_i = Es la variable de decisión. Variable sobre la cual se tiene control.
- ω_i = Parámetro numérico cuyos valores reflejan las contribuciones relativas de los cambios en cada una de las variables de decisión, según el logro de los objetivos.
- $F(U)$ = Es el vector $[f_1(u), f_2(u), \dots, f_k(u)]$ de las k funciones objetivo que recogen los criterios u objetivos simultáneos del problema. La formulación "min" (a minimizar), no es restrictiva pues siempre puede conseguirse mediante un adecuado cambio de signo

No es frecuente que en un problema de este tipo exista una única alternativa o solución (un valor concreto del vector u de las variables), para la cual alcancen simultáneamente su valor óptimo todas y cada una de las medidas. Es más, suele ocurrir que debido al menor o mayor conflicto entre los diversos criterios, una solución sea mejor que las otras en algunos de ellos, mientras que para los restantes criterios sea superada por otras soluciones.

Sin embargo, es muy frecuente que existan soluciones dominadas, llamadas así porque hay otra u otras soluciones que las superan claramente en al menos un criterio, sin ser peor en los restantes. Generalmente, sólo las soluciones no-dominadas o eficientes serán las que nos interesará seguir considerando.

Es importante que precisemos exactamente este concepto de solución eficiente, dado su papel fundamental en la teoría del análisis multicriterio. Decimos que una solución $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ($a \in X$) es eficiente cuando no existe otra solución $b \in X$ tal que $f_k(b) \geq f_k(a)$, $\forall k=1, p$, con al menos un q tal que $f_q(b) > f_q(a)$ (Barba-Romero, 1998).

Debido a la definición anterior, si se pasa de una solución eficiente a otra igualmente eficiente y uno de los objetivos mejora, entonces al menos alguno de los otros objetivos debe empeorar (si no ocurriese así, la segunda solución dominaría a la primera, en contra de lo supuesto).

La elección entre soluciones eficientes es el verdadero problema de este tipo de análisis (Dodgson et al., 2009), ya que en principio no hay ningún otro elemento de racionalidad 'objetiva' que podamos manejar para descartar más soluciones. Nos vemos obligados a tener que hacer intervenir consideraciones de tipo subjetivo: las preferencias del decisor.

4.4.3 Restricciones

Existen dos tipos de restricciones que afectan el proceso de optimización: la primera se refiere a los rangos de valores dados a los parámetros involucrados dentro de la función objetivo; y la segunda se relaciona con la evaluación MCA o con las metas generales, los cuales deberán reflejar los objetivos iniciales planteados por los planificadores.

Preferiblemente, los rangos de entrada dentro de los cuales pueden variar los parámetros a optimizar, deben limitarse de tal forma que el proceso de optimización no tome mucho tiempo y además, para que tome valores reales y prácticos.

Un segundo tipo de restricciones se basa en los datos de salida del modelo. Estas restricciones pueden expresarse como un parámetro dentro del modelo en cualquier periodo de tiempo, para así poder controlar un indicador y controlar el grado en que ha logrado su objetivo particular. A través de una adecuada selección de las restricciones se puede lograr la maximización de la función deseada.

4.4.4 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad tienen por finalidad mostrar los efectos que sobre los indicadores de sostenibilidad escogidos, tendría una variación o cambio en el valor de las variables exógenas que influyen en el modelo, y a la vez mostrar la holgura con que se cuenta para su realización ante eventuales variaciones de tales variables en el modelo. También se puede estudiar la incertidumbre de los resultados analizando otras variables decisorias.

El análisis de sensibilidad es un resumen que muestra los valores de los indicadores objetivos para cualquier porcentaje de cambio previsible en cada una de las variables más relevantes de estudio. El gráfico resultante permite ver fácilmente las holguras con que se cuenta para variaciones de cada una de las variables.

Este análisis se realizará de acuerdo al método Montecarlo o simulación Montecarlo (Metropolis y Ulam, 1949), donde se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones basadas en el muestreo sistemático de variables aleatorias. Por lo tanto es un proceso de cálculo que utiliza números aleatorios para derivar una salida, por lo que en vez de tener entradas con puntos dados, se asignan distribuciones de probabilidad a alguna o todas las variables de entrada. Esto generará una distribución de probabilidad para una salida después de la simulación.

Para poder realizar una simulación multivariable, es necesario suponer una distribución estadística para los parámetros que se quieren cambiar. La distribución a escoger debe estar basada en la naturaleza del modelo y de sus parámetros. Estos parámetros deben estar acotados dentro de un rango de valores. Para este estudio se supuso que los posibles valores de dichos parámetros están uniformemente distribuidos, es decir, que cada valor tiene la misma probabilidad de ser escogido como cualquier otro dentro del rango. Se utilizó esta distribución ya que no se dispone de la información necesaria para saber con certeza la distribución estadística de dichos parámetros.

El sentido de este análisis es examinar la incertidumbre de los resultados de un número de parámetros en las funciones objetivo, con dos objetivos principales: en primer lugar, se realiza una evaluación de la fiabilidad de los resultados de la implementación de una estrategia según los cambios producidos en los valores de los parámetros de la función objetivo. En segundo lugar, una evaluación de la conveniencia de los rangos de valores de las medidas seleccionadas. Los parámetros considerados se verán en el caso de estudio.

Dentro de un sistema dinámico, debido a sus complejas interacciones, en Kleijnen (1995) se habla acerca de la importancia de responder a preguntas como: ¿cuáles son los efectos en el resultado final de cambiar los valores de las medidas probadas? ¿Existe algún tipo de interacción entre los datos de entrada? Tratando de responder estas preguntas, dentro de esta investigación se utilizará un caso de estudio, en donde se tendrá en cuenta un punto más importante: ¿cuáles valores de datos de entrada dan un resultado óptimo?

4.5 RESUMEN Y DISCUSIONES

Se ha visto que un proceso de optimización consiste en buscar la mejor solución a un problema particular, bajo un amplio espacio de valores posibles. Este proceso de optimización se basa en la búsqueda de parámetros (definidos previamente y según el escenario) a través de un rango definido, con el fin de encontrar los valores óptimos de dichos parámetros que maximicen una función objetivo. Este procedimiento permite optimizar esta función objetivo en uno, o en los parámetros que se hayan definido, basándose en el ya enunciado método de minimización de una función de varias variables cambiando un parámetro a la vez. Aunque en los ejemplos mostrados solo se han empleado funciones con dos variables, la **gran ventaja** del método es su capacidad de optimizar simultáneamente varios parámetros a la vez.

El algoritmo que se ha implementado en esta Tesis Doctoral utiliza la dirección $\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0$ como una nueva dirección de búsqueda, ya que es la dirección resultante de las n iteraciones realizadas en el paso inmediatamente anterior. Esto con el fin de evitar la posible aparición de dependencias lineales entre las direcciones de búsqueda, según el método original de Powell. La diferencia más importante respecto al algoritmo de Powell original es la de descartar la dirección anterior, en cuya minimización la función f ha hallado el punto mínimo. Aunque parece paradójico descartar la dirección conjugada donde se encuentra el punto 'más' óptimo hasta ahora hallado (en la iteración anterior), esta dirección es la que más se parece a la nueva dirección $\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0$ y es la que más influye en la dependencia lineal del conjunto de direcciones. Una buena descripción del proceso informático utilizado puede verse

en “*Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*” (Press et al., 2007). En la actualidad es bien conocido que de todas las técnicas de optimización del tipo *hill-climbing*, la de Powell se considera que es la más adecuada para este tipo de modelos (Burns y Janamanchi, 2007). Esto se debe a que este método elige, combina y compara los resultados de la búsqueda, presenta una rápida convergencia cuadrática y no requiere realizar derivas parciales de la función objetivo. En resumen, este método es una técnica de búsqueda de un gradiente conjugado de una función.

Aparte del algoritmo, la optimización (según sea el tipo de función objetivo utilizada) se realiza a partir de una comparación entre un escenario alternativo (con la medidas a probar) y un escenario base, es decir, de un conjunto de supuestos (valores y situaciones iniciales) dentro del modelo de usos del suelo y transporte. La estrategia óptima puede ser probada comparando su robustez y eficiencia bajo otros escenarios, por medio de la función objetivo, teniendo en cuenta que los resultados serían diferentes según los escenarios asumidos.

De otro lado, la metodología desarrollada **no limita** el número de funciones objetivo a trabajar, ni el número de parámetros que las conforman. Así, el algoritmo se utiliza para resolver problemas que tengan varias soluciones, algunas mejores que otras. Se empieza con una solución aleatoria, e iterativamente se van haciendo pequeños cambios sobre los parámetros escogidos, mejorando la función objetivo un poco cada vez. Cuando el valor final de la función objetivo no sufra cambios adicionales significativos, el proceso termina.

Los limitantes de una estrategia pueden ser tratados como los límites aceptables de las medidas a implementar o como restricciones del problema de optimización. Así, por ejemplo, el límite mínimo sobre tarifas de transporte público o sobre la financiación disponible de una infraestructura, puede dejar fuera estrategias que excedan dichos límites. Otro caso sería por ejemplo, repetir el proceso de optimización sin estos límites para demostrar el beneficio de remover estos precios mínimos. Esto sería de gran ayuda en el caso de cambios en las medidas económicas.

Por medio de este método se puede resolver una función multidimensional, es decir, encontrar su punto máximo o mínimo, de más de una variable independiente. El método solo requiere la evaluación de funciones, no de obtener sus derivadas.

Este algoritmo de optimización ha mostrado resultados prometedores en la búsqueda de soluciones óptimas en gran diversidad de campos, lo que confirma la aplicabilidad, confiabilidad y la eficiencia de esta técnica de optimización global. La intención de esta investigación es adaptar la técnica a los complejos problemas de interacción de usos del suelo y transporte.

CAPÍTULO 5.

PROPUESTA METODOLÓGICA. DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO DE OPTIMIZACIÓN ESTRATÉGICA

TABLA DE CONTENIDO

5.1 INTRODUCCIÓN.....	91
5.2 MARCO DE EVALUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	91
5.2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	92
<i>¿El Transporte como una Demanda Derivada o Como una Actividad de Valor?.....</i>	93
<i>La Minimización del Tiempo y un Razonable Tiempo de Viaje.....</i>	94
<i>Falta de Planificación a Largo Plazo.....</i>	94
5.2.2 PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA SOLUCIÓN.....	95
<i>Reducir la Necesidad de Viajar.....</i>	95
<i>Cambio Modal.....</i>	95
<i>Reducción de las Distancias de Viaje.....</i>	96
<i>Mejora de la Eficiencia.....</i>	96
<i>Desarrollo de Herramientas de Apoyo a la Toma de Decisiones.....</i>	96
5.2.3 LA PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE COMO UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	97
5.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	99
5.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	100
5.4 PRINCIPIOS DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADA.....	100
5.4.1 INDICADORES.....	101
<i>Mecanismos de Evaluación de Indicadores.....</i>	103
5.4.2 SELECCIÓN DEL MODELO DE EVALUACIÓN.....	104
<i>Descripción del Modelo.....</i>	105
5.4.3 DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO DE OPTIMIZACIÓN ESTRATÉGICA.....	107
<i>Optimización Dinámica.....</i>	107
<i>El Modelo de Optimización.....</i>	108
5.5 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA INTEGRADA.....	109
5.5.1 INTEGRACIÓN, EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS.....	112
5.5.2 FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS INTEGRALES.....	113
<i>Los Principios de la Formulación.....</i>	114
<i>Los Principios de la Evaluación.....</i>	115
<i>Búsqueda de Sinergias y Eliminación de Barreras.....</i>	116

5.1 INTRODUCCIÓN

La solución a los problemas de las ciudades consiste en el diseño y evaluación de estrategias efectivas e integrales enfocadas hacia un desarrollo sostenible. La toma de decisiones por parte de las autoridades de una ciudad, con el fin de identificar su propia y óptima estrategia de transporte y usos del suelo y para satisfacer sus necesidades y objetivos a largo plazo, debe basarse en un juicioso análisis previo, respaldado por estudios técnicos.

Estos problemas urbanos no se solucionan simplemente con diseñar estrategias, es necesario que estos paquetes de medidas sean integrales; es decir, que tengan en cuenta, además de la relación entre los sistemas de transporte y usos del suelo, los aspectos sociales, económicos y ambientales de las zonas urbanas. En este caso, la clave para cumplir con los objetivos, es fortalecer los lazos entre el estado del arte del marco de evaluación de las medidas de transporte sostenibles y un modelo LUTI con un módulo automatizado de optimización multiobjetivo. Esta técnica permitirá a las autoridades y a los planificadores disponer de una herramienta que simule la evolución futura de las ciudades y proporcionar una guía para la implementación de estrategias óptimas. El modelo en sí debería convertirse en un mecanismo de seguimiento del progreso durante la ejecución, tal como lo plantea J. Forrester en su famoso reporte “*Urban Dynamics*” (Forrester, 1969).

Debido a las complejas relaciones entre los elementos urbanos, surgen preguntas acerca de la disponibilidad de herramientas útiles para el análisis de la problemática urbana y que además tengan la capacidad de estimar los impactos a largo plazo. Sin embargo, una vez esté la herramienta de análisis disponible, surge otra pregunta: ¿es posible encontrar el nivel óptimo de las estrategias que se desean implementar? Es decir, ¿existe una metodología para el diseño e implementación de estrategias óptimas de transporte y usos del suelo dentro de un entorno dinámico, que además tenga en cuenta las sinergias?

A responder estas preguntas se dedica este capítulo, donde se pondrán de relieve las nuevas necesidades urbanas, lo que llevará a plantearse la necesidad de desarrollar una herramienta de optimización que interactúe de forma dinámica con un modelo de evaluación de los sistemas de transporte y usos del suelo. Esta herramienta deberá ser flexible y permitir satisfacer la necesidad real de combinar las potencialidades de cada paquete de medidas, es decir, crear sinergias, con el fin de aportar una base sólida para el análisis de estrategias a largo plazo.

Así, en este capítulo se describe el marco de evaluación en donde se desarrolla la presente Tesis Doctoral (§5.2), y donde se plantea el problema que se pretende resolver, con un planteamiento general de la solución. Luego, en la sección 5.3, partiendo de la definición del problema, se describen los objetivos generales y específicos. En la sección 5.4, se muestran las bases de partida del desarrollo de la metodología, integrada por la selección de indicadores (medición de impactos), modelo de evaluación (herramienta de simulación), el modelo de optimización y finalmente en la sección 5.5, se describe la metodología propuesta (la integración funcional de todos estos elementos), así como la formulación de estrategias.

5.2 MARCO DE EVALUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En 1998 en el Reino Unido, el Libro Blanco de Transporte (DETR, 1998) respalda la idea del uso de estrategias de transporte integradas, incluyendo infraestructuras de transporte, medidas de gestión de la demanda, de *pricing* y usos del suelo, como forma de lograr objetivos orientados hacia la sostenibilidad. Este enfoque fue recientemente reforzado en el año 2007 (DETR, 2007a).

Dentro del concepto de estrategias integradas de transporte, la cuestión clave es entender la mejor manera de combinar la amplia gama de medidas existentes. Así que los puntos en cuestión son: encontrar la forma de identificar una combinación óptima de ellas, dado que en su mayoría, estas medidas pueden cambiar según su forma de implementación y; la forma en identificar sus restricciones y limitaciones. Estas preguntas han sido abordadas por varias investigaciones anteriores (Fowkes et al., 1998; May et al., 2000a; May et al., 2000b; Shepherd et al., 2006; Zhang et al., 2006; May et al., 2008), y en algunos proyectos europeos como PROSPECTS (Minken et al., 2003) y PROPOLIS (Lautso et al., 2004), donde ha habido importantes avances en el diseño de estrategias integradas. Sin embargo, ninguna de estas estrategias interactúa de forma dinámica con el modelo de apoyo, y no en todas las ocasiones, dicho modelo integra las interacciones dinámicas a largo plazo del sistema de transporte y los usos del suelo.

La metodología presentada en este capítulo, es un desarrollo que incorpora, además de un modelo dinámico de usos del suelo y transporte, un módulo de optimización de funciones objetivo compuestas por conjuntos de medidas. Para este propósito, se utiliza como **herramienta de apoyo** un modelo existente conocido como *Metropolitan Activity Relocation Simulator*, MARS (Pfaffenbichler, 2003), cuyas características principales se pueden ver en el apartado 5.4.2 y sus detalles en el Anexo 4. Se ha escogido este modelo porque en el Centro de Investigación (TRANSyT-UPM) se ha utilizado en varios proyectos como CityMobil¹ (Ruberti, 2009), MEMORYAL (Monzón et al., 2009), ASSET (Gühnemann et al., 2008) y también se ha trabajado coordinadamente tanto en Madrid, como en Viena con el desarrollador del modelo, además de escribir conjuntamente varias publicaciones (Guzmán, 2010; de la Hoz et al., 2008; Guzmán, 2008; Guzmán et al., 2008; Guzmán et al., 2011).

Este modelo proporciona la información necesaria de los impactos de las estrategias durante el periodo de evaluación (30 años) y posteriormente esta información se utiliza para evaluar las estrategias según los objetivos planteados en el inicio. El procedimiento de optimización (Capítulo 4) se utiliza para identificar el conjunto óptimo de medidas.

En esta investigación se han desarrollado **dos métodos distintos** para evaluar y optimizar las estrategias a implementar. El primero de ellos se basa en el ya conocido análisis coste-beneficio (CBA), que tiene un buen ejemplo de aplicación en el proyecto PROSPECTS (Minken et al., 2003) y el segundo, se basa en un análisis multicriterio (MCA), donde se ha utilizado un proceso de jerarquía analítica, desarrollado en Lootsma (1992) y Saaty (2000).

5.2.1 Identificación del Problema

Como es sabido, los principales problemas causados por el transporte urbano están asociados a la congestión, contaminación, consumo energético, accidentes, ruido y necesidad de espacio. Los contaminantes del aire son el mayor problema en las ciudades europeas, especialmente las partículas y el dióxido de nitrógeno (NO₂), las cuales son emitidas en gran medida por el transporte (Lautso et al., 2004).

El ruido ocasionado por el transporte es un serio problema alrededor del mundo. La Agencia Europea de Medio Ambiente (Wieringa, 1995) mostró que en Europa cerca de 113 millones de personas son afectadas por niveles de ruido superiores a 65 dB(A) y 450 millones por niveles superiores a 55 dB(A), donde el tráfico por carretera es la fuente de ruido más importante.

La infraestructura de transporte y los flujos motorizados también tienen la necesidad de grandes espacios urbanos para su funcionamiento, causando los conocidos efectos barrera. Además

¹ Caso de estudio Madrid.

estos espacios urbanos no pagan ningún tipo de impuesto. Los peatones y ciclistas son (y serán) los usuarios del sistema más débiles y vulnerables frente a los demás usuarios, a menos que se emprendan acciones para cambiar esta situación.

A pesar de este razonamiento, el crecimiento de las zonas urbanas sigue siendo el principal efecto negativo que enfrenta cualquier ciudad (Kenworthy y Laube, 1999; Rotmans et al., 2000; Su, 2010), aunque el conocimiento sobre el estado del medio urbano de Europa sea limitado (OSE, 2009).

Entonces, son bastante conocidos los problemas generales de una zona urbana, pero, ¿cuándo se sabe que hay un problema específico en una ciudad en particular? ¿Cómo es posible identificarlo? Para saber qué tipo de problema está relacionado con qué aspecto de la ciudad, basta con hacer un simple ejercicio de lógica: por ejemplo, un problema relacionado con la eficiencia se adjudica claramente a la congestión (entre más congestión, más tiempo consumirán los usuarios en una actividad que no es productiva); un problema social se puede relacionar con la distribución de oportunidades, la seguridad con los accidentes y así sucesivamente.

Al disponer de una lista clara y detallada de los problemas que tiene una ciudad, se tendrá una base sólida para la identificación de posibles soluciones. Como este es un ejercicio de evaluación a largo plazo (30 años), es necesario, aparte de los problemas actuales, tratar de identificar los problemas que una ciudad podría sufrir en el futuro debido a las tendencias urbanas actuales. Aunque no es fácil, con un cuidadoso análisis de las tendencias actuales, se pueden obtener datos interesantes. Sin embargo, a menudo estos objetivos muchas veces pueden ser un poco vagos y abstractos, por lo que puede ser un poco más fácil poner dichos objetivos dentro de una estrategia a largo plazo y analizar su comportamiento.

Una buena alternativa para clasificar los tipos de problemas que influyen sobre una zona urbana, es el impacto y la severidad con que se afecta a un grupo de personas. Sin embargo, una vez hecha esta clasificación, surge otro interrogante: ¿cuál debe ser prioridad, solucionar un grave problema que afecta a pocas personas o uno no tan grave pero que afecta a muchas más? En esta situación entran de nuevo los objetivos, en particular para este ejemplo, los objetivos de equidad. Se debe tomar una decisión según lo que se desee hacer en la ciudad.

En consecuencia, desde la perspectiva tradicional de la planificación del transporte, surgen dos problemas fundamentales: la minimización de los costes de viajes y los viajes como una demanda derivada. Esto sugiere que el paradigma de la movilidad sostenible (Banister, 2008) debe ser más flexible, especialmente si las políticas de desarrollo sostenible son una realidad. De esta manera, comprendiendo este paradigma, se ha llegado al punto de origen del problema del transporte urbano sostenible: la falta de una verdadera planificación a largo plazo, unida con la carencia de herramientas de soporte adecuadas para la ayuda en el proceso de toma de decisiones.

¿El Transporte como una Demanda Derivada o Como una Actividad de Valor?

En los viajes al trabajo, el tiempo de viaje es una variable importante, pero a medida que los patrones de viaje van cambiando y se presenta un aumento en los viajes de ocio, el tiempo que empleamos en viajar puede convertirse en una actividad valorada positivamente (Mokhtarian y Salomon, 2001; Schlich et al., 2004; Loo y Chow, 2006). El concepto ampliamente utilizado referente a que los viajes son una demanda derivada de otras actividades puede empezar a debilitarse a medida que los ingresos aumentan y el tiempo libre cada vez más se vuelve más valioso (Mokhtarian y Salomon, 2001). Puede ser que por estas razones una cantidad importante de viajes de ocio, de movilidad no obligada, sean subestimados cuando en un modelo se quiere representar la realidad.

Los análisis convencionales del transporte se basan en la teoría de que un viaje es un gasto, una actividad donde sus costes deben ser minimizados y los tiempos deben ser los mínimos posibles. Sin embargo, en la actualidad, los avances tecnológicos permiten una gran flexibilidad en los tiempos de viaje, incluyendo el teletrabajo. Esta nueva situación permite nuevas oportunidades de elección de las actividades de ocio, incluyendo vacaciones, compras, etc. La acción de 'viajar' puede ser reemplazada por más actividades en casa, mientras que otras actividades como por ejemplo ir de compras, se pueden convertir en una combinación de acciones, a través de diferentes modos y medios.

De esta manera, aunque la percepción de la actividad de viajar pueda estar cambiando, debido a los cambios sociales en el mundo moderno, en la actualidad el transporte como demanda derivada, particularmente la movilidad obligada, sigue siendo un elemento que se comporta como consecuencia directa de otro tipo de actividades, generalmente sin valor añadido para el viajero. Así que el estudio de la interacción de la demanda de transporte como una actividad de valor, dentro de un sistema urbano y dinámico de transporte y usos del suelo, con diferentes políticas de transporte, puede ser objeto de investigaciones futuras; particularmente para diseñar y optimizar estrategias de gestión de la demanda en fines de semana y vacaciones, o la localización de centros de ocio y recreación.

La Minimización del Tiempo y un Razonable Tiempo de Viaje

En este punto es evidente la contradicción entre aumentar la velocidad de los viajes y el calmar el tráfico. A manera de ejemplo, la mayor parte de los beneficios de los usuarios es consecuencia directa de los ahorros en tiempo de viaje (Salling y Leleur, 2011) y en el deseo, cada vez mayor, de viajar más rápido. En zonas rurales y en viajes de largo recorrido, puede que este punto tenga sentido; sin embargo en las ciudades, donde se intenta, con grandes esfuerzos, reducir el tráfico para mejorar los niveles de contaminación y seguridad, hay una gran contradicción.

Por un lado se cuenta con innumerables estudios que hablan de las horas (y el dinero) que los habitantes de una ciudad pierden en los atascos diarios y por otro lado, existen estrategias que intentan al mismo tiempo, aumentar y reducir las velocidades de recorrido. Estos ahorros de tiempo en miles de horas al año, monetarizados, pueden ser una cantidad de dinero muy importante, pero distribuido en la población, ¿es significativo? Para una persona común, en su viaje diario de una hora, ¿es significativo una reducción de 5 min?

Es por esto que un sistema de transporte sin congestión es poco realista, y extremadamente caro de mantener, por lo que gran parte del debate se ha centrado en encontrar el nivel adecuado de congestión (Lyons y Urry, 2005). De esta manera, el objetivo sería el establecimiento de tiempos de viaje razonables, en lugar de siempre buscar su minimización.

Siempre ha existido la preocupación de saber cuánto tiempo emplearemos en ir y volver del trabajo, o a cualquier destino, con un nivel aceptable de certeza. El problema se centra en conocer la fiabilidad del sistema, que vendría a ser un problema fundamental.

Falta de Planificación a Largo Plazo

Los dos apartados anteriores se pueden resumir en un solo punto: una verdadera e integral planificación urbana a largo plazo. A pesar de que el transporte y los usos del suelo están fuertemente relacionados, la mayoría de métodos que analizan estas relaciones son limitados, especialmente en las interacciones entre el transporte público y los usos del suelo (Kriger et al., 1999).

Como se ha mencionado, este es el verdadero problema que se quiere atacar. Las ciudades europeas están trabajando día a día por hacer frente a los retos del transporte urbano, partiendo

de posiciones diferentes en cuanto a la gravedad de sus problemas específicos, el contexto institucional y los medios e instrumentos disponibles (Wolfram, 2004). Aunque algunas ciudades han sorteado estos inconvenientes mejor que otras, es posible identificar una serie de deficiencias que afectan directamente la capacidad real de una planificación efectiva a largo plazo. Sin tener en cuenta problemas relacionados con la falta de participación ciudadana y la falta de coordinación institucional a diferentes niveles, una parte significativa del diagnóstico del problema es que no hay una comprensión integral entre las áreas que deberían involucrar las políticas urbanas, como el transporte, usos del suelo, ordenación del territorio, medio ambiente y desarrollo social y económico; además de la falta de metodologías claras de evaluación.

5.2.2 Planteamiento General de la Solución

Los tres enfoques expuestos anteriormente son importantes para entender el razonamiento que se encuentra detrás del análisis de transporte, ya que la mayoría de las metodologías utilizadas no pueden controlar los viajes como una actividad con valor por sí misma o manejar la fiabilidad del tiempo de viaje. Pero también tienen importantes implicaciones dentro de la planificación del transporte, si es que se trata del concepto de desarrollo sostenible a nivel estratégico. Las principales preocupaciones sobre los elementos físicos, como el tráfico y la forma urbana, deben equilibrarse con los elementos sociales (población y proximidad) (Marshall, 2001). Según Banister (2008), el enfoque de movilidad sostenible requiere adoptar medidas para reducir la necesidad de viajar (menos viajes), incentivar el cambio modal, reducir la longitud de los viajes y fomentar una mayor eficiencia en el sistema de transporte.

Reducir la Necesidad de Viajar

Este punto puede verse de dos formas diferentes: que la actividad que requería viajar ha sido reemplazada por otra que no lo requería, o ha sido sustituida por la tecnología (por ejemplo compras por internet o teletrabajo). Precisamente debido a esta mejora tecnológica continua, existe un gran potencial de sustitución de viajes, aunque también debido a esa mayor flexibilidad, pueden generarse otras actividades.

El impacto de las nuevas tecnologías en el transporte es complejo. Dentro de este contexto, se plantean tres cuestiones clave para utilizar la información y las comunicaciones para aumentar sustancialmente la eficiencia del transporte (Banister y Stead, 2004): la necesidad de tener una perspectiva clara sobre el transporte intermodal, cadenas de suministros sostenibles y el impacto de la tecnología y su flexibilidad, permitiendo llevar a cabo varias acciones de diferentes maneras. Las relaciones entre el transporte y las nuevas tecnologías parecen ser de tipo simbiótico, ya que hay una gran oportunidad para flexibilizar los patrones de viaje, sustituyendo algunas actividades, mientras que se generan otras y también otras son reemplazadas por viajes más cortos o en modos sostenibles (Lyons y Urry, 2005).

Cambio Modal

Las políticas de transporte pueden reducir la dependencia del coche a través de la promoción de transportes alternativos. Esto puede lograrse por medio de una gran variedad de acciones, por ejemplo calmando el tráfico urbano, potenciando el transporte público, implementando medidas de *pricing* y mejorando la accesibilidad o implementando subsidios al transporte público. La gestión de la demanda es efectiva para limitar el acceso a ciertas zonas y para la reasignación del espacio, haciendo un mejor uso de la capacidad disponible.

Las calles, el espacio público, están tomando una definición mucho más amplia: ya no se ve solamente como un espacio para los coches, ahora se enfoca como un espacio para gente, para la convivencia ciudadana. Por estos motivos, las medias que fomenten el cambio modal, deben

combinarse con otras que favorezcan el uso del espacio público sin coches, de modo que se logre una reducción neta del tráfico vehicular. Las restricciones al uso del coche dentro de las zonas urbanas serán bienvenidas, siempre y cuando se proporcionen alternativas viables a los viajeros.

Reducción de las Distancias de Viaje

Las medidas de usos del suelo, están relacionadas directamente con la localización física de actividades y por lo tanto, también son los instrumentos adecuados para reducir las distancias de desplazamiento. El objetivo de este tipo de medidas es dar origen a unos patrones de movilidad sostenibles que sean soportados por unos modos de transporte ecológicos y eficientes.

Una intervención de este tipo en una zona urbana puede hacerse por medio del aumento de las densidades y concentraciones, desarrollando usos mixtos, relocalizando viviendas, diseño de edificios, espacios y rutas, orientando el desarrollo hacia el transporte público y mediante el establecimiento de umbrales en cuanto al tamaño y disponibilidad de servicios e instalaciones.

La escala temporal en la que la movilidad sostenible puede alcanzarse, es similar al volumen de negocios inmobiliarios (cerca del 2% anual), aunque la decisión de la localización de las viviendas nuevas tendrá un gran impacto sobre los patrones de movilidad, lo que a su vez, influirá en gran medida sobre la vida útil de esas viviendas (Banister y Hickman, 2006).

Mejora de la Eficiencia

El papel de la tecnología es muy relevante ya que sus impactos sobre la eficiencia del sector transporte se sienten directamente a través del consumo de combustibles, la eficiencia de los motores y el uso de fuentes de energía renovables. La tecnología también puede emplearse en la reducción del ruido y las emisiones en el origen, así como para garantizar o restringir el acceso a ciertas partes de la ciudad a vehículos que cumplan determinadas características, como por ejemplo la cero emisión de contaminantes o las nuevas normativas ambientales. Esto sería una combinación de eficiencia tecnológica y cambio de hábitos. Dentro de la mejora de la eficiencia, se incluirían también las nuevas tecnologías de información y los sistemas inteligentes, los cuales dan al usuario una mayor fiabilidad del sistema, permitiéndole optimizar sus desplazamientos y tiempos de espera.

Desarrollo de Herramientas de Apoyo a la Toma de Decisiones

Cuando nos enfrentamos a un problema complejo es necesario desarrollar un método para estructurar y organizar los pasos a seguir, para encontrar una solución eficaz. Las fases más importantes involucradas en la construcción de una solución son la definición del problema, la conceptualización del sistema que se utilizará para solucionarlo, su representación y finalmente, la solución en sí misma (Drew, 1995).

Como ocurre normalmente en cualquier actividad económica y en general en las actividades humanas, el objetivo para solucionar dichos problemas es seleccionar las mejores estrategias de un conjunto de posibles opciones, lo que da lugar a los problemas de optimización, es decir, ¿cómo se podría identificar la combinación óptima de dichas medidas, sabiendo que cada una de ella puede variar sus efectos según cada combinación? Por otro lado, ¿cómo podemos representar las limitaciones financieras? ¿Las responsabilidades institucionales, el avance tecnológico o la aceptación pública? Y por último: ¿hasta qué punto estas estrategias y combinaciones son transferibles de una ciudad a otra? Estas son preguntas difíciles de responder, particularmente las que tienen que ver con las apreciaciones subjetivas. A su vez, el transporte está estrechamente ligado al desarrollo económico y social de una región, existiendo

una relación entre transporte, movimientos de población y localización de servicios, que hace aún más difícil tener una única respuesta.

Aunque la Unión Europea ha adoptado la directiva “*Towards a Thematic Strategy on the Urban Environment*” (EU, 2006), esta comunicación es apenas la idea básica de cómo plantear poco a poco la integración eficiente en la planificación urbana. Por esto, es necesario diseñar un enfoque de transporte sostenible que tenga en cuenta la problemática descrita desde el principio. En consecuencia, la solución a la falta de planificación planteada es, en este caso, el **diseño de una herramienta** que sea de utilidad y sirva de apoyo para la toma de decisiones complejas. Esta herramienta deberá involucrar los elementos incluidos en el planteamiento de la solución ya mencionado.

Para que la sostenibilidad de un sistema de transporte urbano sea tenida en cuenta desde el principio se requiere un conjunto políticas adecuadas a este objetivo, así como procedimientos específicos en la planificación y coordinación interinstitucional. Aunque esta idea no es totalmente nueva, ya que algunos países ya han buscado soluciones en este campo, sus experiencias constituyen un insumo importante dentro de esta investigación (Ver Capítulos 3 y 4).

5.2.3 La Planificación del Transporte como un Problema de Optimización

Dentro del contexto descrito en la sección anterior, se ha planteado de forma general la problemática del transporte y las posibles soluciones disponibles. En este caso, se pretende desarrollar una solución particular a esta problemática por medio del diseño y puesta en marcha de un modelo dinámico y estratégico de toma de decisiones que ayude a las administraciones y planificadores urbanos a elegir, diseñar y priorizar estrategias integradas de transporte y usos del suelo.

La razón de utilizar la optimización dinámica se debe a la variación en el tiempo de la demanda de viajes, la provisión de infraestructuras y las características y localización de la población. También se ha utilizado un modelo dinámico de optimización debido a que los modelos tradicionales no tienen sistemas retroalimentación. Además, la optimización dinámica permite determinar las trayectorias de las variables de control y de estado para un horizonte de tiempo finito para maximizar una función objetivo (Zuidgeest, 2005).

Debido a la complejidad matemática de los modelos dinámicos en general, los planificadores se han enfrentado continuamente a las dificultades de estimar las medidas (y sus valores) óptimas dentro de estrategias de usos del suelo y transporte con el fin de lograr unos objetivos deseados. En este caso, teniendo en cuenta el número de parámetros que pueden variar en un modelo LUTI complejo, además de la no linealidad de muchas de sus relaciones, el proceso de búsqueda de valores óptimos puede tomar mucho tiempo y llevar a un escenario ineficaz. Así, el conocimiento previo del modelo utilizado como herramienta es un factor decisivo que proporciona una valiosa orientación para una búsqueda de resultados óptimos en general. En consecuencia, utilizar algoritmos de optimización para solucionar este tipo de problemas es una aplicación práctica bastante prometedora en términos del desarrollo de una metodología automatizada y eficiente que servirá como ayuda y herramienta de apoyo en la toma de este tipo de decisiones.

En la Figura 5.1 se esquematizan los pasos básicos de este proceso de optimización. Como punto de partida, se definen el escenario base, los escenarios alternativos y la función objetivo del tipo que sea (la cual estará formada por los indicadores seleccionados). Posteriormente se definen las estrategias a implementar dentro del modelo y se inicia el proceso de optimización. El algoritmo empieza con la búsqueda de los valores óptimos de los parámetros dentro de la función objetivo y tras una serie de iteraciones, el modelo converge a un resultado. Los pasos básicos descritos en la Figura 5.1, componen a un nivel técnico, los siguientes elementos:

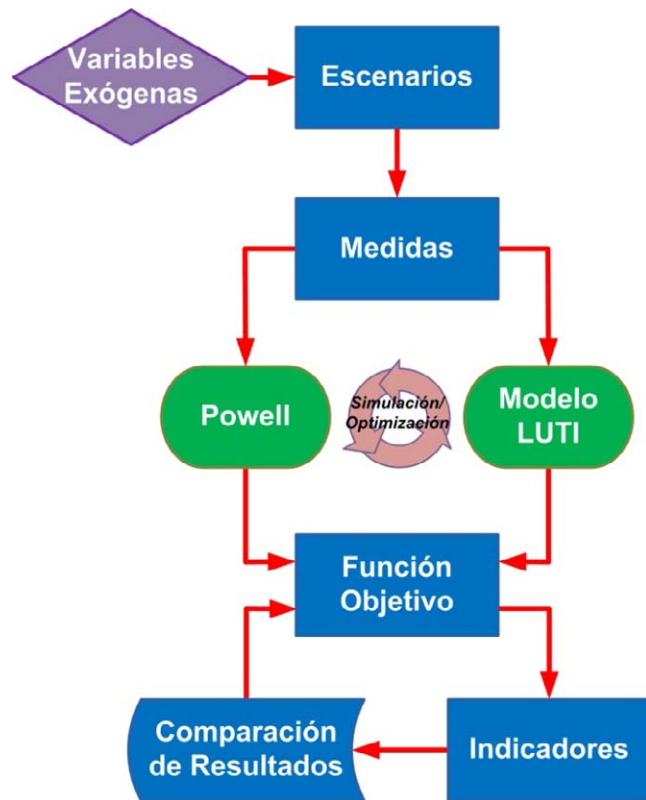


Figura 5.1 Proceso de Optimización

- **Modelo Integrado.** El objetivo principal del modelo es servir de apoyo en el complejo razonamiento de las relaciones causales que van desde los objetivos hasta las medidas. La idea es que las interacciones entre el sistema de transporte y el territorio deben ser modelizadas, y la única forma realista de hacerlo es utilizando un modelo de estas características.

- **Formulación de Políticas Realistas.** En primer lugar, no es realista disponer de un modelo que simule todos los procesos en detalle de un sistema urbano, ya que lo que se busca es una representación simplificada de la realidad. Esto significa que la aplicación del resultado de la optimización al mundo real deberá hacerse sin perder validez, teniendo en cuenta el contexto de aplicación en su totalidad, aunque sin entrar en detalles que sean costosos de aplicar y que al final no aporten datos relevantes dentro del resultado final. Este proceso resultará teniendo un efecto claro y desempeñando un papel en la búsqueda de la solución

óptima, manteniendo el modelo siempre simple y comprensible.

- **Causas y Efectos Claros y Explicables.** El modelo de optimización no debe producir solamente una alternativa adecuada, sino también una explicación de por qué esa alternativa en particular es óptima, en relación con los objetivos buscados. Es por esto que un modelo de 'caja negra' no sería el más conveniente para estos casos, ya que las causalidades deben poder expresarse con facilidad mediante ecuaciones matemáticas, aunque esto no quiere decir que el proceso de formulación deba ser totalmente racional. Es decir, un modelo que ayude a diseñar alternativas óptimas, debe ser capaz de explicar las relaciones correspondientes.

Finalmente, las políticas y estrategias que conforman las funciones objetivo, podrían estar compuestas por variables de varios tipos según se describe a continuación:

- **Políticas Continuas.** Son variables representadas por ciertos indicadores que son utilizadas para cambiar el impacto de una medida a toda el área de estudio o a una gran parte de ésta. Este tipo de políticas pueden ser por ejemplo cambios en los impuestos al combustible, tarifas y frecuencias de transporte público, tarifas de aparcamiento o de peaje, entre otros.
- **Políticas Discretas.** Estas son variables que nos dicen si una medida ha sido aplicada o no, es decir toman valores 0 ó 1. Por ejemplo, la ejecución de una inversión en infraestructuras en un periodo de tiempo determinado, puede llevarse a cabo o no, según el escenario planteado.

En resumen, el punto de partida se basa en comparar dos escenarios o el cambio en un periodo de tiempo en particular. Se tendrá como punto de comparación un escenario base donde todo se deja igual (escenario base) y otro donde se implementarán las diferentes estrategias. El periodo de evaluación es de 30 años, y aunque la sostenibilidad es un término que se mide a

mucho más largo plazo, dadas las limitaciones, se considera que una predicción del comportamiento urbano a este horizonte es suficientemente arriesgado.

5.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta el problema planteado y los posibles campos de acción para una solución general, el objetivo y el aporte científico de esta Tesis Doctoral, consisten en diseñar una herramienta y metodología que combinen de la mejor manera posible las nuevas tendencias en cuanto a las políticas de desarrollo de los sistemas de transporte y el suelo urbano, ya que a nivel europeo, la política de transportes se ha centrado en la optimización de un sistema de transporte intermodal y a nivel trans-europeo, a través de una mayor interoperabilidad e interconectividad (Mulley y Nelson, 1999). Estos nuevos enfoques han sido llevados a la práctica de la planificación del transporte con distintos énfasis en diferentes lugares de Europa, aunque según Hull (2008) existe poca evidencia que sustente la existencia de vínculos institucionales entre las administraciones para garantizar que se produzca una integración de medidas.

Bajo esta pequeña introducción, es claro que una adecuada planificación y gestión de un sistema de transporte es la clave para ofrecer a una ciudad el primer paso hacia el desarrollo de una movilidad sostenible. Para llegar a esto, es necesario disponer de herramientas de apoyo capaces de ayudar a identificar y evaluar las mejores estrategias posibles para que esto pueda convertirse en realidad. Sin embargo, los problemas relacionados con el transporte y el territorio son más importantes en las ciudades, de tal forma que esta tesis se centra en la escala urbana y metropolitana. Así, se propone el desarrollo de un modelo de optimización de estrategias de transporte y usos del suelo, basado en métodos eficientes para encontrar el óptimo de una función objetivo compuesta por varias variables. Este modelo de optimización interactúa de forma dinámica con un modelo LUTI, evaluando una o varias funciones objetivo a largo plazo.

En consecuencia, el objetivo principal y básico de esta Tesis Doctoral **es desarrollar un modelo integrado de optimización de estrategias de transporte y usos del suelo, que evalúe y optimice el funcionamiento de un sistema urbano, teniendo como meta la maximización del bienestar de la sociedad, dado por funciones de eficiencia y sostenibilidad, minimizando el consumo descontrolado de recursos no renovables, permitiendo conseguir una actividad sostenible desde la perspectiva social, económica y ambiental y aportando una base sólida para el análisis de estrategias de usos del suelo y transporte a largo plazo.**

De esta forma, el modelo planteado deberá ser capaz de dar respuesta a cuestiones fundamentales para organizar un sistema de transporte urbano, según el enfoque de sostenibilidad descrito. Así, el objetivo principal se articula en las siguientes fases:

- Desarrollar una metodología de evaluación estratégica que permita la optimización de medidas de transporte urbano, mediante la definición de escenarios de oferta, de movilidad, de medio ambiente y consumo energético, a largo plazo.
- Una vez definidos los escenarios y estrategias, hay que diseñar una adecuada combinación de medidas para alcanzar el óptimo global de los diversos objetivos contrapuestos de una movilidad sostenible. Se desarrollará, una función multiobjetivo de sostenibilidad que permita establecer paquetes integrados de medidas de movilidad dentro de los escenarios definidos en el punto anterior.
- Una vez definidas las estrategias, la metodología estará en capacidad de permitir el análisis de las sinergias, así como los efectos combinados de dichas estrategias en el largo plazo.

- Por último, se validará la metodología desarrollada mediante su aplicación a un caso de estudio, orientado a optimizar las estrategias de movilidad en la región de la Comunidad de Madrid.

5.3.1 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo propuesto se ha de cumplir una serie de objetivos específicos según cada fase de desarrollo de la investigación:

- Desarrollo y justificación de la forma en que debe hacerse un enfoque integrado de usos del suelo y transporte.
- Formulación de escenarios a largo plazo de movilidad sostenible. Definición de los elementos críticos, de las variables explicativas que definen el proceso, de las variables de control disponibles e indicadores que permitan valorar el progreso del sistema hacia unos escenarios futuros de movilidad sostenible.
- Estudio de la compleja interrelación entre transporte y usos del suelo, analizando la influencia de la localización de las actividades en la distribución de la movilidad en el ámbito urbano y regional y sus impactos a largo plazo.
- Definición de estrategias que produzcan los mejores efectos sinérgicos para una movilidad sostenible: análisis de las sinergias entre los distintos tipos de estrategias diseñadas y su potencial para cumplir los objetivos fijados en los escenarios de transporte.
- Planteamiento de un proceso de modelización, evaluación y optimización que podrá servir de ayuda en el proceso de planificación conjunta y sostenible de los usos del suelo y transporte, atendiendo a los objetivos generales de sostenibilidad y los escenarios diseñados.

5.4 PRINCIPIOS DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADA

Dentro del contexto de integración, el proceso de evaluación y optimización debe realizarse teniendo en cuenta una serie de pasos iniciales:

1. Recopilar toda la información necesaria para alimentar el modelo.
2. Conocer los objetivos que se quieren lograr y traducirlos de alguna manera en una función objetivo.
3. Definir las estrategias y medidas, según los rangos y características particulares de la zona de estudio.
4. Definir los escenarios de acuerdo a los objetivos, tasas de crecimiento, desarrollo económico y demás factores externos que se quieran tener en cuenta y que el modelo soporte.
5. Con base en esta información, se está en disponibilidad de configurar y calibrar el modelo LUTI. Este modelo incluye toda la información relacionada con la zona de estudio, así como su zonificación, habitantes, puestos de empleo, vivienda, etc.

Una vez en funcionamiento, el modelo de usos del suelo y transporte está en capacidad de evaluar los impactos de las estrategias durante un periodo de 30 años. El modelo toma como datos de entrada los cambios producidos por las medidas de transporte, la demanda y oferta de transporte y la información socioeconómica y produce como datos de salida, los cambios en los indicadores de los objetivos, como por ejemplo la demanda de transporte, los cambios en los

volúmenes de tráfico, velocidades, accidentes, emisiones, entre otros indicadores. Estos cambios son recogidos por la función objetivo, donde la rutina de optimización ajusta los niveles de cada medida adoptada, mejorando su valor.

Así, las cuestiones clave de la integración, dentro del presente marco de evaluación entre estrategias y optimización, radican en la necesidad de entender la mejor manera de combinar una amplia variedad de estrategias y medidas. Y también en cómo identificar sus combinaciones óptimas, dado que la mayoría de estas medidas pueden variar según su forma de implementación. También hay que tener en consideración las restricciones financieras, las responsabilidades institucionales, la tecnología y la aceptación pública (Zhang et al., 2006).

5.4.1 Indicadores

Un componente importante de una sociedad sostenible es el bienestar general de sus ciudadanos. Esto implica poder vivir en unas condiciones que incluyan un sistema de transporte cómodo, limpio y rápido, un entorno (natural y artificial) de buena calidad y oportunidades reales de participar en la planificación local y en los procesos de toma de decisiones. En consecuencia, en este apartado se describe la metodología utilizada para la selección de indicadores que conformarán las funciones objetivo.

Dentro del contexto del transporte sostenible, un conjunto de indicadores (a cualquier nivel) puede ser utilizado para medir el desempeño de una serie de estrategias encaminadas a mejorar la sostenibilidad de una ciudad. Según la definición dada en el Capítulo 2, un indicador puede ser utilizado con varios fines, por lo que se deben definir criterios generales para su selección y validación. Existen tres criterios básicos para que un indicador sea seleccionable (OECD, 1999): que sea relevante y útil dentro de la aplicación de una política (representatividad, sensible a las estrategias, compatibilidad, alcance), que tenga solidez analítica (clara relación entre el impacto del indicador y el nivel de logro del objetivo) y que sea medible (disponibilidad, calidad). Una valoración conjunta de los indicadores bajo este prisma multidimensional y teniendo en cuenta las recomendaciones de la iniciativa de la Unión europea “*The European Common Indicators*” (Berrini et al., 2003), ayuda a la selección de aquellos indicadores más relevantes, representativos y fiables, los cuales integrarán las funciones objetivo. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los criterios de selección de los indicadores.

Tabla 5.1. Criterios de Selección de Indicadores

Relevancia y utilidad	Proporcionar una descripción real (dentro de lo razonable) de las condiciones del entorno, las presiones sobre el ambiente y las respuestas de la sociedad
	Simple, fácil de interpretar y mostrar las tendencias en el tiempo
	Sensibilidad respecto a los cambios en el ambiente y a las actividades humanas
	Que sea comparable con otros indicadores
Solidez analítica	Tener un valor de referencia con el cual comparar y medir su desempeño
	Bien fundamentado técnica y científicamente
	Se basarán en normas previamente establecidas
Medible	Podrá utilizarse dentro de otros modelos y sistemas
	Medición fácilmente disponible
	Documentación disponible y calidad de información
	Actualización regular

Fuente: OECD (1999).

Siguiendo estas recomendaciones, se estudiaron los mecanismos más apropiados para la construcción de los indicadores, tanto desde el punto de vista de su estructura analítica como su formato gráfico y espacial, con el fin de obtener una comprensión sencilla de la información que se pretende transmitir. Cada uno de los indicadores finales quedó caracterizado por aspectos como:

- Objetivo que evalúa
- Descripción
- Fuentes - Antecedentes - Referencias
- Método de cálculo
- Unidades
- Observaciones
- Representación gráfica/formato
- Tipología de indicador
- Aplicabilidad sectorial/escala
- Valoración del indicador según los criterios de selección

Teniendo en cuenta los criterios de selección, también fue necesario contar con indicadores que sirvieran para la planificación a largo plazo y especialmente que fueran útiles para la optimización de estrategias. Al necesitar indicadores que expliquen a futuro los resultados de la implementación de diferentes estrategias, sólo se utiliza la información derivada del proceso de planificación para construirlos. Esto significa que debe existir una clara relación entre el impacto y la eficiencia del indicador y además, estos indicadores deben ser sensibles a las estrategias que se prueben en el modelo. Existen dos clases de indicadores fácilmente identificables:

- Indicadores que describen el estado de un elemento concreto en términos absolutos (por ejemplo, la construcción de un carril-bus, la puesta en funcionamiento de un peaje, la cantidad de toneladas de CO₂ emitidas, etc.). Se pueden describir en unidades monetarias o físicas.
- Indicadores que miden el desempeño o el cambio de conducta del grupo al que se dirige la medida (por ejemplo, porcentaje de incremento en el uso del transporte público, reducción del tráfico motorizado, etc.).

En resumen, el primer grupo de indicadores evalúa el proceso al final de la implementación de una estrategia, mientras que el segundo varía con el tiempo, una vez que la estrategia ha sido puesta en marcha. En todo caso, para evaluar ambos grupos de indicadores es preciso que estos sean monitorizados dado que en el proceso de implementación de las estrategias, deben estar presentes la fase de evaluación y la monitorización, que permitirá ajustarlos o modificarlos si fuera necesario, así como aprender de la experiencia de cara al futuro. Esta evaluación sólo es posible si se monitorizan los indicadores cualitativos (descriptivos) y cuantitativos (numéricos).

Además de todo esto, es preciso contar con los indicadores adecuados. En este sentido, la elección debe decantarse hacia aquellos que no sean demasiado complejos y costosos de monitorizar, pues lo cierto es que cuanto más complejo sea un indicador o más amplio alcance tenga, más recursos se necesitan (en tiempo y dinero) para recoger los datos que se precisan. De ahí el problema y la permanente discusión sobre qué indicadores son útiles y tienen sentido

para la monitorización de las actuaciones diseñadas para lograr un desarrollo urbano sostenible, pues no existe un conjunto unitario de indicadores estándar aplicable a una situación dada.

En el proceso de desarrollo y elección de unos buenos indicadores para esta investigación, se tuvo en cuenta los siguientes criterios, además de los criterios expuestos en la Tabla 5.1:

- La realidad analizada, vista a través de un modelo, no refleja exactamente el mundo real, tan solo es una buena aproximación que permite hacer seguimientos coherentes de diferentes políticas en la planificación a futuro.
- El interés principal es en los resultados, es decir, el nivel de cumplimiento alcanzado en los objetivos.

Generalmente los indicadores propuestos para la evaluación no tienen las mismas unidades de medida, como por ejemplo el tiempo de viaje en un modo dado y la proporción de población que trabaja en el centro. Aunque es posible comparar políticas utilizando estos indicadores, se pueden presentar algunos inconvenientes. Disponer de una gran cantidad de indicadores en la evaluación, puede ser poco práctico y por otro lado, el valor resultante en las comparaciones puede ser un poco subjetivo. Al estandarizar estos indicadores se evita este problema ya que los resultados se agregan de acuerdo con sus valores y pesos específicos dados por expertos.

Por otro lado, la revisión de los indicadores más comúnmente usados podría estructurarse según diferentes criterios para adecuarse a los diferentes planes o proyectos a evaluar, como por ejemplo:

- Su aplicabilidad, pudiendo ser indicadores estructurales (comunes) o sectoriales.
- Su escala, pudiendo ser indicadores generales o específicos/locales
- Su temporalidad, pudiendo ser indicadores a evaluar en corto, medio o largo plazo

De esta manera, los indicadores utilizados estarán destinados a proporcionar la información suficiente para poder tomar decisiones sobre el desempeño de las estrategias de usos del suelo y transporte empleadas en la zona de estudio.

Mecanismos de Evaluación de Indicadores

En este punto se define la forma en que se escogen los indicadores con los cuales se pretende evaluar el impacto de las diferentes estrategias implementadas sobre la función objetivo de tal forma que se puedan construir valores explícitos y preferencias en la definición de sostenibilidad. En los datos de la Tabla 5.1, se incluyeron los criterios de selección para un indicador y los indicadores propuestos para la presente Tesis Doctoral, se seleccionaron con base en los tipos de evaluación descritos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Clasificación y Evaluación de Indicadores

Criterio de Selección	Evaluación		
	1	2	3
Relevancia	Alta	Media	Baja
Solidez analítica	Buena	Media	Pobre
Medición:			
Disponibilidad de información	Corto plazo	Medio plazo	Largo plazo
Calidad de información	Buena	Media	Pobre

Fuente: OECD (1999).

En su conjunto, la lista final de indicadores es una lista exhaustiva, que incluye todos los objetivos que definen en su conjunto el desarrollo sostenible. Finalmente, en el momento de elegir los indicadores, se consideraron las siguientes características como las más relevantes; características adaptadas, claro está, al caso de estudio particular.

- Sólo se seleccionaron los indicadores más relevantes. Se buscó un sólido equilibrio entre los indicadores sintéticos por una parte, y los que son capaces de mostrar la evolución local sobre el período de evaluación.
- Los finalmente seleccionados están claramente definidos: ámbito geográfico y temporal, modo de cálculo, fuente y periodicidad.
- Los indicadores seleccionados deben permitir monitorizar en su conjunto las tres dimensiones básicas de la sostenibilidad: social, económica y medioambiental.
- Los indicadores seleccionados son fácilmente comprensibles, no sólo por los decisores políticos, sino también por el público en general. Esa simplicidad facilita, asimismo, la normalización de indicadores entre los diferentes observatorios existentes.

5.4.2 Selección del Modelo de Evaluación

Para esta investigación se utilizó el modelo MARS (*Metropolitan Activity Relocation Simulator*) desarrollado por P. Pfaffenbichler en su Tesis Doctoral (Pfaffenbichler, 2003), ya que este modelo y su plataforma flexible permiten adaptar y modificar las condiciones de análisis según los requerimientos de los planificadores y modelizadores. El modelo MARS es un modelo de interacción entre los usos del suelo y el transporte que trabaja con un nivel de agregación importante y hace evaluaciones a largo plazo. Fue desarrollado como una alternativa al tradicional modelo de cuatro etapas, proporcionando un ahorro de tiempo ya que se omite el paso de asignación, trabajando con relaciones de velocidad-intensidad (pares O-D) en lugar de una red completa. MARS asume que los usos del suelo no son constantes, sino que hacen parte de un sistema dinámico que se ve influido por las infraestructuras de transporte. En la Tabla 5.3 se muestra una pequeña descripción del modelo MARS Madrid en términos de oferta y demanda.

Tabla 5.3 Características del Modelo MARS

Características	MARS
Número de zonas	90
Modos de transporte	Coche, transporte público, caminar
Efectos de congestión	Curvas específicas de intensidad-velocidad
Costes generalizados	Tiempo de recorrido, tiempos de espera, acceso y salida, tiempos de búsqueda de parking, tarifas
Propósitos de viaje	Movilidad obligada y no obligada (<i>commuting</i> y <i>others</i>)
Características del hogar	Residentes empleados, nivel de motorización, ingreso medio por hogar
Elección de ruta	No
Elección de modo y destino	Simultáneo
Respuesta de la demanda	Viajes movilidad obligada inelástica. Presupuesto de tiempo de viaje
Respuesta de los usos del suelo	Si

Fuente: Shepherd et al., (2006).

La integración agregada del modelo dinámico de usos del suelo y transporte MARS, fue desarrollada dentro de un marco centrado en la sostenibilidad. La hipótesis subyacente es que las ciudades son sistemas 'auto organizables' y donde sus principales sinergias pueden aplicarse

para describir su comportamiento colectivo. Un modelo cualitativo fue desarrollado basado en una investigación vienesa (Pfaffenbichler, 2003). El método de diagramas retroalimentados fue usado en este caso. Partiendo de la base de este modelo cuantitativo, se convirtió en un código. MARS, en sus inicios, se calibró para la ciudad de Viena. Un programa extensivo de pruebas del modelo se llevó a cabo utilizando información de 1981 a 2001. Pruebas de sensibilidad y de trazabilidad probaron la utilidad de MARS.

Descripción del Modelo

MARS incluye ciclos de retroalimentación entre los submodelos de transporte y usos de suelo. También incluye los más importantes modos de transporte (Tabla 5.3). Una gran ventaja de este modelo en la actualidad es que trabaja bajo un software de sistemas dinámicos conocido como Vensim® donde es posible cambiar sus ecuaciones y relaciones según sea necesario, dejando de lado los modelos conocidos como de 'caja negra'. Esta característica hace al modelo transparente y flexible y, bajo una programación orientada a objetos que facilita su desarrollo y comprensión. Es importante aclarar que MARS no es un modelo de equilibrio.

MARS consta de dos modelos principales: el de transporte y el de usos del suelo, tal como se puede apreciar en la Figura 5.2. Estas dos partes están relacionadas por un intervalo de tiempo, que permite que cada submodelo trabaje en dos escalas de tiempo diferentes. Esto significa que al haber cambios en el sistema de transporte, éstos tendrán un impacto sobre el sistema de usos del suelo después de un periodo de tiempo t ; a su vez, si hay cambios en el sistema de usos del suelo, estos causarán reacciones inmediatas en el sistema de transporte. El modelo de usos del suelo está conformado por un modelo de desarrollo y localización residencial y de puestos de trabajo. También existe un modelo de consumo energético y de emisiones. Todos estos modelos están conectados entre sí. El modelo de transporte está conformado por viajes de *commuting* y por los que no lo son (viajes de ocio), incluyendo modos no motorizados. Los modelos de consumo energético y emisiones son dependientes de las velocidades de recorrido. El modelo de usos del suelo considera criterios de localización residencial y de empleo, tales como la accesibilidad, el suelo disponible, el precio y la cantidad de zonas verdes.

En general, estos modelos son de tipo LOGIT o gravitacional. El modelo de transporte implica decisiones diarias, mientras que en el de usos del suelo, según el tipo de ciudad, éstas pueden tardar hasta 15 años, o más.

La hipótesis principal de MARS es que la movilidad es sólo un medio de satisfacer unas necesidades, pero no es una necesidad en sí misma. Adicionalmente supone que la gente tiene un presupuesto de tiempo

de viaje finito y constante disponible para gastar en desplazarse, ya que estudios empíricos han demostrado que el tiempo destinado a viajar permanece constante a lo largo del tiempo y entre zonas (Hupkes, 1982; Marchetti, 1994; Levinson y Kumar, 1994; Kölbl, 2000; Schafer, 2000). Bajo estos conceptos, el modelo trabaja además con los siguientes parámetros:

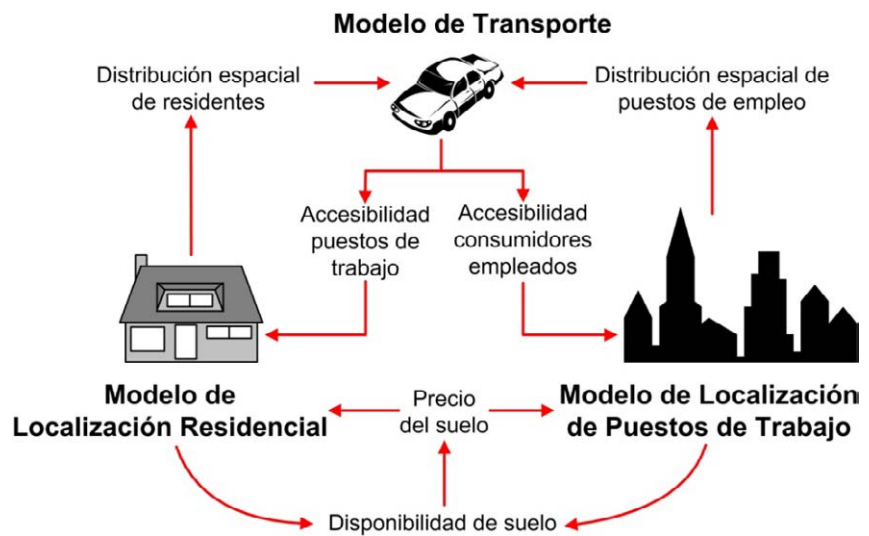


Figura 5.2 Estructura Básica de los Submodelos de MARS

- Usa ratios de viajes constantes para los desplazamientos de trabajo.
- MARS trabaja con dos grupos de personas: personas en hogares con y sin coche.
- Hay dos tipos de viajes: trabajo (*commuting*) y otros (resto).
- Cuatro modos de transporte: *slow*¹, transporte público (autobuses y modos ferroviarios) y coche.
- El número de viajes totales de trabajo se distribuye por zonas y por modos de transporte.
- El tiempo empleado en los viajes de trabajo se extrae del presupuesto de tiempo de viaje. El tiempo restante, MARS supone que queda libre para realizar el resto de actividades.

MARS trabaja sobre la plataforma Vensim® y a su vez éste utiliza libros de Excel, para algunos datos de entrada.

Otro concepto sobre el que se basa el modelo MARS, Diagramas de Flujo Causales (CLD) es la base de la definición y explicación de las relaciones causa-efecto de las variables del modelo. Así, por ejemplo, en la Figura 5.3, se muestra parte del modelo de transporte en el que se pueden ver las variables que afectan al número de viajes en vehículo privado, generándose diferentes ciclos o bucles.

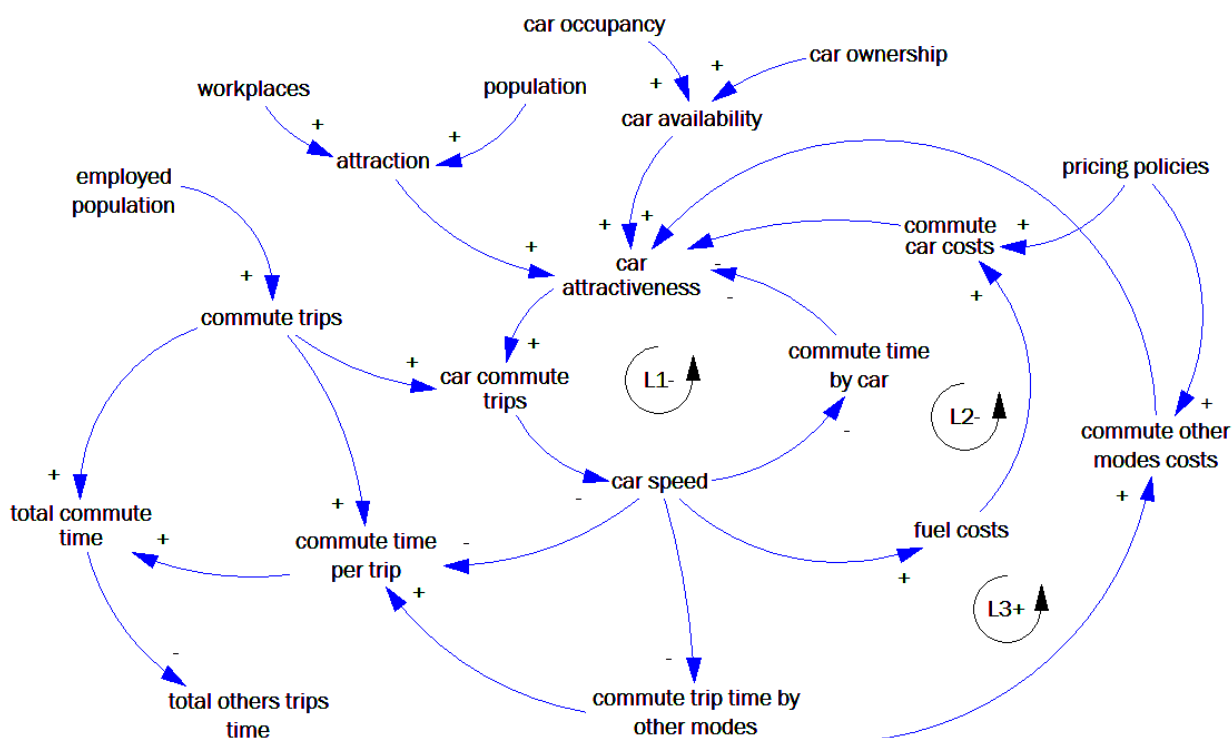


Figura 5.3 CLD del Modelo de Transporte – Viajes en Coche en MARS

Un bucle negativo (L1) indica que la generación de viajes en coche está vinculada con la atractividad de la zona para ir en coche, a su vez representa el efecto de la congestión y su

¹ Este término se refiere a modos no motorizados, viajes a pie y/o en bicicleta.

influencia sobre la velocidad. Este bucle negativo es un bucle de naturaleza equilibradora. El Bucle L2 actúa sobre el coste del desplazamiento. Estos bucles siguen teniendo una naturaleza que hace tender al sistema al equilibrio. Pero el bucle L3 sin embargo es de naturaleza desestabilizadora, puesto que el mayor uso del coche, aumentan la congestión también para otros modos de transporte que comparten vía con éste de tal forma que repercute en una ‘desutilidad’ de los modos alternativos, y por tanto una mayor atractividad del coche, lo que a su vez causa un mayor uso del mismo. Relaciones CLD similares se han desarrollado para el modelo de optimización. Su simplicidad y familiaridad de uso han sido elementos importantes de cara a establecer un modelo transparente y escalable.

Una descripción detallada del modelo, su adaptación al caso de estudio y su calibración, puede verse en el Anexo 4.

5.4.3 Desarrollo de un Modelo Dinámico de Optimización Estratégica

Para realizar investigaciones de optimización, es necesario disponer de dos tipos de modelos complementarios (Burns y Janamanchi, 2007): el primero de ellos, es el modelo dinámico que simula el comportamiento de las variables y procesa los datos de la zona de estudio. El segundo modelo debe ser el que evalúa y optimiza los valores de las medidas, para así analizar su desempeño.

De esta manera, se ha utilizado una optimización dinámica para modelar el desarrollo sostenible de un sistema de transporte urbano, de acuerdo con la teoría y características descritas en capítulos anteriores.

Optimización Dinámica

El principal objetivo de la optimización en este caso es determinar las causas que satisfacen un conjunto de restricciones y que al mismo tiempo maximizan o minimizan una función objetivo. De acuerdo a la Figura 5.4, estamos interesados en encontrar el valor óptimo $r(t)$ que, a través del sistema S (el cual está descrito por las variables de estado $x(t)$), las medidas $u(t)$, las variables exógenas $g(t)$ y los tiempo inicial t_0 y final t_n , optimizan la función objetivo $f(u, x, g)$.

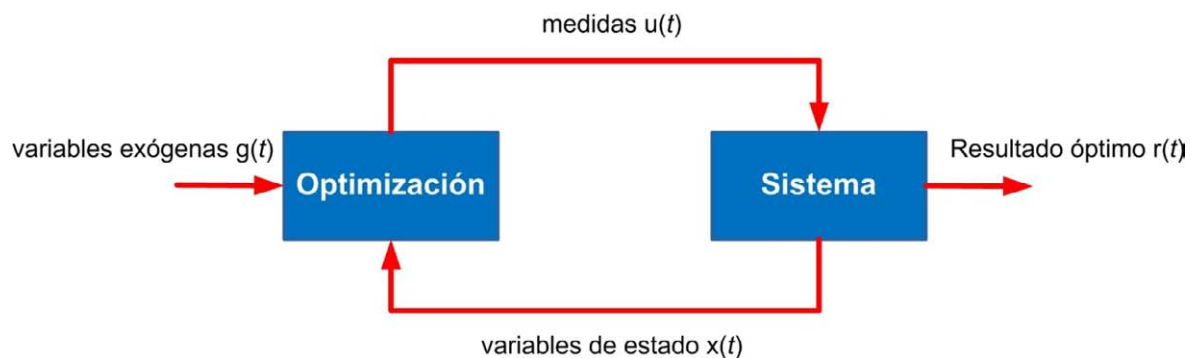


Figura 5.4 Configuración General de la Optimización

De esta forma, la formulación del problema de optimización requiere (Naidu, 2003):

- Una descripción matemática del modelo.
- Una especificación de la función objetivo.

- Un conjunto de condiciones de contorno y las limitaciones físicas de las variables exógenas.

Una vez definido el problema de optimización, éste puede ser formulado en tiempo continuo o discreto. Debido al planteamiento particular de esta investigación, se deja a un lado la formulación discreta, y a continuación se muestran algunos argumentos a favor del uso de modelos continuos:

- Ya que las decisiones individuales de planificación estratégica, se realizan generalmente en intervalos discretos de tiempo, es difícil creer que estén coordinados de tal forma que la sincronización sea perfecta, sino que por el contrario, estas decisiones pueden solaparse a lo largo del tiempo de alguna manera. Como las variables consideradas y observadas en este caso son el resultado de un gran número de decisiones tomadas por viajeros y operadores en diferentes momentos en el tiempo, parece natural tratar estos procedimientos como si fueran continuos (Gandolfo, 1993).
- Una definición en tiempo continuo es particularmente útil para modelizar los procesos de ajuste una vez se hayan introducido cambios dentro del sistema.
- La disponibilidad de un modelo formulado mediante ecuaciones diferenciales y con programación orientada a objetos, permite al planificador obtener predicciones y simulaciones en cualquier intervalo de tiempo y no solamente para la unidad de tiempo inherente a los datos. También permite un cambio en la formulación.
- Las especificaciones en tiempo continuo son más manejables desde el punto de vista matemático y más coherentes con las teorías de crecimientos y los modelos de difusión (Zuidgeest, 2005). También presentan una mejor forma de representar el comportamiento general del sistema.
- Un sistema de transporte está en continua evolución, al igual que el sistema territorial, aunque éste último evolucione mucho más lentamente.
- El desarrollo en sí mismo es un proceso dinámico, continuo y por lo tanto, también lo es el desarrollo estratégico de un sistema de transporte.

El Modelo de Optimización

Se propone así un modelo integrado de optimización para el desarrollo y evaluación de medidas de transporte sostenibles. El modelo dinámico de optimización se basa en las ideas conceptuales expuestas en el Capítulo 3, donde la planificación integral del transporte y los usos del suelo se ha definido y en el Capítulo 4, donde se ha caracterizado y descrito el algoritmo de optimización. A manera de resumen, un modelo de este tipo debe estar caracterizado por (Zuidgeest, 2005):

- **Dinámica.** La transición temporal hacia un sistema de transporte sostenible es descrita por variables de estado que representan el estado actual del tráfico (flujos, capacidad, modos, entre otros) y sus impactos (emisiones, distancias, tiempos), sobre la red de transporte y el territorio, así como sus costes marginales.
- **Optimización.** La naturaleza del problema de diseñar una planificación sostenible del transporte, es el de un problema de optimización con ciertas restricciones. Las estrategias y medidas de transporte deben traducirse en funciones de costes o multicriterio, a lo largo del tiempo de evaluación. Estas funciones deben optimizarse, maximizando por ejemplo, el excedente social de los viajeros, o por otro lado, minimizar la congestión y emisiones.

- **Medidas.** De forma general, las mejoras dentro de un sistema de transporte se relacionan con los ahorros en los tiempos de viaje y en los costes de operación de los coches. Estas mejoras pueden realizarse a través de controles en la toma de decisiones: intervenciones en infraestructura (construcción, adecuación, mantenimiento) o medidas de *pricing* como impuestos o tarifas.
- **Restricciones.** El proceso de optimización y el uso de las medidas anteriores, están limitados por los valores naturales de las restricciones, es decir, aspectos como la capacidad del medio ambiente o las limitaciones financieras, hacen necesario disponer de planes realistas.

La idea básica detrás de este modelo de optimización dinámica es poder comparar, teniendo una serie de objetivos, estrategias y restricciones, diferentes valores y combinaciones de medidas de transporte y usos del suelo. Los costes de transporte y los tiempos de viaje, que componen las funciones de impedancia de cada modo, influirán directamente sobre la accesibilidad, la cual también dependerá de la atractividad de cada zona. La estructura general del modelo dinámico puede ser representada como un diagrama causal, tal como se explica más adelante.

Entre los atributos básicos del modelo de transporte utilizado se encuentra una sola ruta por cada par O-D, costes y tiempos de viaje, así como la capacidad de la red. Estos atributos se observan de forma continua a lo largo plazo dentro periodo de evaluación, lo cual es necesario para poder hacer una evaluación con fines estratégicos, lo que no debe confundirse con evaluaciones dinámicas a corto plazo.

5.5 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA INTEGRADA

El desarrollo de esta metodología puede entenderse como un proceso que se extiende desde la información base necesaria para alimentar el modelo, pasando por la modelización del comportamiento y de los impactos en la sostenibilidad, hasta los resultados en términos de indicadores y procedimientos de evaluación estratégica.

Este enfoque integrado se ha diseñado para que sea una herramienta útil que ayude a las diferentes administraciones o planificadores a identificar sus propias estrategias óptimas de usos del suelo y transporte, con el fin de satisfacer sus necesidades futuras. Como se dijo en la introducción, **el enfoque se centra en integrar** el estado del arte de la evaluación de estrategias en modelos de usos del suelo y transporte con técnicas de optimización multidimensional y multiobjetivo. Esta integración permite simular la evolución de una zona urbana, proporcionando una guía para la implementación de estrategias óptimas de usos del suelo y transporte (Pfaffenbichler y Shepherd, 2003).

Teniendo claro el concepto de lo que es una estrategia, una medida, su(s) indicador(es) y su campo de aplicación, es conveniente plantear el primer paso para desarrollar una metodología lógica que sirva de apoyo a la formulación de estrategias de una manera fácil, inteligente y eficaz. Debido a que un entorno urbano sostenible puede tener muchas facetas, es necesario que esta estructura sea flexible, es decir, que se adapte a las necesidades particulares de cada caso, articulando los siguientes pasos:

1. El punto de partida es una definición clara de los objetivos y una descripción precisa de los escenarios a evaluar. Dentro de este punto entra la identificación de los problemas a solucionar.
2. Las medidas propuestas deben responder a solucionar los problemas que se han identificado.
3. Las estrategias deben diseñarse como una combinación de medidas, sin exceder su número ni alcance. La implementación de grandes y complicadas estrategias no asegura el

cumplimiento de los objetivos y puede llegar a ser muy difícil su interpretación debido su interacción.

4. Las estrategias se plasmarán dentro de diferentes escenarios, teniendo siempre como punto de comparación un escenario base.

La estructura de esta metodología permite distinguir en cualquier etapa al responsable del proceso en la toma de decisiones y cada etapa es fácilmente distinguible de las demás. Los resultados preliminares pueden dar avisos acerca de lo que podría pasar con ciertas estrategias, lo que hace necesario un cambio de rumbo en el sentido que se crea más conveniente. Como seguramente el tiempo y el dinero no serán ilimitados, es necesario, como ya se ha mencionado, tener muy claros los objetivos y diseñar estrategias simples y eficaces, enfocadas al resultado deseado.

Precisamente a que los recursos siempre serán limitados, el primer paso es tener muy bien definidos los límites del estudio. Como parte de esto, hay que incluir y definir las variables exógenas al modelo, cuyo comportamiento no se verá afectado por las relaciones internas de éste, pero sí tendrán efecto sobre él. Estas variables son el crecimiento demográfico, el índice de motorización, la evolución de los puestos de empleo y el precio de los combustibles, entre otras.

Por otro lado, estas estrategias deben estar enmarcadas dentro de un proceso de planificación estratégica. La planificación estratégica es cada vez más importante dentro de la planificación del transporte, ya que en este nivel se tienen en cuenta todos los elementos de la administración pública, es decir, las zonas urbanas y regionales a cualquier escala. Una de las dificultades principales de estos planes es que no sean coherentes o que puedan llegar a interpretarse de diferentes formas, en distintas áreas como pueden ser las medidas de transporte o la evolución del tráfico. Otra de las dificultades reside en la complejidad de la interacción del transporte con las facetas técnicas, socioeconómicas y ambientales, las cuales podrían ser, por ejemplo, cuando personas de la misma organización toman diferentes decisiones (Kölbl et al., 2008).

Este marco de evaluación y optimización integrado pretende cubrir el desarrollo de estrategias sostenibles en el transporte urbano y sus interacciones con los usos del suelo. La Figura 5.5 muestra una visión general de cómo es el proceso de toma de decisiones estratégicas en la realidad y como esta metodología simula este proceso. En general, los planificadores ponderan y priorizan sus objetivos y luego comparan los resultados con la realidad. En base a esta comparación, se toman las decisiones respectivas. Todo este proceso se basa en suposiciones personales de cómo las medidas adoptadas afectarían la realidad.

Esta integración propuesta simula el comportamiento de un sistema urbano en el tiempo y está compuesto por cuatro grandes módulos:

1. Políticas
2. Funciones objetivo
3. Método de optimización
4. Modelo de evaluación (MARS)

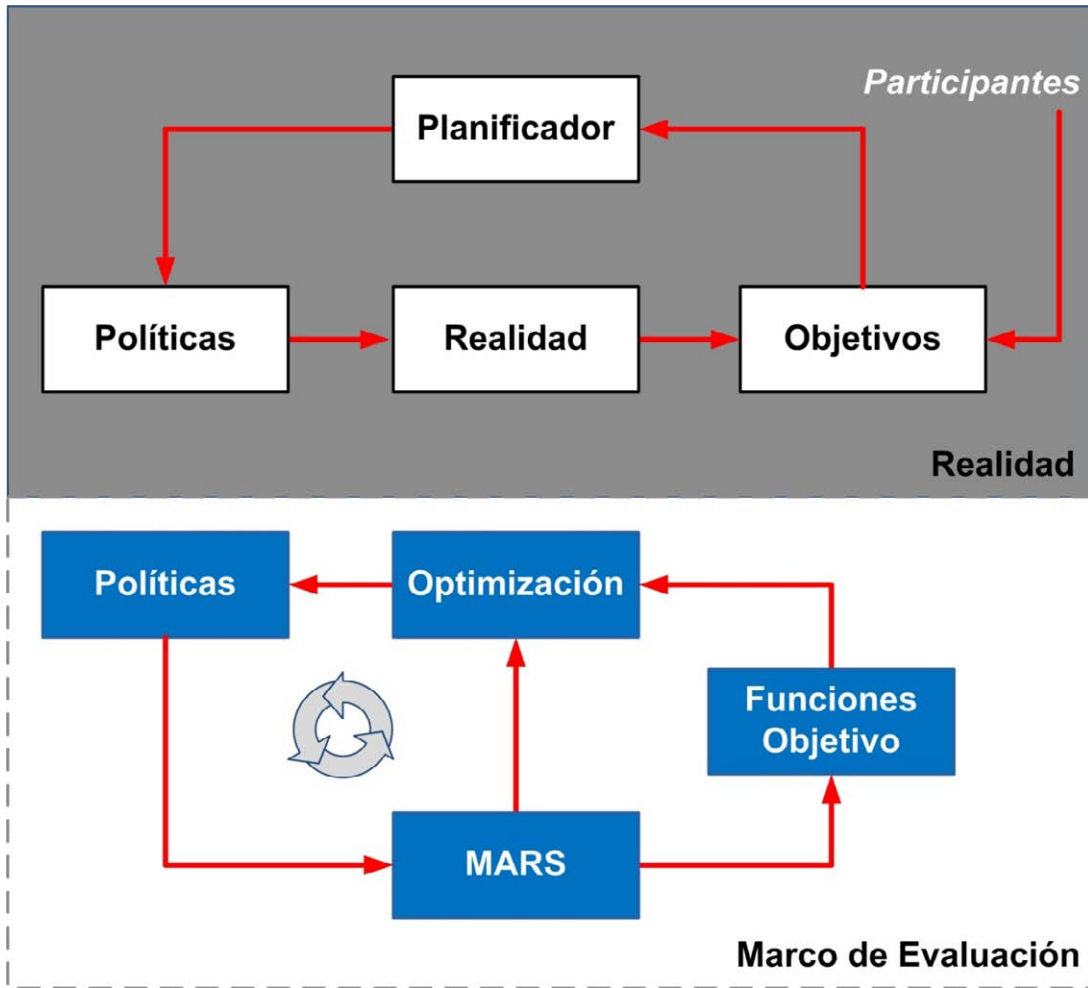


Figura 5.5 La Toma de Decisiones en la Realidad y su Transformación en un Marco Integrado de Evaluación y Optimización

La primera parte (Módulo 1) describe las políticas e instrumentos que se pueden probar y/o aplicar, así como analizar su influencia en el sistema urbano. En el módulo 2, las funciones objetivo ‘transforman’ la realidad en funciones matemáticas basadas en diferentes indicadores del modelo MARS. Esto quiere decir que el valor de una función objetivo se calcula a partir de los cambios relativos de dichos indicadores, teniendo como base de comparación un escenario base o un punto de referencia. En el módulo 3, el proceso de optimización identifica la combinación óptima de los valores de las medidas evaluadas, lo que maximizaría el valor de la función objetivo utilizada. Este proceso se repite $n+1$ veces hasta que se cumplan los criterios de convergencia del proceso de optimización. El resultado de este procedimiento es un nuevo nivel de valores de dichas medidas, que a su vez serán comparados con los objetivos propuestos.

Finalmente, en el último módulo (módulo 4), un conjunto de n medidas y sus valores asociados constituyen los datos de entrada para esta parte de la metodología. El modelo MARS simula las interacciones entre el sistema de transporte y los usos del suelo, obteniéndose como resultado diferentes indicadores. Estos indicadores podrán seleccionarse según los objetivos y las funciones objetivo planteadas.

Así, la combinación de valores que tenga como resultado un mejor valor de la función objetivo podrá ser considerada como la estrategia óptima, bajo los supuestos iniciales con que se realizó la optimización, ya que cambiando el entorno de evaluación o las condiciones iniciales, la

estrategia óptima también cambia. Un análisis de sensibilidad podría utilizarse para comprobar y perfeccionar la estrategia. Esta metodología es capaz, hasta cierto punto, de sustituir las suposiciones subjetivas que un planificador o gobernante pueda tener. Es probable que la aplicación de esta metodología resulte en decisiones más objetivas y racionales.

En resumen, una estrategia dirigida hacia la sostenibilidad debe tener en cuenta el manejo de estas relaciones tan complejas y dinámicas, en donde diferentes actores tienen diferentes objetivos (Button y Hensher, 2005). La respuesta obvia es la necesidad de la integración, entendiendo el sistema como un todo (May et al., 2006). Así, según su nivel de aplicación las actuaciones pueden ir desde una medida, una actuación de tipo puntual, a la elaboración de un escenario, donde se evalúa el desempeño de una estrategia a nivel urbano o regional.

5.5.1 Integración, Evaluación y Optimización de Estrategias

El procedimiento de optimización apoyado sobre el modelo MARS, es el núcleo del marco de evaluación de las medidas aquí evaluadas. En la Figura 5.6 se muestra la forma en que el transporte y los usos del suelo forman parte de un sistema dinámico, compuesto por ciclos de retroalimentación, además de su interacción con el modelo de optimización y el flujo de información. Esta figura representa el esquema final y los ciclos de retroalimentación de la metodología. Este esquema general integra los ciclos representados en las Figuras 5.1 y 5.6.

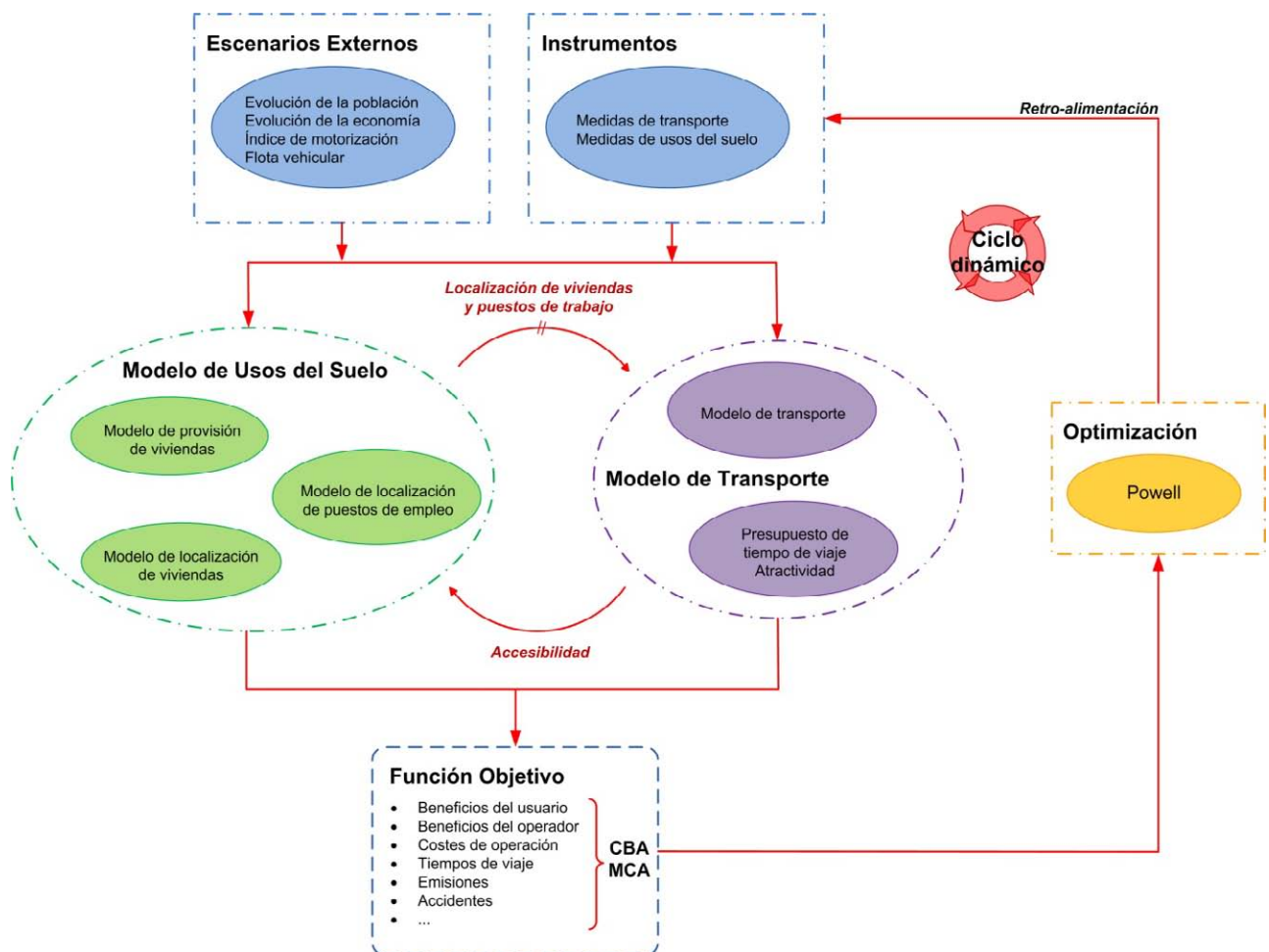


Figura 5.6 Estructura del Proceso de Modelización y Optimización y su Integración

Algunas de las formas de integración pueden abarcar unos objetivos muchos más amplios, como por ejemplo la integración del transporte y el territorio, mientras que la integración con políticas educativas o sanitarias puede requerir un replanteamiento de los objetivos, así como redefinir su significado y entendimiento (Jones et al., 2003).

De esta manera, el diagrama de la Figura 5.6 muestra la integración entre el proceso de optimización definido en la Figura 5.1 y el modelo dinámico de transporte y usos del suelo. En este esquema se muestra la integración de toda la metodología propuesta.

Aunque varias publicaciones van en la dirección de recomendar enfoques integrados, en el Reino Unido se ha ido un poco más allá y se ha especificado la integración de estrategias como un objetivo de las políticas de transporte (DETR, 2000). También existe en la literatura algunos posibles principios de integración de políticas centradas en dos hipótesis: la búsqueda de sinergias (May y Roberts, 1995) y la eliminación de barreras (May et al., 2001).

5.5.2 Formulación de Estrategias Integrales

La mayoría de zonas urbanas mantienen las longitudes medias de viaje por encima de los umbrales requeridos para maximizar el uso de modos alternativos de transporte como la bicicleta y los viajes a pie. Esta situación impide el desarrollo de servicios innovadores de transporte público, de tal forma que la necesidad de utilizar el coche fuera la mínima. Por medio de la combinación de estrategias claras de planificación, las ciudades pueden diseñarse a escala personal, de tal forma que permitan una accesibilidad y un entorno de alta calidad (Banister, 2008). En consecuencia, la formulación de estrategias no consiste en, por ejemplo, solamente restringir el uso del coche, ya que esto iría en contra de la libertad de elección, entre otros derechos. Lo que se pretende es diseñar ciudades de calidad y a una escala adecuada, donde el transporte individual no sea el denominador común.

La literatura existente habla de algunos tipos de medidas, las cuales las más comunes son los cambios tarifarios (peajes y aparcamientos) y de frecuencia en transporte público (May et al., 2000b; Mayhew y Hyman, 2002; Pfaffenbichler et al., 2006; Shepherd y Pfaffenbichler, 2006; Zhang et al., 2006). Al utilizar la metodología aquí desarrollada, los paquetes de medidas serán el punto de partida para este proceso. De esta forma, el método descrito a continuación proporcionará una guía útil para reflexionar acerca de la complementariedad y conflictos entre diferentes medidas.

Cuanto más medidas se quieran probar en un solo escenario, mayor será el número de combinaciones a evaluar, lo que resulta en un aumento del tiempo de simulación del modelo. Además, al disponer de un conjunto amplio de medidas, el análisis de resultados puede ser bastante complejo, ya que no será fácil estudiar el efecto o el aporte que sobre los resultados puede tener una sola medida en particular. Por eso es recomendable, ir paso a paso con la evaluación, para así ir estudiando el impacto que cada medida tendría sobre el logro de los objetivos.

En el plano operativo, siempre ha existido una preocupación acerca del significado de la formulación e integración de estrategias, especialmente en temas como la integración tarifaria, servicios y provisión de información dentro del transporte público y privado. Ahora, lo que se busca es que por medio de una adecuada formulación, exista una integración de medidas como forma de lograr un mayor rendimiento de la estrategia global. Esta formulación puede llevarse a cabo de las siguientes formas:

1. Formulación de medidas que involucren diferentes modos de transporte.
2. Formulación de medidas relacionadas con oferta de infraestructura, gestión, información y medidas de *pricing*.

3. Integración entre medidas de transporte y de usos del suelo.
4. Integración con políticas de otras áreas como salud y educación.

Es inevitable que haya algunas coincidencias entre estos puntos. Por ejemplo, el primer y tercer punto, se basan en que cada vez un mayor número de medidas existentes en transporte y usos del suelo, están disponibles. Uno de los problemas que se presentan en el desarrollo de tales estrategias es la falta de información sobre su desempeño de forma individual.

Visto lo anterior, es muy probable que una combinación de medidas funcione diferente y en contra de un determinado objetivo de medidas aplicadas aisladamente, razón por la cual el impacto la estrategia dependerá de los tipos de medidas utilizadas y de sus niveles de aplicación. En este caso esta metodología se centra en formular estrategias que maximicen las sinergias entre las diferentes medidas implementadas.

Los Principios de la Formulación

Los rangos en que cada medida puede ajustarse para encontrar un valor que optimice una función objetivo, deben basarse en la práctica, en las limitaciones de las ciudades y en la aceptabilidad del público en general. En la búsqueda de un paquete óptimo de medidas, cada una de ellas puede ser ajustada, en principio, para ser optimizada en cada año del periodo de evaluación (30 años). Si se permite esto, el número de variables en el proceso de optimización podría ser demasiado grande para un proceso eficiente. Si suponemos que tenemos n medidas dentro de una estrategia, el espacio de medidas donde se busca el óptimo tendría 30 dimensiones, una por cada periodo de evaluación.

Estrategias que incluyan la reducción de precios y tasas a los combustibles fósiles, marcan una tendencia hacia la expansión urbana, aumentando la demanda de transporte individual (Vold, 2005) y así, de sus emisiones. Con el aumento en los precios (tasas, impuestos) del combustible, se puede llegar a tener ciudades más compactas, con distancias de recorrido más cortas, un mayor acceso al transporte público por parte de una mayor proporción de población y la disminución de las emisiones totales.

Las estrategias relacionadas con las tarifas de aparcamiento son herramientas importantes para equilibrar el reparto modal entre el vehículo privado y el transporte público en las zonas urbanas. De hecho, los elevados niveles de congestión en las ciudades se deben a la preferencia de los usuarios por el uso del coche (Gallo et al., 2006). Si deseamos un reparto modal lo más equilibrado posible, junto con una mejora en el servicio del transporte público, una estrategia a tener en cuenta es la tarificación de los estacionamientos.

Con todas estas estrategias disponibles, es claro que no existe una única solución para los problemas del transporte urbano, las estrategias deben basarse en la combinación de medidas y además, aprovechar plenamente su interacción (sinergias). El desempeño de estrategias evaluadas en estudios anteriores es muy sensible a las variaciones y cambios de frecuencia y tarifas de transporte público y a los gastos extras asociados al coche. En algunos casos, sin los subsidios asociados al transporte público, las estrategias que involucren variaciones en la frecuencia de servicios y de tarifas, deberán compensarse con un aumento en el coste de usar el coche, con el fin de no romper el equilibrio.

Aparte de la financiación, las principales limitaciones en la aplicación de estrategias óptimas son las relacionadas con la legislación vigente y con su aceptabilidad. La legislación es importante, especialmente en los casos donde se deben aplicar tarifas y controles. La aceptabilidad pública puede ser un obstáculo importante, en el caso de las medidas que gravan el uso del coche y de las infraestructuras.

Los Principios de la Evaluación

Para la evaluación del bienestar de la sociedad, se ha definido una ‘función de sostenibilidad económica’, que incluye los cambios en el excedente del consumidor, los beneficios de operadores y administración, la congestión, los accidentes y los ingresos fiscales y tarifarios, además de los costes por contaminación. En la literatura existen diferentes enfoques de análisis de bienestar, por ejemplo algunos autores estiman el coste de varias medidas utilizadas con el fin de reducir la emisión de la polución (Jansen y Denis, 1999), otros calculan la pérdida de bienestar debido a la congestión (Bilbao-Ubillos, 2008) y otros investigan el bienestar de los usuarios bajo un diseño óptimo de autopistas de peaje (Light, 2009).

En cuanto a la metodología de evaluación multicriterio, es necesario desarrollar un proceso que se lleve paso a paso. Algunos de estos pasos requerirán una información de entrada detallada y un conocimiento profundo del efecto combinado que tendrán las políticas implementadas, así que es recomendable tener bien estudiados los pasos anteriores. Gran parte de la validez de los resultados dependen de la consistencia con que se desarrollen los pasos del proceso:

1. Definir y conocer el contexto.
2. Definir los objetivos del análisis. Función objetivo.
3. Identificar los escenarios disponibles.
4. Identificar los criterios que reflejen el valor asociado con los efectos de cada indicador.
5. Normalizar indicadores.
6. Dar pesos a cada indicador dentro de la función objetivo.
7. Combinar los pesos con los resultados en cada escenario.
8. Revisar los resultados.
9. Realizar un análisis de sensibilidad para estudiar el comportamiento de pesos y resultados de los indicadores.

Esta evaluación es por tanto, un método de análisis de varias políticas, que considera simultáneamente el grado de consecución, por cada alternativa, de un conjunto de objetivos con el fin de tomar una decisión. Para medir en qué grado se cumplen dichos objetivos, es necesario haber definido previamente unos criterios de evaluación.

Para obtener los pesos de los indicadores de la función MCA, se recurrió a un proceso de jerarquía analítica para la toma de decisiones desarrollada en Saaty (2000), el cual se considera como una técnica multicriterio y multiatributo (AHP, por sus siglas en inglés); complementado por otro método de análisis conocido como REMBRANT (Lootsma, 1992). El punto de partida de este método es responder a preguntas del estilo ¿qué tan importante es el criterio A respecto al B? De esta manera se crean pares de respuestas entre los criterios que se elijan.

La relación de las funciones objetivo con el modelo de evaluación y la rutina de optimización se puede ver claramente en el esquema de la Figura 5.6.

Desde el punto de vista metodológico, en este proceso de planificación se quiere predecir, a través de un modelo estratégico, qué pasaría sobre el sistema de usos del suelo y transporte si se cambian las condiciones del entorno de alguna manera, mediante la utilización de una estrategia integrada. Con la utilización del modelo se quiere hacer una descripción matemática formal de un sistema.

Búsqueda de Sinergias y Eliminación de Barreras

La búsqueda de sinergias consiste en encontrar parejas o grupos de medidas que se refuercen mutuamente en el logro de los objetivos. Ejemplos evidentes de este tipo de medidas son el refuerzo y fortalecimiento del transporte público; sin embargo, esto dependerá principalmente de la estructura urbana de la ciudad: superficie, densidad, actividades, distribución modal, entre otros elementos. Estas medidas interactúan entre sí de maneras diferentes.

La eliminación de barreras implica identificar factores y elementos que dificultan la aplicación de las políticas urbanas. Los principales obstáculos en este caso serían las finanzas de la ciudad, la aceptación ciudadana y el fomento de la desigualdad. La integración puede ayudar a la eliminación de estas barreras de tres formas (May et al., 2006): la primera de ellas sería obtener la financiación necesaria, por medio de otras medidas, como por ejemplo cobro por aparcamientos, peajes urbanos y otras medidas *pricing*. En segundo lugar, se encuentra el diseño de paquetes de medidas que sean poco aceptadas con otras que claramente tengan popularidad, o que beneficien directamente a los más afectados. En este caso de nuevo se encuentra el cobro por uso de infraestructuras o cobro por acceso a ciertas zonas de la ciudad, ya que se ha demostrado que la ciudadanía es más propensa a aceptar este tipo de medidas si los ingresos son destinados a inversiones y mejoras en el transporte público (Jones, 1998). Finalmente, en tercer lugar, la integración puede centrarse en compensar a quienes han salido perjudicados por la implementación de cierta política. Por ejemplo, volviendo al esquema de un peaje urbano, podrían diseñarse tarifas reducidas para los residentes de la zona tarifada.

Como se ha señalado anteriormente, el problema del diseño de estrategias integradas es el gran número de diferentes tipos de medidas que pueden ser utilizados. Como resultado de esto, es difícil tener la certeza de la forma en que cada combinación va a interactuar en general y mucho menos prever sus potenciales impactos. Por esta razón, la metodología desarrollada pretende dar luces acerca de los posibles efectos y sinergias de diferentes políticas de transporte sobre el sistema urbano a largo plazo.

Las sinergias serán un valor añadido muy importante como resultado de la aplicación de esta metodología. El principio básico de la aplicación de un conjunto de diferentes medidas de transporte es obtener un rendimiento superior de una estrategia global, en lugar de aplicar dichas medidas de manera aislada. Las sinergias permiten la complementariedad de medidas, en donde la suma global de los beneficios es mayor que la suma individual de los beneficios de cada medida.

CAPÍTULO 6.

DISEÑO DE HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN ESTRATÉGICA

TABLA DE CONTENIDO

6.1 INTRODUCCIÓN.....	121
6.2 FORMULACIÓN DEL MODELO DE EVALUACIÓN.....	121
6.2.1 PROCESO DE EVALUACIÓN.....	122
6.2.2 DESARROLLO DEL MÓDULO DE ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO	123
<i>Justificación.....</i>	<i>124</i>
6.2.3 DESARROLLO DEL MÓDULO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO	124
<i>El Proceso Multicriterio Seleccionado.....</i>	<i>125</i>
<i>Estimación de Pesos.....</i>	<i>126</i>
<i>Normalización de Indicadores.....</i>	<i>128</i>
6.2.4 ESCENARIOS.....	130
<i>Diseño de Escenarios</i>	<i>130</i>
<i>Formulación de Escenarios</i>	<i>131</i>
6.3 PANEL DE INDICADORES	133
6.3.1 EVALUACIÓN DE INDICADORES	133
<i>Impacto Ambiental</i>	<i>134</i>
<i>Equidad Social.....</i>	<i>135</i>
<i>Eficiencia del Sistema.....</i>	<i>135</i>
6.3.2 SELECCIÓN DE INDICADORES.....	136
6.3.3 DESCRIPCIÓN DE INDICADORES.....	139
<i>Beneficio de los Usuarios</i>	<i>139</i>
<i>Beneficio Operadores.....</i>	<i>147</i>
<i>Costes de Operación</i>	<i>149</i>
<i>Impuestos al Combustible.....</i>	<i>150</i>
<i>Costes de Infraestructura y Mantenimiento</i>	<i>151</i>
<i>Externalidades</i>	<i>152</i>
<i>Consumo de Suelo.....</i>	<i>156</i>
<i>Accesibilidad</i>	<i>157</i>
<i>Distribución Equitativa de Costes de Transporte</i>	<i>158</i>
<i>Ahorros de Tiempo.....</i>	<i>160</i>
<i>Costes de Operación</i>	<i>161</i>
<i>Cambio Modal</i>	<i>161</i>

6.1 INTRODUCCIÓN

Ante la complejidad de las relaciones urbanas cabe preguntarse qué herramientas hay disponibles para poder evaluar los impactos de la problemática urbana y de los efectos a largo plazo de las estrategias que se implementen. Estas herramientas cobran una gran utilidad en el momento de encontrar las estrategias de sostenibilidad, especialmente en estos tiempos donde el cambio climático y el deterioro ambiental de las ciudades se encuentran en la mira de todos. Entonces, sería de gran utilidad contar con un método relativamente sencillo, para analizar las ventajas de una estrategia y así comparar posibles escenarios alternativos.

Este método se ha pensado como una evaluación estratégica de diferentes paquetes de medidas de transporte, bajo distintos tipos de evaluación. Haciendo buen uso de las herramientas disponibles, es posible identificar los puntos clave de un proyecto y proveer la suficiente información cuantitativa acerca de sus posibles efectos, con el fin de orientar a los planificadores. Con seguridad, mucha de esta información no es medible ni comprable, lo que hace aún más difícil evaluar en una escala única todos los efectos. Por estas razones, la valoración de un proyecto generalmente es sometida a un largo proceso de evaluación (Small, 1999). Ya desde los años 70 en trabajos de planificación de transporte, se sugieren procedimientos formales de evaluación que incluyan la elección de objetivos alternativos, como la maximización de un beneficio o la maximización del uso de una infraestructura (Meyer y Straszheim, 1971).

Desde una perspectiva económica, el marco de evaluación más conocido es el análisis coste-beneficio (CBA). Recientemente los métodos analíticos, como las evaluaciones multicriterio (MCA), han sido ampliamente utilizados, debido a la necesidad de ‘sugerir’ la forma en que un planificador debe pensar de forma sistemática acerca de la definición y estructuración de unos objetivos, teniendo en cuenta los riesgos y las compensaciones (Tsamboulas y Kopsacheili, 2003).

Este capítulo considera dos partes importantes dentro de la evaluación de proyectos: el análisis coste-beneficio CBA y el análisis multicriterio MCA, dentro de un entorno de sistemas dinámicos. Posteriormente, teniendo como base en la metodología descrita en el capítulo anterior, se describen los criterios de selección y evaluación de los indicadores de sostenibilidad y de evaluación estratégica.

6.2 FORMULACIÓN DEL MODELO DE EVALUACIÓN

A pesar de un gran número de mecanismos de evaluación disponibles actualmente, es difícil disponer de la suficiente información acerca de los métodos existentes y de las condiciones en que se debe elegir un método de evaluación en la práctica (Nijkamp y Blaas, 1994), en un lugar con características concretas. La experiencia sugiere que no existe un método mejor que los demás, y su elección dependerá de algunos factores, que a su vez dependerán del nivel de evaluación.

Debido a esta diversidad, es posible clasificar estos métodos en al menos cuatro tipos de evaluación en la planificación (Vreeker et al., 2002):

- Un enfoque monetario, basado en los principios de análisis coste-beneficio o coste-efectividad.
- Un enfoque basado en la teoría de la utilidad, consistente en la jerarquización de las preferencias de expertos.

- Un proceso de aprendizaje basado en una articulación secuencial (interactiva o cíclica) del punto de vista de los planificadores.
- Un enfoque de toma de decisiones colectiva, basado en una negociación o elección entre varias personas.

Según el sistema que se haya elegido, el marco de evaluación de las inversiones del sector público, puede ser realizada bajo tres marcos generales (Bristow y Nellthorp, 2000): análisis coste-beneficio (CBA), análisis multicriterio (MCA) y marcos descriptivos.

Los dos primeros marcos generales y su contexto dentro de esta investigación, se describirán brevemente a continuación. En cuanto a los marcos descriptivos, éste sistema consiste en métodos de análisis que pueden ser orientados hacia objetivos y pueden centrarse en un amplio rango de efectos del transporte, aunque los resultados no son ponderados ni valorados.

En este capítulo se propone un conjunto de criterios para realizar una evaluación estratégica para proyectos que se encuentren en la etapa de planificación. Este procedimiento se integra dentro de la metodología general desarrollada en el Capítulo 5 y permitirá a los planificadores considerar un número importante de alternativas potenciales y a su vez servirá para descartar las menos prometedoras en las etapas siguientes. Los métodos de evaluación que se han trabajado en esta investigación son el análisis coste-beneficio y el análisis multicriterio. Estos métodos no serán desarrollados desde su enfoque clásico, sino desde el punto de vista de los sistemas dinámicos y su interacción continua con el modelo estratégico y el proceso de optimización. Se han utilizado estos dos métodos para estudiar sus diferentes resultados teniendo en cuenta, por un lado, los criterios económicos y por el otro, los criterios de sostenibilidad dados por expertos en transporte.

Como punto final, es válido aclarar que los dos procedimientos descritos a continuación (CBA y MCA), son dos tipos de evaluación **diferentes** y no se han combinado en ningún momento.

6.2.1 Proceso de Evaluación

Al estudiar diferentes metodologías de evaluación existentes, queda el interrogante acerca de cuál es la más adecuada para evaluar el desempeño de un sistema de transporte con el fin de encontrar estrategias viables para ponerse en la senda del desarrollo sostenible. Esto no significa que un método sea mejor que el otro. Simplemente, el método seleccionado debe ser coherente con los objetivos que se busquen por el proyecto, sean objetivos económicos, intangibles o cualitativos. También dependería de la disponibilidad y fiabilidad de la información.

Por todo esto, una posibilidad a explorar es una combinación de estos dos métodos (esta posibilidad se plantea como futura línea de investigación). Esta integración no radica en darle un peso subjetivo a las variables económicas. En este caso, se ha planteado la construcción simultánea de un proceso de optimización para los módulos de análisis CBA y MCA, con el fin de evaluar y comparar los diferentes valores óptimos de cada estrategia según su escenario. Aunque un escenario tenga mayores beneficios totales, podría darse la particularidad que este escenario dé lugar a ineficiencias e inequidades en algunos sectores de la sociedad, aunque en el cómputo global, el resultado sea positivo.

En cuanto a los indicadores seleccionados, algunos dirán que se han quedado algunos por fuera, sin embargo, una de las grandes ventajas de esta metodología es su flexibilidad, ya que si el planificador, por las características particulares de su proyecto, necesitase evaluar elementos diferentes, existe la posibilidad de modificar el panel de indicadores que componen las funciones objetivo. Así, el desarrollo de esta metodología de evaluación es **claro y**

transparente, dejando a un lado los modelos de ‘caja negra’ y permitiendo la adaptabilidad, del modelo y de la metodología a cualquier caso particular.

Adicionalmente a esto, no solamente se pueden adaptar los indicadores según las necesidades de cada caso, de ser necesario, la metodología se ha diseñado de tal manera que es posible cambiar los modelos de transporte, usos del suelo, ambiental, etc., modificando ecuaciones, parámetros, funciones objetivo y de esta forma, disponer de la misma metodología de evaluación pero con los modelos preferidos por cada planificador.

6.2.2 Desarrollo del Módulo de Análisis Coste-Beneficio

Según el Libro Verde, ‘Valoración y Evaluación en el Gobierno Central’ del Reino Unido (HTM, 2003), la definición de un análisis coste beneficio es un “análisis que permite cuantificar en términos monetarios los costes y beneficios de un propuesta factible, incluyendo los elementos para los cuales el mercado no tiene una medida satisfactoria de su valor económico”. Sin embargo, el concepto de un CBA puede ser mucho más amplio. En este caso, la evaluación de la eficiencia y equidad de un sistema de transporte, deberá incluir un análisis detallado de coste-beneficio, basando el análisis en el pronóstico, en el riesgo en la estimación de costes y en los beneficios globales del sistema, definido por el modelo estratégico.

Tradicionalmente, un CBA es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar los posibles impactos socioeconómicos de las inversiones públicas y en muchos países es utilizada como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con las infraestructuras de transporte (Damart y Roy, 2009). En esta investigación se propone el diseño de un módulo de evaluación CBA dinámico, que tenga en cuenta los cambios relativos de costes debido a una o varias medidas implementadas con respecto a un escenario base, y que a su vez interactúe con un proceso de optimización para que en cada iteración se llegue a un nivel, o rango de valores que aumente el valor de la función objetivo.

Este módulo de evaluación permitirá medir los cambios en los costes percibidos por los usuarios debido a cambios en el sistema de transporte. Estos costes son generalmente asociados a la impedancia (dificultad) de moverse de un punto a otro, incluyendo los costes monetarios en los que se incurre al realizar el viaje (tarifas de transporte público, peajes, combustibles, etc.).

En este caso, los costes tenidos en cuenta son los siguientes:

- Cambios en los tiempos de viaje.
- Cambios en tarifas de transporte (transporte público, peajes, aparcamientos, impuestos).
- Cambios en los costes de operación de los vehículos (transporte privado y público).
- Cambios en la adaptación de los usuarios a las nuevas situaciones.
- Cambios en los costes de las externalidades (emisiones y accidentes).
- Cambios en los costes del mantenimiento de la red vial (transporte privado).

Como muchos de estos costes y beneficios serán causados en el futuro, se deberán descontar sus impactos a valores actuales con el fin de poder hacer comparaciones. Así, el valor económico de un escenario evaluado en el largo plazo será medido por el valor actual neto (VAN), actualizado con una tasa social de descuento.

Una de las dificultades en este análisis es definir qué es un coste y qué es un beneficio, ya que aunque es claro que algunos elementos pueden clasificarse como costes, como los de infraestructura, hay otros que no son tan claros. Así que la variación de los valores de escenarios alternativos respecto a un escenario base de comparación, es la que determinará si el escenario alternativo presentará costes o beneficios en los elementos descritos anteriormente.

Se propone una evaluación utilizando las bases de un CBA porque es importante y útil disponer de una herramienta de evaluación que permita tomar decisiones a largo plazo sobre conceptos económicos y de inversión, debido principalmente a las restricciones presupuestales de las administraciones. Esta herramienta tendría en cuenta los beneficios relacionados con la implementación de diferentes tipos de políticas (infraestructura, gestión de la demanda, transporte público) dentro de un sistema de transporte multimodal.

Justificación

El carácter científico de un CBA es justificado si se aceptan las hipótesis de la evaluación económica basadas en un paradigma liberal (Damart y Roy, 2009). Además, un CBA describe muy bien los efectos que mutuamente se causan entre sí los usuarios de un sistema de transporte, debido a que realizan actividades conjuntas, produciendo efectos de naturaleza positiva o negativa (Doll y Jansson, 2005). Un efecto positivo puede verse en el siguiente ejemplo: si aumenta la demanda de usuarios de transporte público, entonces es necesario una mayor capacidad para transportarlos (es decir, más vehículos), lo que reduciría el coste de acceso a los usuarios existentes.

La Administración de Transportes Francesa (DTT, 2004), menciona que “un balance económico es el mejor criterio para evaluar la efectividad socioeconómica en condiciones óptimas que la teoría ha determinado, y aunque nunca se alcanzará en realidad, proporciona una aproximación racional”. Se ha trabajado con este principio, ya que sólo se dispone de un objetivo que es maximizar el bienestar de la sociedad, aunque en la mayoría de los casos la distribución de estos beneficios es inequitativa.

Al utilizar el principio de ‘disponibilidad a pagar’ (*willingness to pay*) (Small, 1999), se está en condiciones de tratar las cuestiones que surgen con frecuencia en las evaluaciones de un sistema de transporte. De esta manera, los beneficios de una sociedad vienen dados principalmente por estas tres grandes categorías: ahorros en tiempos de viaje, ahorros en operación y mejoras en las condiciones ambientales. Este listado está en orden de importancia cuantitativa como componentes del beneficio social y está compuesto por varios indicadores, que se describen en el apartado 6.3.3.

6.2.3 Desarrollo del Módulo de Análisis Multicriterio

Para este caso en particular, se utilizará un análisis multicriterio como un enfoque y un conjunto de técnicas con el objetivo de obtener una visión general de políticas de transporte y usos del suelo, ordenándolas desde las más a las menos factibles, según los conceptos de expertos. Un análisis de este tipo es recomendable para afrontar un problema complejo que implique objetivos monetarios o no, donde dichos objetivos puedan separarse en conjuntos más pequeños y manejables, que permitan un análisis detallado de sus componentes, para posteriormente unir los resultados y dar una visión en conjunto (Shepherd et al., 2006).

En la toma de una decisión, necesariamente deberán estar implicadas una o varias comparaciones entre las diferentes alternativas propuestas. El solo hecho de comparar dichas alternativas (y sus elementos) se traduce en la necesidad de realizar mediciones que permitan aplicar los criterios de comparación de modo de establecer preferencias entre ellos.

Los elementos que participen en un proceso de decisión por lo general se miden en escalas diferentes (peso, distancia ó tiempo, por ejemplo), por lo que se requiere transformar estas unidades en una unidad abstracta (normalizada) que sea válida para todas las escalas y todos los ámbitos.

En este proceso de evaluación participan muchas variables intangibles imposibles de cuantificar dentro de aspectos políticos, sociales y ambientales, en medidas tradicionales. Estas variables intangibles también deben verse representadas por una escala común y que algunas ocasiones son de difícil medición en términos económicos. Lo que interesa medir es cuánto más 'preferible' es una alternativa sobre otra y para compararlas necesitamos una escala de evaluación común. Estas escalas de evaluación permiten caracterizar los elementos bajo un mismo patrón de comparación pudiendo de esta manera establecer relaciones entre ellas. De estas necesidades surge la necesidad de utilizar una evaluación multicriterio, la cual es necesaria para lograr combinar las distintas dimensiones, objetivos, actores y escalas que se hallan envueltos en el proceso de toma de decisiones, sin sacrificar la calidad, confiabilidad y consenso en los resultados.

Una de las características principales de las evaluaciones multicriterio es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso. La particularidad de cada metodología multicriterio está en la forma de transformar las mediciones y percepciones en una escala única, de modo de poder comparar los elementos y establecer ordenes de prioridad (Arancibia et al., 2003).

Existen diferentes tipos de análisis multicriterio, los cuales dependen de los factores a utilizar y las aplicaciones a realizar. Dentro de esta investigación, se llevará a cabo un análisis coherente, lógico y sólido, que sea fácil de usar, aplicar e integrar a nuestro modelo dinámico de usos del suelo y transporte y al de optimización.

Los elementos básicos en cualquier evaluación de proyectos de transporte y territorio son un marco conceptual y uno objetivos claros. Según la zona de estudio, un MCA puede utilizarse de varias maneras, aunque el marco conceptual es requisito fundamental (Minken et al., 2003). En general, lo más común es agrupar los objetivos de una manera tal que quede una función objetivo fácil de entender y explicar. Cuando existe una multiplicidad de usuarios con distintos énfasis, un análisis flexible es una particularidad importante, ya sea un MCA, CBA o una mezcla de los dos.

En la práctica, se utilizó un análisis multicriterio como una herramienta de ayuda en la toma de decisiones coherentes. Aunque esta herramienta puede utilizarse para evaluar efectos de políticas que ya se han implementado, en este caso se ha usado como una herramienta para evaluar el posible efecto de políticas implementadas en el futuro.

El Proceso Multicriterio Seleccionado

El objetivo es obtener una clasificación de n alternativas sobre la base de los resultados obtenidos de los indicadores X en cada uno de los m criterios, que en este caso son tres. Para obtener esta clasificación es necesario disponer de un método de clasificación de dichas alternativas. El método propuesto para estimar los pesos de cada indicador y criterio y así definir una jerarquía, es el método REMBRANDT (Lootsma, 1992), basado en el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytical Hierarchy Process, AHP*), originalmente desarrollado por Thomas Saaty en 1980 (Saaty, 2000). REMBRANDT es uno de los procedimientos más conocidos y conserva los puntos fuertes del AHP, evitando algunos de sus inconvenientes (Beuthe et al., 1998).

En primer lugar, el AHP es una técnica estructurada muy popular utilizada para tratar con decisiones complejas con atributos múltiples (Saaty, 1987). En vez de prescribir la decisión

‘correcta’, el AHP ayuda a los decisores a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a su comprensión del problema. Este proceso permite la descomposición de un problema en una jerarquía y asegura que tanto sus aspectos cualitativos como cuantitativos sean incorporados en el proceso de evaluación, y donde la opinión expresada es extraída sistemáticamente por medio de comparaciones entre pares. El AHP es una metodología de decisión compensatoria porque las alternativas que son eficientes con respecto a uno o más objetivos pueden compensarse mediante su desempeño con respecto a otros objetivos. Sin embargo, ha habido una serie de críticas al método, principalmente por algunos problemas identificados como el *rank reversal* (inversión en el orden de preferencias obtenido entre un conjunto de alternativas cuando una nueva es introducida en el sistema) (Olson et al., 1995).

En el núcleo del AHP se encuentra un método que convierte las evaluaciones subjetivas de importancia relativa en un conjunto de pesos o puntajes globales. El método ha demostrado ser uno de los más extendidos del MCA (Shepherd et al., 2006), aunque como ya se ha mencionado, se han realizado una serie de debates entre los críticos y los defensores del método a principios de los años 90. Por ejemplo, en Dyer (1990) se sugiere que el AHP es erróneo como un procedimiento de clasificación de alternativas y se centra en que se produce una clasificación arbitraria en el momento en que se asume el principio de composición jerárquica. También existen otros autores que critican el método (Holder, 1990). Estas críticas ocasionaron una respuesta de Saaty, dando lugar a una discusión científica, con respuestas de ida y vuelta (Saaty, 1991a; Holder, 1991; Saaty, 1991b). Sin embargo, después de múltiples discusiones, el debate en el mundo científico se decidió a favor del AHP (Harker y Vargas, 1990). Así, Forman y Gass (2001) publicaron un trabajo en donde se refutan las críticas al método y se dice que este es teóricamente sólido, fácil de entender, fácil de implementar y capaz de producir resultados que cubran las expectativas. Posteriormente, en 2008 se publica un artículo que revisa los últimos 15 años del progreso de los métodos MCA (Wallenius et al., 2008), y se concluye que los métodos basados en AHP han superado en número a cualquier otro método y que su crecimiento ha sido enorme.

Finalmente, las supuestas fallas del AHP se han abordado de al menos dos formas (Olson, 2008). Una de ellas fue propuesta por Barzilai et al., (1987). La otra, es conocida como el método REMBRANDT, el cual se presentó con una escala alternativa más natural en opinión de su autor. Los principios básicos de este método fueron desarrollados por Lootsma (1989) y Lootsma (1992). Posteriormente se publicó una actualización en el año 2000 (Van den Honert, R. C. y Lootsma, 2000).

De esta manera, el método propuesto para estimar los pesos de las variables que integran la función de evaluación, es el método REMBRANDT, desarrollado por Freerk Lootsma y basado en el AHP.

Estimación de Pesos

La aportación fundamental del AHP es que responde a una serie de preguntas de forma general: ¿qué tan importante es el criterio A respecto al criterio B? Esto se llama comparación por pares. Cuestiones de este tipo se pueden utilizar para establecer los pesos de los criterios y puntuaciones de diferentes alternativas de evaluación.

La ventaja fundamental de este método es que no requiere una escala común ni formalizada de medida de los factores, razón por la cual se pueden incorporar dentro del análisis aspectos sociales, culturales y por supuesto, técnicos. Esto es posible gracias a que generalmente la importancia de los criterios es diferente, motivo por el cual este tipo de análisis determina la importancia relativa entre éstos, comparando el peso de los criterios por pares. Estas comparaciones se realizan según la escala de valores mostrada en la Tabla 6.1, donde estos valores representan la importancia relativa de los criterios.

Tabla 6.1 Escala de Medidas del Método de Jerarquía Analítica

Índice	Valor	Definición: ¿qué tan importante es A respecto a B?
1	Igual	Dos indicadores contribuyen de igual forma al cumplimiento del objetivo.
3	Moderada	La experiencia y el juicio del experto favorecen levemente a un criterio sobre el otro.
5	Importante	La experiencia y el juicio del experto favorecen fuertemente un criterio sobre el otro.
7	Muy Importante	Un indicador es mucho más importante que el otro, según el experto.
9	Abrumadora	La experiencia y el juicio del experto favorecen una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara.
2, 4, 6, 8	Valores Intermedios	Valores intermedios que pueden ser utilizados para representar matices de criterio entre las cinco evaluaciones anteriores.

Fuente: Saaty (2000).

Debido a que la toma de una decisión se supone que será consistente con las relaciones entre todos los criterios, solo será necesario realizar $\frac{1}{2}n(n-1)$ comparaciones para establecer el juego completo de parejas de criterios, para n criterios. Por lo tanto, el resultado de este análisis es una matriz que relaciona la importancia de un indicador frente al otro. Al comparar el indicador i con el indicador j y colocarlo en la posición a_{ij} de la matriz \bar{A} , se indica la comparación relacionada entre cada uno de los criterios, tal como se muestra a continuación:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

El siguiente paso es estimar el conjunto de pesos para sean consistentes con las relaciones relativas expresadas en la matriz de criterios. Es necesario tener presente que aunque la relación entre un par es consistente, la consistencia entre todas las relaciones y todos los pares no está garantizada, razón por la cual se debe tener cuidado en la construcción de la matriz. El análisis compara la importancia relativa de todas las posibles comparaciones emparejadas asignando valores que reflejan una diferencia importante. Así pues, ahora la tarea consiste en buscar los n pesos (w_i) que proporcionarán el mejor ajuste a la función objetivo.

La información anterior es un resumen de la forma en cómo el AHP estima los pesos y define las jerarquías. En el método REMBRANDT, se propone una serie de modificaciones donde una escala logarítmica sería más conveniente (Olson et al., 1995). Por lo tanto, su autor presenta una escala geométrica que refleja el criterio y los niveles de decisión de los planificadores.

Así, el valor r_{ij} (preferencia de i sobre j) de la escala geométrica es expresado en forma de una función exponencial de la diferencia entre el valor de los niveles de la escala geométrica δ_{ij} . La diferencia en los niveles del valor δ_{ij} se muestra en la Tabla 6.2, donde se comparan las escalas del AHP y REMBRANDT.

El paso final requiere la elaboración de un cuestionario en donde al encuestado se le preguntan sus preferencias por un criterio entre un par de ellos, con base en una escala cualitativa dada en la Tabla 6.2. Los resultados obtenidos son los valores de comparación de la matriz de $n \times n$, los cuales se transforman en los pesos estimados de cada criterio.

Tabla 6.2 Correspondencias de Escalas entre AHP y REMBRANDT

Valor	AHP (w_i/w_j)	REMBRANDT $\delta(i/j)$
Preferencia muy fuerte por j	1/9	-8
Preferencia fuerte por j	1/7	-6
Preferencia por j	1/5	-4
Preferencia débil por j	1/3	-2
Indiferente (igual)	1	0
Preferencia débil por i	3	+2
Preferencia por i	5	+4
Preferencia fuerte por i	7	+6
Preferencia muy fuerte por i	9	+8

Fuente: Olson et al., (1995).

Otro elemento a tener en cuenta, es la evolución de dichos pesos a lo **largo del tiempo**. Esto es importante, ya que en el futuro seguramente cambien las percepciones de los expertos acerca de los factores más importantes a tener en cuenta en un sistema de transporte. Por esta razón, la metodología permite cambiar los pesos de la función objetivo MCA a lo largo del tiempo. Sin embargo, la evolución de dichos valores deberá realizarse como un ejercicio aparte y tenerla en cuenta como una variable exógena.

Este procedimiento tiene como objetivo final, obtener un conjunto de pesos (jerarquías), para los indicadores seleccionados. La sensibilidad de los resultados a los cambios en los pesos de los criterios se evaluará en capítulos posteriores.

La información requerida para el caso de estudio se ha obtenido de una encuesta realizada en un evento relacionado con el transporte.

Normalización de Indicadores

Dada la gran variedad de escalas por las cuales pueden medirse los indicadores, un análisis de decisión multicriterio necesita transformar estos diversos criterios en unidades comparables. Existen varias formas de obtener una estandarización de indicadores para que sean fácilmente comprables: definición directa, clasificaciones definidas por criterios, transformación a una escala lineal (valores máximos y mínimos arbitrarios) y funciones de valor o utilidad.

Los métodos de transformación a escalas lineales convierten la información disponible en criterios estandarizados medibles y comparables entre sí (Malczewski, 1999). Existe un gran número de estos métodos (Massam, 1988). Uno de los más conocidos y usados es el procedimiento de estandarización por rangos (*score range procedures*).

El método de funciones de utilidad o valor, se maneja dentro del contexto de un criterio determinista o decisiones en condiciones de certeza (Keeney y Raiffa, 1993) y es una forma de transformar los indicadores a una escala común. Una función de utilidad tiene un valor relacionado (generalmente medido en una escala de 0 a 1), con el atributo en cuestión. De esta manera, la función de valor es una expresión flexible que normaliza una escala de valores para cada elemento dentro de un rango de valores.

Existen varias técnicas para determinar la curva de una función de valor. El método del 'valor medio' es uno de las técnicas más populares para obtener la curva de una función (Malczewski, 1999). Este método consta de los siguientes pasos (Bodily, 1985):

1. Se debe determinar el rango sobre el cual la curva ha de definirse, es decir, un valor máximo y uno mínimo, y asignarle valores (0 y 1, equivalentes).
2. Encontrar el punto medio entre estos dos puntos y asignarle un valor de 1/2.
3. Encontrar los valores de los puntos medios, entre el valor mínimo del paso 1 y el punto medio definido en el paso 2 y entre el punto medio y el valor máximo. Asignarle valores 0.25 y 0.75, respectivamente.
4. Repetir el paso 3 para encontrar los valores medios entre los rangos ya determinados y asignar los valores de 0.125, 0.375, 0.625, 0.875 y así sucesivamente, hasta disponer de puntos suficientes con los cuales se pueda construir la curva.
5. Dibujar la curva por medio de los puntos hallados en los pasos anteriores y ajustarla a una expresión analítica.

En este caso, el concepto principal es que cada indicador evalúa su cambio porcentual, en cada periodo de tiempo, con respecto a su valor inicial (año base). Esta variación calculada es asignada dentro de un rango de valores donde se encuentran el mejor y el peor resultado esperado. Sin embargo, como cada indicador tiene un valor, unidad y sentido diferentes, es necesario transformar todos sus valores a una escala común, tal como se muestra en la Figura 6.1.

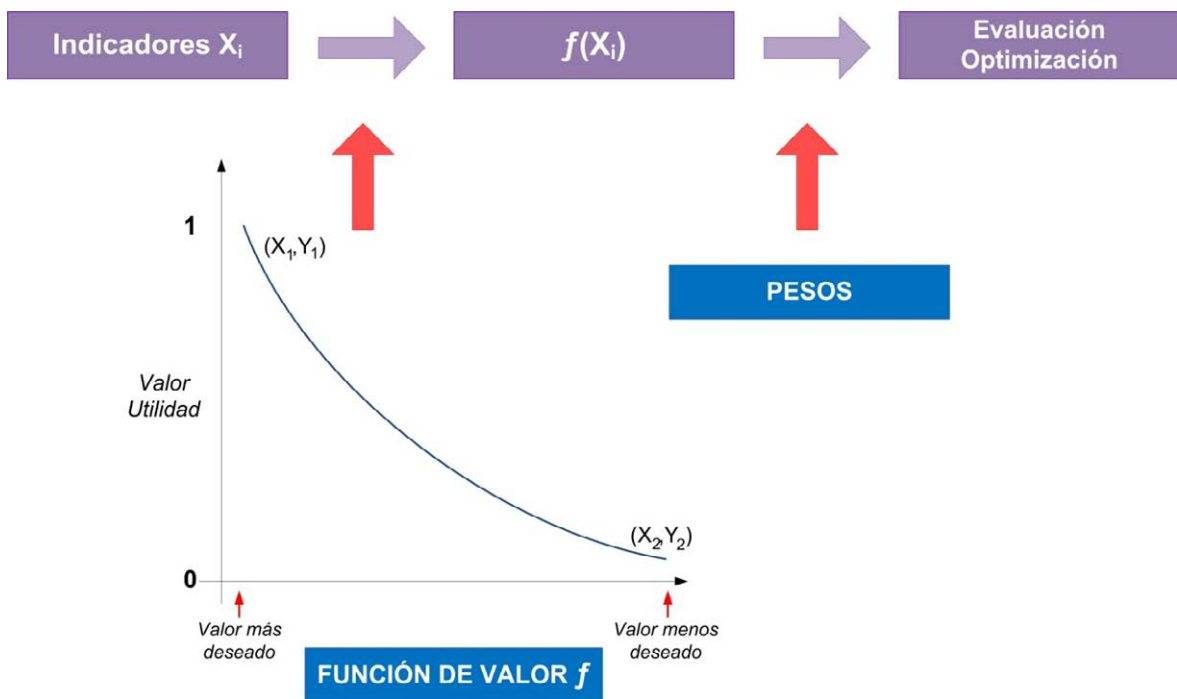


Figura 6.1 Normalización de Pesos en un MCA

El valor normalizado del indicador se calcula dividiendo la diferencia entre el cambio porcentual y el valor mínimo esperado y el rango de posibles valores, tal como se puede ver en la ecuación (6.1), donde x'_{ij} es el valor normalizado de la i -ésima alternativa y del j -ésimo atributo y $x_{ij}(0)$ es el indicador x en el año base ($t=0$).

$$x'_{ij} = \frac{\left[\frac{x_{ij}(t)}{x_{ij}(0)} - 1 \right] - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (6.1)$$

Esta fórmula estandariza el valor de los indicadores en un rango que varía de 0 a 1. El valor más alto, indicaría que el criterio es más atractivo. Es necesario tener en cuenta que la reducción de un indicador no siempre es bueno: es necesario tener en cuenta la dirección y sentido del cambio de cada indicador para establecer el rango de valores máximos y mínimos.

6.2.4 Escenarios

Una vez descritos los mecanismos de evaluación, ahora es necesario definirlos dentro de escenarios para hacerlos comprobables y así obtener resultados, ya que un proceso de planeación debe basarse en un resultado integrado por un conjunto de decisiones articuladas entre sí.

Como se ha visto en el Capítulo 2, un escenario es una secuencia lógica y plausible, aunque no necesariamente probable, de eventos, construida con el fin de centrar la atención en procesos causales y en puntos de decisión.

Un escenario debe plantearse como un estado futuro de algo que cambiamos en el presente. Pueden existir dos tipos diferentes de escenarios. En un escenario proyectado, se parte de una situación actual, donde se extrapolan las tendencias actuales. Un escenario en perspectiva, sería aquel cuyo punto de inicio busca una posible o deseada situación futura, generalmente descrito por unos objetivos claros desde el inicio. Un escenario general se refiere a una evolución 'macro' de elementos que se consideren en dicho escenario.

Diseño de Escenarios

Es muy importante dentro de un escenario, diferenciar entre sus variables exógenas y las endógenas. De hecho, las variables endógenas son los indicadores que al final nos ayudarán a evaluar los resultados de la evaluación de las políticas y precisar en qué medida se han alcanzado los objetivos propuestos.

En cuanto a las variables exógenas, se debe tener en cuenta que dentro de un escenario no son totalmente independientes entre sí. Un ejemplo claro de esto, es la relación entre el crecimiento económico y el empleo, o su relación con la evolución del índice de motorización. Esto es importante, ya que un escenario futuro estimado por el modelo MARS, el cual tiene en cuenta estas variables, debe presentar resultados coherentes. Sin embargo, las incertidumbres asociadas a este tipo de variables también generarán incertidumbres en los resultados obtenidos en escenarios futuros, aunque Makridakis (1990) habla de la existencia de evidencia empírica que sugiere que una simple predicción con base en valores medios de estas variables mejoran su precisión y reducen su incertidumbre. Como es apenas obvio, el nivel de precisión, o de incertidumbre, depende de la escala temporal de evaluación, ya que a mayor tiempo de evaluación, mayor será la incertidumbre de los resultados.

Es necesario diseñar escenarios específicos para el ámbito de ejecución de esta investigación, que reflejen las tendencias de las políticas seleccionadas, la evolución de la economía, de la urbanización, los cambios de la población, la competencia, la regulación y los cambios tecnológicos. Nuestros escenarios deben responder los siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles han sido las tendencias más importantes de las variables exógenas en el contexto de transporte y territorio en la zona de estudio?
- ¿Cuáles serían las variables exógenas más importantes que se incluirían en escenarios futuros?
- ¿Qué tan importantes serían las incertidumbres relacionadas con las tendencias futuras de dichas variables exógenas?
- Finalmente, ¿cómo diseñar un conjunto de escenarios para que el impacto de estas incertidumbres sobre los resultados finales sea el menor posible?

Una vez respondidos estos interrogantes, los resultados obtenidos al evaluar los escenarios previstos en el caso práctico, serán la base para el planteamiento de mecanismos de optimización en búsqueda de las sinergias que se producen entre las diferentes medidas según diferentes indicadores de sostenibilidad.

Formulación de Escenarios

La comprensión de la situación actual y de las supuestas situaciones futuras, debe conformar la construcción del escenario base y de los escenarios alternativos. Para esto es necesario considerar los siguientes puntos:

- Medidas de transporte y en particular, medidas que afecten el transporte, como las de los usos del suelo.
- Oportunidades y limitaciones de la oferta de transporte.
- Los patrones de movilidad y los niveles de servicio.
- Otros problemas relacionados con el transporte.

El futuro del escenario base debe representar de forma coherente una visión realista de lo que es probable que pase en el caso de ausencia de intervenciones, es decir, que todo se deje como está. Las hipótesis deben definirse claramente, al igual que la situación actual y los niveles de servicio.

Por lo general, estas hipótesis se refieren al mantenimiento de las infraestructuras actuales, teniendo en cuenta los cambios previstos en los usos del suelo y en la población. En todo caso, para obtener una evaluación del impacto de las medidas implementadas, siempre se deberán comparar las alternativas con esta base.

Las proyecciones de población, empleos e índice de motorización, deberían estar disponibles en cada zona. Los aspectos relacionados con los usos del suelo deben basarse en las previsiones de las autoridades locales y de ser posible, deben encajar en los marcos de planificación regional. El escenario base también debe incluir supuestos acerca del crecimiento económico (en este caso en particular, la evolución de los puestos de trabajo) y otras variables que puedan influir sobre la demanda de transporte, costes y tiempos de viaje.

Como última medida, las tendencias actuales que se presenten en el escenario base deben identificarse y en la medida de lo posible, integrarse dentro de dicho escenario, ampliándolas hacia el futuro.

En los escenarios alternativos, su construcción debe partir de las mismas bases descritas anteriormente. Estos nuevos escenarios necesitan desarrollarse para cada una de las opciones escogidas y si se desea, se pueden presentar variaciones con base en la tendencia

más probable, una pesimista y/o una optimista. Estos escenarios deben tener en cuenta la evolución de las variables exógenas, cuya incertidumbre hacia el futuro es importante. Además, dentro de estos escenarios, puede que tenga que realizarse un análisis de sensibilidad, con el fin de evaluar el impacto de la incertidumbre de las variables exógenas sobre los resultados de dichos escenarios. Este ejercicio también puede ser útil para demostrar la idoneidad de los resultados y para determinar el impacto de los supuestos hechos en los valores de los elementos.

Si una alternativa incluye medidas que podrían aplicarse por separado, se debe evaluar la estrategia completa, pero la aportación de cada una de las medidas debe identificarse y evaluarse, para saber la forma en que cada elemento aporta al objetivo final.

Según lo expuesto en capítulos anteriores y definiendo un contexto particular para este caso, una estrategia es un conjunto de diferentes medidas, cada una con sus características particulares y sus efectos sobre el transporte y el territorio. Estas estrategias están dentro de un entorno mucho más amplio, condicionado por situaciones políticas, sociales, ambientales, económicas y tecnológicas, que determinarán el comportamiento y la funcionalidad futura de una zona urbana. Estas situaciones externas son tratadas como variables exógenas y su combinación dentro de la presente investigación será conocida como un **escenario**. Para el diseño de un escenario, de forma general, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos (variables exógenas de la metodología propuesta):

- Evolución de la población.
- Evolución de la economía (puestos de trabajo por sector: servicios y producción).
- Evolución del índice de motorización (sea el caso de coche o moto).
- Planes e inversiones en nuevas infraestructuras o ampliación de las actuales. Se deberá tener en cuenta cualquier elemento que modifique la oferta de transporte.
- Precio de los combustibles.
- Impuestos sobre los combustibles.
- Composición tecnológica del parque vehicular.

Las variables exógenas representan los cambios generales en la sociedad. El valor de estas variables y su evolución a lo largo del tiempo, formará parte de la construcción de escenarios futuros, así como del desarrollo de análisis específicos de sensibilidad.

Adicionalmente a estas variables, existen también una serie de parámetros de cuya especificación también dependerán los resultados futuros de los escenarios. Estos parámetros son:

- Valor del tiempo [€/h]
- Coste accidentes [€/accidente]
- Coste emisiones [€/t]

La construcción de diferentes escenarios es la herramienta principal para analizar la incertidumbre y el grado de afectación de estas variables externas sobre los resultados de la investigación. Sin embargo, a veces surgen dudas acerca de si una variable debe ser un factor externo o debe estar influenciada por las relaciones internas del modelo.

Los escenarios son la herramienta principal para analizar qué tipo de estrategias son las más adecuadas para alcanzar los objetivos, dentro de un marco de desarrollo urbano sostenible. La parte analítica del proceso de planificación consiste en determinar los efectos que causarán las diversas estrategias frente a un escenario en donde ‘no se hace nada’. Para hacer frente al hecho que al momento de construir los escenarios no es posible saber a ciencia cierta su comportamiento y sus efectos, es necesario construir varios y analizar las diferencias entre sus variables de entrada y sus resultados.

6.3 PANEL DE INDICADORES

En sus distintas dimensiones, cuando se habla de la sostenibilidad, el tema del transporte urbano se encuentra en un lugar de gran importancia. En España, la estrategia Española de Movilidad Sostenible (MIFO, 2009), aboga por una evolución hacia modelos económicos de bajo consumo de carbono y menor consumo energético, a través de criterios de equidad social y reparto justo de la riqueza. Y como el sistema de transporte juega un papel preponderante, el documento recomienda adoptar estrategias de movilidad que permitan abordar no sólo los problemas de la congestión, sino también el de las variables que la acompañan, es decir, la solución debe ser integral y coherente en todos los términos asumiendo la complejidad que ello supone.

En consecuencia, esta investigación es mucho más que el desarrollo de una metodología analítica para evaluar los efectos económicos, ambientales y sociales de un grupo de estrategias sobre un sistema urbano de transporte y usos del suelo. Para evaluar dichos impactos, es necesario contar con un conjunto de indicadores de movilidad sostenible.

Para analizar detalladamente los factores relacionados con la sostenibilidad de un sistema de transporte urbano y para elaborar un listado que recoja una selección de los indicadores más relevantes, es necesario:

- Un sistema de indicadores medibles que representen de manera fiable un desarrollo sostenible de la movilidad urbana.
- Una fuente de información que aporte suficientes detalles para poder realizar el análisis.

Aplicados estos criterios a los previamente recogidos en capítulos anteriores, y tras un exhaustivo análisis de entre los numerosos estudios existentes, finalmente se **seleccionarán los indicadores**, excluyendo expresamente aquellos que no puedan medirse, aquellos para cuya monitorización no haya datos disponibles y, finalmente, los que no sean aptos para hacer pronósticos.

6.3.1 Evaluación de Indicadores

Los criterios de evaluación han sido seleccionados con base en la revisión de proyectos e investigaciones realizados recientemente, metodologías de evaluación existentes y documentos de la Unión Europea, descritos en capítulos anteriores. Estos estudios siguen la misma línea de los procedimientos de evaluación tradicionales, aunque se deben complementar con la evaluación de determinados objetivos estratégicos (DETR, 2009).

Estos criterios deben seleccionarse de tal manera que reflejen la medida en que cada escenario evaluado cumpla con los objetivos de la evaluación global (sostenibilidad social, económica y ambiental) definida en el Capítulo 2. Así, que según dichos objetivos, tenemos los siguientes criterios:

- **Impacto Ambiental.** Impacto sobre el medio ambiente urbano que el transporte y los usos del suelo pueden generar sobre la zona de estudio.
- **Equidad.** El objetivo es mejorar la seguridad en todos los modos de transporte, especialmente el coche, y la seguridad vial, reduciendo los riesgos de accidentes. También homogeneizar el coste proporcional que cada familia emplea en transportarse, según su nivel de ingreso.
- **Eficiencia del Sistema.** Mejora de la integración de la planificación territorial y urbanística con la de transporte. Alcanza unos niveles de accesibilidad adecuados y razonablemente homogéneos en todo el territorio; el cambio modal hacia modos más sostenibles, como el transporte público y modos no motorizados. Internalización progresiva de los costes internos y externos asociados a la movilidad.

Impacto Ambiental

El cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la fragmentación de los hábitats, los efectos que sobre la salud humana causan las emisiones locales de varios contaminantes, y en general, el bienestar de una zona urbana debido a la calidad del aire y ruido son los problemas ambientales más importantes relacionados con la actividad del transporte.

En este apartado se incluyen los indicadores que se pueden medir y evaluar con relativa certeza dentro del modelo estratégico utilizado. Indicadores que midan el grado de polución del aire y la contaminación, serán los seleccionados dentro de este objetivo. En consecuencia, aspectos que deben ser medidos como parte de una estrategia con metas predefinidas, se muestran a continuación:

- Reducción del uso de recursos no renovables y aumento del uso de energías limpias.
- Reducción del consumo energético en el transporte y en las viviendas, para así contribuir a la disminución de emisiones de CO₂.
- Reducir las emisiones de contaminantes como son los NO_x y el SO₂ (óxidos de nitrógeno y de azufre).
- Reducir los problemas de sanidad causados por el material particulado (PM₁₀).
- Proteger los lugares de patrimonio cultural, hábitats naturales, zonas verdes, tierras agrícolas y zonas recreativas.
- Detener o retrasar la dispersión urbana y la ocupación de suelo para usos de vivienda, comercio y transporte.
- Reducir las actividades con consecuencias medioambientales en áreas sensibles.
- Reducir la cantidad de población expuesta a los contaminantes.

Estos impactos ambientales también pueden tener efectos redistributivos, si dentro de la evaluación se está en capacidad de identificar el grado en que las diferentes áreas se ven afectadas por impactos negativos. Esto es un paso adelante hacia la identificación de ganadores y perdedores en relación con los aspectos ambientales (May et al., 2001).

Equidad Social

La equidad o igualdad, debe tener en cuenta que cualquier operador o usuario no debe pagar ni más ni menos que los demás integrantes del sistema (participaciones justas en igualdad de

condiciones). Los efectos generados por las inequidades deben ser contrarrestados en la medida de lo posible y los dineros destinados al desarrollo de infraestructura de vivienda y transporte, deben ser usados con precaución y eficiencia, ya que es dinero de los contribuyentes.

Tanto es así, que el grado de desigualdad existente en una sociedad y su evolución en el tiempo son temas que constantemente despiertan interés de la ciudadanía y de los especialistas. En la teoría económica, existen diversos indicadores para el estudio de la equidad; sin embargo, parece existir consenso que el indicador que ha tenido mayor aceptación es el denominado coeficiente de concentración de Gini (Brown, 1994). Este índice, de fácil interpretación, es una referencia común en los debates sobre el bienestar y la equidad.

En este caso, la inclusión social dentro del presente contexto, se mide por medio de dos elementos principales: la relación entre el ingreso medio de un hogar y sus costes destinados al transporte, la accesibilidad relativa entre modos y el número de accidentes.

En el primer elemento, el índice de desigualdad es una medida que resume la manera como se distribuye una variable entre un conjunto de individuos. En este caso particular, la medición se asocia al gasto en transporte de los hogares en relación con su renta bruta media mensual. De esta manera, si y_1, y_2, \dots, y_n representan los gastos en transporte de un grupo de n hogares, el indicador de desigualdad se construye como función de las observaciones $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$. Este indicador busca medir el índice de 'redistribución regional', expresado como el objetivo de obtener una distribución de los costes de transporte y del bienestar más equitativa entre las zonas de estudio (Lauridsen, 2011).

El segundo indicador mide el número de oportunidades (puestos de empleo) que hay en una zona y que se ven afectadas por funciones que miden la dificultad de acceder, desde un origen cualquiera, a dichas oportunidades. Estas funciones pueden ser distancias, tiempos, costes o una combinación de ellas.

El último elemento implica la reducción del número y gravedad de los accidentes, particularmente en coche. Este objetivo tiene implicaciones sobre la equidad, ya que algunos emplazamientos, determinadas edades y ciertos modos de transporte suponen un mayor número de accidentes que el resto.

Eficiencia del Sistema

La eficiencia de un sistema de transporte es un requisito indispensable para garantizar la movilidad a mediano y largo plazo, especialmente en las zonas urbanas más grandes y congestionadas. Los consumidores, como usuarios del transporte público y de la red vial, necesitan un transporte ordenado, seguro, eficiente y no contaminante, que sea una verdadera opción para la movilidad urbana. Esta opción debería basarse en modos colectivos más que en individuales, con el fin de mejorar su eficiencia.

Los grandes problemas de movilidad que se vienen presentando dentro de las zonas urbanas como el crecimiento de la población, del número de vehículos circulando y de los kilómetros recorridos; o como la casi permanente congestión de las áreas urbanas y sus accesos, hace que este tema sea un campo de gran importancia.

Este criterio se enfoca principalmente hacia la reorientación de la demanda de los usuarios del sistema de transporte, en el sentido de reducir el uso excesivo del coche, sin llegar a prohibirlo y sin renunciar a la libertad de elección. Para lograr esto, se incentiva el uso de otros medios de transporte, como el transporte público o modos alternativos, o al menos hacia unas formas de utilización más racionales del coche, por medio de algunas medidas específicas, como las de *pricing*.

Otro de los elementos importantes dentro de la eficiencia del sistema es su planificación, lo que posibilita una mejor gestión, ya que a medida que el nivel de desarrollo económico aumenta, aumenta la complejidad de las relaciones urbanas. Los impactos negativos directos de este desarrollo son el incremento de la tasa de motorización y de la cantidad de viajes que cada persona realiza, lo que a su vez ocasiona problemas de congestión, de calidad del aire, ruido, accidentes, entre otros.

Dentro de este criterio de evaluación no hay objetivo único, generalmente es un objetivo general, en consonancia con el desarrollo urbano, en donde se reduzcan los efectos negativos o se eviten las consecuencias que suele caracterizar la circulación tanto de vehículos como de peatones.

Eficiencia Económica

Este objetivo consiste en estimar el máximo beneficio que los habitantes de una ciudad, es decir, la sociedad en su conjunto, pueden obtener en los mercados de transporte, vivienda, etc. y que pueda ser medido a un nivel agregado como una función de bienestar; o también a nivel de cada mercado. Esta vez se ha medido como el excedente del consumidor y del productor (operador). Todo esto teniendo en cuenta los costes de funcionamiento y de provisión.

Los beneficios netos anuales son solo la materia prima para el cálculo de la eficiencia económica. Con el fin de que dichos beneficios sean comparables y puedan ser sumados, los valores obtenidos para los diferentes años de evaluación deben llevarse al valor actual neto (VAN), preferiblemente en un periodo de tiempo, anterior al momento de implantar las diversas estrategias.

En este caso se asume que todos los valores, costes y beneficios, son reales, por lo que no se tienen en cuenta los efectos causados por la inflación. Para actualizar los valores futuros a precios actuales, se utiliza la tasa social de descuento para España cuyo valor se estimó en 4.8% (Souto Nieves, 2003).

De esta manera, la eficiencia económica será medida desde perspectivas diferentes: el excedente del consumidor (usuarios del sistema de transporte), el excedente de los operadores y los cambios en los costes externos. Su evaluación será por medio de un análisis dinámico coste-beneficio (CBA). La suma total de dichos excedentes será el beneficio total de la sociedad en su conjunto.

6.3.2 Selección de Indicadores

Para que un indicador sea eficaz en relación con los objetivos planteados, es necesario cubrir una serie de requisitos. Estos indicadores deben cubrir las partes esenciales que se encuentran en juego, deben ser coherentes con la base de datos estadísticos y además, deben ser simples en su forma de aplicación y comprensión (Nicolas et al., 2003).

Como los indicadores deben tener en cuenta la realidad de la movilidad urbana, se ha tratado de representar y cubrir todos los posibles problemas. Además, la forma en que se miden estos indicadores debe ser lo más integrada posible. En la Tabla 6.3 se muestra una propuesta de los posibles indicadores a utilizar y su nivel de análisis.

Teniendo en cuenta los criterios y calificaciones descritas en el Capítulo 5 (Tabla 5.2) y las características del modelo de evaluación utilizado, a continuación se muestra el resultado de la evaluación de varios posibles indicadores seleccionables para esta investigación, de acuerdo con los criterios expuestos anteriormente. Esta evaluación se ha hecho con el fin de

ser coherente con otros paquetes de indicadores urbanos de proyectos y agencias europeas (ver bibliografía).

Tabla 6.3 Propuesta e Evaluación de Indicadores

Criterio	Indicador	Relevancia	Solidez Analítica	Medición	
				Disponibilidad de información	Calidad de información
Impacto Ambiental	<i>Cambio climático</i>	1	1	2	1
	<i>Polución del aire</i>	1	1	2	2
	<i>Consumo de suelo</i>	1	1	2	1
	<i>Consumo Energético</i>	1	2	2	2
	Exposición al ruido	1	3	3	3
	Calidad de espacios protegidos	1	1	3	2-3
	Fragmentación del territorio	2	2	2-3	2
Equidad Social	Vulnerabilidad de usuarios de transporte no motorizado	2	2	3	3
	<i>Equidad en Costes de Transporte</i>	2	1	2	1
	<i>Seguridad vial</i>	1	1	2	2
	Cobertura de transporte público	1	1	3	2
	Población expuesta al ruido	2	3	3	3
	Población expuesta al contaminantes	1	3	3	3
	<i>Accesibilidad</i>	3	3	2	2
	Accesibilidad a discapacitados	1	1	2	2
	Subsidios al transporte	3	2	3	2
	Accesibilidad transporte público	1	2	2	3
Eficiencia del Sistema	Consumo de combustible	1	1	3	1
	Coste medio de viaje	1	1	1	2
	<i>Ahorros de tiempo</i>	3	3	2	2
	<i>Costes de operación</i>	1	2	2	1
	Intensidad del tráfico	2	2	1	2
	Velocidad media	2	2	2	3
	Suelo Urbano/Habitante	1	2	1	2
	<i>Distancias de Viaje</i>	3	2	1	3
	Calidad de la vivienda	2	3	3	3
	<i>Cambio modal</i>	3	2	2	2
	Protección del patrimonio cultural	2	1	1	2
Tiempo medio de viaje	1	2	2	1	
Eficiencia Económica	<i>Excedente del consumidor</i>	1	1	1	1
	<i>Costes de operación</i>	1	1	2	2
	Costes de inversión	1	1	3	1
	<i>Impuestos al combustible</i>	1	1	2	2
	<i>Coste de emisiones</i>	1	1	2	1
	<i>Coste de accidentes</i>	1	1	2	1
	Cambio en los usos del suelo	1	2	3	3

Con base en esta revisión de la literatura, se han podido señalar las siguientes características como las más relevantes a la hora de adoptar los indicadores necesarios.

- Sólo se seleccionarán los indicadores relevantes. Hay que buscar un sólido equilibrio entre los indicadores sintéticos por una parte y los que son capaces de mostrar la evolución local sobre el período de análisis.
- Los que finalmente sean seleccionados deben estar claramente definidos: ámbito geográfico, modo de cálculo, fuente, periodicidad.
- Los indicadores seleccionados deben permitir monitorizar las tres dimensiones básicas de la sostenibilidad: social, económica y medioambiental.
- Deben estar rápidamente disponibles. La cuestión es que no siempre hay presupuesto para recoger indicadores adicionales, como suele ocurrir con las organizaciones encargadas de las encuestas regulares de movilidad. De ahí que en numerosas ocasiones, haya que emplear indicadores indirectos.
- Los indicadores seleccionados deben ser fácilmente comprensibles, no sólo por los decisores políticos, sino también por el público en general. Esa simplicidad facilita, asimismo, la normalización de indicadores.
- Deben ser de confianza en cuanto a su definición, ámbito geográfico y ámbito temporal.

En consecuencia, al aplicar los criterios de evaluación descritos en la Tabla 5.2 a una lista de varios indicadores de sostenibilidad, en la tabla anterior se presenta la lista en **negrita** de los indicadores seleccionados para el caso de estudio, al haber obtenido una mejor calificación.

Con base en políticas de la Unión Europea y en proyectos europeos como EUNET (Beuthe et al., 1998), PROSPECTS (Minken et al., 2003), PROPOLIS (Lautso et al., 2004), STEPs (Fiorello et al., 2006) y CityMobil (Gühnemann y Kimble, 2008), además de las evaluaciones de la Tabla 6.3, la lista de indicadores seleccionados para cada tipo de evaluación (MCA o CBA), se define en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Criterios de Evaluación e Indicadores

	Criterio	Sub-Criterio	Indicador	Unidad
Coste-Beneficio	Eficiencia Económica	Usuarios y operadores (excedente del consumidor)	Beneficios usuarios	M€/año
		Costes e ingresos	Beneficios operadores	M€/año
			Costes de operación	M€/año
			Impuestos al combustible	M€/año
		Externalidades	Costes de mantenimiento a infraestructuras viales	M€/año
			Emisiones CO ₂	M€/año
Polución del aire	M€/año			
Multicriterio	Impacto Ambiental	Cambio climático	Accidentes	M€/año
		Polución del aire	Emisiones de CO ₂	t/año
		Dispersión urbana	Emisiones NOx y PM ₁₀	t/año
	Equidad Social	Accesibilidad potencial	Consumo suelo	km ² /hab
		Distribución costes de transporte	Accesibilidad relativa por modo	-
	Eficiencia del Sistema	Seguridad vial	Ingreso hogar / costes transporte	GINI
		Congestión	Reducción accidentes	Acc/año
Costes operación		Ahorros de tiempos de viaje	min	
	Cambio modal	Costes de operación del coche	M€/año	
		Mayor uso del transporte público	%	

La intención detrás de esta estructura de indicadores viene de la necesidad de evaluar los resultados del sistema de transporte y usos del suelo y sus consecuencias en términos desde la perspectiva económica, social y ambiental. En los datos de la tabla anterior no se incluye un doble conteo, solo se describen todos los indicadores a tener en cuenta para cada una de las dos funciones objetivo.

6.3.3 Descripción de Indicadores

Para **validar la optimización y comparación** de diferentes medidas de transporte en el largo plazo, a cada una de las dimensiones de la sostenibilidad se le han asignado un conjunto de indicadores que contengan los requisitos mencionados (siendo, de otro modo, desechados).

La combinación de las medidas debe ser de tal manera que se compensen sus efectos negativos; por citar un ejemplo, si se limita la velocidad del tráfico en un corredor cualquiera, podría tener efectos positivos sobre la reducción del número de accidentes, lo cual sería un objetivo a conseguir en el área social; pero esta medida, por sí sola, no bastaría para compensar los efectos sobre otros indicadores relativos a la pérdida de oportunidades, accesibilidad y contaminación. Por tanto, las medidas que afecten a un elemento específico, deben adoptarse y estudiarse caso por caso.

En definitiva, tras la lista de indicadores de sostenibilidad urbana, se han aplicado los criterios de jerarquización basados en los criterios generales de claridad, representatividad y solidez analítica, de manera que finalmente, se pueda contar con un grupo de evalúe la sostenibilidad de un sistema urbano, según el mecanismo de evaluación que se utilice. Así, a continuación se presenta una descripción de cada indicador seleccionado.

Beneficio de los Usuarios

Dentro de un sistema de transporte, el beneficio de sus usuarios en un entorno dinámico se define como la parte de los beneficios sociales que se obtienen de una política, en donde los usuarios (u hogares), en su condición de viajeros, usuarios de coches y viviendas sacan algún tipo de provecho. En este caso, el cálculo del beneficio para los usuarios de transporte, se basa en la teoría convencional del excedente del consumidor (EC). En la estimación del modelo de usos del suelo y transporte se han tenido en cuenta los siguientes elementos:

- Cambios en los costes del transporte.
- Cambios en los tiempos de viaje.
- Cambios en la movilidad (zonas atractoras de viajes).

Este concepto es muy importante a la hora de evaluar una estrategia dentro de este entorno dinámico. El excedente del viajero se ha definido como la diferencia entre la cantidad que se paga por realizar un viaje (cualquiera sea el modo utilizado) entre el origen i y el destino j y la cantidad máxima que éste estaría dispuesto a pagar ante la expectativa de no hacer el viaje. Por ejemplo, si un usuario estuviera dispuesto a realizar un viaje entre dos puntos que no dura más de 20 minutos (si dura más, el usuario no lo hace) entonces, el valor total del viaje es equivalente al valor dispuesto a pagar por el usuario por 20 minutos de tiempo de viaje. El excedente de este usuario se da en la medida que su viaje dure menos de los 20 minutos provistos inicialmente. Si una política de transporte reduce aún más dicha duración de este viaje, pues el usuario experimentará un aumento en su 'excedente del consumidor'.

En consecuencia, dentro de grupo de usuarios del sistema de transporte, un cambio en el excedente del consumidor está dado por la diferencia entre el cambio del beneficio obtenido y el cambio del coste percibido. En el caso más simple, donde los costes en tiempo o dinero

cambian, pero la demanda permanece estática (demanda inelástica), el cambio en el excedente se puede ver en la ecuación (6.2) (DETR, 2010b). Esto aplica para cada par O-D.

$$\Delta \text{costes} \cdot \text{número viajeros} = (P^{E0} - P^{E1}) \cdot T \tag{6.2}$$

Donde,

P_{Ej} = Coste percibido de viaje (según escenario, donde E0 es el escenario base)

T = Número de viajes

Sin embargo, a pesar del ejemplo anterior, lo más común es que la demanda cambie en respuesta a los cambios en los costes de transporte, donde puede haber un impacto adicional: pueden haber nuevos viajeros o menos. Para cambios en los costes relativamente pequeños, lo usual es atribuir la mitad del cambio de los costes al cambio de demanda. En este caso, el cambio en el excedente del consumidor se muestra en la Figura 6.2 y en la ecuación (6.3). Este excedente del consumidor se calcula por medio de la conocida ‘regla de la mitad’, la cual fue introducida en los años 60 en el Instituto de Transportes de Londres por Tressider et al., (1968), aunque Johansson (1987) y Button (1993), hacen una definición mucho más elaborada. Este procedimiento es la forma más utilizada para estimar el beneficio de los usuarios en proyectos de transporte (Jara-Díaz, 2007).

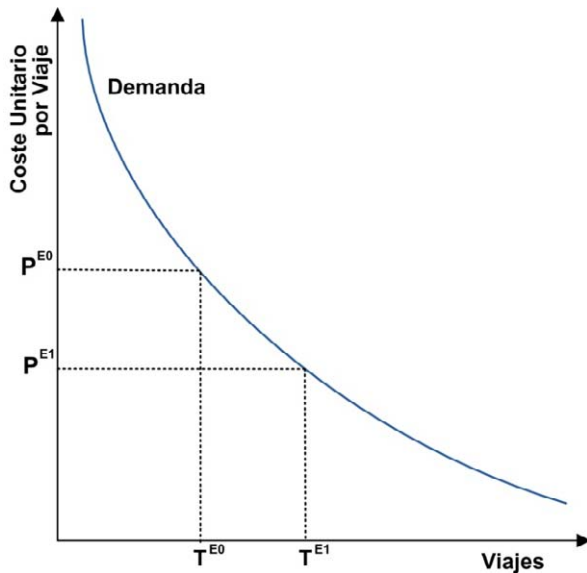


Figura 6.2 Cambios en el Excedente del Consumidor

Esta operación asume de manera implícita que existe una relación lineal entre los costes y la demanda. Si este supuesto resultara falso, y la demanda tuviera una curvatura importante, este procedimiento tendería a una sobreestimación de los beneficios, pero si el cambio en los costes es pequeño, el error puede ser poco significativo (DETR, 2010b).

Sin embargo, la realidad es mucho más compleja que la descripción dada en los párrafos anteriores, ya que los principales sustitutos y alternativas para un viaje del punto A al B, podrían ser viajes a otros destinos, por otros modos y utilizando rutas diferentes. Aunque en la realidad esto es lo que sucede, en un ejercicio de este tipo siempre se puede lograr una coherencia entre el patrón de viajes de una ciudad y sus costes asociados. En este punto radica la clave para esta evaluación, ya que esta

forma puede extenderse para cubrir la red regional donde existen varios modos de transporte y múltiples orígenes y destinos.

$$\begin{aligned} \Delta \text{costes} \cdot \text{demanda } E_0 + \frac{\Delta}{2} \text{costes} \cdot \Delta \text{demanda} = \\ (P^{E0} - P^{E1}) \cdot T^{E0} + \frac{1}{2} \cdot (P^{E0} - P^{E1}) \cdot (T^{E1} - T^{E0}) = \\ \frac{1}{2} \cdot (T^{E0} + T^{E1}) \cdot (P^{E0} - P^{E1}) \end{aligned} \tag{6.3}$$

Este método de cálculo se ha aplicado a todas las opciones de viaje dentro del sistema analizado, ya que los costes generalizados muy probablemente cambien al comparar el escenario base con uno alternativo. En la práctica, incluso la estrategia más simple puede tener complejos efectos sobre los costes y comportamiento de un sistema de transporte urbano. Se puede calcular el total de los beneficios de los agentes del sistema por medio de la ‘regla de la mitad’ de una manera razonable, siempre y cuando los cambios producidos por las estrategias afecten a los costes generalizados del sistema (Simmonds, 2001). Consideraciones adicionales acerca de la aplicación de este procedimiento, así como sus aproximaciones, ventajas y limitaciones pueden verse en detalle en Jara-Díaz (2007).

Sin embargo, si una política de transporte consiste en la introducción de un nuevo modo de transporte, el coste percibido de este modo en el escenario base sería infinito. En este caso la regla de la mitad no es válida. Esto es discutido ampliamente en Nellthorp y Hyman (2001), donde también se presentan otras alternativas de evaluación.

Por otro lado, al producirse cambios en los usos del suelo, la función dada por la ecuación (6.3) no captura el beneficio de los usuarios debido a estos cambios. Como las funciones que estiman estos cambios solo se aplican a un determinado tipo de modelo, se debe actuar con cautela y buen juicio si se desea aplicar este concepto en otros modelos.

Desagregación de Beneficios

A pesar de que en teoría, en la ecuación (6.3) se tienen en cuenta todos los costes asociados a un viaje, es necesario considerar los costes que pasan desapercibidos para el usuario. Estos costes son asumidos por quien realiza el viaje, pero no es consciente de ello, razón por la cual no influyen en su decisión de viajar. En general, los usuarios del coche no asumen costes no asociados al consumo de combustible, es decir, no tienen en cuenta el consumo de neumáticos, mantenimiento o depreciación del vehículo. Estos costes pueden cambiar si cambian los patrones de viaje. El cambio neto de costes debe estimarse y ser incluido a la aplicación de la ecuación (6.3).

Con el fin de abordar estos problemas, se ha adoptado en este caso el planteamiento defendido por Sugden (1999). Este planteamiento se centra en la distribución de beneficios por modo de transporte según su ‘origen’. La función de distribución de estos beneficios es la mostrada en la ecuación (6.3), para cada modo m .

$$\Delta S \approx \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \sum_m (T_{ijm}^{E_0} + T_{ijm}^{E_1}) \cdot (P_{ijm}^{E_0} - P_{ijm}^{E_1}) \quad (6.4)$$

Se ha de tener en cuenta que los beneficios están dados por los costes iniciales y finales percibidos por cada modo, independientemente de la causa del cambio en los costes. Así por ejemplo, si una mejora sobre la red de metro genera beneficios en la carretera debido a la descongestión, estos beneficios se deben atribuir al modo de la carretera.

Para la descripción de la desagregación de beneficios, se utilizará la misma que se usó en Sugden (2002). De esta forma se tiene:

- S_{ij}^k = excedente del consumidor para los viajeros entre i y j en el escenario k
- P_{ij}^k = coste percibido de i a j en el escenario k
- F_{ij}^k = coste de combustible entre i y j en el escenario k (impuestos indirectos incluidos)
- N_{ij}^k = costes de operación sin combustible (mantenimientos, neumáticos, depreciación, etc.) entre i y j en el escenario k (impuestos indirectos incluidos)

- M_{ij}^k = tarifas, peajes y otros cargos, incluido el parking, entre i y j en el escenario k ¹
- V_{ij}^k = coste del tiempo percibido de i a j en el escenario k (note que $V_{ij}^k = J_{ij}^k \cdot K_T$)
- J_{ij}^k = tiempo de viaje entre i y j en el escenario k
- D_{ij}^k = distancia entre i y j en el escenario k
- L_{ij}^k = combustible consumido entre i y j en el escenario k
- T_{ij}^k = viajes entre i y j en el escenario k
- K_T = valor del tiempo
- t = tasa de impuestos indirectos al combustible

Así, los beneficios se obtienen de la siguiente forma:

$$(S^{E_1} - S^{E_0}) \cdot (1 + t) \quad (6.5)$$

De tal forma que el término $(S^{E_1} - S^{E_0})$ es el incremento del EC calculado según la ecuación (6.6).

$$(S^{E_1} - S^{E_0}) = \frac{1}{2} \sum_{ij} (T_{ij}^{E_0} + T_{ij}^{E_1}) \cdot (P_{ij}^{E_0} - P_{ij}^{E_1}) \quad (6.6)$$

Así, el término $(N^{E_1} - N^{E_0})$ es el cambio en el gasto de los usuarios no percibido (se asume que los que hacen viajes no obligados solo perciben el coste del combustible). De tal forma que:

$$(N^{E_1} - N^{E_0}) = \sum_{ij} T_{ij}^{E_1} \cdot N_{ij}^{E_1} - T_{ij}^{E_0} \cdot N_{ij}^{E_0} \quad (6.7)$$

Entonces, según lo anterior, la definición de los costes percibidos es (para cada par ij):

$$P^k = M^k + F^k + N^k + V^k \quad (6.8)$$

Para el transporte público, los términos F^k y N^k , son siempre cero. En el transporte privado, el término M^k , puede ser cero, siempre y cuando no existan cobros por peajes, aparcamientos, etc.

Los cálculos anteriormente descritos, representan el beneficio general de los usuarios del sistema de transporte. Para una estimación por categorías, éstos se pueden clasificar por tiempo, costes de operación y tasas. Esto debe hacerse mediante la desagregación de los costes percibidos, como se ha visto con anterioridad.

¹ Para F_{ij}^k , N_{ij}^k y M_{ij}^k , se debe excluir el IVA.

De esta manera, los beneficios desagregados para viajes en coche vienen dados por:

$$\text{Tasas} \quad \frac{1}{2}(1+t) \cdot \sum_{ij} (T_{ij}^{E_1} + T_{ij}^{E_0}) \cdot (M_{ij}^{E_0} - M_{ij}^{E_1}) \quad (6.9)$$

$$\text{Costes de Operación} \quad \frac{1}{2}(1+t) \cdot \sum_{ij} (T_{ij}^{E_1} + T_{ij}^{E_0}) \cdot (F_{ij}^{E_0} + N_{ij}^{E_0} - F_{ij}^{E_1} - N_{ij}^{E_1}) \quad (6.10)$$

$$\text{Tiempos de Viaje} \quad \frac{1}{2}(1+t) \cdot \sum_{ij} (T_{ij}^{E_1} + T_{ij}^{E_0}) \cdot (V_{ij}^{E_0} - V_{ij}^{E_1}) \quad (6.11)$$

Beneficios de los Usuarios en un Modelo LUTI

Si una estrategia solo influye en los costes de transporte percibidos por el usuario, el EC tal como se ha visto es una buena medida para medir el beneficio de los usuarios. Sin embargo, Simmonds (2001) muestra que en el momento en que se introducen cambios que no estén representados en los costes generalizados, el método convencional dado por la ecuación (6.3) es menos fiable y puede resultar engañoso. Esto es evidente, ya que si en la ecuación (6.3) no ocurren cambios en P (costes), no se registra un beneficio en dicho escenario. Pero en la realidad, podría haber beneficios, por ejemplo en la forma de más oportunidades en los destinos, mejoras en el medio ambiente y zonas residenciales más baratas (en este caso, se ha supuesto que los usuarios son inquilinos y no propietarios). En términos generales, es posible identificar las mejoras que no aparecen en los beneficios de los costes generalizados, como beneficios de uso del suelo. Lo difícil es valorar en dinero dichas mejoras.

En la ecuación (6.12) se muestra la forma de calcular el beneficio de los usuarios en un modelo multinomial logit de forma general (Simmonds, 2001).

$$V = \frac{1}{\beta_L} \ln \sum_i \exp(\beta_L \cdot V_i) \quad (6.12)$$

Donde,

V_i = Utilidad de residir en la zona i

β_L = Coeficiente de distribución asociado a la elección residencial

V = La utilidad esperada de la elección residencial

Es de notar que en la función de utilidad V se incluyen términos relacionados con el transporte o la accesibilidad, mientras que ya en el término introducido por la ecuación (6.13), se excluyen los costes de transporte.

$$V_j = \alpha^a \cdot A_j^c + \alpha^g \cdot G_j + \alpha^r \cdot R_j^D \quad (6.13)$$

Donde,

- A_j = Accesibilidad a los puestos de trabajo desde la zona j en el tiempo t
- G_j = Calidad ambiental de la zona j (proporción de zonas verdes en la zona j en el tiempo t)
- R_j^D = Alquiler mensual (o hipoteca) de una vivienda en la zona j
- α = Constantes monetarias

Al combinar (6.12) y (6.13), se obtiene la ecuación (6.14), que estima la distribución espacial de la población que se muda dentro de nuevas zonas residenciales (ver Anexo 4), siendo a , b , c , d y e constantes.

$$N_j(t) = H(t) \cdot \frac{a \cdot \exp [b \cdot A_j^C(t) + G_j(t) \cdot (c \cdot G_j(t) + d) + e \cdot R_j^D(t)]}{\sum_j a \cdot \exp [b \cdot A_j^C(t) + G_j(t) \cdot (c \cdot G_j(t) + d) + e \cdot R_j^D(t)]} \quad (6.14)$$

Donde,

- $N_j(t)$ = Número de residentes que requieren una vivienda de la zona j en el tiempo t
- $H(t)$ = Demanda total de viviendas que se puede cubrir en el tiempo t

Así, la ecuación (6.14) es un modelo LOGIT con un término de demanda esperada de vivienda para la zona j (N_j), una medida de la 'utilidad de localización' dada por la función $V(A, Gr, R)$ y unas constantes. H es el número total de hogares a localizar.

Entonces, la utilidad individual de la elección de localización residencial en este modelo viene dado por V_i de la ecuación (6.12) y el beneficio total de los usuarios se define como $H \cdot V$. De esta manera, el beneficio del usuario, ahora medido en unidades monetarias, al pasar del escenario base a uno alternativo está dado por (Simmonds, 2001):

$$BU = H \cdot (V^{E1} - V^{E0}) \quad (6.15)$$

En este punto, siguiendo algunas recomendaciones de proyectos europeos (Minken et al., 2003), se hacen derivadas parciales de V , para calcular una expansión de Taylor de primer orden alrededor de un punto de la situación inicial (escenario base). Estos cálculos se utilizan en la ecuación (6.13) y (6.15), llegando a la expresión dada en (6.16), donde BU estima los beneficios de los usuarios, debió a los beneficios asociados a los usos del suelo.

$$BU = \sum_i H_i(\theta) [\alpha^a \cdot (A_i^{E1} - A_i^{E0}) + \alpha^r \cdot (R_i^{E1} - R_i^{E0}) + \alpha^g \cdot (G_i^{E1} - G_i^{E0})] \quad (6.16)$$

En esta ecuación, el beneficio total del usuario calculado de los cambios en los costes del transporte y de los usos del suelo, se descompone en términos que relacionan el transporte y la atractividad de los destinos (A_i) y los términos que relacionan los cambios en el uso del suelo en las zonas residenciales (R_i y G_i). Los términos de la accesibilidad, pueden obtenerse del modelo de transporte, mientras que los demás, han de obtenerse del modelo de usos del suelo.

Sin embargo, partiendo de las ecuaciones (6.15) y (6.16), en las transformaciones realizadas en el Proyecto PROSPECTS (Minken et al., 2003), queda un término θ desconocido, por lo cual es necesario obtener un valor aproximado. Si se usa $\frac{1}{2} \cdot (P_i^{E1} + P_i^{E0})$ en lugar de $H_i(\theta)$ en la ecuación (6.16), significa que al utilizar la ‘regla de la mitad’ al nivel de los usos del suelo¹, la formulación sería la siguiente:

$$BU = \frac{1}{2} \sum_i (H_i^{E1} + H_i^{E0}) \cdot [\alpha^a \cdot (A_i^{E1} - A_i^{E0}) + \alpha^r \cdot (R_i^{E1} - R_i^{E0}) + \alpha^g \cdot (G_i^{E1} - G_i^{E0})] \quad (6.17)$$

De esta manera, los términos A_i podrían ser los beneficios asociados al transporte de los residentes en la zona i , calculado en el nivel de elección de destino en un modelo como el siguiente:

$$T_{ijp} = T_{ip} \cdot \frac{W_{jp} \exp(-\beta_D \cdot \hat{c}_{ijp})}{\sum_k W_{kp} \exp(-\beta_D \cdot \hat{c}_{ikp})} \quad (6.18)$$

Donde,

- T_{ijp} = Es el número de viajes de la zona i a la j por el motivo p , sin importar el modo
- \hat{c}_{ijp} = Es el coste compuesto de estos viajes, dado por la log-suma en el nivel de elección de modo
- T_{ip} = Es el número de viajes originados en la zona i por el motivo p , sin importar el modo o el destino
- W_{jp} = Es un índice de atractividad del destino j , para realizar actividades de tipo p , medido por ejemplo, como el número de puestos de empleo, área de compras, etc.
- β = Es el parámetro de distribución de elección de destino

Ahora es necesario transformar de alguna manera el índice W_{jp} en alguna forma de beneficio w_{jp} en el destino y definir la utilidad indirecta de los viajes a j debidos a la atractividad A_{ij} (Minken et al., 2003). Para ver los detalles de la accesibilidad dentro de un contexto de un CBA, consultar Geurs y Ritsema van Eck (2001).

En un modelo de usos del suelo y transporte, cuyo modelo de localización residencial sea del tipo logit simple y las log-sumas de los modelos de elección de transporte estén incluidas en las funciones lineales de utilidad indirecta, el beneficio puede obtenerse sumando términos. Así, el beneficio total de los usuarios (BU) se calcula sumando los elementos de la ecuación (6.17) de la siguiente manera:

- $BU(T)$ es el elemento de los beneficios que se calculan a partir de los cambios en los costes generalizados del transporte. En el caso específico del modelo MARS, se asume que los beneficios obtenidos se deben a que los usuarios en su calidad de inquilinos, experimentan reducciones en los precios de alquiler (debido principalmente a la reducción de la congestión), sin que esto afecte ni degrade la habitabilidad de la zona.
- $BU(Atr)$ es el elemento de los beneficios calculados a partir de los cambios en la atractividad de los viajes. Generalmente se calcularán como una mejora en la accesibilidad que viene dado por los ahorros de tiempo debidos a nuevos accesos (infraestructuras) o menor congestión.
- $BU(P)$ es el elemento de los beneficios calculados de los cambios en la localización residencial (y por tanto en la producción de viajes), exceptuando la accesibilidad.

¹ Por la propiedad del valor intermedio de las funciones continuas en un dominio cerrado, la existencia de un valor $\theta \in [0,1]$, hace que $H_i(\theta) = 1/2 \cdot (P_i^{E1} + P_i^{E0})$ esté garantizado.

Visto lo anterior, el beneficio total del usuario puede ser desagregado en sus componentes básicos (T , A , G y R), tal como se puede observar en las ecuaciones (6.19), (6.20) y (6.21).

$$BU(T) = \frac{1}{2} \sum_{ijm} (T_{ijm}^{E0} + T_{ijm}^{E1}) \cdot (P_{ijm}^{E0} - P_{ijm}^{E1}) \tag{6.19}$$

$$BU(Atr) = \frac{1}{2} \sum_{ijm} (T_{ijm}^{E0} + T_{ijm}^{E1}) \cdot (w_{ijm}^{E1} - w_{ijm}^{E0}) \tag{6.20}$$

$$BU(P) = \frac{1}{2} \sum_i (H_i^{E0} + H_i^{E1}) \cdot [\alpha^r \cdot (R_i^{E1} - R_i^{E0}) + \alpha^g \cdot (Gr_i^{E1} - Gr_i^{E0})] \tag{6.21}$$

Finalmente, a manera de resumen se tiene:

- El superíndice E_0 se refiere al escenario base y E_1 al alternativo.
- Las variables T se refieren al número de viajes y P al costo de viaje.
- w es el índice de atractividad de un destino, según el propósito del viaje.
- El número de residente de la zona i viene dado por H , R es la utilidad de las actividades basadas en el hogar menos la renta y Gr es un índice de calidad ambiental (zonas verdes, en este caso) (Krainer et al., 2005).

Finalmente, en la Figura 6.3 se muestra el modelo construido dentro del modelo MARS donde se estima el beneficio de los usuarios del sistema de transporte, según los cálculos descritos anteriormente.

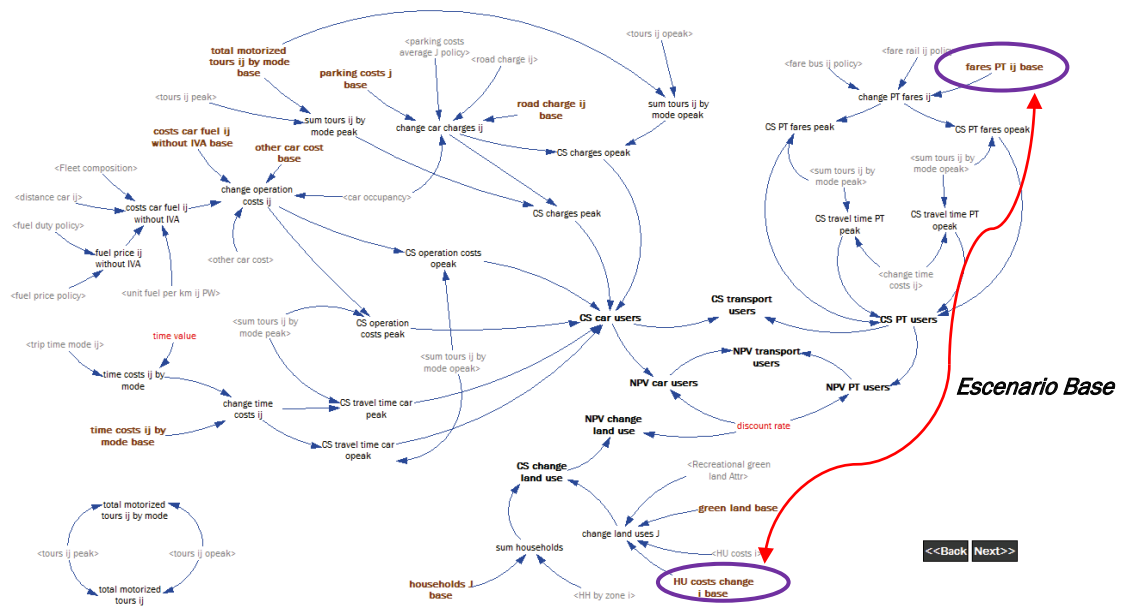


Figura 6.3 Cálculo del Beneficio del Usuario

Fuente: Elaboración propia.

Beneficio Operadores

Se ha definido que el beneficio de un operador viene dado por los ingresos anuales totales menos los costes asociados a la prestación de un servicio. Es importante aclarar que el productor (operador en este caso) de un servicio debe comportarse de manera económica: producir una cantidad específica al menor coste posible (Fontaine, 1981). Esto es la eficiencia económica en un sistema de transporte. Dentro de este contexto, suponiendo que no existen subsidios del estado, el beneficio del operador se define como la diferencia entre el ingreso total por tarifas y el ingreso mínimo que se requiere para ofrecer el nivel mínimo de servicios, como se ha mencionado.

Según la Figura 6.4, si se implementa una medida que aumento la oferta de TP de O^0 a O^1 , se supone que el ingreso por tarifas aumentaría de M^0 a M^1 , lo que implica que el número de viajeros aumentará de T^0 a T^1 . El coste adicional incurrido por el operador (en términos de recursos utilizados para poder producir este aumento en la oferta), se refleja en el área bajo la curva de oferta entre los niveles de producción T^0 y T^1 , es decir la zona T^0T^1CA . Los ingresos del operador aumentarán en la cantidad indicada por el área M^0ABM^1 , para la cantidad original de 'servicio', más el área dentro del triángulo ABC , que a su vez corresponde a las ganancias (excedente del operador) obtenidas por el aumento en la oferta de servicios de T^0 a T^1 .

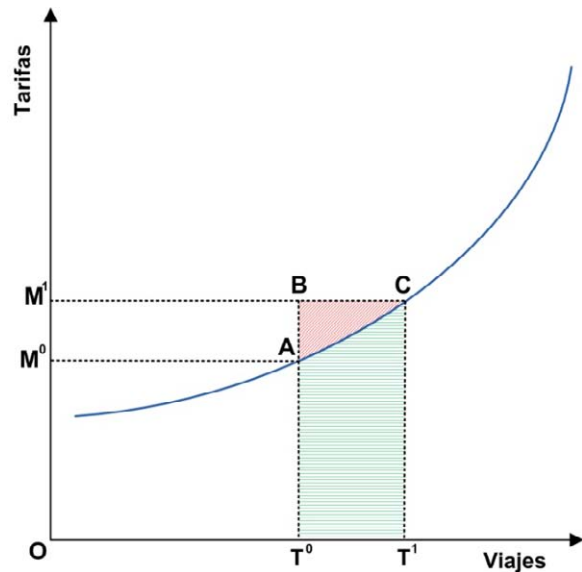


Figura 6.4 Excedente del Operador

Desde el punto de vista de la sociedad, este aumento en las ganancias, que se debe al aumento en el recaudo de la cantidad de servicios ofrecidos originalmente, no es un beneficio neto, ya que representa una transferencia de dinero entre consumidores y operadores. De esta manera, los beneficios de los operadores vienen dados por la ecuación (6.22).

Las formulaciones de los costes de operación del transporte público no están tan bien definidas como para el transporte privado y pueden variar de un estudio a otro (DETR, 2010c).

Por otro lado, se deberá tener cuidado en excluir de los costes asociados a los operadores, cualquier elemento relacionado con subsidios e inversiones, ya que éstos se deben tratar de forma separada. La frontera que divide a los operadores de las administraciones en algunas ocasiones es difusa y con seguridad esta relación varía según la ciudad que se mire. Además será cambiante con el tiempo: el grado de privatización sufrirá variaciones, así como los contratos entre el gobierno y los operadores de servicios de transporte. De esta manera, algunos ingresos y gastos de operadores pueden pasar a ser todo lo contrario para el gobierno, es decir, el gasto de un operador puede ser un beneficio para el gobierno. Estos costes también deben excluir el IVA que sea recuperable por parte del operador.

En la gran mayoría de los casos, los ingresos anuales de las empresas de transporte público provienen de las tarifas regulares. En otros casos por ejemplo, los ingresos vendrán dados por tarifas de aparcamiento y peajes urbanos.

Los gastos de los operadores también incluyen los costes de operación y mantenimiento del material rodante, los costes laborales, costes de combustibles y consumo de energía, seguros, etc. De esta manera, a continuación se describen los indicadores que son necesarios para el cálculo del beneficio de los operadores, que se han utilizado en el caso de aplicación.

- **Ingresos por peajes y otros cargos.** En este caso se supone que en el caso de existir un peaje urbano, éste será operado por privados y los ingresos de las tarifas irán a sus arcas. Incluye también coste de aparcamiento y otros cargos de este tipo.
- **Ingresos por tarifas.** En este ítem se incluyen todas las tarifas del transporte público (autobús urbano y regional, metro y cercanías).

Finalmente utilizando la ecuación (6.22), en la Figura 6.5 se muestra el modelo diseñado para calcular los beneficios de los operadores para el caso de estudio.

$$(M^{E_1} - M^{E_0}) = \sum_{ij} T_{ij}^{E_1} \cdot M_{ij}^{E_1} - T_{ij}^{E_0} \cdot M_{ij}^{E_0} \tag{6.22}$$

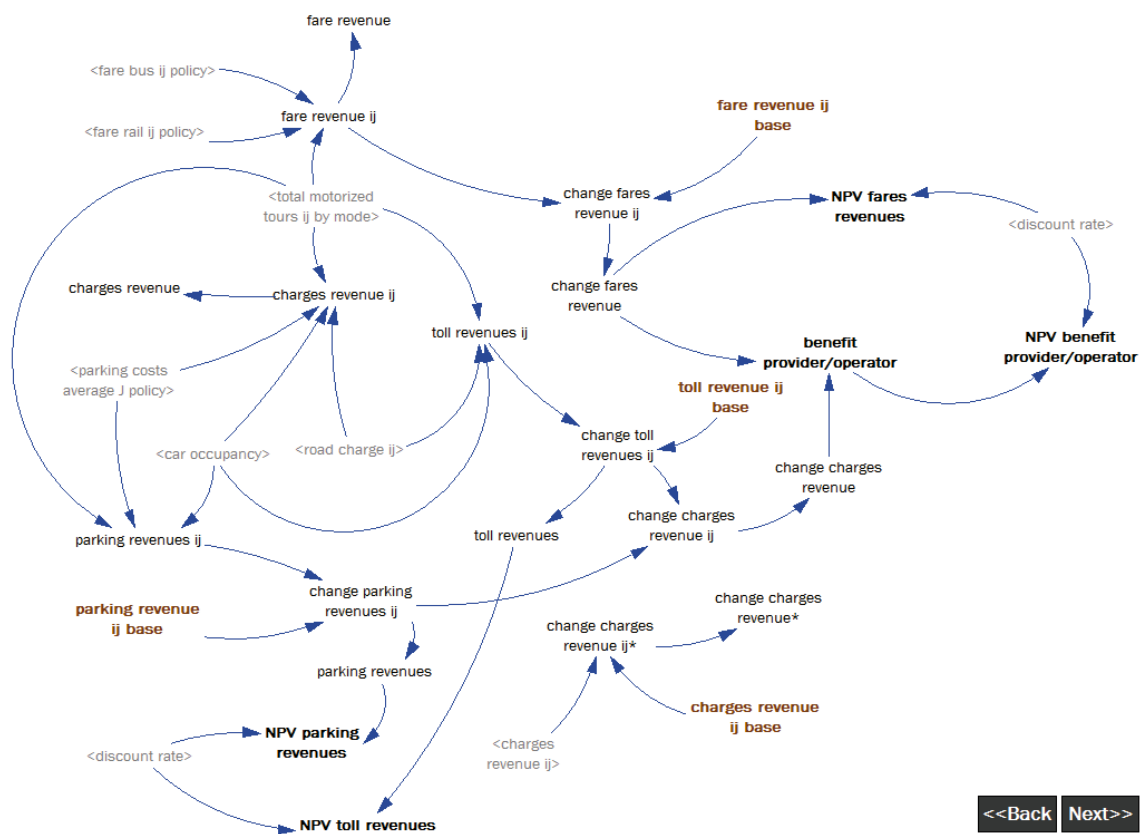


Figura 6.5 Cálculo del Beneficio de los Operadores

Fuente: Elaboración propia.

Costes de Operación

Los costes de operación del vehículo privado y explotación del transporte público se exponen a continuación.

Costes Operación Transporte Privado

En el transporte privado, el uso de la red de calles y carreteras da lugar a gastos de funcionamiento para el usuario. Estos costes incluyen reparaciones, lubricantes, repuestos, tasas y combustible. Este último coste se maneja por separado y los demás se tratan como un coste constante por kilómetro adaptado para la Comunidad de Madrid, que es el caso de estudio.

Una vez se tiene el consumo unitario de combustible por kilómetro recorrido, por medio de la ecuación (6.23) se calcula el consumo total de combustible por año y por tipo de carburante. Este consumo se puede obtener tanto en litros como en millones de euros para cada par ij .

$$\text{Coste Combustible}^c = \left[\left(\frac{T_{ij}^{MO} + T_{ij}^{MNO}}{F.O.} \right) \cdot l/km_{ij}^c \right] \cdot FV^c \cdot P^c \cdot d_{ij} \quad (6.23)$$

Donde,

- T_{ij}^{MO} = Viajes en coche, movilidad obligada [viajes/año]
- T_{ij}^{MNO} = Viajes en coche, movilidad no obligada [viajes/año]
- F^c = Composición de la flota vehicular según el tipo de combustible c
- P^c = Valor del litro de combustible según el tipo c
- d_{ij} = Distancia de recorrido de i a j [km]
- $F.O.$ = Factor de ocupación del coche (hora punta y valle)

En cuanto a los costes de operación que no incluyen combustibles, para el caso de estudio se hizo un cálculo de su valor estimado, incluyendo elementos como reparaciones, lubricantes, repuestos, tasas y otros (carné de conducir, alquiler, garajes, etc.). Ver Anexo 3.

Costes Operación Transporte Público

La hipótesis en este caso consiste en tratar la variación de los costes de operación del transporte público según la oferta. Bajo este supuesto, estos costes de operación (CT) están integrados por costes fijos (CF) y costes variables (CV). Los costes fijos se deben básicamente a los costes de personal. En cambio, los costes variables dependerán del mantenimiento del material móvil, del consumo de energía y de otros aspectos menos relevantes.

Así que los costes totales de operación se definen por medio de la ecuación (6.24):

$$CT = CF + CV \quad (6.24)$$

Estos costes de operación varían según se aumente o disminuya la oferta, ya que en el primer caso, tanto los costes fijos como los variables aumentarán, pero en el caso contrario, solo disminuirán los costes variables. Entonces, según el cambio en la oferta los costes de operación (CO) serán definidos por:

$$CO = p + CT$$

(6.25)

Entonces, si se define f como la variación de la oferta, se tiene:

$$Si \begin{cases} f < 0 \rightarrow p = f \cdot CV \\ f > 0 \rightarrow p = f \cdot CT \end{cases}$$

(6.26)

De esta manera, si la operación normal vale X €, y se decide aumentar la frecuencia de operación en $z\%$, los costes de operación serán de $z \cdot X + X$. Pero, si la estrategia contempla una reducción en las frecuencias, solo se tendrá en cuenta la parte de los costes variables de X , en la reducción total de los costes de operación.

Impuestos al Combustible

A continuación, se describe un proceso práctico para introducir impuestos y tasas en la función objetivo de un análisis coste-beneficio. Este proceso debe adaptarse según las normativas de cada zona.

En este caso, se tiene en cuenta el beneficio producido por el ingreso de los impuestos a los combustibles (IC), tal como se define en la ecuación (6.27).

$$IC = \left(\frac{T_{ij}}{F.O.} \cdot l/km_{ij}^c \right) \cdot I^c \cdot FV^c \cdot d_{ij}$$

(6.27)

Donde,

- T_{ij} = Viajes en coche [viajes/año]
- F^c = Composición de la flota vehicular según el tipo de combustible c
- I^c = Impuestos por litro de combustible según el tipo c [€/l]
- d_{ij} = Distancia de recorrido de i a j [km]
- $F.O.$ = Factor de ocupación del coche
- l/km_{ij} = Litros por kilómetro

Costes de Infraestructura y Mantenimiento

Este indicador mide los costes necesarios para aplicar una medida, cualquiera que sea: los costes de inversión para llevarla a cabo y para el periodo de vida útil, los costes de operación y mantenimiento. Estos costes se miden en millones de euros por año (M€). Dentro de los indicadores que se encuentran dentro de este grupo, se tiene:

- Inversiones en medidas de *pricing* (aparcamiento y peajes, entre otros).
- Inversiones en Infraestructura de transporte público y privado.
- Mantenimiento y operación de infraestructuras.

Los costes de inversión y gastos de operación dependen directamente de los programas de inversión. Estos costes deben convertirse a costes económicos descontando los impuestos, ya que este dinero es una transferencia entre los diversos actores de un proyecto. Esta conversión se debe realizar dividiendo los costes entre mano de obra, materiales y otros.

El valor de los costes de inversión de una política dada debe ser el valor actual neto (VAN) de la inversión, el cual se puede calcular según la ecuación (6.28).

$$CI = \sum_1^{30} \frac{c_i}{(1+r)^i} \quad (6.28)$$

Donde,

c_i = Costes económicos en el año i

r = Tasa de interés

i = Número de años

En cuanto al mantenimiento de las infraestructuras viales, para este caso se ha trabajado bajo el supuesto de un coste fijo por cada veh-km estimado del proyecto META (Monzón et al., 2009) para una carretera típica de 2+2 carriles. De esta manera, los costes por mantenimiento se calcularán teniendo en cuenta la variación de la demanda en coche (veh-km) y este coste asumido.

Externalidades

Para equiparar el transporte público y privado en cuanto a las externalidades, es necesario adecuar progresivamente el sistema de cobros y tarifas directas sobre la movilidad y el uso de las infraestructuras, de tal forma que regule los costes de producción y utilización de los sistemas y la accesibilidad ordenada al núcleo urbano disuada de hacer un uso poco racional del vehículo privado.

Cambio Climático (Emisiones de CO₂)

Este indicador expresa las emisiones de gases de efecto invernadero, en este caso CO₂, causadas por la combustión de los motores de vehículos a gasolina y diesel. Este indicador puede ser expresado en toneladas de CO₂ emitidas por año o su valor correspondiente (Bickel et al., 2005). En este caso, se ha medido este valor por kilómetro recorrido en todos los modos, para poder disponer de una medida de comparación.

En el caso español, según el protocolo de Kioto, el compromiso fue no sobrepasar el 15% de emisiones en 2004 respecto a 1990. Sin embargo, no existen objetivos específicos de emisiones de CO₂ para el sector transporte, aunque en el caso de la Comunidad de Madrid existe el Plan Azul (CM, 2007).

De esta manera, en los sectores difusos (donde el transporte se encuentra), las proyecciones dicen que para el año 2012 las emisiones aumentarán cerca del 65% con respecto a los niveles de 1990, mientras que en otros sectores (como energía e industria), las proyecciones hablan de un incremento del 37%. Los sectores difusos son responsables de aproximadamente el 46-49% de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el transporte, dentro de este sector, contribuyó con cerca del 42% de estas emisiones en 1990 y con 49% en 2004 (lo que implica un 24% del total de gases efecto invernadero en 2004 (Ministerio de la Presidencia, 2006).

Las emisiones de CO₂ producidas por la flota vehicular (turismos) se estimaron con base en una serie de encuestas a gran escala realizadas en el Reino Unido desde 1968 (DETR,

2007b). Estas mediciones han mostrado que las mayores emisiones [g/km] tienden a ocurrir a bajas velocidades, por ejemplo en congestión, o a altas velocidades, como en autopistas.

Las emisiones de carbono de los nuevos vehículos son influenciadas por las mejoras tecnológicas diseñadas para aumentar la eficiencia en el consumo energético. Para el cálculo de estas emisiones de vehículos privados, la ecuación (6.29) muestra la forma de estimarlas en función de la velocidad media de un vehículo desde un origen i hasta su destino j . Esta estimación da un valor en g/km, según la velocidad de recorrido (Samaras y Ntziachristos, 1998; DETR 2007b).

$$e^{CO_2}(t) = \left(a + b \cdot v(t) + c \cdot v(t)^2 + d \cdot v(t)^e + f \cdot \ln(v(t)) + g \cdot v(t)^3 + \frac{h}{v(t)} + \frac{i}{v(t)^2} + \frac{j}{v(t)^3} \right) \quad (6.29)$$

Donde,

e^{CO_2} = Tasa de emisiones [g/km]
 v = Velocidad media de los coches [km/h]
 a hasta x = Coeficientes

Posteriormente, con la ecuación (6.30) se obtienen las emisiones totales de CO₂ en un determinado año y según el tipo de movilidad.

$$E_{coche}^{CO_2}(t) = \left| 246 \left(\sum_{ij} e^{CO_2}(t) \cdot veh \cdot km_{ij} \right) \right|_{HWH} + \left| 365 \left(\sum_{ij} e^{CO_2}(t) \cdot veh \cdot km_{ij} \right) \right|_{HOH} \quad (6.30)$$

Donde,

$E_{coche}^{CO_2}$ = Emisiones de CO₂ del modo coche [t/año]
 $veh \cdot km$ = Vehículos-kilómetro entre i y j en el año t
 HWH y HOH se refiere a viajes de movilidad obligada (*commuting*) y no obligada, respectivamente

Por otro lado, para transporte público, las emisiones de CO₂ se calculan según la ecuación (6.31).

$$e^{CO_2}(t) = \left(a + b \cdot v(t) + c \cdot v(t)^2 + d \cdot v(t)^3 + \frac{e}{v(t)} + \frac{f}{v(t)^2} + \frac{g}{v(t)^3} \right) \cdot veh \cdot km \quad (6.31)$$

Donde,

e^{CO_2} = Emisiones de transporte público [t/año]
 v = Velocidad media del transporte público [km/h]
 $veh \cdot km$ = Vehículos kilómetro transporte público
 a hasta g = Coeficientes

La velocidad media de recorrido en transporte público, se calcula según se muestra en la ecuación (6.32).

$$v(t)^{TP} = 60 \sum_{ij} \frac{f_{ij}^{bus} \cdot d_{ij}^{bus}}{f_{ij}^{bus} \cdot IVT_{ij}^{bus}} \quad (6.32)$$

Donde,

- v^{TP} = Velocidad media transporte público [km/h]
- f_{ij} = Frecuencia transporte público desde i hasta j [min]
- d_{ij} = Distancia transporte público desde i hasta j [km]
- IVT_{ij} = Tiempo de recorrido en transporte público desde i hasta j [min]

Para estimar el coste de la tonelada de CO₂ emitida, se usó la información mostrada en la Tabla 6.5. Para efectos del caso de estudio, solo se usaron los valores medios.

Tabla 6.5 Valores Estimados CO₂ *

Año	Precio Bajo	Precio Medio	Precio Alto
2004-2009	14	22	51
2010-2019	16	26	63
2020-2029	20	32	81
2030-2039	26	40	103
2040-2049	36	55	131
2050	51	83	166

* Precios a 2004 [€/t]

Fuente: Bickel et al., (2005).

Polución del Aire

La emisión de otros contaminantes (sustancias acidificantes, partículas, etc.) por las actividades del transporte tiene importantes efectos sobre la calidad del aire y la salud, siendo más importante su efecto en el entorno urbano y metropolitano, donde la congestión y la propia estructura de las ciudades agravan esos efectos. Salvo una parte menor (evaporación de combustibles y pérdida de gases refrigerantes), estas emisiones provienen de la quema de combustibles fósiles de uso final. Dentro de esta categoría, se encuentran los óxidos de nitrógeno y el material particulado entre 2.5 y 10 µm.

La emisión de óxido de nitrógeno es causada por la combustión de vehículos que usan gasolina y diesel para su funcionamiento. Este tipo de gases reacciona con la humedad de la atmósfera para formar ácidos. La lluvia ácida puede provocar la acidificación de las aguas superficiales, los suelos y los ecosistemas. En las plantas causa una declinación en sus tasas de crecimiento debido a que afecta su capacidad para absorber los nutrientes del suelo, también las hace más propensas a las enfermedades, insectos, sequías y heladas. También afecta a los cuerpos de agua. Como resultado de esto, lagos y ríos pueden sufrir de acidez crónica, donde se presentan niveles constantes muy bajos de su pH.

En zonas urbanas, la lluvia ácida y la deposición seca de partículas ácidas, contribuyen a la corrosión de metales y al deterioro de estructuras de los edificios y coches. También aumentan sus costes de mantenimiento. La forma de estimar la cantidad de ácidos de nitrógeno emitidas por la combustión de los coches y del transporte público, se calcula igual que en el punto anterior, ecuación (6.31), pero con diferentes coeficientes.

En cuanto a las partículas, se conoce como PM₁₀ a pequeñas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento ó polen, dispersas en la atmósfera. Están

formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín). Se caracterizan por poseer un pH básico debido a la combustión no controlada de materiales.

Las fuentes de emisión de estas partículas pueden ser móviles ó estacionarias, destacando que cerca de un 80% de la cantidad total emitida de PM₁₀ procede del polvo suspendido existente en la atmósfera. La industria, la construcción y el comercio con un 7,6% y el transporte rodado con un 6,5% representan otros focos de contaminación de especial relevancia. Como fuentes minoritarias de contaminación es importante señalar que el 3,7% del total procede de quemas agrícola y un 3,3% es de origen doméstico (EPER-España, 2008).

Para estimar la cantidad de partículas emitidas, se calcula igual que en las emisiones de CO₂, aunque al igual que el NO_x, los coeficientes serán distintos. Y al igual que el punto anterior, estas emisiones se calcularán por kilómetro recorrido.

El coste por kilogramo de óxido de nitrógeno emitido usado como referencia en esta investigación es de 5.300 [€/t] (Bickel et al., 2005) y el coste por kilogramo de partículas emitidas es de 2.872,5 [€/t] (Bickel et al., 2005).

Accidentes

El sufrimiento personal de las víctimas de los accidentes graves de tráfico no puede nunca expresarse en términos económicos. Ninguna cantidad de dinero puede compensar la pérdida de un familiar cercano o una invalidez permanente. Sin embargo, es necesario calcular el impacto general que sobre la economía tienen los accidentes. Sin esta estimación no sería posible decidir sobre las inversiones públicas o privadas destinadas a reducir los accidentes de tráfico.

Hay dos razones fundamentales que justifican la necesidad de valorar económicamente los accidentes de circulación. En primer lugar resulta fundamental conocer el gran impacto de dichos accidentes en la economía para garantizar que su importancia quede también reconocida en las agendas políticas y en los presupuestos públicos destinados a su prevención. Cuando no se conoce el impacto de los accidentes en la economía, los gobiernos responsables carecen de referencias claras para determinar el nivel adecuado de gasto público dirigido a su prevención. En España mueren cada año en torno a las 4.800 personas en accidentes de tráfico y aproximadamente otras 20.000 más sufren heridas de gravedad (DGT, 2004).

En segundo lugar, y al margen del cálculo global de la accidentabilidad vial, también es preciso valorar económicamente el beneficio económico que supone la prevención de una víctima mortal, así como la prevención de lesionados de diferente gravedad. Ello permite poner en relación el coste y la efectividad de cada medida de seguridad vial con los beneficios derivados de la prevención de víctimas de accidentes. Aquellas medidas cuyos beneficios superen a sus costes, por ejemplo, deberán ser priorizadas con respecto a las que llevan asociados costes que superen a los beneficios. Gracias a este criterio de inversiones se consigue una mejor utilización de los fondos para la prevención de accidentes de tráfico y de víctimas (FITSA, 2002).

Para la sociedad, el coste de las medidas que buscan reducir la accidentabilidad, debe ser asumido por los presupuestos públicos y la inversión privada. A cambio de esto, se espera que las medidas produzcan como beneficio la disminución del número de accidentes y de personas muertas y heridas. De esta manera, según la ecuación (6.33) (Pfaffenbichler, 2003), se estiman el número de accidentes en coche, según los vehículos kilómetro recorridos.

$$Accidentes(t) = \sum_{ij} [a \cdot (b \cdot v_{ij}^2 + c \cdot v_{ij}^3)] \cdot veh \cdot km_{ij} \quad (6.33)$$

Donde,

- v_{ij} = Velocidad del coche de i a j en el año t en el periodo p [km/h]
- $vh \cdot km_{ij}$ = Vehículos kilómetro entre i y j en el año t en el periodo p [km]
- a, b, c = Constantes calibradas

Ahora, para tratar de estimar el coste medio, se supone que el coste de accidentes causados por el transporte público no es significativo. De esta manera, según la ecuación (6.34) se pueden calcular los costes por año de los accidentes causados por los vehículos privados.

$$Coste(t) = c_{acc} \sum_{ij} [a \cdot (b \cdot v_{ij}^2 + c \cdot v_{ij}^3)] \cdot veh \cdot km_{ij} \quad (6.34)$$

Donde,

- c_{acc} = Costes medio por accidente [€]
- v_{ij} = Velocidad del coche de i a j en el año t en el periodo p [km/h]
- $vh \cdot km_{ij}$ = Vehículos kilómetro entre i y j en el año t en el periodo p [km]
- a, b, c = Constantes

El indicador utilizado en este caso trabaja a un nivel agregado, el cual usa una tasa constante de accidentes por vehículos-kilómetro, así como un valor estimado medio por accidente.

En la Tabla 6.6 se muestran los valores económicos estimados para cada tipo de accidente, de donde se obtiene un valor medio por accidente.

Tabla 6.6 Valores Estimados de Accidentes*

Tipo Accidente	Valor Medio [€]
Muertos	1.193.686
Heridos Graves	147.755
Heridos Leves	11.171

* Precios a 2004

Fuente: Bickel et al., (2005).

Consumo de Suelo

Este indicador es un reflejo de la dispersión urbana y se entiende como la tendencia de una ciudad a extenderse más y más con el tiempo, lo que hace cada vez más difícil y costoso proveer estas nuevas zonas con los servicios y equipamientos urbanos necesarios. Este concepto de dispersión se relaciona directamente con el grado de desarrollo urbano excesivo (Irwin y Bockstael, 2007), el cual se caracteriza por ciudades muy extensas y poco densas, la localización dispersa de sus puestos de empleo y zonas y núcleos urbanos que no son lo suficientemente densos.

El fenómeno de la dispersión urbana creciente ha conducido en gran número de ciudades a un aumento de la movilidad en cuanto a las distancias medias recorridas (Massoth y Roy, 2004). La localización o relocalización de actividades residenciales y productivas en las áreas periféricas de las ciudades, es un hecho creciente y expansivo, que genera relaciones mucho más dispersas, fragmentadas y descentralizadas. En gran medida este cambio asociado a una dispersión de actividades, muchas veces asociadas a los desplazamientos al trabajo o de *commuting*, viene acompañado de un mayor uso del automóvil, creando en cierto modo, una dependencia sobre ese modo de transporte (Guzmán y de la Hoz, 2009).

El desarrollo de medidas que puedan controlar la expansión urbana es un gran desafío para las ciudades de hoy. Estrategias de contención urbana, la implementación de medidas que limiten el desarrollo urbano más allá de ciertos límites, son bien conocidos como herramientas válidas de planificación (Gennaio et al., 2009).

Estas medidas de contención urbana son necesarias, ya que el crecimiento de los espacios residenciales bajo estándares de baja densidad hace necesarios los complejos tipo ‘campus’ para alojar el resto de funciones urbanas tales como centros comerciales, empresariales, industriales y dotacionales, entre otros, así como la estructuras fragmentadas de espacios diferenciados (zonificación), que separa los usos, el trabajo, el estudio y la residencia, no sólo induce a un alargamiento de las distancias empleadas, sino que éstas irremediablemente han de ser realizadas en vehículo privado. De esta manera, por medio de este indicador se medirá cómo evoluciona la relación entre suelo urbano construido y sus habitantes.

Este indicador nos muestra el área de suelo que cada año está disponible para su construcción por habitante. En este caso se mide la evolución a lo largo del tiempo del área por uso del suelo (residencial, servicios e industrial) por año, con respecto al valor del año 0. La implementación de algunas políticas crean la necesidad de relocalizar población y puestos de empleo. Esto puede ocasionar edificios vacíos en unas zonas y una nueva demanda de residencias y parques empresariales en otras. En este caso, algunas políticas pueden necesitar de más espacio para construcción, consumiendo un valioso activo, como es el suelo y según el caso, dispersando la ciudad.

$$SR_{disponible} = \sum_i (C_{uso_i} - SC_{R_i} + SR_{R_i} \cdot A_i) / P \quad (6.35)$$

Donde,

C_{uso} = Suelo de cambio de uso a residencial en la zona i [m^2]
 SC_R = Suelo residencial empezado a construir en la zona i [m^2]
 SR_R = Suelo reutilizado para uso residencial en la zona i [m^2]
 A_i = Área total del suelo residencial desarrollable en la zona i [%]
 P = Población

Existen dos aspectos fundamentales desde los cuales se puede calcular el grado de dispersión urbana de una zona urbana (Mann, 2009): un punto de vista estático y otro dinámico. El primero consiste en conocer la razón por la cual algunos municipios tienen un uso mayor de suelo urbano por habitante. En cuanto al aspecto dinámico, la idea es saber por qué algunos de estos municipios gestionan su suelo urbano de tal manera que van densificando sus núcleos urbanos a lo largo del tiempo, mientras que en otros lugares se hace lo opuesto.

Una de las dificultades de responder estos cuestionamientos es obtener suficiente información en cuanto a calidad y cantidad: la información disponible debería cubrir espacios abiertos y cerrados, viviendas, zonas verdes, espacios para la infraestructura, entre otros.

Accesibilidad

Este concepto se conoce desde hace muchos años. Ya desde el siglo pasado, algunos autores (Stewart, 1947; Stewart, 1948) han aplicado el concepto de accesibilidad por primera vez en un estudio de distribución de población. Hansen (1959) fue el primer autor en usar el concepto de potencial para describir la accesibilidad a puestos de empleos (oportunidades), definiendo la accesibilidad como ‘el potencial de las oportunidades para la interacción’. Una descripción general de la accesibilidad viene dada por la ecuación (6.36). Formulaciones alternativas a esta medida pueden verse en (Geurs y Ritsema van Eck, 2001).

$$A_i = \sum_j D_j \cdot f(t_{ij}, c_{ij}) \tag{6.36}$$

Donde,

- D_j = Oportunidades en la zona j
- t_{ij} = Tiempo de viaje de i a j
- c_{ij} = Coste de viaje de i a j
- f = Función de impedancia

Este tipo de indicador supera algunas de las deficiencias teóricas de las medidas de contorno (Geurs y van Wee, 2004): este indicador evalúa el efecto combinado de los elementos de transporte y usos del suelo y además incorpora hipótesis sobre las percepciones personales del transporte utilizando una función que disminuya con la distancia o el tiempo.

Además este indicador tiene la ventaja de ser fácilmente calculado utilizando información de usos del suelo y transporte y/o modelos. La desventaja de esta clase de indicadores está relacionada con una interpretación más difícil, ya que no es fácil de entender y comunicar debido a que combina elementos de transporte y usos del suelo, así como que pondera las oportunidades según la función de impedancia.

La pregunta general es hasta qué punto las formas alternativas de desarrollo suburbano crean diferencias en los patrones de viaje. La cuestión práctica es si esta forma suburbana puede modelizarse para reducir el uso del coche y así mitigar los problemas asociados a su uso (Handy, 1994). Así, el concepto de accesibilidad constituye una importante herramienta para resolver estas cuestiones, las cuales exigen una visión más completa.

El método de cálculo utilizado para estimar el nivel de accesibilidad en este caso, tiene dos objetivos. El primero de ellos es mantener el análisis tan simple y directo como sea posible y el segundo, es utilizar la información suministrada por el modelo. Así, para calcular este indicador se ha utilizado una forma exponencial del modelo gravitacional. Este método es probablemente el más aceptado para medir el nivel de accesibilidad a un nivel agregado (Handy, 1994), teniendo fuertes bases metodológicas (Koenig, 1980).

Finalmente, para propósitos de esta investigación, la accesibilidad se ha definido respecto al tipo de actividad y a la localización de dicha actividad. Esta actividad consiste en los puestos de empleo del sector de servicios.

$$A_i = \sum_j D_j \cdot [0.16 \cdot \exp(-0.0163 \cdot f_{ij})] \quad (6.37)$$

Donde,

f_{ij} = Función de costes medios debido al viaje de i a j en todos los modos motorizados que incluye tiempo y dinero [€/viaje]

Después de calcular la accesibilidad para cada una de las zonas, se normalizaron dichos valores dividiendo el valor de accesibilidad de cada zona por el valor medio, ponderado por la población, para la totalidad del área de estudio en su conjunto. Estos valores normalizados permiten conocer las diferencias relativas entre zonas, más que los valores absolutos, los cuales en gran medida carecen de sentido. Todos los resultados obtenidos se presentan en forma de niveles de accesibilidad relativos.

Distribución Equitativa de Costes de Transporte

La desigualdad en lo referente a la distribución de los ingresos es una variable importante al momento de definir el bienestar de una sociedad. En este caso, el indicador evalúa el impacto de los costes de transporte por hogar y por zona respecto a su nivel de ingresos. De esta manera, se obtendrá una medida que mida la proporción de dinero que un hogar de una determinada zona debe destinar de su presupuesto familiar a cubrir sus costes de desplazamiento.

El indicador se expresa utilizando el concepto del coeficiente de Gini, el cual es un número entre 0 y 1, en donde 0 se corresponde con la igualdad perfecta, es decir, toda la población tiene el mismo nivel de ingresos y 1, que se corresponde con la perfecta desigualdad, o sea que una persona tiene todos los ingresos. Un exceso de concentración de la riqueza va en contra del desarrollo e integración social y económica de una región. Sin embargo, es claro que existen zonas con diferencias de ingresos y niveles socioeconómicos, aunque es difícil sostener cuando este nivel es demasiado.

La curva de Lorenz (Figura 6.6) es una forma gráfica de mostrar la distribución de la renta en una población. En ella se relacionan los porcentajes acumulados de población con porcentajes acumulados de la renta que esta población recibe. En el eje de abscisas se representa la población ordenada de forma que los percentiles de renta más baja quedan a la izquierda y los de renta más alta quedan a la derecha.

A manera ilustrativa, en la Figura 6.6 (derecha) se muestra como ejemplo la representación de dos países imaginarios, País 1 (en azul) y el País 2 (verde). La distribución de la renta en el país 1 es más desigual que en el país 2. En el caso del país 1, el 40% más pobre de la población recibe una renta inferior al 20% del total del país. En cambio, en el país 2, el 40% más pobre recibe más del 20% de la renta. La línea recta diagonal muestra la situación de un país en el que todos y cada uno de los individuos obtuviese exactamente la misma renta; sería la equidad absoluta. Cuanto más próxima esté la curva de Lorenz de la diagonal, más equitativa será la distribución de la renta de ese país.

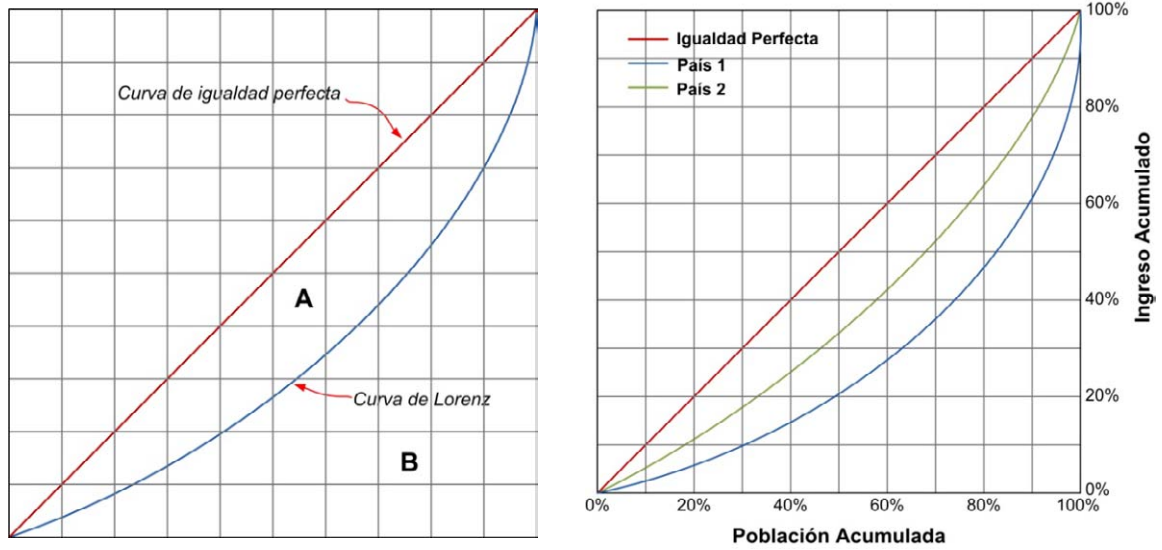


Figura 6.6 Estimación del Coeficiente de Gini

En el trabajo empírico es habitual que el cálculo de los índices de desigualdad se efectúe a partir de las observaciones agrupadas, debido a que no resulta práctico comparar conjuntos de datos que pueden llegar a tener tamaños muy distintos. En ese sentido, lo común es que se decida agrupar las observaciones en conjuntos más pequeños pero de igual tamaño, de modo que se faciliten tanto los cálculos como las comparaciones entre grupos.

Según esto, el procedimiento que se utiliza para el cálculo este indicador bajo el concepto del índice de Gini para datos agrupados es el siguiente (Medina, 2001):

- Ordenar los hogares en forma ascendente conforme a su relación ingreso/costes de transporte urbano.
- Definir intervalos de igual tamaño (por ejemplo, deciles de hogares).
- Construir la distribución de frecuencias relativas, simple y acumulada, de la variable a distribuir (ingreso/costes de transporte), así como de la población que se desea estudiar. Si se opta por la formación de deciles de hogares, cada grupo deberá concentrar el 10%, por ejemplo, de las observaciones.
- Calcular este indicador conforme a alguna de las muchas expresiones que existen para el caso en que se trabaja con datos agrupados, como por ejemplo la ecuación (6.3), la cual es conocida como la fórmula de Brown (Brown, 1994).

$$G = \left[1 - \sum_{i=1}^n (P_{i+1} - P_i) \cdot (I_i + I_{i+1}) \right] \tag{6.38}$$

Donde,

- P_i = Proporción acumulada de población en el grupo i
- I_i = Ingreso/costes de transporte acumulado en el grupo i
- n = Número de grupos

En el trabajo empírico existe un debate sobre cuál es la variable que se considera más apropiada para evaluar la concentración del ingreso en una sociedad. De hecho, la principal controversia surge al momento de elegir entre el ingreso total del hogar o el ingreso per cápita. En esta discusión, es válido decir que las dos variables podrían ser utilizadas, dependiendo de los objetivos de la investigación que se quiera llevar a cabo.

En ciertos casos puede justificarse el uso del ingreso total familiar (hogar), por el hecho de que se considera que es el hogar la unidad de consumo en la cual se concentran las percepciones de ingreso de sus miembros y se decide sobre el destino de los recursos. De esta manera, dentro del hogar es donde se comparten todos los bienes y servicios colectivos que son adquiridos con el presupuesto familiar, y el contexto que sirve para que sus miembros se formen y desarrollen para el proceso productivo.

Ahorros de Tiempo

La congestión, de forma general se entiende como la condición en que existen muchos vehículos circulando por una misma vía y cada uno de ellos avanza lenta e irregularmente. Algunos autores definen la congestión como “la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta la demora de los demás en más de x%” (Thomson y Bull, 2002).

La causa fundamental de la congestión es la interacción entre los vehículos en el flujo de circulación. Hasta un cierto nivel de flujo, los vehículos pueden circular a una velocidad cercana a la velocidad a flujo libre, determinada por los límites de velocidad y la frecuencia de las intersecciones, entre otros elementos. Sin embargo, a intensidades mayores, cada vehículo adicional estorba el desplazamiento de los demás, es decir, comienza el fenómeno de la congestión.

De esta forma, a mayor congestión, mayor será el tiempo empleado en viajar. Así, este indicador reflejará el cambio en el tiempo total de viaje empleado en los modos motorizados, según el escenario analizado, con respecto al año base.

Costes de Operación

Diferentes usuarios se enfrentan a diferentes costes de viaje, según sea el modo escogido, siendo la respuesta de éstos (su mayor o menor número de viajes) a estas variaciones de los precios implícitos la base para poder estimar la curva de demanda.

Este valor de cada viaje tendrá consecuencias directas a la hora de la toma de decisión por parte del usuario acerca de si viaja o no. Sin embargo, generalmente los costes de operación de un coche no son tenidos en cuenta por el usuario a la hora de tomar la decisión de viajar. La disminución de estos costes tendrá repercusiones positivas sobre el medio ambiente (utilización de menos combustible) y la estructura urbana (menores distancias recorridas).

Así, este indicador mide el cambio en los costes de operación del vehículo privado, en diferentes escenarios, con respecto al año base. En cuanto al transporte público, los costes de operación se miden con respecto a un escenario base.

Cambio Modal

Una ciudad, al disponer de un sistema de transporte público eficiente, con calidad y rápido, puede alcanzar una alta participación en el reparto modal y ser competitiva frente al coche. En este contexto, la regularidad y velocidad de los servicios públicos y las restricciones y dificultades al uso del automóvil (por ejemplo aparcamientos de pago, costes por congestión, entre otros) son factores que incentivan el uso del transporte colectivo frente al privado.

Al darse esta situación y cuando el tiempo de viaje en coche no es mucho menor al del transporte público éste es elegido mayoritariamente, y viceversa.

Por lo tanto, se puede decir que el transporte público es una alternativa competitiva en las relaciones con los centros urbanos (estructura monocéntrica radial), pero no lo es tanto en las relaciones tangenciales o transversales, donde pierde competitividad y tiene menos oferta. Justo en estas zonas es donde la movilidad ha sufrido un mayor incremento soportada principalmente por el uso del vehículo privado. Este hecho provoca una mayor complejidad de las redes de flujos de viajeros, en las que el vehículo privado es el modo dominante, lo que reduce la cuota del transporte público y aumenta las distancias medias diarias de desplazamiento. En definitiva, un escenario claramente alejado del óptimo, tanto en términos económicos como de sostenibilidad.

Así que este indicador, reflejará la situación de un sistema de transporte orientado hacia la sostenibilidad, o por el contrario, altamente dependiente del coche.

CAPÍTULO 7.

VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA. CASO DE ESTUDIO DE LA COMUNIDAD DE MADRID

TABLA DE CONTENIDO

7.1 INTRODUCCIÓN	167
7.2 DISEÑO DE ESCENARIOS	167
7.2.1 HORIZONTES TEMPORALES	168
7.2.2 HIPÓTESIS DE EVALUACIÓN	168
7.2.3 CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	168
<i>Configuración Regional</i>	168
<i>La Movilidad y el Sistema de Transporte</i>	171
7.2.4 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES EXÓGENAS.....	174
7.2.5 DISEÑO DE LA MEDIDAS A OPTIMIZAR	177
7.2.6 APLICACIÓN DE MEDIDAS EN EL MODELO	178
<i>Tarifas de Congestión Urbana</i>	179
<i>Tarifas Aparcamiento</i>	180
<i>Oferta de Transporte Público</i>	181
7.2.7 ESCENARIOS A OPTIMIZAR	181
7.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	182
7.3.1 ESCENARIO BASE	182
7.3.2 EVALUACIÓN COSTE-BENEFICIO	185
<i>La Función Objetivo CBA</i>	185
<i>Resultados Óptimos Coste-Beneficio</i>	187
<i>Comparación de Escenarios CBA</i>	188
<i>Resumen y Análisis de la Evaluación Coste-Beneficio</i>	192
7.3.3 EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	194
<i>La Función Objetivo MCA</i>	194
<i>Resultados Óptimos Multicriterio</i>	197
<i>Comparación de Escenarios MCA</i>	198
<i>Resumen y Análisis de la Evaluación Multicriterio</i>	203
7.3.4 ANÁLISIS DE SINERGIAS	204
7.3.5 EFICIENCIA RELATIVA DEL SISTEMA	206
7.3.6 DISTRIBUCIÓN DE BENEFICIOS	209
7.3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	212
7.4 RESUMEN Y DISCUSIÓN.....	217
7.4.1 SIMULACIÓN DEL MODELO.....	219
7.4.2 LIMITACIONES DE LA METODOLOGÍA	219

7.1 INTRODUCCIÓN

Para la validar la metodología desarrollada, se ha definido un caso de estudio en la Comunidad de Madrid, teniendo como año de inicio el año 2004. Las pruebas de optimización y evaluación de las medidas escogidas se han realizado utilizando el algoritmo de optimización y el modelo MARS descritos en los Capítulos 4 y 5, respectivamente. El propósito de este capítulo es **evaluar** la contribución de las medidas aplicadas al logro de los objetivos y **validar** la metodología de optimización en cuanto a su potencial de poder analizar y comparar los efectos de distintas políticas de transporte en el largo plazo, así como sus posibles sinergias.

Los resultados aquí mostrados representan una visión **estratégica y tendencial** de los impactos ambientales, sociales y de movilidad sobre el área de estudio a largo plazo. Los valores obtenidos como resultados óptimos son indicativos y solamente hacen parte de un ejercicio teórico y académico.

Las medidas seleccionadas se implementarán sobre la base de las tendencias de desarrollo actualmente proyectadas en el marco territorial de la Comunidad de Madrid (Plan Azul (CM, 2007)). Más allá de las medidas planteadas, es interesante evaluar desde el punto de vista teórico los efectos potenciales que ciertas medidas pueden tener sobre los niveles de sostenibilidad en una zona urbana.

En consecuencia, este capítulo se ha organizado de la siguiente manera: en primer lugar se presenta el diseño de los escenarios a optimizar, con sus correspondientes medidas, hipótesis, caracterización de la zona de estudio, escenarios externos y periodos de aplicación (§7.2).

En la sección 7.3 se muestran los principales resultados obtenidos de la aplicación de la metodología. Se hace una descripción de las funciones objetivo aplicadas según el tipo de evaluación empleada: coste-beneficio (CBA) o multicriterio (MCA). En el apartado 7.3.1 se muestra la descripción del escenario base. En los apartados 7.3.2 y 7.3.3 se describen los resultados óptimos obtenidos para cada tipo de evaluación.

Posteriormente, se analiza la presencia de los efectos de las sinergias, así como sus posibles combinaciones y complementariedades (§7.3.4). Un enfoque alternativo de análisis se presenta en la sección 7.3.5, el cual consiste en medir y comparar la eficiencia de los escenarios donde se obtienen recursos adicionales. Esta 'eficiencia' se mide en forma de beneficios netos según el nivel medio de costes e ingresos de los usuarios. En la sección 7.3.7, se presenta un análisis de sensibilidad de las variables consideradas como decisorias dentro del análisis, además de los rangos de factibilidad de los valores de las medidas aplicadas. Finalmente, se dispone de un apartado (§7.4) donde se hace un resumen de los resultados obtenidos y de las bondades y limitantes de la metodología desarrollada.

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos del proceso de optimización. Esto con el fin de destacar la funcionalidad y el potencial de la metodología. Resultados adicionales y complementarios se pueden consultar en el Anexo 5.

7.2 DISEÑO DE ESCENARIOS

La definición de los escenarios a optimizar pasa por:

- Definición de diferentes horizontes temporales de evaluación

- Hipótesis de evaluación
- Caracterización del área de estudio
- Definición de las variables exógenas y su proyección futura
- Diseño y aplicación de las medidas a optimizar

7.2.1 Horizontes Temporales

Para la optimización de las diferentes medidas, se ha definido un periodo común para todas ellas. El año de referencia (año base) será el año 2004 y el año horizonte (fin de la evaluación), el 2034. Los horizontes temporales se han planteado de la siguiente forma:

- Año 2004: año base y de calibración. Se ha escogido este año debido a la disponibilidad de información referente a la movilidad de la Comunidad de Madrid gracias a la encuesta domiciliaria de movilidad EDM'04 realizada en ese año (CRTM, 2004).
- Año 2007: inicio de la implantación de las estrategias.
- Año 2034: año final.

7.2.2 Hipótesis de Evaluación

La comparación de los resultados entre los diferentes escenarios, tanto en demanda de viajes, velocidad de recorrido y otros indicadores, así como los valores de las funciones objetivo, serán al final del periodo de evaluación (2034) y serán separados por tipo de evaluación: CBA y MCA. Para el caso del módulo de evaluación coste-beneficio, se han estimado los valores actuales netos (VAN) de los indicadores seleccionados y la función objetivo. En el caso de la evaluación multicriterio, se tuvieron en cuenta los valores obtenidos para el año horizonte en cada escenario, según su variación con respecto al año base.

En la evaluación CBA, los flujos de costes y beneficios se han tratado durante todo el periodo de evaluación como precios constantes del año base, sin tener en cuenta la inflación.

7.2.3 Caracterización General del Área de Estudio

En este apartado se describirán las principales características territoriales, socioeconómicas y de movilidad de la Comunidad de Madrid.

Configuración Regional

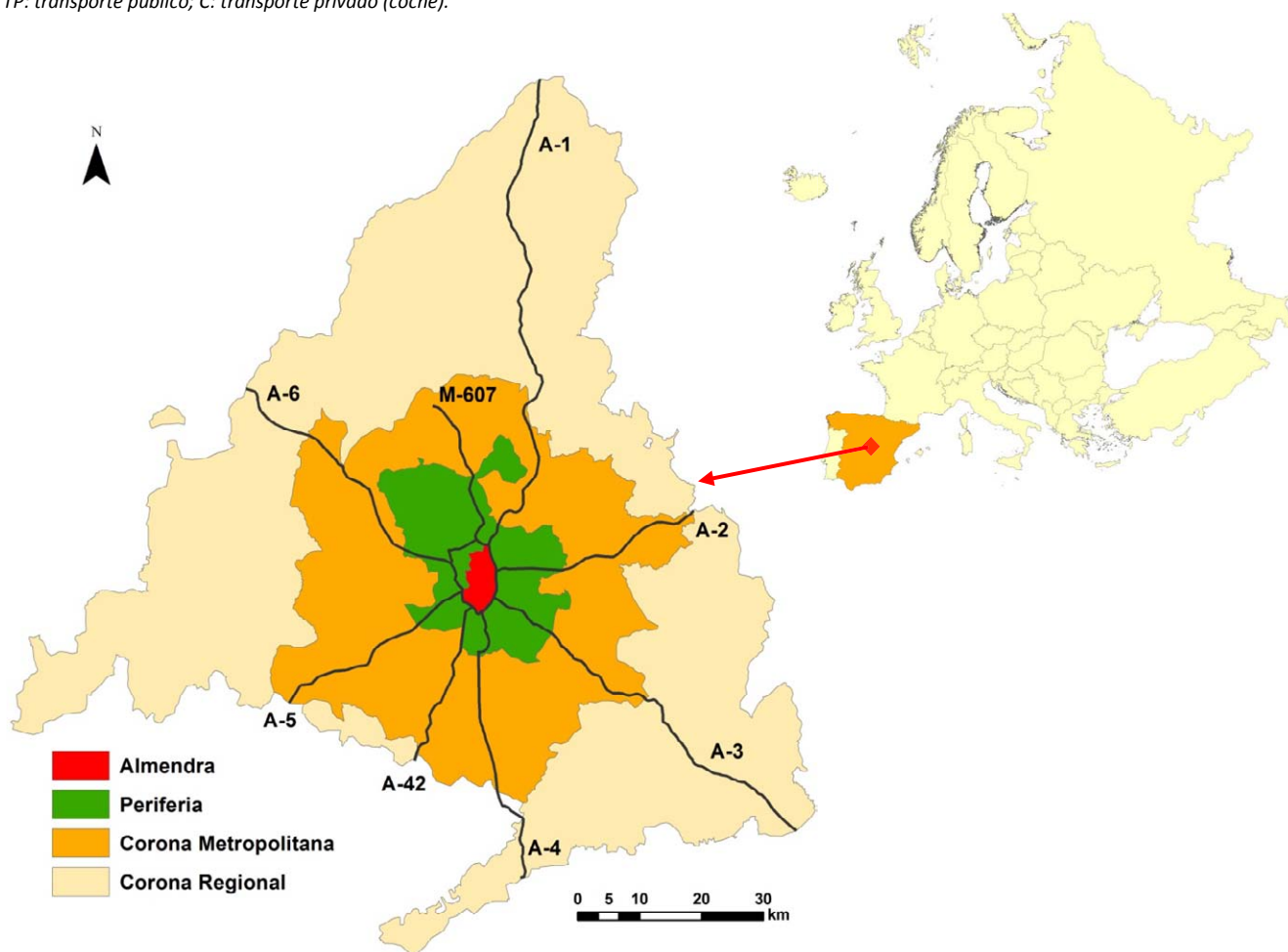
La configuración regional de la Comunidad de Madrid se puede ver en la Figura 7.1. Adicionalmente, en la Tabla 7.1 se muestra un resumen general de las principales características de las coronas (anillos) que conforman la zona de estudio en el año base del estudio. En el Anexo 4, se realiza una descripción detallada de la región de estudio, teniendo en cuenta las características socioeconómicas de la población, los patrones generales de movilidad y los usos del suelo.

Tabla 7.1 Características de la Zona de Estudio

	<i>Zona Peaje</i>		<i>Resto del Área Modelada</i>		<i>Área Modelada</i>
	<i>Almendra</i>	<i>Periferia</i>	<i>C. Metropolitana</i>	<i>C. Regional</i>	<i>Total</i>
Población	1,019,545	2,142,759	1,992,333	712,662	5,867,299
Puestos de Empleo	877,695	563,833	587,450	186,826	2,215,804
Superficie [m ²]	41.8	565.2	2,272.6	5,151.7	8,031.3
Distribución Modal (TP/C) [%]	71/29	55/45	31/69	13/87	55/45
Coches/1.000 habitantes	450	379	525	506	510

Año base: 2004

TP: transporte público; C: transporte privado (coche).


Figura 7.1 La Comunidad de Madrid

Desde el punto de vista espacial, históricamente los desplazamientos realizados diariamente en el ámbito metropolitano de Madrid tenían una alta componente gravitatoria, es decir hacia el centro de la ciudad. Tomando como referencia las encuestas domiciliarias de 1996 (CRTM, 1996) y 2004 (CRTM, 2004), se puede apreciar que (Guzmán y de la Hoz, 2009):

- Los viajes interiores al municipio de Madrid pierden peso en el conjunto global: del 57.1% al 48.6% entre 1996 y 2004, respectivamente.

- Los viajes radiales corona metropolitana-almendra y corona metropolitana-periferia urbana crecen, pero en menor medida que el resto. Esto representa un ligero retroceso en términos relativos.
- Finalmente, los viajes con origen o destino fuera del municipio de Madrid son los que más crecen. En especial, crecen los viajes internos a la corona metropolitana, al pasar de un 17.2% a un 23.4%.

Esta situación pone de manifiesto un cambio significativo en el período 1996-2004; la Corona Metropolitana ha crecido en importancia, como fruto del proceso de dispersión de actividades. Esto tiene importantes efectos sobre el reparto modal y la eficiencia del sistema, dado que los mayores crecimientos se producen precisamente en aquellas relaciones en las que el coche es el modo dominante (ver Figura 4.6 en el Anexo 4).

Esta nueva periferia metropolitana de Madrid se caracteriza por densidades residenciales bajas o medias asociadas a desarrollos de viviendas en edificaciones unifamiliares o en complejos residenciales de poca altura con equipamientos intersticiales (zonas ajardinadas, piscinas, pistas deportivas), y además por la existencia de nuevas centralidades. Áreas residenciales y piezas funcionales se sitúan de forma discontinua, dejando espacios intersticiales entre sí, de lo que resulta un paisaje fragmentado y disperso. Esta situación, combinada con el constante proceso de crecimiento de la población, hace que el peso relativo del Municipio de Madrid respecto a las coronas metropolitana y regional vaya decreciendo.

Hoy el área metropolitana de Madrid constituye un espacio extenso que no tiene límites claros, en el que la periferia metropolitana tiene un peso creciente frente al municipio central: si la población del municipio de Madrid se multiplicó por 1.9 en la segunda mitad del siglo pasado, la de la corona metropolitana lo hizo por 26.1; por esta razón, el tamaño y forma de la ciudad parece ser un factor importante para la generación de viajes, tal como se muestra en la Figura 7.2, donde la población en el Municipio de Madrid crece a lo largo de los años, pero su proporción respecto al resto de la Comunidad muestra un descenso constante.

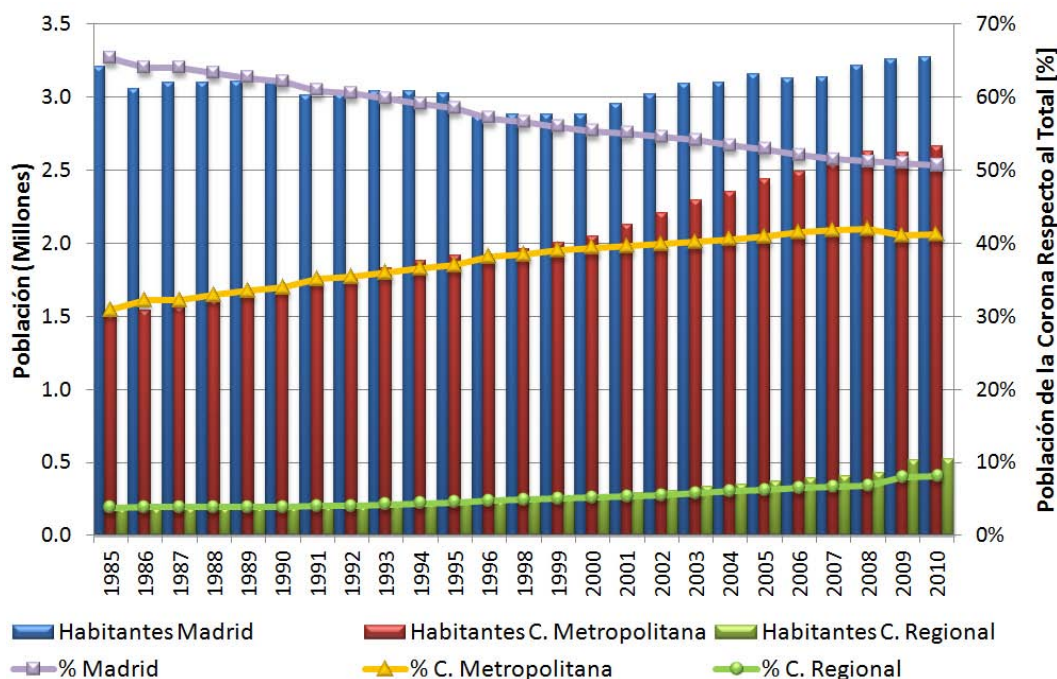


Figura 7.2 Evolución de la Población en la Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

A lo largo de los últimos años se ha registrado en Madrid un intenso y progresivo proceso de expansión y reestructuración territorial, con la dominante de la 'periferización', ya sea en forma de urbanización periférica (en los años sesenta y setenta) o suburbanización y periurbanización (en los últimos decenios). En estos cincuenta años Madrid ha pasado de ciudad nuclear a metrópoli monocéntrica y posteriormente a región metropolitana (Guzmán y de la Hoz, 2009). Unas de esas transformaciones es el acelerado crecimiento de la población, lo que combinado con la poca disponibilidad de espacio en el centro y su alta valorización, hace que la ciudad experimente una reorganización de su estructura urbana.

En la Figura 7.3 se puede ver la evolución de la estructura urbana de la Comunidad, donde se muestra el crecimiento experimentado por la población y el suelo urbano desde 1992. Se puede apreciar como el suelo destinado a uso urbano ha crecido mucho más que la población. El resultado ha sido un descenso de la densidad media que unido a la dispersión de población conduce a escenarios territoriales difusos.

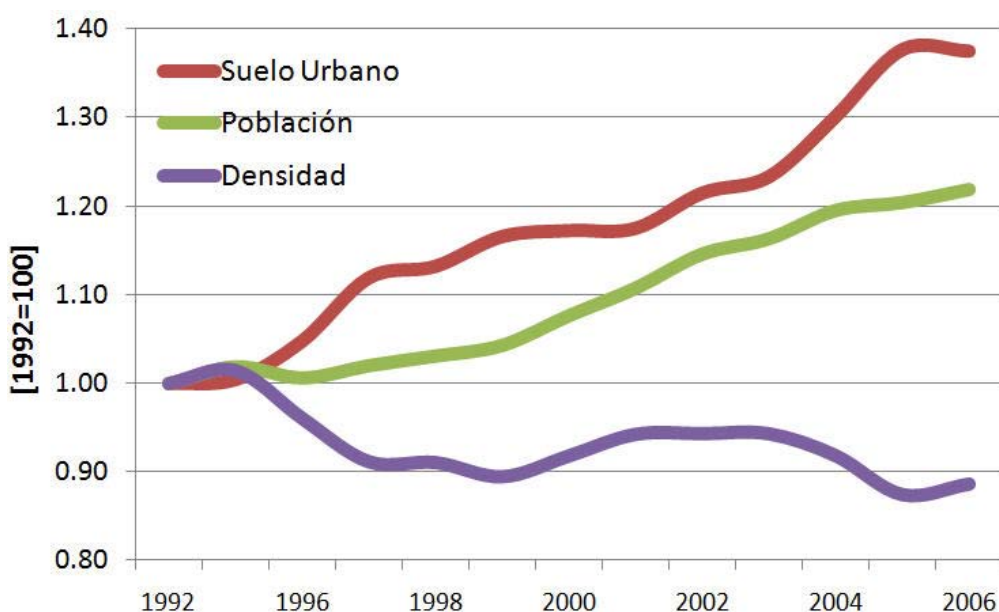


Figura 7.3 Evolución del Suelo, Población y Densidad (1992-2006)

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

La Movilidad y el Sistema de Transporte

La demanda de movilidad en la Comunidad de Madrid crece de forma continua. El número de desplazamientos en día laborable, según la última encuesta disponible de movilidad de Madrid de 2004 alcanza los 14.5 millones de viajes, lo que representa un incremento de un 38.6% con respecto a la anterior encuesta de 1996.

En cuanto al reparto modal, entre 1996 y 2004, se ha producido una pérdida global de cuota del transporte público, favoreciendo el transporte privado. La distribución modal de la movilidad en términos de reparto público-privado ofrece una clara pauta de variación espacial, según la cual la importancia del transporte público crece claramente en las zonas centrales y la del vehículo privado en la periferia.

Progresivamente los patrones de viaje gravitatorios han ido cambiando hacia una mayor relevancia de los movimientos transversales en la periferia, frente a los movimientos típicos del modelo monocéntrico periferia-centro y centro-centro. Como se puede observar en la

Figura 7.4, los viajes desde la periferia (clasificada por corredores) hacia el centro, han disminuido de una manera importante, a excepción del corredor de la A-4, debido probablemente a que esta zona no está lo suficientemente consolidada. También se observa como los viajes internos a cada corredor son los que mayor participación tienen dentro de viajes originados en cada sector (cerca del 50% o más).

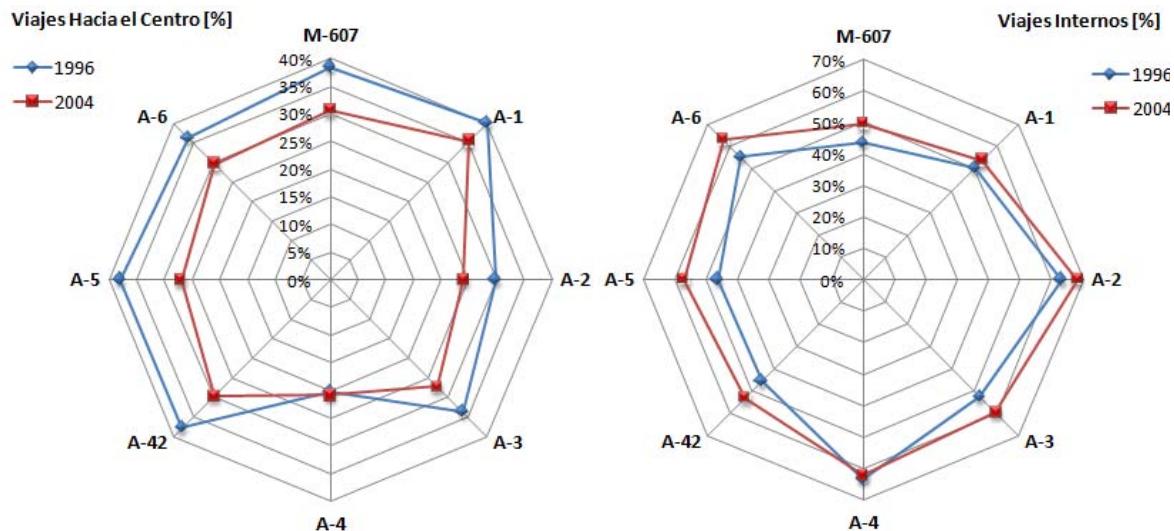


Figura 7.4 Viajes al Centro y Viajes Internos en la Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

Los datos de la Figura 7.4, muestran cómo el centro de Madrid ha venido perdiendo protagonismo en los últimos años, dando prioridades a múltiples núcleos atractores dentro de varios sectores de la periferia.

En la Figura 7.5 se muestra la configuración de la red principal de transporte de la Comunidad de Madrid para el año 2004, con excepción de las líneas de autobuses. Además de la infraestructura existente, se señalan las zonas de la región que tienen un mayor acceso al transporte público, ya sea por los servicios de autobuses, líneas de metro, o la red de Cercanías.

El sistema de transporte de la Comunidad de Madrid está basado en un fuerte relación entre la periferia y el centro, enlazando las regiones externas con la ciudad de Madrid por medio de autovías de altas especificaciones y una red de trenes de Cercanías que cubre las zonas más pobladas de la región, complementada por una flota de autobuses interurbanos. En cuanto a la red de metro, ésta se ha diseñado para viajes más cortos y en un entorno netamente urbano. Según el Consorcio de Transportes de Madrid, el sistema de transporte público ha sido utilizado por 1,528.6 millones de viajeros en el año 2009, lo que representa una disminución del 4.4 por ciento respecto al 2008. Según ellos, este descenso se debe a las consecuencias del descenso de la actividad general, como efectos directos del crecimiento de las tasas de desempleo debido a la crisis económica.

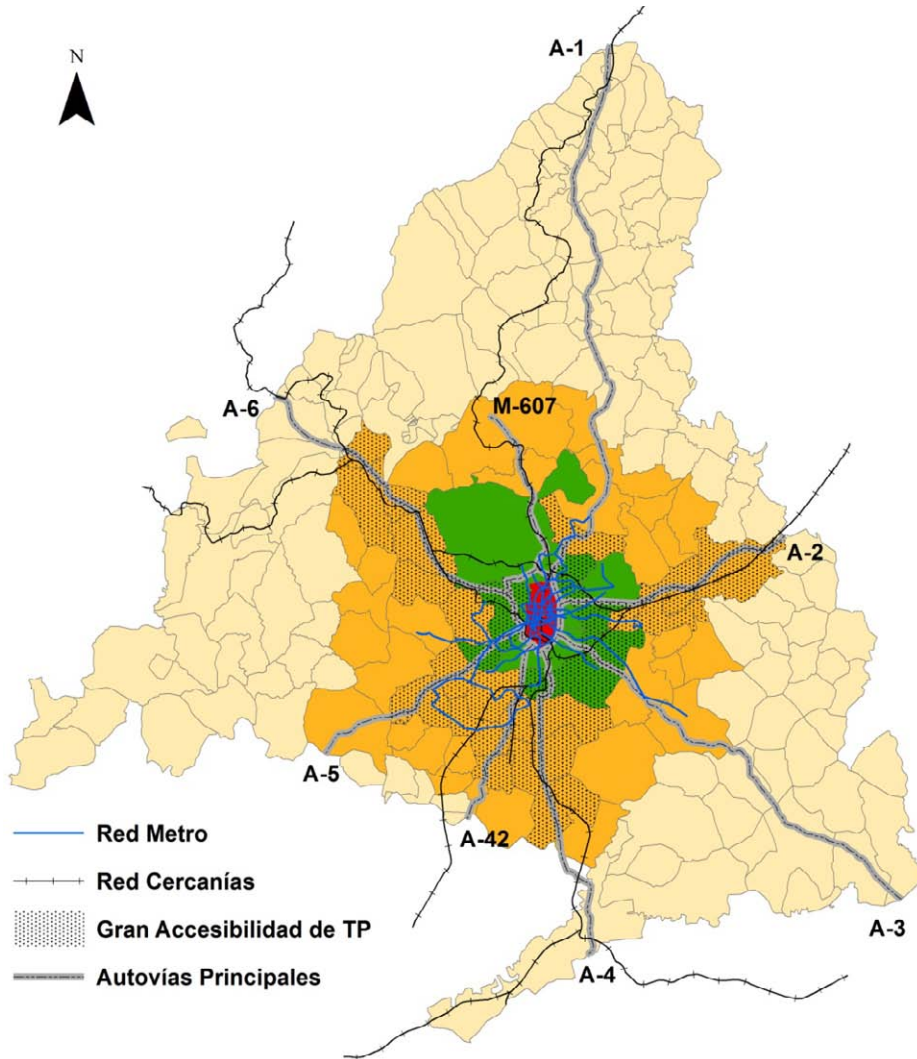


Figura 7.5 Infraestructura de la Región

Por otro lado, los datos movilidad necesarios para la alimentación del modelo MARS fueron obtenidos a partir de un modelo de asignación (VISUM) de la Comunidad de Madrid para el año 2004. De este modelo de red, se obtuvieron y agregaron los datos relacionados con distancias, tiempos de recorrido y tiempos de transbordo y espera para los diferentes modos de transporte simulados: coche y transporte público (autobuses y modos ferroviarios), en función del nivel de saturación. La red vial VISUM de Madrid utilizada se muestra en la Figura 7.6.

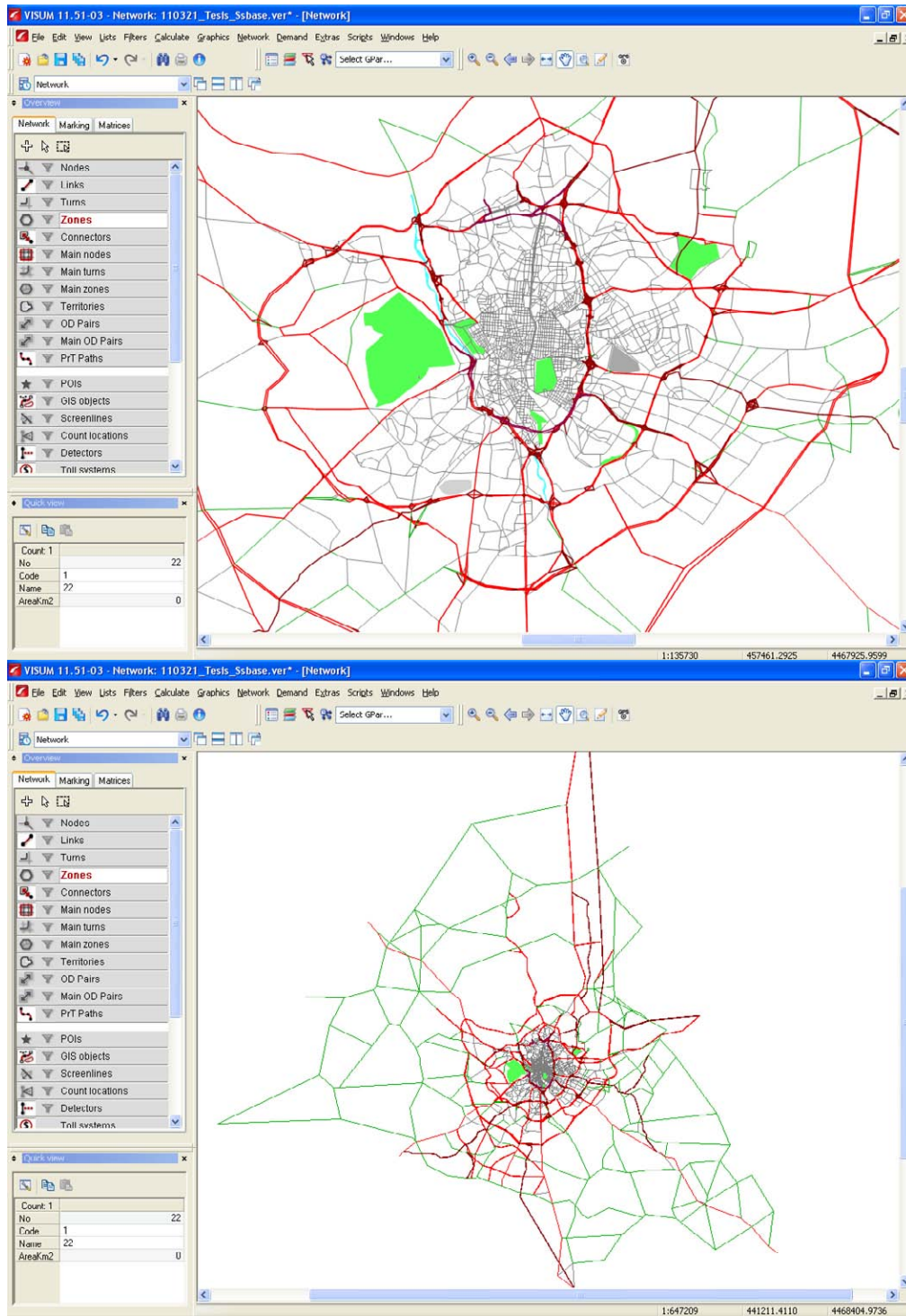


Figura 7.6 Red Visum Madrid

7.2.4 Definición de las Variables Exógenas

En este apartado se describen las principales variables exógenas consideradas en el modelo MARS. En el Anexo 3, se puede ver más información al respecto. De acuerdo a la sección

6.24 del capítulo anterior, existen algunas variables externas a la metodología las cuales se definirán a continuación. Estas variables exógenas son las siguientes:

- Evolución de la población
- Evolución del índice de motorización (coches por cada 1,000 habitantes)
- Evolución de los puestos de trabajo por sector (servicios y producción)
- Composición tecnológica del parque vehicular

A continuación se muestran las proyecciones que se han supuesto para la definición de estas variables exógenas. En general, se han utilizado extrapolaciones simples para predecir el comportamiento futuro de dichos parámetros, teniendo como base una serie de datos históricos.

En la Figura 7.7 se muestran las proyecciones estimadas para el crecimiento de la población y del número de coches en la Comunidad de Madrid para los próximos años. En cuanto a la población, los datos fueron obtenidos por cálculos propios, teniendo como base información del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, INE (INE, 2010). En la figura de la derecha, se muestra una proyección estimada de la tasa de motorización de la Comunidad de Madrid. Esta tasa viene expresada en vehículos totales (turismos), con información básica obtenida de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2004) y el INE (INE, 2010). A partir de esta estimación, se obtiene la tasa porcentual de crecimiento año a año.

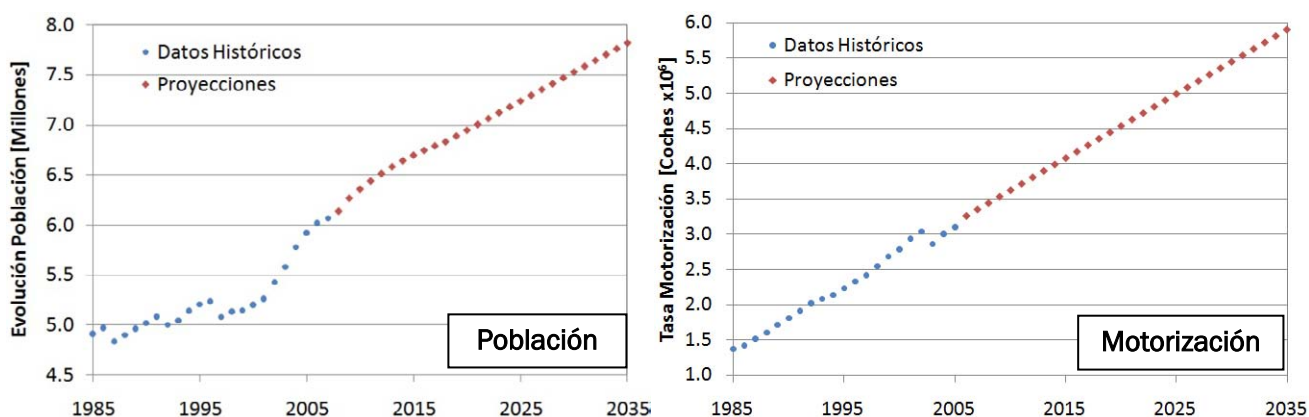


Figura 7.7 Evolución de la Población y del Índice de Motorización

Fuente: INE (2010), DGT (2004) y proyecciones propias.

De forma análoga, en la Figura 7.8 (izquierda) se muestran las estimaciones para los puestos de trabajo en el sector servicios de la Comunidad de Madrid. En la figura derecha, se muestra la proyección de los puestos de empleo para el sector industrial (producción). Como se puede ver, se ha trabajado con la hipótesis de que en la Comunidad de Madrid, el sector servicios tenderá a crecer mucho más que el sector de la producción.

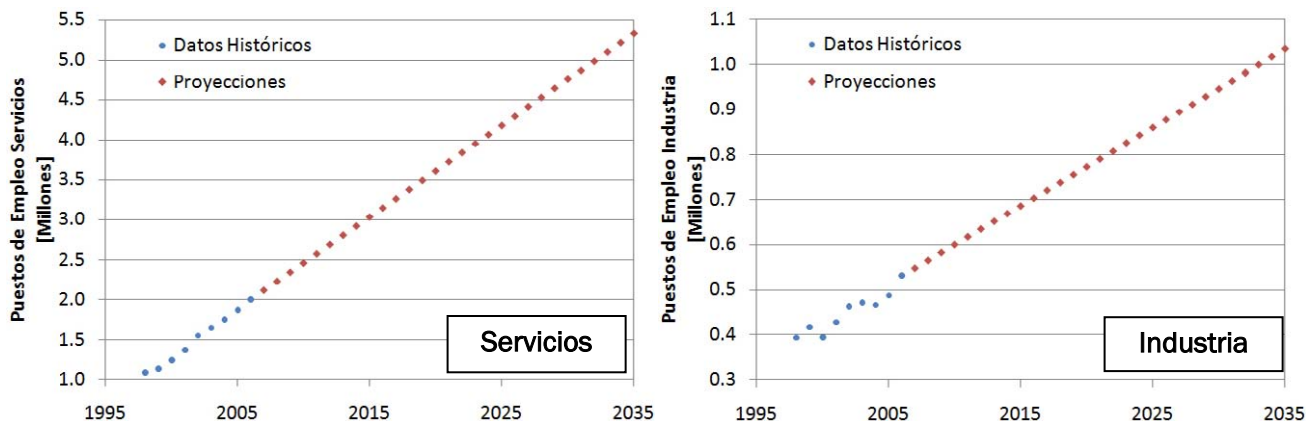


Figura 7.8 Evolución de los Puestos de Trabajo por Sector

Fuente: INE (2010) y proyecciones propias.

Por último, en la Figura 7.9 se muestran las proyecciones de la composición de la flota vehicular con la que se ha trabajado en este caso de estudio. En la figura izquierda, se muestra la forma en que los vehículos diesel aumentan su participación de forma considerable hasta sobrepasar los vehículos a gasolina, Esta tendencia se mantiene hasta invertir las proporciones iniciales. En la figura derecha, se muestran las estimaciones de crecimiento de la flota de vehículos híbridos (eléctricos, pila de hidrógeno, etc.). Escenarios diferentes pueden ser modelizados con el fin de estimar el impacto que una mayor proporción de vehículos limpios pueden causar sobre los indicadores de referencia.

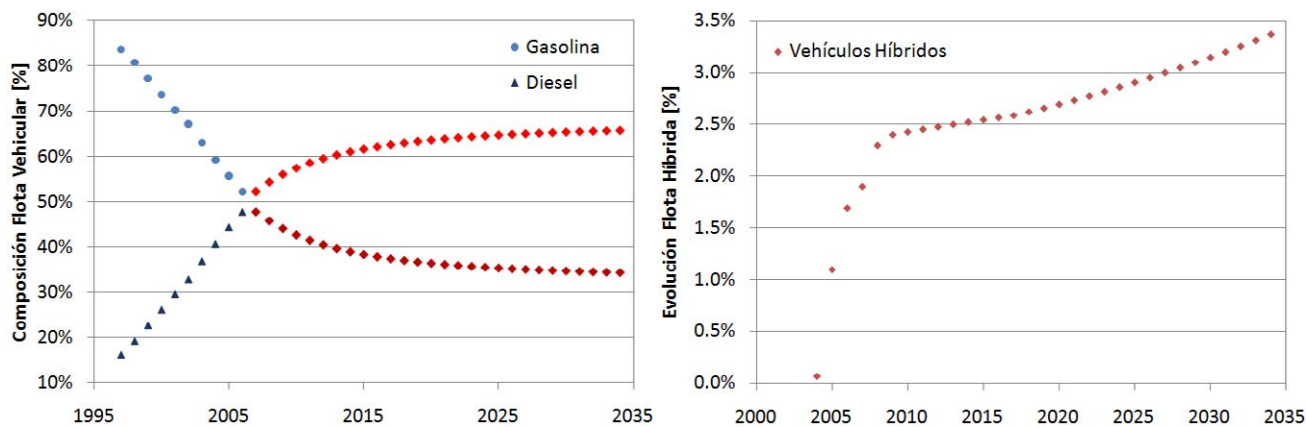


Figura 7.9 Evolución Flota Vehicular

Fuente: DGT (2004) y proyecciones propias.

Estas variables representan los cambios generales en la sociedad. Son factores exógenos al modelo y pueden ser usadas para pruebas de sensibilidad.

El valor y la evolución a lo largo del tiempo, tanto de las variables exógenas como de los parámetros específicos, formará parte de la construcción de escenarios futuros, así como de un potencial desarrollo de análisis específicos de sensibilidad.

7.2.5 Diseño de la Medidas a Optimizar

En general, las políticas urbanas han estado orientadas a solucionar problemas particulares. En concreto se han centrado en actuaciones puntuales, como restricciones al tráfico, infraestructuras específicas o cobros adicionales, sin tener en cuenta sus efectos colaterales sobre el resto del sistema urbano. Esta práctica habitual tiene dos debilidades: primero, una política urbana centrada en soluciones particulares puede que sea apropiada para el objetivo planteado, pero también puede que tenga efectos negativos sobre otros aspectos no considerados. En segundo lugar, el transporte es un sistema complejo donde los cambios producidos sobre un modo de transporte, afectarán al resto de modos y al desarrollo de las actividades (Tsamboulas y Kopsacheili, 2003).

De acuerdo con los más recientes estudios e investigaciones, existe un marco más o menos común sobre las principales líneas de actuación de las estrategias a optimizar. Pero más allá de las medidas planteadas actualmente, es interesante evaluar desde el punto de vista teórico los efectos que medidas potenciales pueden tener sobre los niveles de sostenibilidad de una región.

Una buena política urbana sería aquella que combinase elementos que conjuntamente produzcan efectos acumulativos que logren un equilibrio entre los objetivos ambientales, sociales o económicos. Estos elementos pueden componerse de iniciativas como:

- Combinación de políticas de mercado o *pricing*, cercanas al nivel óptimo, diferenciando entre hora punta y hora valle, combinadas con las políticas tarifarias de transporte público y aparcamiento.
- Regulaciones de velocidad asociado al tipo y localización de la vía. Jerarquización de vías con una revitalización de los modos de transporte no motorizados.
- Inversión en transporte público para mejorar los tiempos ‘puerta a puerta’ para soportar los cambios de demanda causados por el resto de políticas
- Un plan de usos del suelo que fomente la autosuficiencia de los espacios y una mayor oportunidad de uso del transporte público

Todos estos elementos se han agrupado en diferentes categorías, tal como se ha descrito en el Capítulo 2; aunque solamente algunos tipos de medidas pueden simularse bajo esta metodología:

- Medidas de *Pricing*: Las iniciativas de “*pull*” por sí mismas han tenido un resultado claramente poco eficaz en la estimulación del cambio de conducta y cambio modal, mientras que las iniciativas “*push*” han tenido un efecto inmediato y remarcable. Sin embargo la combinación de ambas puede producir un efecto mucho mayor. Las medidas aplicables dentro de esta categoría que podrían ser evaluadas serían:
 - Estrategias de peaje urbano diferenciado según el periodo del día.
 - Estrategias de servicios regulados de aparcamiento a través de la disponibilidad de plazas y la variación de tarifas.
 - Estrategias tarifarias de transporte público.
- Medidas de Infraestructura y Gestión: las políticas generales que comúnmente se adoptan bajo estas categorías tienen que ver con mejoras en los niveles de servicio del transporte público al mismo tiempo que se reduce el ritmo de mejora de las capacidades para los automóviles. Las medidas de reducción de capacidad en carreteras para desincentivar el

uso del coche son discutibles desde el punto de vista de su eficacia económica. Como medidas potenciales que podrían estudiarse se encuentran:

- Inversión y mejora de las carreteras ampliando su capacidad.
- Inversión y mejora del servicio de transporte público, en cuanto a la mejora de frecuencias y tiempos de servicio.
- Estrategias de *traffic calming*.
- Medidas Espaciales: Los principales objetivos de estas medidas tiene que ver con la reducción de la descentralización de la población, la reducción de la dependencia del vehículo privado o el número de viajes realizados en coche, a través de un cambio en la situación o diseño de los usos del suelo. Las iniciativas potencialmente valorables o analizables pueden ser:
 - Actuaciones sobre las densidades urbanas.
 - Actuaciones sobre limitación de crecimiento en zonas menos accesibles en transporte público
- Medidas de Innovación Tecnológica: dentro de esta investigación, este tipo de medidas tienen que ver con una línea de trabajo en particular:
 - Desarrollo de nuevas tecnologías vehiculares y de propulsión hacia vehículos más eficientes.

7.2.6 Aplicación de Medidas en el Modelo

En esta investigación, los criterios de selección de las medidas probadas tienen su base en proyectos y estudios europeos, cuya finalidad general es enfocar el transporte hacia un desarrollo sostenible (Santos et al., 2010; ITS, 2010; VTPI, 2010).

De esta forma, las medidas escogidas y aplicadas en el presente caso de estudio serán:

- Cobro de una tasa por congestión a los coches que ingresen al centro de Madrid.
- Variación de la tasa de aparcamiento existente en el centro de Madrid.
- Variación de la oferta del transporte público (variación de frecuencias).

Se han escogido estas medidas y sus combinaciones porque en general son medidas fáciles de aplicar en un ambiente urbano, son conocidas por la ciudadanía y no requieren grandes inversiones de capital. Además, son medidas que se complementan entre sí (restricciones al uso del coche y fomento al transporte público) y existe la posibilidad que haya transferencias monetarias entre los diversos instrumentos, con el fin de disponer de fondos para financiar aspectos del sistema de transporte que son más costosos de implementar.

De esta manera, las medidas seleccionadas se han aplicado de dos formas diferentes: en el caso de las relacionadas con tarifas, éstas se han implementado de manera puntual en un determinado año y a partir de ese momento se han mantenido constantes. Para todos los casos, la tarifa de congestión se puede implementar en el periodo de hora punta (7-11 y 17-20 h) u hora valle (resto del día), según el resultado del algoritmo de optimización y la función objetivo correspondiente. En el caso del cobro por aparcamiento, debido a que se supone que ya estaba en funcionamiento en el año base, se ha mantenido para todo el día y para todos los usuarios del coche; y se ha supuesto una tarifa media de 2.50 €.

En el caso de la oferta del transporte público, las medidas se han aplicado de forma gradual hasta alcanzar, al final del periodo de evaluación, el valor óptimo estimado por el proceso de optimización. Estas medidas se aplicarán según la siguiente función:

Si se denomina P al año de implantación y t a un periodo de tiempo, se tiene:

$$Política(t) = \begin{cases} Si t \geq P \rightarrow S \cdot (t - t_p) \\ Si t < P \rightarrow 0 \end{cases}$$

Donde,

$$S = \frac{valor_{\acute{o}ptimo}}{t_{2034} - t_p}$$

(7.1)

El modelo estratégico MARS será utilizado para evaluar el impacto de las medidas sobre el sistema transporte y usos del suelo en el largo plazo.

A continuación, se describen brevemente en qué consiste cada una de las medidas escogidas.

Tarifas de Congestión Urbana

Este tipo de medidas puede tomar una gran variedad de formas, aunque la más utilizada es el peaje urbano. Dentro de esta medida se pueden encontrar sistemas que cobren una tarifa dentro de una zona definida o con base en una distancia recorrida, un tiempo utilizado en hacer un recorrido o por el tiempo gastado en congestión. El primer caso de aplicación del cobro de una tarifa por congestión fue aplicado en la ciudad de Singapur en el año de 1975, donde se definieron inicialmente 22 puntos de acceso y se cobraba según la hora del día y el tipo de vehículo (Phang y Toh, 1997). En el caso de Londres, la implantación de una tarifa para acceder a la City ha sido un éxito en cuanto a la reducción de la congestión y a la aceptación popular: los retrasos han disminuido cerca de un 30%, con una reducción del tráfico que circula dentro de la zona de un 15% y los ingresos al centro en coche han caído cerca de un 18% en las horas punta (Leape, 2006). En la zona metropolitana de Oslo, se concluyó que una estrategia de este tipo tiene efectos sobre el patrón de los viajes, particularmente sobre el uso del coche, debido a los cambios directos en los costes del transporte e indirectamente por los cambios en el uso del suelo (Vold, 2005). También en Noruega, desde 1982 este tipo de medidas se han usado de forma extensiva con el fin de financiar sus programas de infraestructuras (Lauridsen, 2011).

Si bien con este tipo de medidas en un principio se trataba de gestionar la congestión (las pérdidas de tiempo básicamente), con el correr de los años el sistema de peajes urbanos se ha extendido a tratar otros efectos provocados por el transporte como la contaminación, el ruido, los accidentes, los efectos barrera, daños en el firme, entre otros. Para este caso, se probará la implementación de un peaje de acceso al centro de la ciudad de Madrid.

La tarifa de peaje se aplicará a los coches que ingresan al centro de Madrid (Almendra) desde cualquier punto de la Comunidad, tal como se muestra en la Figura 7.10. El área de estudio es de cerca de 41.8 km² e incluye siete distritos de la capital (Centro, Arganzuela, Retiro, Salamanca, Chamartín, Tetúan y Chamberí). Para el año base de la investigación (2004), la zona tenía 1.012.471 habitantes (INE, 2010), de los cuales unas 250.000 personas viajan en coche a sus lugares de trabajo fuera de ella. También se encuentran 83.254 lugares de trabajo que emplean 862.405 personas (INE, 2010) de las cuales cerca del 30% vienen en coche desde fuera de la zona de peaje (CRTM, 2004). Los viajeros que salen de la zona de estudio, no tendrán que pagar la tarifa.

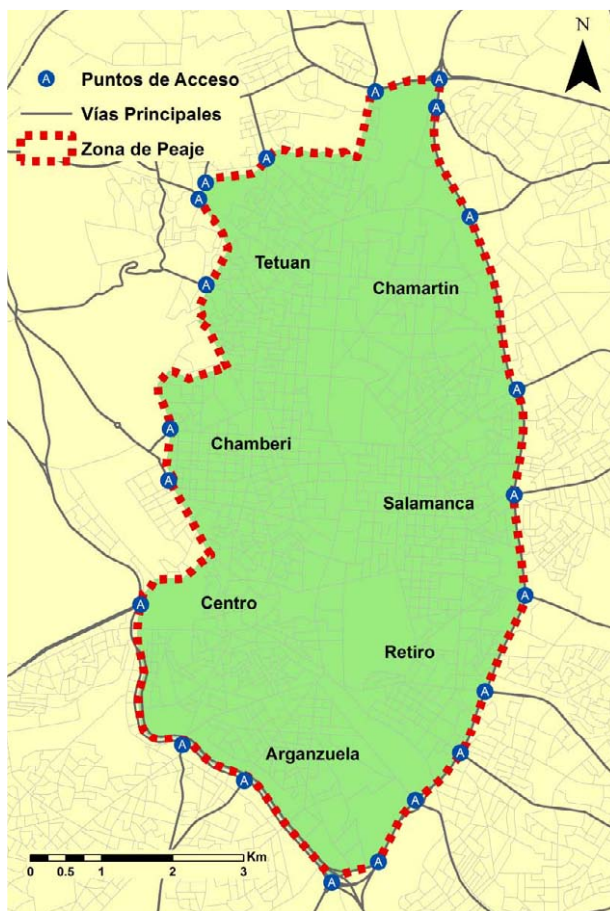


Figura 7.10 Zona de Implementación del Peaje y Aparcamientos

Una vez definida el área a tarifificar, los puntos de ingreso, así como la forma en que se controlará el cobro y el acceso, son cuestiones tecnológicas y logísticas que no hacen parte de este problema. Se ha supuesto que la tarifa se cobra de forma automática a los conductores, en el momento que pasen por los puntos de control. Un ejemplo simplificado de aplicación de esta medida puede verse Guzmán et al. (2011).

Tarifas Aparcamiento

Al igual que cuando se implementa cualquier cobro adicional al uso del coche, se cree que la introducción de una tarifa por aparcar, puede ir en contra de los comercios y en general de la actividad de la zona, ya que los usuarios del coche pueden elegir realizar sus actividades en otro lugar. Aunque esto podría suceder, investigaciones previas dicen que no existe evidencia significativa acerca de la relación entre la restricción del aparcamiento y la vitalidad de una zona (Simmonds y Still, 2000; Marsden, 2006). Estas tasas, como cualquier otra, afectarán en mayor medida a los conductores con menores ingresos, causando un impacto negativo en la equidad. En un principio, este tipo de

medidas se han utilizado para controlar la gran demanda de espacio que se presentaba en zonas de alta densidad, aunque gradualmente se ha ido extendiendo a zonas con diferentes usos y casi de cualquier tamaño (Ferguson, 2004).

Sin embargo, ante la progresiva escasez de espacio debido al aumento continuo de la demanda, la disponibilidad de plazas de estacionamiento en destino se ha convertido en una de las principales condiciones para la elección del vehículo privado como forma de desplazamiento. Como consecuencia de esto, el control del aparcamiento en una determinada zona, es uno de los más eficaces instrumentos para incidir en la atracción de viajes en vehículo privado y, a través de ella, en la congestión circulatoria (Guzmán et al., 2008). En Madrid por ejemplo, la implementación del estacionamiento regulado (SER), se considera como una herramienta más al servicio de las políticas de movilidad urbana como el aparcamiento fuera de la vía pública, el transporte público o la regulación del tráfico. En este caso, la implementación del SER por parte del Ayuntamiento de Madrid, se hizo con el fin de desestimular el uso del vehículo privado en algunas zonas céntricas de la ciudad.

Para los escenarios que impliquen el cobro de aparcamiento, el área tarifificada será la misma que la del peaje urbano, es decir, el centro de Madrid definido en la Figura 7.10. En esta zona se ha implementado una tarifa por aparcar, según el usuario sea residente o no, y según el tiempo de aparcamiento. Por razones prácticas, se ha supuesto una tarifa uniforme para toda la almendra de Madrid, con una tarifa media de 2.50 €, la cual deberá ser pagada por todos los usuarios sin excepción.

Oferta de Transporte Público

De acuerdo a la oferta de servicio de transporte público, tanto en autobuses como en modos ferroviarios, la variación de dicha oferta consistirá en aumentar o disminuir, en forma porcentual, la frecuencia de los servicios teniendo como punto de comparación la operación del escenario base. En concordancia con esta variación, los costes de operación variarán en la misma proporción en que se aumente o disminuya la frecuencia del servicio, según las consideraciones descritas en el apartado 6.3.3 del Capítulo 6.

Para este caso, el transporte público se ha dividido en dos categorías: los servicios que comparten la vía con el tráfico vehicular normal (modo *bus*: autobuses urbanos e interurbanos) y los que disponen de una vía exclusiva, como son los modos ferroviarios (modo *rail*). Ver Anexo 4 para más información.

Así, partiendo de un coste base de operación de los modos *bus* y *rail*, se calcula el aumento o disminución de sus costes de operación según la variación que se presente en la frecuencia de servicios ofertados. En la Figura 7.11, se observa el coste de operación total por año y por modo del caso práctico según su variación de frecuencia de prestación del servicio.

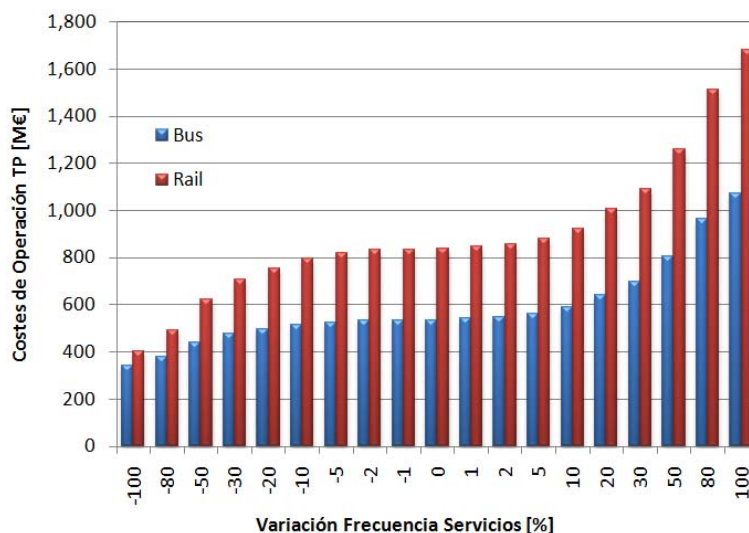


Figura 7.11 Variación del Coste de Operación de la Oferta de Transporte Público

La implementación de estas medidas será en toda la Comunidad de Madrid y de forma gradual, año a año, hasta alcanzar al final del periodo de evaluación, el valor óptimo.

7.2.7 Escenarios a Optimizar

En la Tabla 7.2 se muestran los escenarios a optimizar como caso práctico de la presente investigación. Estos se han clasificado según el número de medidas probadas: los tres primeros escenarios, peaje urbano [P], variación del coste de aparcamientos [A] y variación oferta de los servicios de autobuses [B], serán escenarios que se utilizarán para estudiar el impacto de **medidas aisladas**. El escenario de peaje urbano más coste de aparcamientos [P+A], es un escenario con **dos medidas**, donde se busca analizar el impacto de medidas con similares características. Por último, están los escenarios peaje urbano más variación de oferta de transporte público (*bus + rail*) [P+TP] y peaje urbano, variación coste aparcamientos y variación de oferta de transporte público [P+A+TP], donde se combinan **varias medidas** y se buscarán las sinergias. En este tipo de escenarios, en donde se combinan tres o incluso muchas más medidas, está el verdadero potencial de la propuesta metodológica.

Tabla 7.2 Escenarios Caso Práctico

Código	Escenario	Implementación			Año Base	Año Horizonte
		Zona	Periodo	Año		
Base	Escenario base. Sin intervenciones	-	-	-	2004	2034
[P]	Peaje urbano	Almendra	HP/HV	2007	2004	2034
[A]	Tarifas de aparcamiento	Almendra	TD	2007	2004	2034
[B]	Oferta transporte público (solo bus)	Comunidad	TD	2007	2004	2034
[P+A]	Peaje urbano + tarifas aparcamiento	Almendra	HP/HV TD	2007	2004	2034
[P+TP]	Peaje urbano + oferta transporte público (bus+tren)	Almendra Comunidad	HP/HV TD	2007	2004	2034
[P+A+TP]	Peaje urbano + tarifas aparcamientos + oferta transporte público (bus+tren)	Almendra Almendra Comunidad	HP/HV TD TD	2007	2004	2034

HP: hora punta; HV: hora valle; TD: todo el día.

En cuanto a la aceptabilidad por parte del público a la implementación de estas medidas, en particular las que implican cobros adicionales, es difícil conocer la respuesta, aunque la creencia general es que la gente las rechazaría. Sin embargo, en un estudio en este sentido llevado a cabo en Estocolmo (Schuitema et al., 2010), se le preguntó a la gente acerca de la implementación de un peaje en el centro de la ciudad. Las personas encuestadas creían que la imposición de estas tasas tendrían más consecuencias positivas (reducción de la congestión, contaminación y de los problemas de aparcamiento) que negativas (aumentos de los costes de viaje). Los resultados de ese estudio indicaron que la aceptación pública a estas medidas ha aumentado debido a que ellos mismos han experimentado sus consecuencias positivas.

7.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

En esta sección se muestran los principales resultados de la aplicación de la metodología desarrollada. En la primera parte se describen los valores óptimos hallados para cada caso según el tipo de evaluación realizada, luego se hace un análisis de los principales efectos de la aplicación de cada estrategia y se estudian sus impactos a largo plazo. Posteriormente se describen y analizan los tipos y las sinergias encontradas, la 'eficiencia relativa' del sistema de transporte en los casos donde haya ingresos nuevos y finalmente se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de algunos parámetros del sistema.

7.3.1 Escenario Base

Como se ha mencionado anteriormente, el escenario base será el punto de comparación para medir los impactos de las medidas simuladas en el módulo de evaluación de coste-beneficio. Para la evaluación MCA, el punto de referencia y comparación será el cambio porcentual de los indicadores respecto al año inicial de la simulación.

Una vez claras las hipótesis básicas relacionadas con las variables externas, se ha simulado un escenario sin política alguna, esto significa, que para este primer escenario sólo se ha tenido en cuenta el cobro por aparcamiento en el centro de Madrid (zonas SER). Este escenario inicial, será la base de referencia y comparación de los demás escenarios alternativos presentado y será conocido como **escenario base**. A continuación se presenta un breve análisis de algunos datos de salida de este escenario base para el período de

evaluación de 30 años; es decir, los resultados que se obtendrían entre el año base, 2004 y el año 2034 sin ningún tipo de actuación.

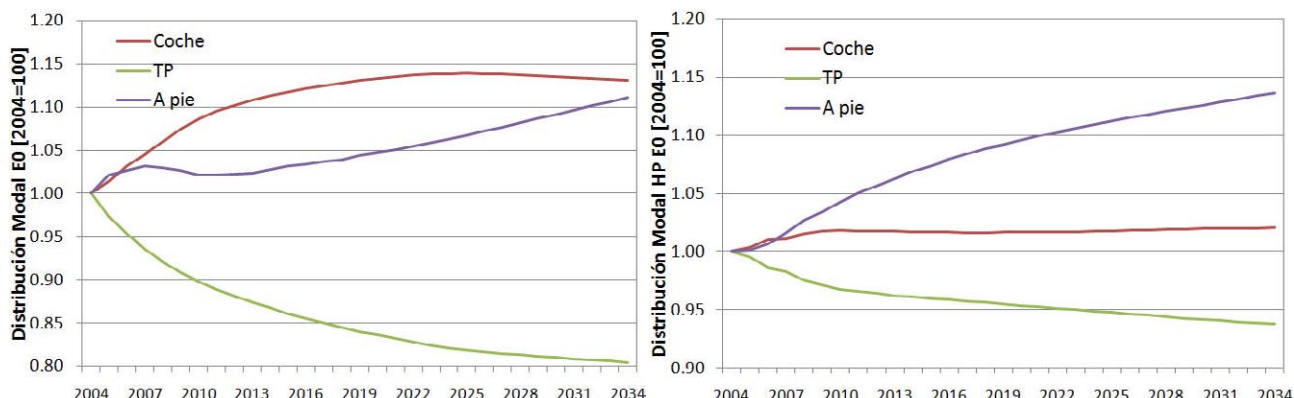


Figura 7.12 Reparto Modal Escenario Base (E0)

De acuerdo con la Figura 7.12, habría una tendencia acentuada de crecimiento del número de viajes en coche, donde el aumento sería de cerca del 15%. Consecuentemente se produciría una reducción del porcentaje de viajes en transporte público aún mayor, de alrededor de 20%. Durante la hora punta se presenta un tendencia más o menos constante en el uso del coche, con un aumento importante de los viajes a pie (o en bicicleta) y con una reducción del uso del transporte público. Debido a que se ha supuesto una distancia media interna de recorrido de 500 m para cada zona, el factor de fricción del modo *slow* será, comparativamente con los otros modos, más bajo, dando lugar al importante aumento de este tipo de viajes¹.

En la Figura 7.13 se muestra la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), estimadas por el modelo MARS, para el periodo de 2004-2034 en el escenario base. Se puede apreciar un fuerte crecimiento de las emisiones en dicho escenario, con aumentos entre el 20% y el 200%, en comparación con el año inicial. Este importante incremento es debido al crecimiento de la población, a la baja renovación de la flota vehicular y a los cambios en el patrón de los usos del suelo (dispersión urbana), que conllevan un aumento de la movilidad urbana principalmente en modos poco sostenibles, como el coche.

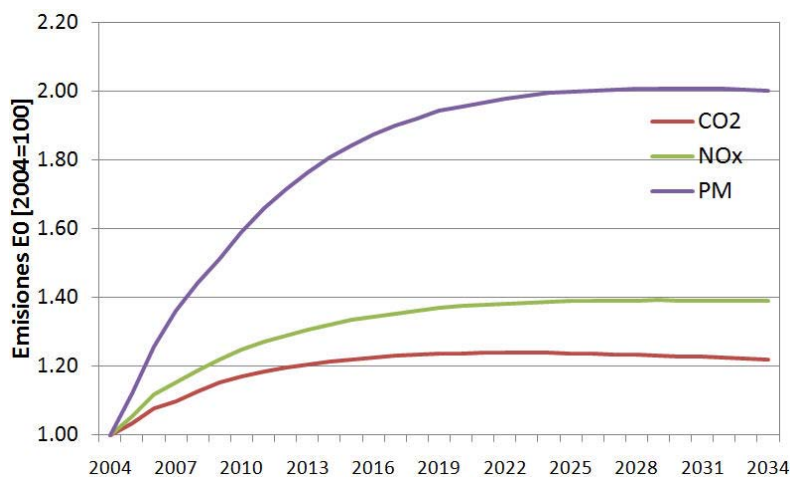


Figura 7.13 Emisiones Escenario Base (E0)

En cuanto a la movilidad en este escenario, en la Figura 7.14 puede apreciarse un aumento significativo de la importancia relativa del transporte privado frente al público en las

¹ La cuestión de la generación y distribución modal de los viajes internos de cada zona, es una cuestión a mejorar en futuros desarrollos.

relaciones de las coronas externas, aunque con un avance importante del transporte público en las relaciones con la almendra central.

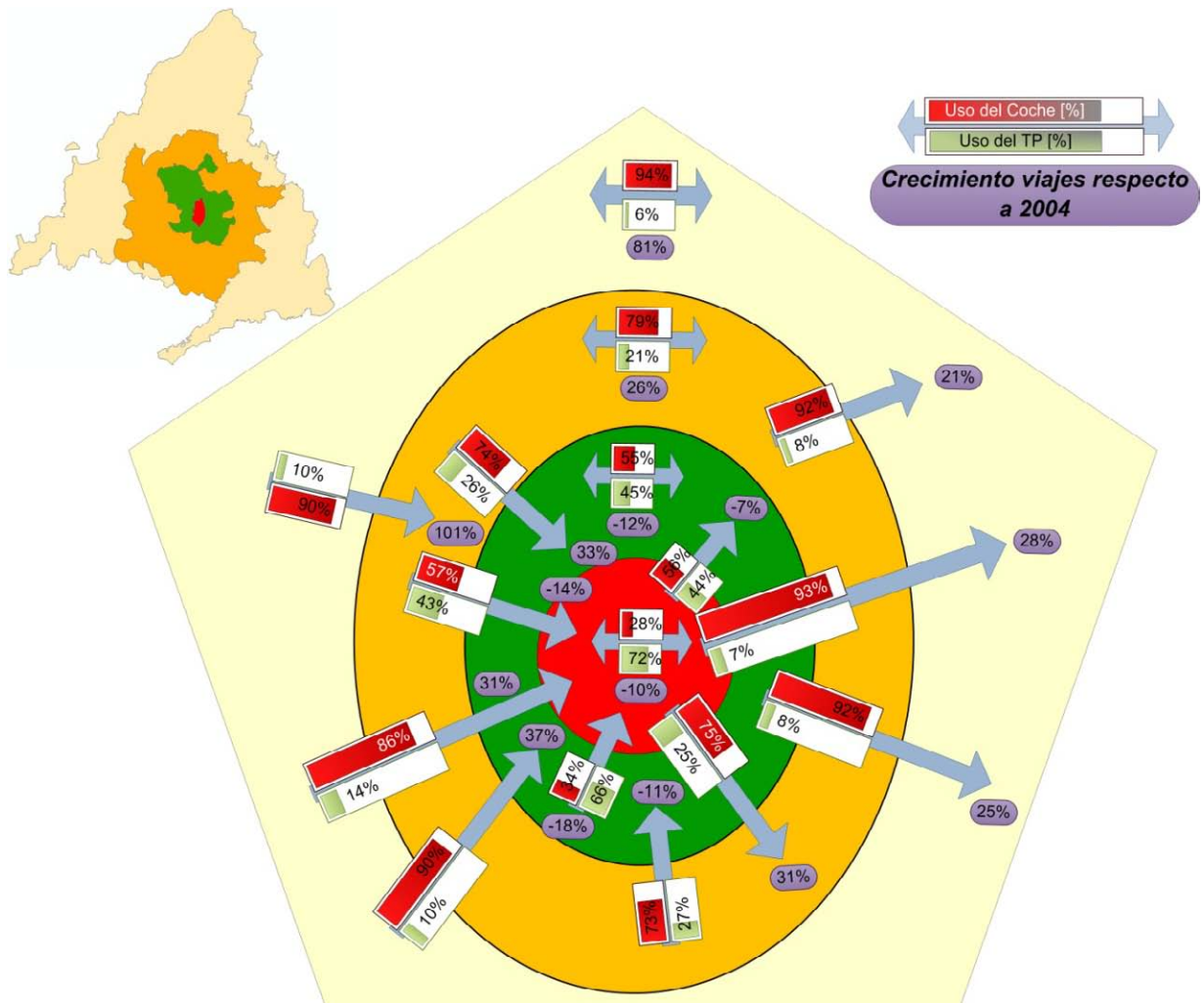


Figura 7.14 Evolución y Reparto Modal de Viajes Motorizados entre Coronas (Año 2034)

Se observa que a medida que nos alejamos del centro, en las relaciones en la periferia y en las coronas metropolitana y regional, se presenta un aumento muy importante del uso del coche, tal vez como consecuencia del típico proceso de aumento de la movilidad en zonas periféricas apoyado en su mayor parte en la accesibilidad en vehículo privado y sin la implementación de políticas competitivas y atractivas de transporte público.

También se puede apreciar un gran aumento en la movilidad de las coronas exteriores, donde se presentan crecimientos hasta del 80% en el año 2034 con respecto al año base. Este aumento de movilidad periférica viene como consecuencia del constante proceso de dispersión urbana que viene padeciendo la Comunidad de Madrid, debido principalmente al alto coste del suelo en las zonas centrales y a la gran oferta de infraestructuras disponibles, en especial carretas y autovías con altas especificaciones y sin coste de utilización.

7.3.2 Evaluación Coste-Beneficio

En esta sección se analizarán los resultados de la metodología desarrollada bajo el enfoque coste-beneficio. Los resultados serán dados en unidades de valor actual neto de millones de euros [VAN M€].

En primer lugar se describe la función objetivo específica a utilizar, partiendo de la definición genérica descrita en el Capítulo 4. Posteriormente se mostrarán los resultados óptimos hallados y se estudiarán sus principales efectos, para terminar con un breve resumen y análisis de este tipo de metodología.

La Función Objetivo CBA

El bienestar de todos los usuarios de un sistema de transporte viene definido por los beneficios sociales obtenidos a través de la implementación de diferentes medidas de transporte. En este sistema los usuarios, en calidad de viajeros y propietarios de coches, reciben algún tipo de beneficio. Una vez definido el proceso de optimización, es posible aplicar las medidas seleccionadas en cualquier periodo de tiempo ($t=1, 2... 30$).

Los resultados tipo CBA se expresarán por el Valor Actual Neto (VAN) de la estrategia implementada, utilizando una tasa social de descuento igual a 4.8% (Souto Nieves, 2003), según la siguiente ecuación:

$$B(X) = \sum_{t=0}^{30} \sum_{ijm} \frac{1}{(1 + 0.048)^t} \cdot [\Delta EV_{ij}^m(t) + \Delta O_{ij}^m(t) + \Delta G_{ij}^m(t) + \Delta E_{ij}^m(t)] \quad (7.2)$$

Esta función, definida para este caso de estudio, se ha llamado **función de valoración económica de la sostenibilidad** ($B(X)$) y viene definida por los siguientes elementos:

- ΔEV = Excedente social de los viajeros que van de i a j en el modo m debido a los cambios en tiempos y costes de viaje.
- ΔO = Beneficios de los operadores por los viajes de i a j en el modo m debido a las tarifas de transporte público, otros recaudos (peajes y aparcamientos) y costes de operación (frecuencias del servicio).
- ΔG = Beneficios del gobierno debido al recaudo de impuestos a los combustibles y a los costes de mantenimiento vial.
- ΔE = Externalidades debidas al cambio en el número de accidentes, emisiones de CO₂ y a los niveles de polución.

En la Figura 7.15 se muestra el esquema de funcionamiento (causalidades) de la función objetivo CBA (*welfare*) en el modelo MARS. Sólo se muestran dependencias de hasta 5 niveles distintos.

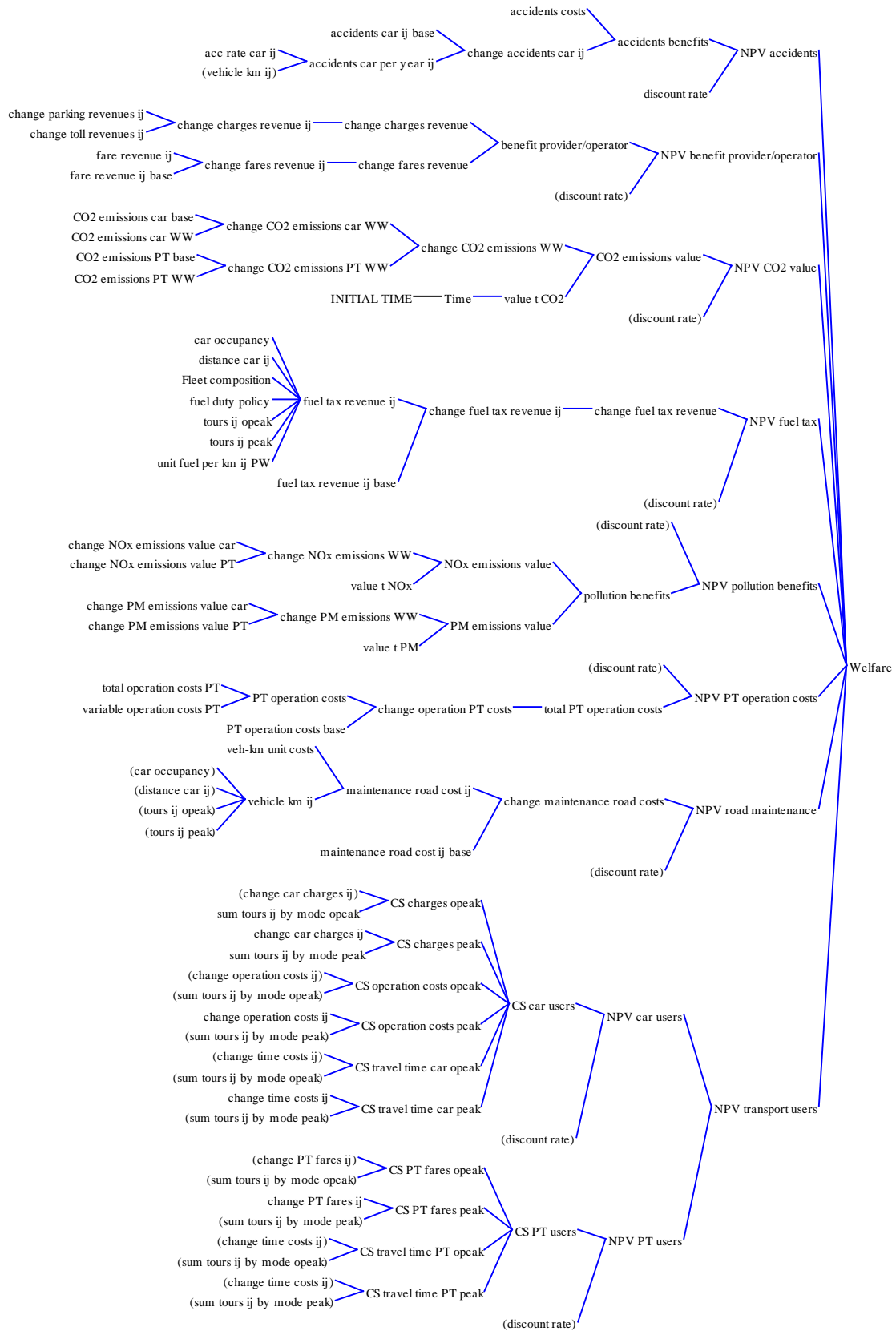


Figura 7.15 Función Objetivo CBA en el Modelo MARS

Como se puede ver en esta imagen, la composición de la función objetivo es bastante compleja y su resultado depende de una gran cantidad de variables. Es por esta razón que el método de optimización escogido es tan útil en este tipo de problemas.

Resultados Óptimos Coste-Beneficio

Con el fin de conocer los impactos individuales de todas las medidas estudiadas, en la siguiente tabla-resumen se presentan los resultados obtenidos para un escenario adicional: el escenario [T], escenario donde se busca el nivel óptimo de la oferta de modos ferroviarios (trenes). En la Tabla 7.3 se presentan los valores óptimos hallados en cada escenario y el resultado global (valor de la función objetivo) de la optimización CBA. Los valores tarifarios vienen dados en euros y los cambios de frecuencia en porcentaje respecto a la frecuencia del escenario base.

Tabla 7.3 Resumen Valores Óptimos – CBA

Variable	[P]	[A]	[B]	[T]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Peaje: HP	1.45	-	-	-	3.40	1.50	2.95
HV	0	-	-	-	0	0	0
Parking	2.50 *	1.65	2.50 *	2.50 *	0.70	2.50 *	0.85
Oferta Autobuses	-	-	+100%	-	-	+130%	+100%
Oferta Trenes	-	-	-	-15%	-	-30%	-25%
Beneficio [M€]	79.85	103.17	1,842.97	29.93	435.18	1,913.49	2,338.08

* Tarifa existente

Analizando estos resultados, parece paradójico que el resultado óptimo en el escenario [P] vaya en la dirección de poner tarifas, mientras que en el escenario [A], las disminuye: en [P] se impone un peaje y en [A] se rebaja el cobro por parking. Esta situación se debe a que en el escenario [A] el mayor beneficio potencial está en el ahorro de los usuarios del coche que pagan parking, así los demás indicadores presenten peores resultados. En cambio en [P], el valor pagado por el peaje, más los ahorros de tiempo, compensan el coste asumido por los usuarios.

En la Figura 7.16 se muestra el comportamiento de la función objetivo de cada escenario a lo largo del tiempo planteado (se excluye el escenario [T], por su pobre desempeño).

En la función objetivo CBA se observa cómo el VAN del beneficio social aumenta considerablemente en los escenarios en donde se combinan medidas de *pricing* y oferta de transporte público (TP); mucho más que en los escenarios en donde solamente se implementan medidas del primer tipo. Entonces, a partir de este primer análisis se puede decir que:

- Medidas aisladas: muy locales y bajo beneficio. El escenario [B] presenta un importante beneficio. Principalmente por su implementación general sobre toda la región y por favorecer la movilidad externa.
- Dos medidas combinadas: el beneficio aumenta, aunque su efecto sigue siendo muy local.
- Varias medidas combinadas: la inclusión de políticas relacionadas con TP, afectan toda la región. Altos beneficios. Estos resultados evidencian la presencia de posibles sinergias.

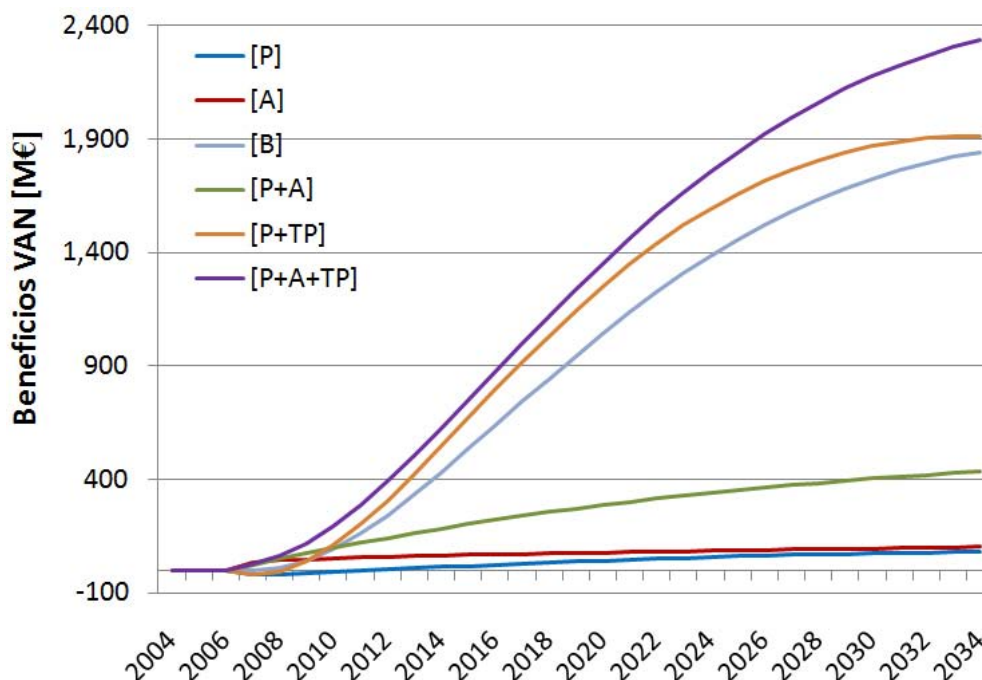


Figura 7.16 Resultados Escenarios Función Objetivo CBA

Comparación de Escenarios CBA

El punto principal de este análisis se centrará en estudiar los principales efectos producidos en cada escenario, sus ventajas e inconvenientes. Para empezar, en la Tabla 7.4 se muestran los resultados desagregados obtenidos del proceso de optimización de los escenarios descritos, para cada escenario y por cada indicador.

Al analizar los resultados de las medidas aisladas y desde el punto de vista de las externalidades, el escenario [A] sería mucho mejor que el [P], en cuanto a ahorros por emisiones y accidentes. Pero desde el punto de vista de los usuarios, la administración o los operadores, el [A] no parece ser el mejor escenario.

Por otro lado, los aspectos ambientales parece que no tienen un peso significativo en comparación con los demás agentes del sistema en los dos escenarios óptimos, particularmente con los beneficios o costes de los usuarios (ahorros de tiempo, eficiencia del sistema). Esto puede indicar que una evaluación basada exclusivamente en análisis coste-beneficio da prioridad a la eficiencia de la red, en lugar de tratar de lograr un equilibrio con los demás aspectos de la sostenibilidad (aspectos sociales y ambientales).

Pasando al caso de la estrategia combinada más simple (dos medidas), en el escenario [P+A], la tarifa de parking se ha reducido en aproximadamente un 72% (de 2.5 a 0.70 €) y aunque el peaje es más del doble que en [P] (3.40 € frente a 1.45 €), los ahorros de tiempo para los usuarios se reducen en casi un 97%, de forma similar que en el escenario [A]. El ahorro en los costes de operación de los usuarios también se ven reducidos en este escenario con respecto al escenario [P].

Tabla 7.4 Resultados de la Optimización CBA, Respecto al Escenario Base [VAN, M€]

Indicador	[P]	[A]	[B]	[T]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Ahorros de tiempo (coche)	265.5	-303.5	1,229.4	-32.1	30.3	1,558.8	1,197.5
Ahorros de tiempo (TP)	84.1	-102.0	2,476.5	-211.9	-6.9	2,609.9	2,116.0
Costes operación (coche)	16.3	-19.4	78.6	-2.2	0.3	95.7	73.3
Coste tarifas usuarios coche	-1,138.6	2,462.7	0.0	0.0	2,663.1	-1,157.4	2,543.7
Impuestos combustible	-5.4	-45.0	170.9	-1.6	-125.3	-186.4	-282.2
Mantenimiento vial	-2.8	13.7	21.2	0.8	25.2	20.1	44.4
Costes operación (TP)	0.0	0.0	-2,757.9	332.3	0.0	-2,917.4	-2,199.4
Ingresos parking	-189.5	-1,983.5	-50.3	-0.7	-4,765.2	-246.3	-4,335.6
Ingresos peaje	1,082.5	0.0	0.00	0.0	2,509.8	1,079.0	2,156.1
Ingresos tarifas TP	26.4	-43.7	1,120.6	-62.3	-32.5	1,239.1	991.3
Accidentes	-60.0	114.1	-82.1	7.3	108.4	-146.6	28.5
CO ₂	1.5	6.8	-7.1	0.2	20.9	-15.7	11.3
Polución	-0.1	2.9	-13.2	0.1	7.0	-19.3	-6.9
Beneficio Social	79.9	103.1	1,843.0	29.9	435.1	1,913.5	2,338.0

Pasando a escenarios más complejos ([P+TP] y [P+A+TP]), los resultados en los cambios de oferta del transporte público son consecuencia de dos elementos principales: el primero se debe a que los costes de operación de los modos ferroviarios son mucho más altos que los autobuses (+57%, ver Figura 7.11); y segundo, la red ferroviaria no conecta todas las zonas de Madrid, en particular las más externas, que es donde se presentan los mayores aumentos de movilidad (Figura 7.21).

Un elemento que llama la atención es que en los escenarios que involucran la optimización de la tasa de aparcamiento, todos los valores óptimos hallados dicen que éste valor debe ser menor al del escenario base (2.50 €). Analizando en detalle los resultados en su conjunto, se ha observado que al reducir el coste de aparcar, el coste de usar el coche será menor en términos generales, lo que causará un aumento en su uso, un aumento en la congestión en el centro de la ciudad y una pérdida importante en el recaudo de este ingreso del sistema. Sin embargo y como se ha mencionado, la reducción en esta tarifa representa un gran ahorro para los usuarios del coche, el cual compensa las pérdidas en otros aspectos,

Por ejemplo, en el escenario [P+A], los usuarios obtendría un beneficio de 2,694 M€, mientras que el resto del sistema tendría pérdidas por 2,258 M€. El ahorro que representa esa disminución en el coste por aparcar a los usuarios del coche, supera en cuatro veces el recaudo obtenido por la implementación del peaje. En este mismo sentido, en el escenario [P+A+TP], el beneficio neto de los usuarios del sistema asciende a cerca de 5.930 M€ y donde aproximadamente solo la **tercera** parte es para los usuarios del transporte público.

Según estos resultados, la reducción de la tasa de aparcamiento en el centro, beneficia únicamente a los usuarios del coche, además de ocasionar un aumento en la congestión y en la pérdida de ingresos provenientes del cobro del parking. El impacto sobre el coste de las externalidades es prácticamente nulo, en comparación con los beneficios obtenidos.

Por otro lado, con el fin de desagregar y analizar el comportamiento de los patrones de viajes en la Comunidad Madrid, a continuación se estudiarán los resultados de algunos indicadores

de movilidad, según el origen y el destino del viaje. Para este análisis, se han hecho **dos clasificaciones**: los viajes desde cualquier punto de la comunidad de Madrid al centro (viajes al centro) y el resto de viajes entre los anillos externos (viajes entre coronas). La configuración de estos anillos se puede ver en la Figura 7.1.

En consecuencia, en la Figura 7.17 se muestra la distribución modal de los viajes cuyo destino principal es el centro de Madrid.

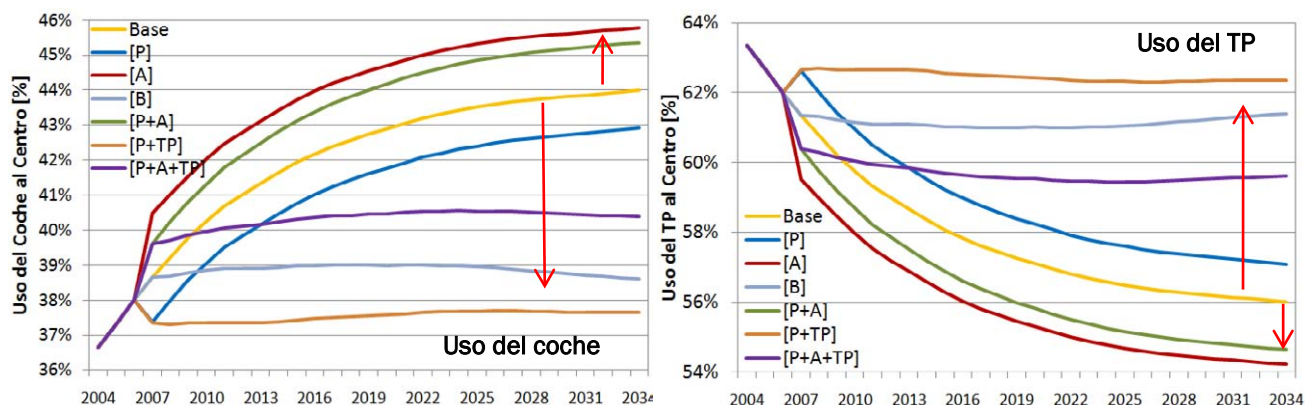


Figura 7.17 Distribución Modal al Centro (CBA)

En comparación con el escenario base, paradójicamente las medidas de *pricing* implementadas causan un efecto contrario al deseado: son los escenarios en donde el uso del coche, en este sentido, crece más.

Se nota que en los escenarios donde más crece el uso del coche y en consecuencia, decrece el uso del TP, son los escenarios en donde se ha disminuido la tasa por aparcar (escenarios [A] y [P+A]). En [A], la reducción del 35% del coste por aparcar hace que el centro se vuelva un destino mucho más atractivo para ir en coche. De forma similar, en [P+A], la combinación de reducción del coste de aparcar con la implementación de un peaje, hace que de igual forma aumente el uso del coche. Esto ocurre porque el ahorro en el coste del parking compensa el pago del peaje. Además, es un incentivo directo a los residentes del centro, quienes serán los más beneficiados, ya que no pagan el peaje y pagarán menos por aparcar.

Por otro lado, al no variar la tasa de parking en el escenario [P], la implementación del peaje hace que el uso del coche sea menor que en los escenarios anteriores. Entonces, sería correcto decir que la tasa de aparcamiento es una medida muy efectiva para controlar el uso del coche, ya que en la mayoría de los casos influye directamente en la decisión del viajero acerca del modo a utilizar.

En cuanto a los escenarios que involucran medidas de TP, es claro que el efecto de aumentar este servicio hace que la tendencia de usar cada vez más el coche, no muestre grandes aumentos en el tiempo. De igual forma, el uso del TP no sufre descensos importantes. Es interesante ver que solo con un aumento anual de 3.7% del servicio de autobuses (escenario [B]), la proporción entre el uso del coche y del TP se mantendrían más o menos constantes en el futuro.

Ahora, en la Figura 7.18 se muestran los resultados complementarios a estos: la distribución modal de los viajes que se hacen entre las coronas externas de la Comunidad de Madrid. El uso del coche, como era de esperarse, es mucho más alto que en el caso anterior. En este entorno geográfico, las medidas de *pricing* no tienen efectos directos sobre la decisión de viajar o del modo a utilizar. Solamente una mejora de la oferta en el TP hace que el uso del coche no presente grandes tendencias de crecimiento. Sin embargo, en todos los escenarios

el coche será el modo preferido de viajar cada vez más en detrimento del TP. En este tipo de viajes, el mejoramiento de la oferta de TP hace que su uso en este entorno no decaiga con el tiempo.

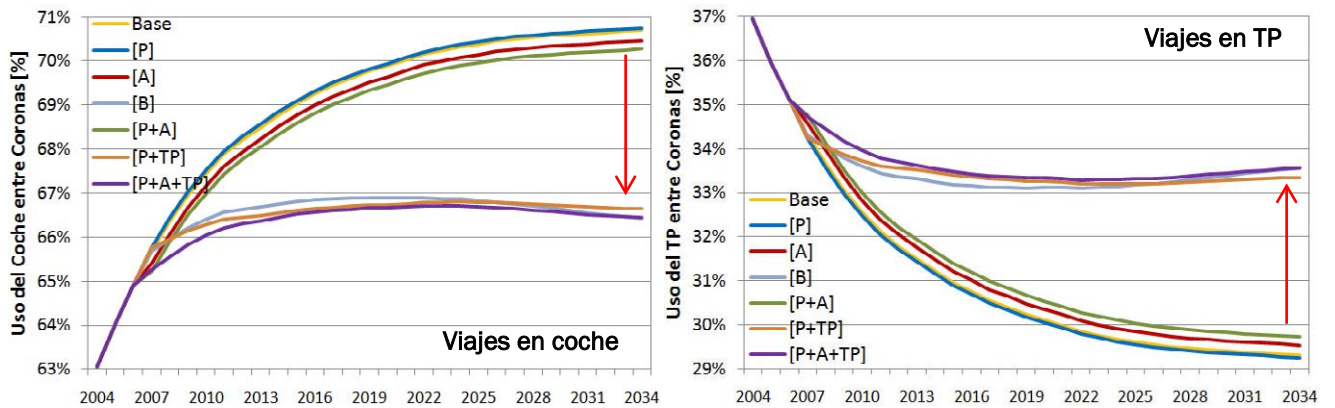


Figura 7.18 Distribución Modal Entre Coronas (Excepto el Centro, CBA)

En cuanto a las distancias medias de los viajes cuyo destino es el centro, en la Figura 7.19 se muestran los resultados para cada escenario. De forma complementaria, en la Figura 7.20 se muestran los resultados para las distancias medias dentro de las coronas externas.

En los viajes al centro se observa una tendencia creciente, que se acentúa en los viajes en TP. Este aumento se hace más evidente en escenarios que restringen el uso del coche en los centros de actividad, logrando con esto una paulatina sustitución de destinos (fuera del centro) con el consiguiente aumento de las distancias recorridas. Los resultados muestran que la estrategia más adecuada para limitar el aumento de este indicador sería encontrar combinaciones adecuadas entre restricciones y estímulos; por ejemplo, comparando los escenarios donde hay medidas de TP.

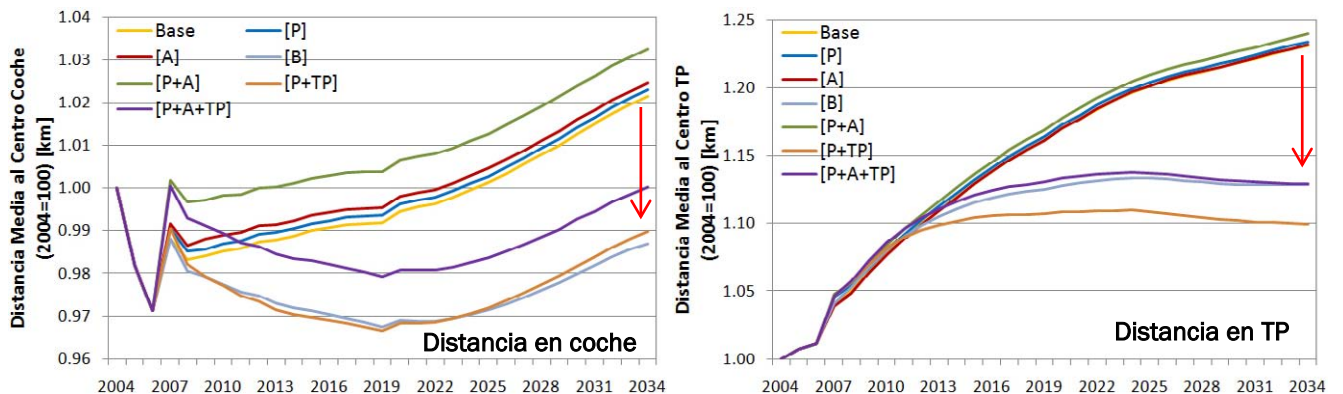


Figura 7.19 Distancia Media al Centro por Modo (CBA)

En cuanto a los viajes externos se observa unos mayores aumentos de este indicador, lo cual tiene sentido al ser generalmente viajes más largos. En este entorno, la mayor oferta de TP hace que este modo se concentre en los viajes más cortos propiciando un aumento en su uso (cerca de 5%). Sin embargo, independientemente del escenario y del entorno geográfico, la distancias en coche presentan aumentos constantes, aunque según el escenario, estos aumentos pueden ser moderados.

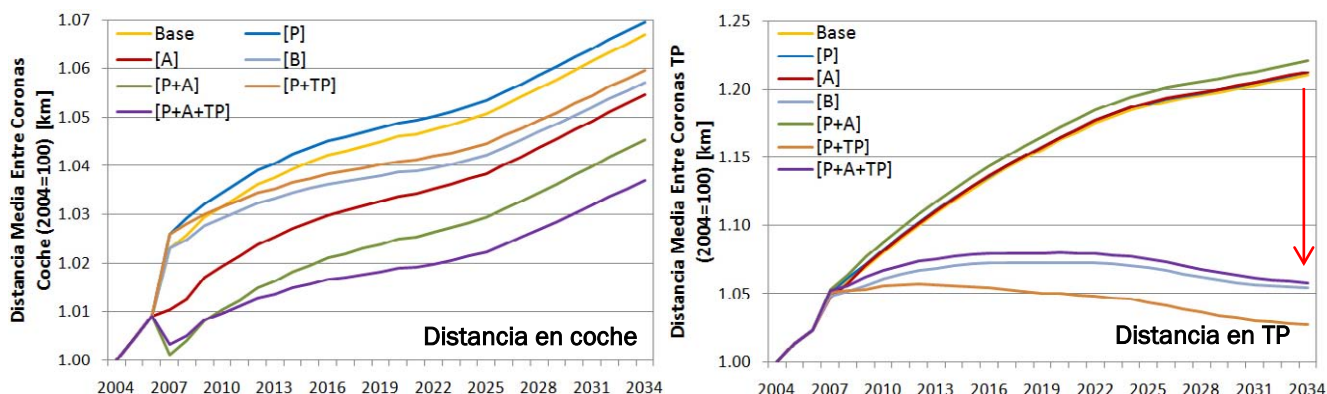


Figura 7.20 Distancia Media Entre Coronas por Modo (CBA)

Para finalizar con el análisis de los principales impactos de la evaluación CBA, en la Figura 7.21 se muestra la variación de los viajes realizados al final del periodo de evaluación con respecto al año de inicio (2004). En estos gráficos es clara la forma en que influye cada escenario sobre la movilidad en la región.

En general, los viajes al centro presentan una tendencia descendente en el tiempo independientemente del modo de transporte. Con la implementación de medidas de *pricing* tal como han sido diseñadas, se estaría fomentando la movilidad transversal y periférica en la región, donde los centros de actividades están dispersos, provocando mayores impactos negativos. Por otro lado, es necesario contar con políticas adicionales para fomentar el transporte público, en particular en los viajes radiales.

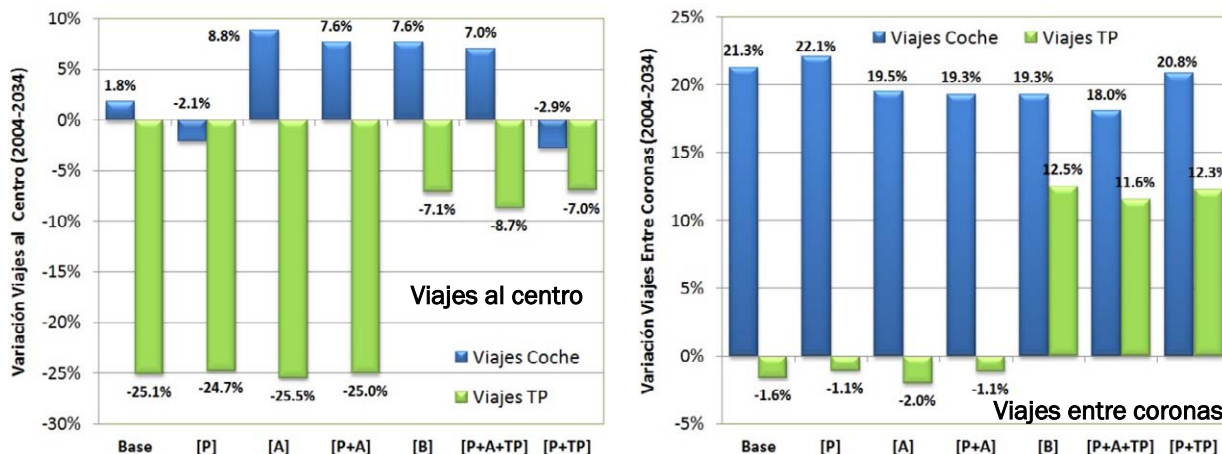


Figura 7.21 Variación de los Viajes Realizados por Modo y Entorno (CBA)

Resumen y Análisis de la Evaluación Coste-Beneficio

Aunque el resultado final de la función objetivo puede ser tomado como un elemento decisorio, no es suficiente para determinar cual escenario es mejor: es necesario analizar los impactos sobre los diferentes indicadores de referencia. Así, viendo y comparando los resultados de la Tabla 7.4, los usuarios en el escenario [A] presentan pérdidas importantes en tiempos de viaje y costes de operación; mucho más del doble que en el escenario [P], ya que al disminuir el valor por aparcar, el uso del coche aumenta, razón por la cual se presentan mayores niveles de congestión con su correspondiente aumento en los tiempos de viaje, tanto en coche como en transporte público. Básicamente yendo a la cuestión monetaria, el

resultado final en [A] es mejor que en [P], debido al ahorro que obtienen los usuarios del coche gracias a la reducción de la tarifa de aparcamiento al pasar de 2.50 a 1.65 € (-34%), particularmente en la hora valle, donde los usuarios del coche se ahorran cerca de 1,600 M€. Por cada céntimo que se disminuya a la tarifa por aparcar, se produce un aumento del beneficio total de los usuarios de aproximadamente 26 M€; es decir, un incentivo al uso del coche en el centro de la ciudad.

En el momento de evaluar el mejor escenario posible, surge un dilema: si una política de transporte consistiera solamente en dos alternativas, por ejemplo los escenarios [P] y [A], ¿es pertinente escoger uno de ellos, como el mejor dentro de una planificación sostenible a largo plazo? Parece ser que incluso dentro de estas dos únicas alternativas, no. Es en este punto donde se demuestra que el desarrollo de herramientas de decisión, apoyadas en modelos o no, es un instrumento de **ayuda** a la toma de decisiones, pero no debe ser el único criterio de elección. Es decir, no se deben tomar los resultados finales, compararlos y escoger uno; es necesario analizar e interpretar los resultados, estudiar sus puntos fuertes y débiles, analizar sus impactos positivos y negativos y compararlos con los objetivos. Y de ser necesario, tomar los resultados más convenientes de uno y de otro. La experiencia y conocimientos del planificador deben ser la base para la toma de decisiones de este tipo, contando con ayudas de herramientas como la aquí presentada.

Un elemento importante que surge al analizar los resultados es la viabilidad de la implementación del cobro del peaje en hora valle. En este caso particular, el resultado durante este periodo del día siempre es cero porque el coste que deberían asumir los usuarios del coche que viajan al centro es muy alto y no se compensa con los ahorros en costes de operación y disminución de la congestión (condicionantes del modelo de transportes).

Aparte del alto coste que para los usuarios del coche en hora valle (HV) supondría el pago de un peaje (que puede llegar a ser más del 50% del coste total de los usuarios dentro de la evaluación CBA), la implementación de una tarifa en este periodo del día, tendría un impacto sobre los ahorros de tiempo casi insignificante: para los usuarios del coche sería tan solo de 1.5% y el impacto combinado (entre usuarios de coche y TP) de 0.3% aproximadamente. Estos ahorros no compensan el aumento del coste de viajar al centro. Por otro lado, aunque los recaudos por el peaje serán mayores (+52%), los de parking caerán en casi 60%. En cuanto a las externalidades, éstas presentarán un peor desempeño, ya que los viajes al centro en coche tendrán restricciones permanentes, lo que hará que se creen nuevos destinos fuera del centro, causando viajes más largos.

Cada medida, según sus propias características, influye de forma diferente sobre el tráfico: según el resultado óptimo, el peaje urbano afectará solamente al tráfico que desee ingresar al centro y solo en un momento específico del día (hora punta); el cobro por aparcamiento además de su localización, influirá sobre el tráfico durante todo el día y sobre los residentes de la zona, además de los usuarios de coche que ingresen en ella. A pesar de algunas objeciones a la forma de implementación (Verhoef et al., 1995), las tasas de cobro por aparcamiento ofrecen una interesante alternativa para la regulación del tráfico, principalmente porque ya están implantadas y aceptadas alrededor del mundo. Por otro lado, la introducción de un peaje, puede tener muchos más obstáculos, por ser un instrumento más novedoso.

Volviendo al escenario [P+A], la reducción en la tarifa de parking cubre de forma total los costes asociados al pago del peaje. En consecuencia, los costes adicionales por utilizar el coche presentan un valor positivo, lo que en el fondo significa un incentivo para usar el coche, por lo menos en los viajes hacia y dentro del centro, ya que significan un ahorro directo al bolsillo de los conductores.

En cuanto a las externalidades, tendrán un saldo positivo, en particular en los accidentes asociados, que presentan una mejoría notable (108 M€). Sin embargo, debido a que esta variable se calcula a partir de la velocidad de recorrido, indica que las velocidades medias han disminuido. Este aumento de congestión se debe al mayor uso del coche en el centro de la ciudad (>40%), debido a la disminución de los costes asociados a su utilización.

En este escenario, también se observa una pérdida de usuarios de transporte público: los operadores recaudan menos dinero por concepto de tarifas de TP (-32.5 M€). Esto significa que se presenta un cambio modal negativo, donde el coche es el modo preferido. Así, el excedente social neto obtenido de la optimización de este escenario, se debe principalmente al ahorro que los usuarios del coche (particularmente en hora valle, 3,586 M€) obtienen de la reducción de las tarifas de aparcamiento.

Volviendo a los resultados desagregados (Tabla 7.4), en el escenario [P+TP] la relación entre usuarios y operadores es un poco más equitativa, ya que las pérdidas de los operadores relacionadas con el parking solo se verán reducidas por la menor cantidad de coches que entrarían al centro en hora punta (debido al peaje), pero aumentarán sus beneficios por ingresos tarifarios en 25% debido al mayor número de usuarios que eligen el transporte público para moverse. Sin embargo, el aumento de los costes de operación hace que presenten un saldo negativo en la evaluación final.

Para terminar, las **principales conclusiones** de este tipo de evaluación son las siguientes:

- Los escenarios con rebajas en el coste del parking, incentivan el uso del coche, aumentando la congestión y a mayores tiempos de viaje en particular a los usuarios del transporte público.
- Las medidas de *pricing* tienen un fuerte e inmediato efecto sobre los viajes al centro en coche, pero con el tiempo, se ve una tendencia creciente de nuevo del uso del coche.
- Combinando medidas restrictivas (al coche) y de incentivos al transporte público, la distribución modal tiende a preferir el uso del sistema público.

7.3.3 Evaluación Multicriterio

De manera análoga al análisis realizado en la sección anterior, a continuación se presenta el análisis de los principales resultados de la aplicación de la metodología multicriterio sobre el mismo caso de estudio.

La Función Objetivo MCA

El proceso de optimización basado en un análisis multicriterio viene dado por la ecuación (7.3), donde los pesos de cada indicador se han obtenido por medio de una encuesta realizada a diferentes expertos (Tabla 7.5). Los resultados finales de tipo MCA se mostrarán en función de los valores obtenidos en el último periodo de evaluación. Los detalles de la encuesta realizada se pueden ver en el Anexo 2.

La Tabla 7.5 también muestra los mejores y peores valores esperados en cada uno de los indicadores seleccionados a lo largo del proceso de optimización. Aunque estos valores se han adoptado para este caso en particular, pueden ser modificados por el usuario según sus necesidades particulares. Se ha asignado para cada indicador un peso de 0 a 1, para indicar la importancia relativa de un indicador sobre los demás. El peso es utilizado para calcular una ponderación combinada según el escenario y política evaluada.

La función definida de forma genérica en el Capítulo 4, se ha detallado para este caso, según los indicadores seleccionados en capítulos anteriores. Esta función será conocida como la **función de sostenibilidad**.

Tabla 7.5 Indicadores de Sostenibilidad y sus Pesos

Criterio	Peso	Indicador	Peso	Mejor Valor	Peor Valor
Impacto Ambiental (IA)	0.354	Cambio Climático (CC)	0.470	-20%	50%
		Polución del Aire (P)	0.338	-20%	50%
		Consumo del Suelo (CS)	0.192	-20%	150%
Equidad Social (EQ)	0.357	Accesibilidad Potencial (AP)	0.297	-50%	50%
		Reducción de Accidentes (RA)	0.337	-25%	50%
		Equidad en Costes de Transporte (CT)	0.366	0%	100%
Eficiencia del Sistema (ES)	0.289	Ahorros de Tiempo de Viaje (TV)	0.496	-50%	50%
		Reducción en Costes de Operación (CO)	0.039	-10%	15%
		Reducción en el Uso del Coche (UC)	0.465	-10%	15%

Ahora, suponiendo que los indicadores seleccionados ya han sido normalizados utilizando la ecuación (6.1) del Capítulo 6, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Max } S(u) = & 0.354(0.470CC + 0.338P + 0.192CS) \\ & + 0.357(0.297AP + 0.337RA + 0.366CT) \\ & + 0.289(0.496TV + 0.039CO + 0.465UC) \end{aligned}$$

(7.3)

Una de las grandes ventajas de esta metodología es que estas funciones son perfectamente modificables según el objetivo que se busque. Las variables que la componen pueden eliminarse, cambiarse o adicionar unas nuevas. Todo depende de lo que el planificador haya definido dentro de sus objetivos.

Al igual que bajo la metodología coste-beneficio, en la Figura 7.22 se muestra la composición de la función objetivo multicriterio hasta el quinto nivel de relación. Se observa que también está compuesta por una compleja relación de variables de diferentes tipos.

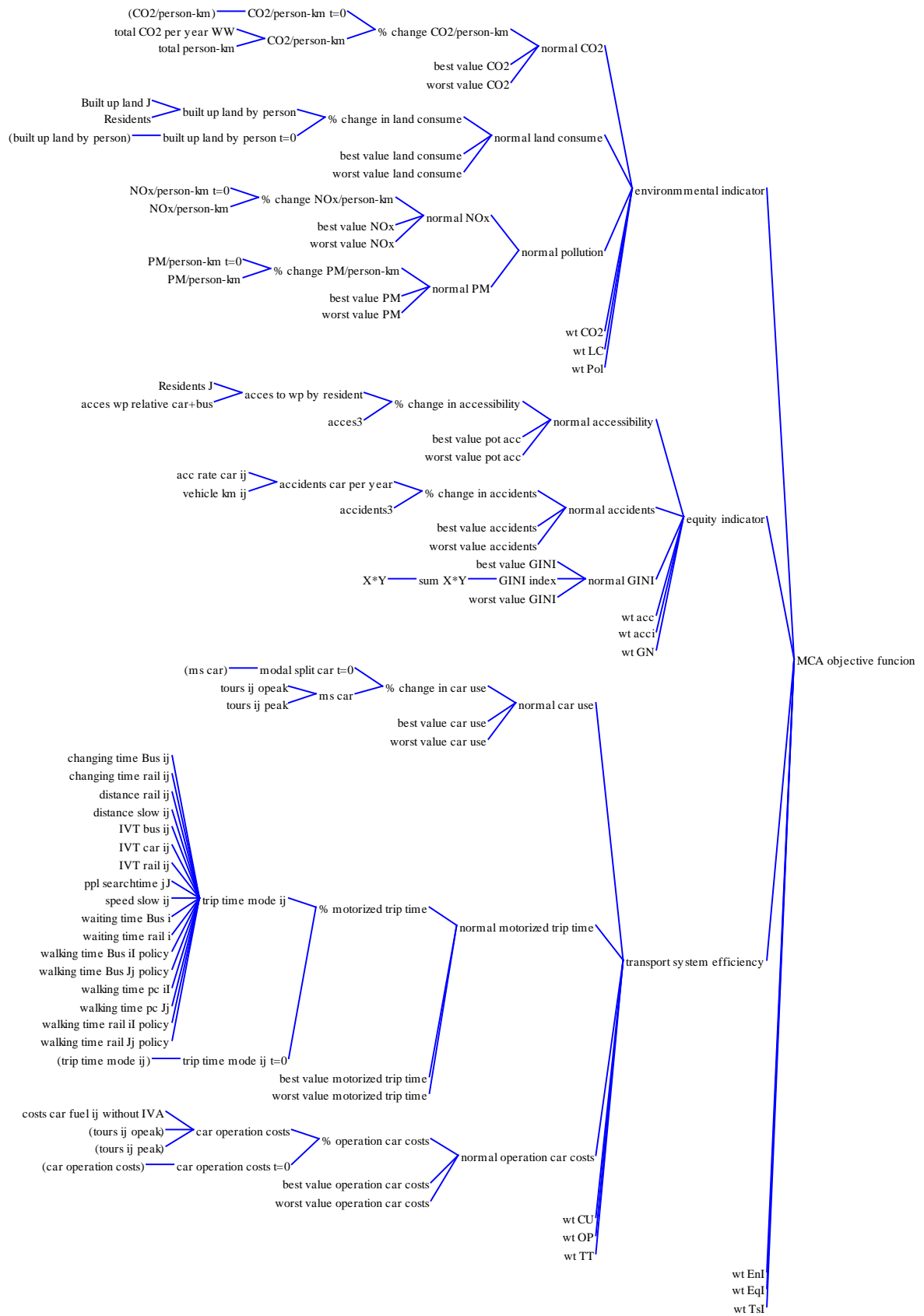


Figura 7.22 Función Objetivo MCA en el Modelo MARS

Resultados Óptimos Multicriterio

Las situaciones anteriormente analizadas sugieren tener en cuenta diversos elementos a evaluar con el fin de llegar a escenarios considerados sostenibles. Entonces, ¿cuál debe ser el criterio de decisión?

En este sentido, será necesario disponer de una visión diferente aunque complementaria a un enfoque CBA. Un enfoque multicriterio puede representar un paso más hacia la construcción de un modelo de optimización integrado y relacionado más directamente con el desarrollo sostenible, aunque de alguna manera será necesario incluir variables económicas.

Al igual que en el apartado 7.3.2, en la Tabla 7.6 se presenta un resumen de los resultados optimizados para la metodología MCA.

Tabla 7.6 Resumen Valores Óptimos – MCA

Variable	[P]	[A]	[B]	[T]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Peaje: HP	12.0	-	-	-	15.0	14.5	15.0
HV	9.0	-	-	-	8.0	6.5	4.0
Parking	2.50 *	9.00	2.50 *	2.50 *	6.00	2.50 *	7.00
Oferta Autobuses	-	-	+120%	-	-	+250%	+250%
Oferta Trenes	-	-	-	+350%	-	+290%	+300%
Función MCA	48.21	48.50	54.26	48.20	48.64	54.58	55.27

* Tarifa existente

Se observa que en comparación con los resultados de la evaluación coste-beneficio, existen dos grandes diferencias: la primera es que bajo este tipo de análisis, deben implementarse tarifas de peaje durante la hora valle. La segunda, es que las tarifas asociadas al uso del coche son mucho más altas y además, el transporte público debe aumentar su oferta de manera importante.

También se observa que las tasas de peaje y aparcamiento no tienden a solaparse o sustituirse. Por el contrario, tienden a combinarse para producir un mayor aumento del coste generalizado a los viajeros que quieren ir en coche al centro de la ciudad. En los escenarios donde hay medidas de TP, las tarifas al uso del coche siguen siendo altas, con el fin de producir el cambio modal buscado.

De forma complementaria a los datos de la tabla anterior, en la Figura 7.23 se muestra el comportamiento de la función objetivo a lo largo del tiempo. En este caso, sea cual sea el escenario, el nivel de sostenibilidad tal como se ha medido empeora a lo largo del tiempo.

En esta evaluación, los mejores resultados vienen dados por los escenarios donde se involucran medidas de TP; sin embargo, habría que tener en cuenta los costes del aumento de esta oferta a tales niveles. De forma general, el impacto de las medidas a lo largo del tiempo, revierte la tendencia de descenso de la función MCA y a partir del año 2022/2023 tienden a crecer, debido a que a partir del año 2017 se empiezan a producir menos viajes en coche. Esto tendrá un impacto importante y favorable sobre el nivel de sostenibilidad en el largo plazo. En consecuencia, de estos resultados se podría decir que,

- El grado de sostenibilidad de un sistema de transporte urbano depende en gran medida de la utilización de los sistemas de transporte público, por encima del transporte individual.

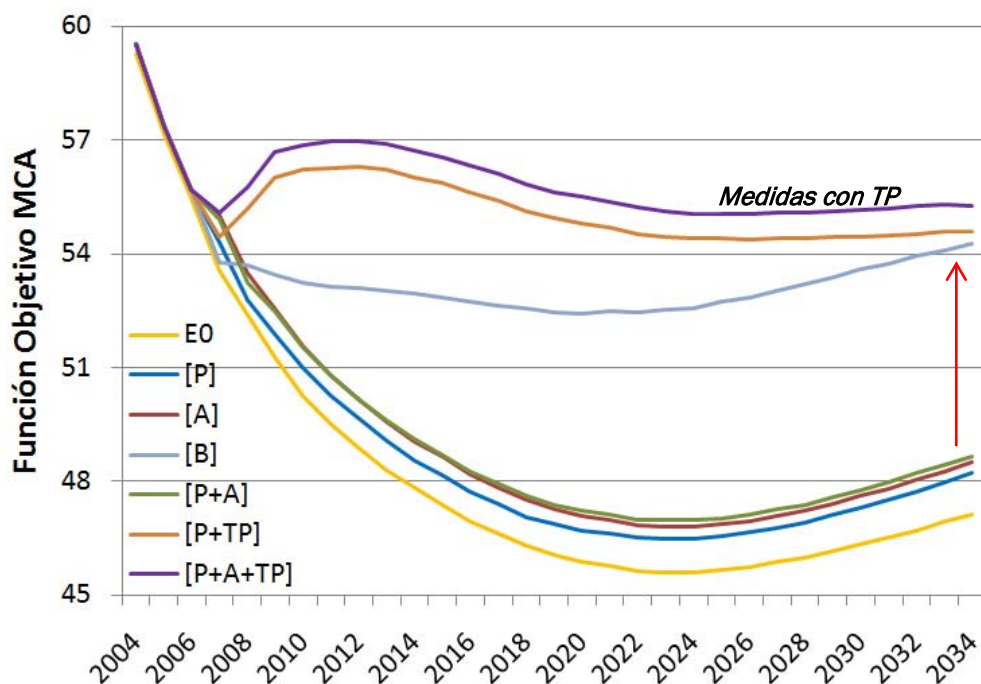


Figura 7.23 Resultados Escenarios Función Objetivo MCA

Comparación de Escenarios MCA

En la Tabla 7.7 se muestra un resumen de los valores de los indicadores de sostenibilidad de la metodología MCA, por escenario, hallados después del proceso de optimización.

Estos datos muestran que aparte de algunos indicadores, los mejores resultados se dan en los escenarios con medidas de TP. En estos caso, el escenario [P+A+TP] muestra mejores resultados que el escenario [P+TP] y los dos presentarían resultados discretos en cuanto a la accidentabilidad en comparación con el escenario base.

Empezando el análisis con escenarios que involucran medidas aisladas, en general el escenario [P] presenta un mejor índice de desempeño, aunque no en todos sus indicadores: al disminuir la congestión en los viajes radiales, las velocidades medias aumentan, lo que ocasiona a su vez un aumento en el nivel de accidentabilidad, razón por la cual el indicador de equidad social en este escenario es peor que en el escenario base. También se presenta una disminución en el indicador que refleja el comportamiento de los costes de operación del coche, ya que debido a las tasas de peaje, algunos conductores cambian su destino por otros fuera del centro, lo que se traduce en la realización de viajes más largos, con mayor consumo de combustible y un aumento en los costes de operación.

Bajo esta evaluación, el escenario con valores óptimos de peaje mejora cerca del 2% el nivel de sostenibilidad con respecto al escenario base. El nivel de impacto tan bajo de estas medidas respecto a la sostenibilidad global, tiene una explicación: debido al ámbito de aplicación local de estas medidas (solo el centro de Madrid), su efecto se diluye dentro del total de la región. Esto va en concordancia con lo planteado en capítulos anteriores, ya que si se desea un desarrollo sostenible, no es, ni será suficiente con implementar medidas aisladas o con alcances locales.

Tabla 7.7 Valores Óptimos por Indicador y por Escenario (MCA)

Escenario	Base	[P]	[A]	[B]	[T]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Cambio Climático	64.11	65.63	65.47	71.99	63.70	66.11	66.74	67.21
Polución del Aire	44.34	45.52	45.41	48.40	43.95	45.89	40.55	40.99
Consumo del Suelo	98.40	98.73	95.76	99.26	98.33	96.84	99.20	97.48
Impacto Ambiental	64.01	65.19	64.51	69.25	63.67	65.17	64.12	64.16
Accesibilidad	44.84	45.29	43.53	48.83	46.88	44.12	47.29	46.33
Reducción de Accidentes	22.68	17.73	16.85	20.25	21.99	15.47	14.70	12.66
Equidad en Costes de Transporte	71.51	72.56	77.35	76.49	72.90	74.64	78.59	81.74
Equidad Social	47.10	45.98	46.92	49.32	48.02	45.63	47.76	47.94
Ahorros en Tiempo de Viaje	44.25	45.18	45.20	52.49	44.46	45.58	54.97	55.27
Reducción en Costes de Operación	25.82	25.28	24.51	28.42	25.74	24.72	28.02	27.40
Reducción en el Uso del Coche	7.57	14.57	16.03	31.97	13.82	18.36	49.40	53.66
Eficiencia del Sistema	26.47	30.17	30.83	42.01	29.48	32.11	51.33	53.43
Función Objetivo	47.14	48.21	48.50	54.26	48.02	48.64	54.58	55.27

Para el escenario [A], los resultados expuestos en la Tabla 7.7 muestran un ligero descenso del indicador de cambio climático con respecto a [P], que aunque no es significativo, es resultado de la mayor congestión, aumento de coches en el centro y por ende, de la disminución de las velocidades. También se observa, que el aumento de esta tarifa aumenta la accidentabilidad, lo que empeora el indicador de equidad social. Además, en los escenarios óptimos, la eficiencia del sistema de transporte, al aumentar costes al uso del coche, tiende a mejorar debido a la reducción de su uso. Al mejorar los niveles de congestión, las velocidades medias tienden a aumentar, lo que se traduce en un ligero aumento de las emisiones totales por pasajero-km.

Por otro lado, al aumentar la tasa por aparcar se castiga la accesibilidad en coche (que a su vez se ve restringida por la imposición de un peaje), pero la de transporte público mejora notablemente. También se ha observado una mejora en la distribución geográfica de los costes de transporte (ver Anexo 5).

Como complemento a los resultados de la Tabla 7.7, en la Tabla 7.8 se muestra el cambio porcentual de cada indicador de la función objetivo MCA con respecto al escenario base. Debido al incremento de población y a la no construcción de nuevas infraestructuras, se presenta un aumento en la demanda de transporte, en particular en la movilidad no obligada en los escenarios [P+TP] y [P+A+TP] (>7%). También hay un importante crecimiento de los hogares en la ciudad (18%). Por otro lado, los impactos ambientales, en particular las emisiones de CO₂ por pas-km disminuyen de forma leve y la polución tiende a permanecer más o menos constante.

Tabla 7.8 Resultados MCA por Escenario

Variación de los Indicadores [%] (2004-2034)	Base	[P]	[A]	[B]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Ahorros de Tiempo	5.8	4.8	4.8	-2.5	4.4	-5.0	-5.3
Cambio Modal	13.1	11.4	11.0	7.0	10.4	2.7	1.6
Costes Operación Coche	143.2	144.4	146.1	137.5	145.6	138.4	139.7
Cambio Climático	5.1	4.1	4.2	-0.4	3.7	3.3	3.0
Polución del Aire	46.2	44.8	44.9	39.2	44.3	45.0	44.5
Consumo de Suelo	-14.8	-14.8	-14.4	-14.9	-14.5	-14.9	-14.6
Equidad en Costes de Transporte	28.5	27.4	22.6	23.5	25.4	21.4	18.3
Seguridad Vial	8.0	11.7	12.4	9.8	13.4	14.0	15.5
Accesibilidad	-5.2	-4.7	-6.5	-1.2	-5.9	-2.7	-3.7
Función Objetivo MCA	47.14	48.21	48.50	54.26	48.64	54.58	55.27
Posición	7	6	5	3	4	2	1
Mejora con Respecto a E0	-	2.3%	2.9%	15.1%	3.2%	15.8%	17.3%
Indicador Eficiencia del Sistema	26.47	30.17	30.83	42.01	32.11	51.33	53.43
Posición	7	6	5	3	4	2	1
Indicador Impacto Ambiental	64.01	65.19	64.51	69.25	65.17	64.12	64.16
Posición	6	2	4	1	3	7	5
Indicador Equidad Social	47.13	45.98	46.92	49.32	45.63	47.76	47.94
Posición	4	7	5	1	6	3	2

El impacto de los indicadores de sostenibilidad analizados para la Comunidad de Madrid, así como su variación de un escenario a otro es muy baja, tal como se muestra en la Figura 7.24. Los indicadores donde se observa una mejoría notable son el cambio modal y en los ahorros de tiempo.

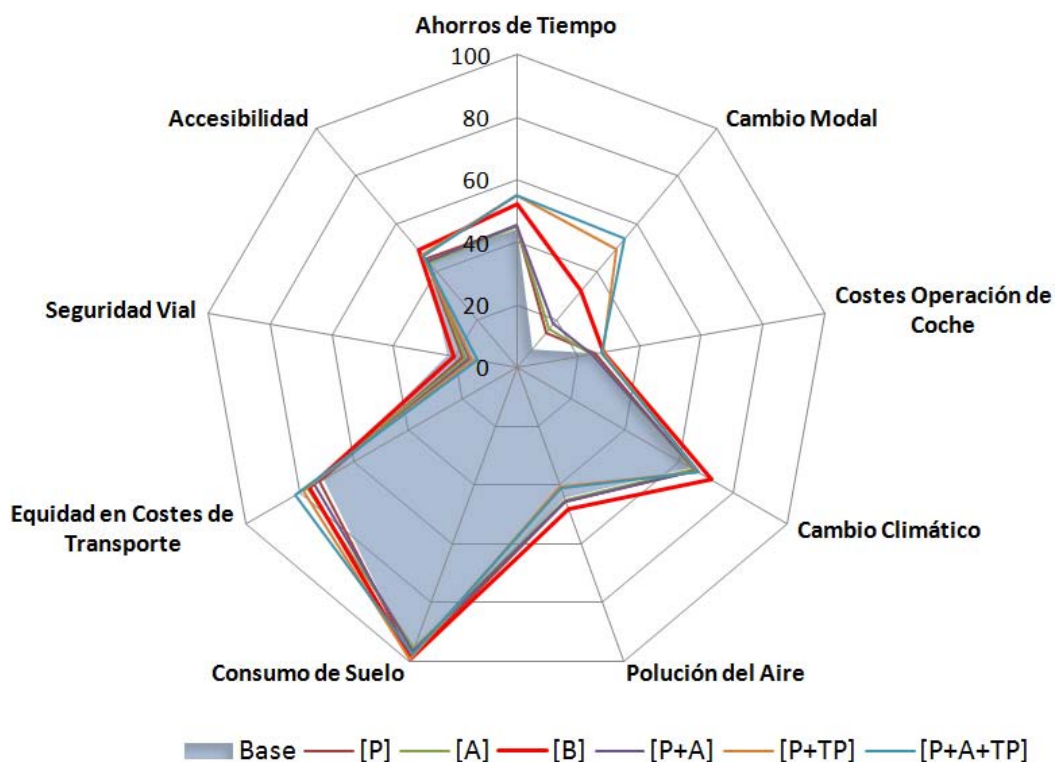


Figura 7.24 Comparación de los Indicadores MCA por Escenario

Al disponer de tarifas adicionales que aumenten los costes generalizados del transporte, el indicador ambiental en general tiende a mostrar mejores resultados a lo largo del tiempo en comparación con el año base. En cuanto a la equidad, tal como se ha definido, se puede ver que antes de la implantación de cualquier estrategia muestra una clara tendencia hacia peores resultados. Sin embargo, una vez se implementan dichas estrategias en el año 2007, este criterio tiende a permanecer constante.

Cambiando de indicadores, en cuanto a la distribución modal de los viajes cuyo destino principal es el centro de Madrid, en la Figura 7.25 se muestran los resultados por modo prioritario.

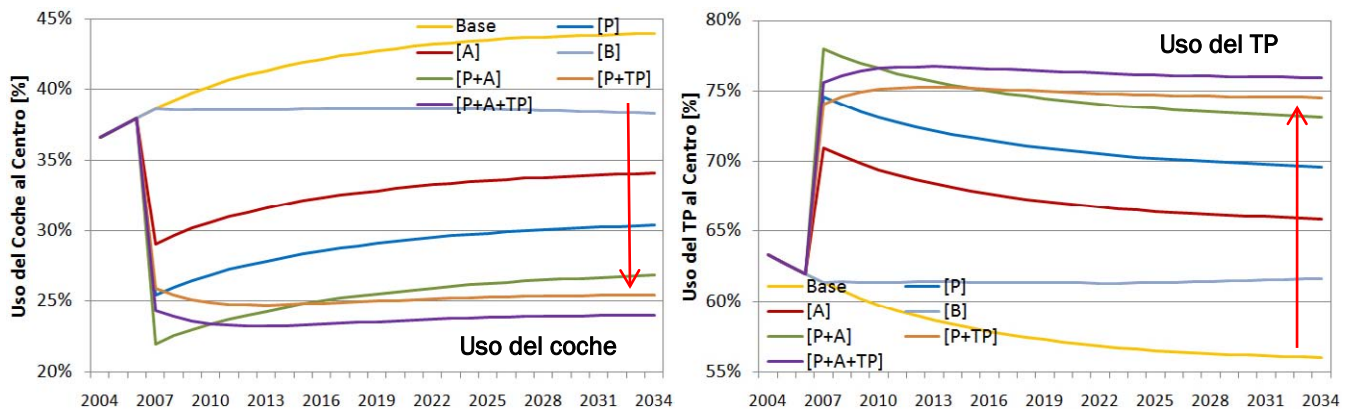


Figura 7.25 Distribución Modal al Centro (MCA)

Los resultados muestran que se produce un cambio modal hacia el transporte público de gran importancia y de forma inmediata para los viajes radiales. Sin embargo, estas restricciones al coche fomentarían la movilidad en este modo en las zonas externas de la región, tal como se puede ver en la Figura 7.27. En escenarios donde se combinan diferentes tipos de medidas, el uso del coche no presentaría crecimientos tan importantes.

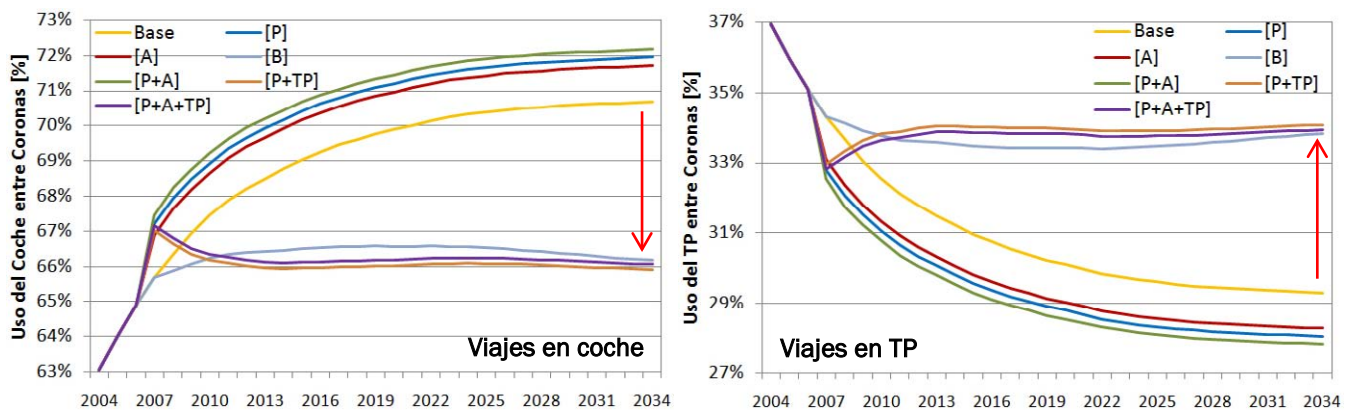


Figura 7.26 Distribución Modal Entre Coronas (Excepto el Centro, MCA)

En cuanto a las distancias medias de recorrido, en la Figura 7.27 se muestran los resultados obtenidos para los viajes al centro por modo. Se observa que en cuanto al coche las distancias variarían muy poco; sin embargo, según el escenario analizado, las distancias en transporte público en este sentido presentarían aumentos importantes. Esto se debe a que el

TP se queda con una proporción mayor de viajes, lo que hace que sus distancias medias de recorrido aumenten.

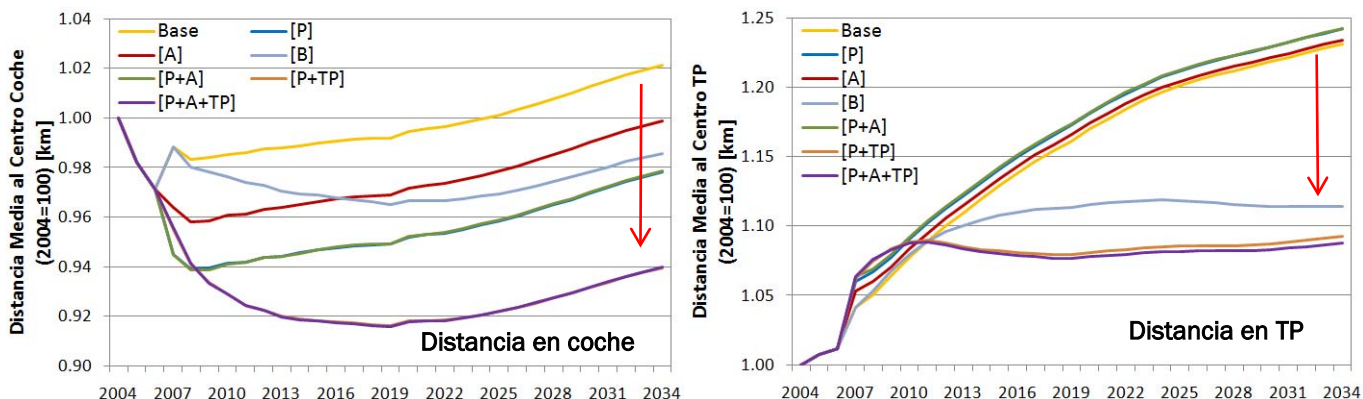


Figura 7.27 Distancia Media al Centro por Modo (MCA)

De forma complementaria, en la Figura 7.28 se muestra la evolución de las distancias medias de los viajes externos de la región de Madrid por modo. En general, las distancias de recorrido en coche presentan aumentos, como era de esperarse. En cuanto al TP, también se presentan aumentos importantes, aunque en los escenarios combinados, este indicador presenta tendencias estables.

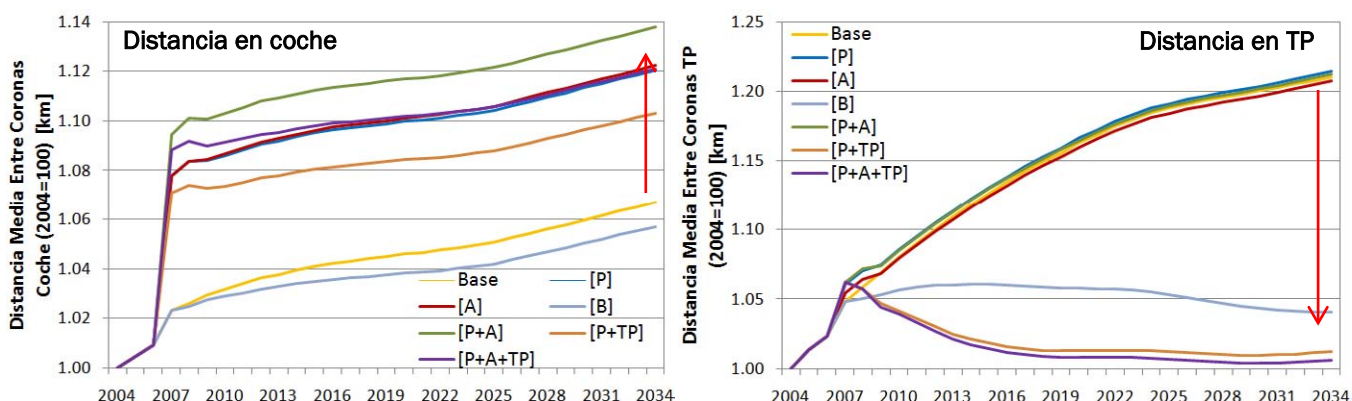


Figura 7.28 Distancia Media Entre Coronas por Modo (MCA)

Esto significa que teniendo en cuenta el reparto modal y la evolución de las distancias, el aumento del coste generalizado al uso del coche en zonas urbanas puede llevar a:

- Potenciar el transporte público en los viajes radiales, donde es muy competitivo (ver Figura 7.5).
- Reducir las distancias de viaje en coche (ahorros de tiempo, congestión y emisiones).
- Mitigar la dispersión de actividades.

En la Figura 7.29 se muestra la variación total de los viajes por cada escenario. La tendencia general en los escenarios que solo utilizan medidas de *pricing* es favorecer la movilidad externa en la región, mientras en aquellos que combinan diferentes medidas, al final del periodo de evaluación muestran un aumento de los viajes en TP hacia el centro, aunque también muestran aumentos mayores en las coronas externas.

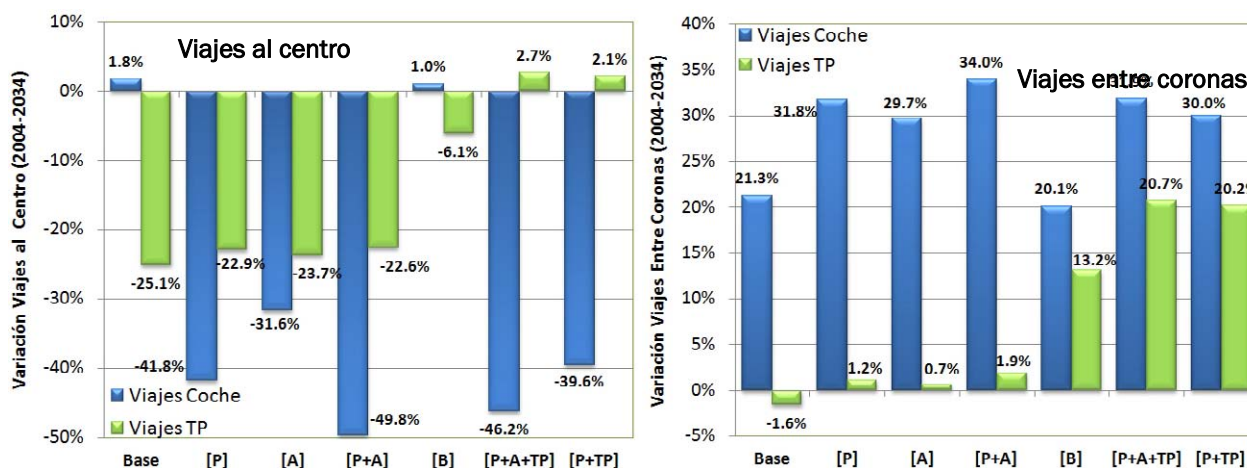


Figura 7.29 Variación de los Viajes Realizados por Modo y Entorno (MCA)

Resumen y Análisis de la Evaluación Multicriterio

Las estrategias óptimas halladas en esta sección fueron relativamente insensibles con respecto a las perspectivas del desarrollo sostenible en el corto plazo. Se ha observado una sensibilidad mucho mayor en el largo plazo, en especial cuando la estrategia está compuesta por medidas de diferentes características. Cuando los impactos a largo plazo se convierten en lo más importante, las estrategias cambian aumentando el coste de usar el coche y haciendo más interesante y atractivo el transporte público. Parece ser que una mayor inversión en el transporte público que implique mayor accesibilidad, conectividad y eficiencia, es un hito importante en la mejora de la sostenibilidad del sistema de transporte a largo plazo.

Viendo algunos resultados de esta evaluación, no sería recomendable integrar políticas cuyos resultados óptimos no sean realistas, como el aumento de la oferta del transporte público a niveles de más del 300%. Seguramente esta medida, sin tener en cuenta los costes asociados de llevarla a cabo, acabaría por saturar las redes de transporte. La interpretación de estos resultados se puede ver como la necesidad de ampliar el cubrimiento de la red de transporte público, especialmente en los viajes transversales (viajes entre coronas).

También, es importante definir el orden en que las estrategias se deben implementar, ya que puede que para que algunas medidas funcionen, deben implementarse otras en primer lugar. Con las estrategias menos populares ante la opinión pública se debe tener especial cuidado, ya que por cuestiones ajenas a su razón de ser, pueden llegar a ser descartadas. Es necesario mezclar este tipo de estrategias con otras más atractivas y aplicarlas conjuntamente. Cualquiera que sea la combinación de estrategias adoptada, será necesario implementar todas las políticas necesarias para alcanzar los objetivos propuestos.

Entonces, las **principales conclusiones** que se han obtenido en este ejercicio son:

- Las políticas de mejoramiento del TP hace que se produzcan menos viajes entre coronas. A viajes más cortos, más atractivo será el transporte público y cobran mayor atraktividad los modos alternativos.
- Las distancias en TP tienden a aumentar más que en los coches. Este aumento se hace más evidente en escenarios que restringen el uso del coche en los centros de actividad, logrando con esto una paulatina sustitución de destinos con el consiguiente aumento de las distancias recorridas.

Es necesario no olvidar que los resultados vistos aquí, es información a nivel agregada y estratégica que nos proporciona una idea a nivel macro de la forma en que un paquete de medidas puede funcionar dentro de un entorno urbano a largo plazo. Para llegar a resultados más detallados será necesario hacer otra clase de estudios con información más desagregada.

Conociendo todos los criterios de evaluación empleados, sus ventajas y desventajas, es claro que se debe hacer un análisis exhaustivo de todas las alternativas posibles de cada escenario y no tener un solo criterio de selección: dentro de esta planificación integrada, es necesario disponer de criterios integrados de evaluación.

7.3.4 Análisis de Sinergias

De entre todos los diferentes tipos de sinergias descritos en el Capítulo 3, vale la pena explicar por qué es deseable alcanzar una sinergia de complementariedad: en un sistema simple o estático, es poco probable que los impactos de la aplicación de dos o más medidas (cambios en el sistema), se refuercen mutuamente, logrando como resultado un beneficio mayor que la suma de las partes. Por ejemplo, el aumento de frecuencia y la disminución de la tarifa en una sola línea de autobús, muy probablemente aumente el número de usuarios, pero en cierta medida atraería a los mismos viajeros; así que es posible que el efecto combinado de estas dos medidas sea menor que la suma de sus efectos por separado. Sin embargo, el sistema transporte-territorio de una ciudad no es así de simple: las interacciones entre los distintos modos y rutas, los tiempos de respuesta y la retro-alimentación entre esos dos sistemas tienen un gran potencial de dar lugar a la aparición de sinergias.

Desafortunadamente, existe poca evidencia empírica de los procesos de integración estratégica, en primer lugar porque este concepto es relativamente nuevo para que hayan estrategias implementadas y evaluadas; y en segundo lugar, es muy difícil evaluar y aislar el impacto individual de una combinación de medidas (May et al., 2006). Así que para analizar este fenómeno, seis estrategias diferentes se han probado con el fin de encontrar evidencias de sinergias. Estas estrategias se han mencionado en la Tabla 7.2.

Para visualizar las sinergias, en la Tabla 7.9 se recoge la información de los resultados de cada función objetivo obtenidos del proceso de modelización y optimización. Las dos primeras filas muestran la suma de los efectos individuales de cada una de las medidas optimizadas por cada metodología. Las dos filas siguientes (impactos combinados), muestran el valor obtenido de la optimización de medidas integradas. Finalmente, las últimas filas muestran las sinergias encontradas. Si se obtienen resultados con signo positivo (+), significa que se produce este efecto.

Tabla 7.9 Combinaciones de Medidas y Posibles Sinergias

Escenario		[P]	[A]	[B]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Suma de Impactos Individuales	CBA	+79.85	+103.17	+1,842.97	+183.02	+1,952.75	+2,055.92
	MCA	48.21	48.50	54.26	48.35 *	50.23 *	40.79 *
Impactos Combinados	CBA	+79.85	+103.17	+1,842.97	+435.18	+1,913.49	+2,338.08
	MCA	48.21	48.50	54.26	48.64	54.58	55.27
Sinergias	CBA	-	-	-	+252.16	-39.26	+282.17
	MCA	-	-	-	+0.29	+4.23	+5.48

* Valor medio de la suma de las funciones objetivo MCA

Las sinergias detectadas en la Tabla 7.9 dan a entender que en el modelo hay gran interacción entre las diferentes medidas aplicadas y su influencia sobre los patrones de movilidad es importante.

Dentro de la evaluación CBA, en los escenarios optimizados con una combinación de medidas de similares características [P+A], parece que estas tasas se superponen de tal forma que al aplicarse en el mismo coste generalizado de algunos viajes, sus valores varían de tal manera que se sustituyen, haciendo que el valor del peaje o del parking oscilen, ya sea hacia arriba o hacia abajo; pero siempre tratando de conservar cierto equilibrio, entre maximizar el beneficio de los usuarios (maximizando ahorros de tiempos y minimizando costes) y el de los operadores (recaudos por tarifas); aunque los usuarios casi siempre tienden a salir beneficiados. En este mismo caso, hay evidencia que se puede presentar una sustitución parcial, ya que si aumenta una tasa, disminuye la otra y viceversa, siempre en proporciones similares. La mayor sensibilidad de los usuarios a la tasa de parking tiene sentido, ya que esta medida es aplicada durante todo el día, mientras que el peaje sólo es cobrado durante el periodo punta.

Solamente cuando una medida afecta el mismo elemento dentro del coste generalizado, como es el caso de peaje y del cobro por aparcar, hay un efecto de solapamiento de tarifas y sinergias sustitutivas.

Analizando los impactos individuales dentro de este mismo escenario, se aprecia un efecto de sustitución de sinergias del escenario [B], aunque es mucho más probable que se presente el fenómeno de aditividad entre el [P+TP] y los escenarios [B] y [T], dado que el beneficio obtenido solamente por el peaje sería similar al [P].

En cuanto a escenarios más complejos, como el [P+A+TP], de nuevo hay evidencia de sinergias sustitutivas parciales en las tasas de cobro (peaje y aparcamiento), aunque su efecto combinado sobre el coste generalizado de viajar al centro en coche no será tan importante como en [P+A], ya que con el aumento de la oferta de TP, hay un mayor cambio modal, y por lo tanto las tarifas adicionales al uso del coche llegan a un nuevo punto de equilibrio. Analizando todo el conjunto, hay evidencia de la presencia de sinergia pura con un gran valor de la función objetivo con respecto a escenarios anteriores; sin embargo, la sinergia neta es de magnitud similar a la producida en el escenario [P+A], aunque su origen es completamente diferente, ya que en este último escenario, el elemento que hace que se produzcan beneficios para los usuarios es el ahorro debido a la disminución de los costes por aparcar, que contribuye con el 99% de los beneficios.

En el escenario [P+A+TP], el elemento que produce los mayores beneficios conjuntos es el ahorro en los tiempos de viaje en ambos modos (en especial en el TP, 64%), aunque también hay reducciones en el coste de usar el coche. Entonces, se ha visto que uno de los elementos más importantes en la implementación de medidas combinadas son los ahorros de tiempo. Este resultado, va en la misma línea de otros autores que dicen que este elemento es uno de los mayores beneficios, el cual puede llegar a ser entre el 70 y 90% del beneficio total (Salling y Leleur, 2011).

Como se ha observado, la tarifa por aparcar es un elemento sensible dentro de la función objetivo CBA, ya que en varios escenarios es quien define si hay o no beneficios. Esto es más evidente en el caso del escenario [P+TP], donde aparentemente se presenta una sinergia negativa. En primera instancia esto indicaría que es mejor implementar sólo algunas de las medidas de este escenario, ya que los resultados finales de la función objetivo serían similares. Sin embargo, al revisar en detalle los resultados desagregados mostrados en la Tabla 7.4 y compararlos con los otros resultados, los costes y beneficios de cada agente del sistema están mucho más equilibrados entre sí.

Este escenario [P+TP], es quien presenta los mejores resultados en cuanto a ahorros de tiempo (para ambos modos) y una menor pérdida para los operadores, la podría ser asumida si se tuvieran en cuenta las subvenciones al TP. El resultado negativo en este caso viene dado por la parte ambiental, debido al aumento de emisiones y de accidentes.

Estos resultados se podrían subsanar si a lo largo del tiempo se implementan en la flota motores más eficientes y limpios. En el caso de la accidentabilidad, como se ha dicho anteriormente, ésta aumenta porque las velocidades medias aumentan, cosa que no es necesariamente cierta. Este es un elemento a mejorar en el futuro.

Por otro lado, dentro de la evaluación MCA, el efecto de sinergias es un poco más difícil de distinguir, ya que los impactos individuales, así como el combinado están dados por índices, los cuales han sido construidos con base en percepciones subjetivas. Sin embargo, se ha tratado de alguna manera de verificar la presencia de este efecto.

Como se muestra en la Tabla 7.9 y dada la poca variación entre los diferentes resultados, las sinergias obtenidas son puras y todas positivas a diferencia de las obtenidas por el método CBA. Además el valor de la sinergia aumenta a medida que se combinan más medidas. Sin embargo, para poder afirmar esto, sería necesario hacer pruebas con otras combinaciones.

Por otro lado, la baja sensibilidad de la función objetivo a algunos parámetros, deja algunas dudas; razón por la cual sea necesario hacer un estudio más detallado del funcionamiento integrado de esta metodología con otras funciones objetivo y otros pesos.

Finalmente, en la Figura 7.30 se muestra el comportamiento de cada una de las dos funciones objetivo en relación con las medidas adoptadas. También se puede ver el efecto de sinergia que se produce en cada una de estas combinaciones.

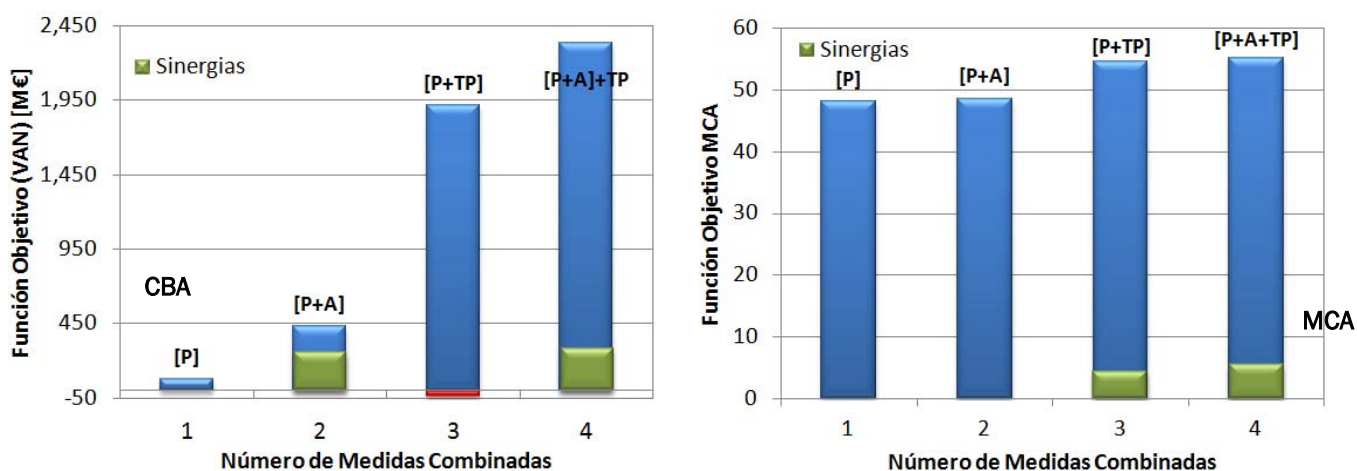


Figura 7.30 Combinación de Medidas y Sinergias

Estos resultados han mostrado los conceptos de complementariedad, aditividad y sustitución para las medidas seleccionadas. También se han mostrado efectos de sinergia pura, aunque sería deseable probar otras medidas para poder tener una evidencia más sólida al respecto.

7.3.5 Eficiencia Relativa del Sistema

Desde un enfoque diferente, la metodología desarrollada también permite analizar un sistema de transporte en términos de eficiencia de los escenarios desde el punto de vista del bienestar (beneficios) por habitante. De esta forma, como medida de “eficiencia relativa” de

un sistema de transporte que incluya medidas que impliquen el recaudo de nuevos ingresos, los beneficios netos obtenidos (incluyendo el dinero que se ahorran los usuarios), pueden ser comparados con el total del recaudo obtenido por el sistema, de forma similar como se ha hecho para la ciudad de Estocolmo (Mattsson y Eliasson, 2006). Este concepto de eficiencia es definido como los ratios entre los beneficios medios y el recaudo medio por habitante en euros constantes por año. Estos resultados se muestran en la Tabla 7.10, teniendo en cuenta dos niveles: primero, el ingreso por tarifas de peaje y segundo, el ingreso total del sistema (peaje + parking). Adicionalmente, se muestra el coste de operación del transporte público por cada habitante, sin tener en cuenta las subvenciones.

Tabla 7.10 Eficiencia Relativa de Medidas – CBA

Ratios	[P]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Beneficios Usuarios [€/hab/año] *	4.4	43.1	59.0	87.3
Recaudo Peaje [€/hab/año]	12.6	29.3	12.5	25.1
Ratio Beneficios/Ingresos	0.35	1.47	4.70	3.49
Recaudo Total Peaje+Parking [€/hab/año]	10.4	-27.2	9.7	-26.4
Nuevo Ratio Beneficios/Ingresos	0.42	-1.58	6.10	-3.31
Coste Operación TP [€/hab/año]	216.5	216.5	261.1	250.1
Ratio Beneficios/Coste Operación TP	0.02	0.20	0.23	0.35

* Estos beneficios incluyen los ahorros por tiempo de viaje (coche y TP) y ahorro en costes de operación (coche).

Según estos resultados, para el primer nivel, el beneficio potencial de los usuarios obtenido sería entre 1 y casi 5 veces el recaudo (excepto en el escenario [P]), lo que indica que serían estrategias muy eficientes en este sentido. Dicho de otro modo, los ratios entre el beneficio medio obtenido y el recaudo son mayores al 100% en la mayoría de los casos. Sin embargo, es necesario analizar todo el sistema en su conjunto, es decir, incluyendo los otros ingresos (parking).

Para el segundo nivel, mientras que el beneficio neto social en cada uno de los escenarios ha sido positivo, estos resultados ponen de relieve la manera general en que los efectos redistributivos negativos (abaratamiento del coste por aparcar, incentivando el uso del coche) dentro de un enfoque sostenible pueden llegar a ser muy importantes, dando soporte a la idea de que un método basado en un CBA y con solo medidas de *pricing*, da prioridad a la eficiencia del sistema. Es decir, en los escenarios donde se ha reducido la tarifa de parking, los usuarios de coche disponen de más ventajas para usar sus vehículos en zonas donde el transporte público es muy competitivo.

En la Figura 7.31 se puede observar el comportamiento del beneficio que un usuario medio obtendría en cada escenario debido a los ahorros en los tiempos de viaje y en los costes de operación del coche (gráfico de la izquierda). También se muestra el recaudo medio por persona del sistema (derecha), donde se nota claramente que los escenarios que presentan pérdidas (recaudos negativos en comparación con el escenario base) son en donde se ha reducido el coste del aparcamiento. Así que desde el punto de vista de la 'eficiencia' definida previamente, los escenarios [P+A] y [P+A+TP] ingresan menos dinero por persona que el escenario base, dejando que esa diferencia vaya directamente al beneficio de los usuarios del coche.

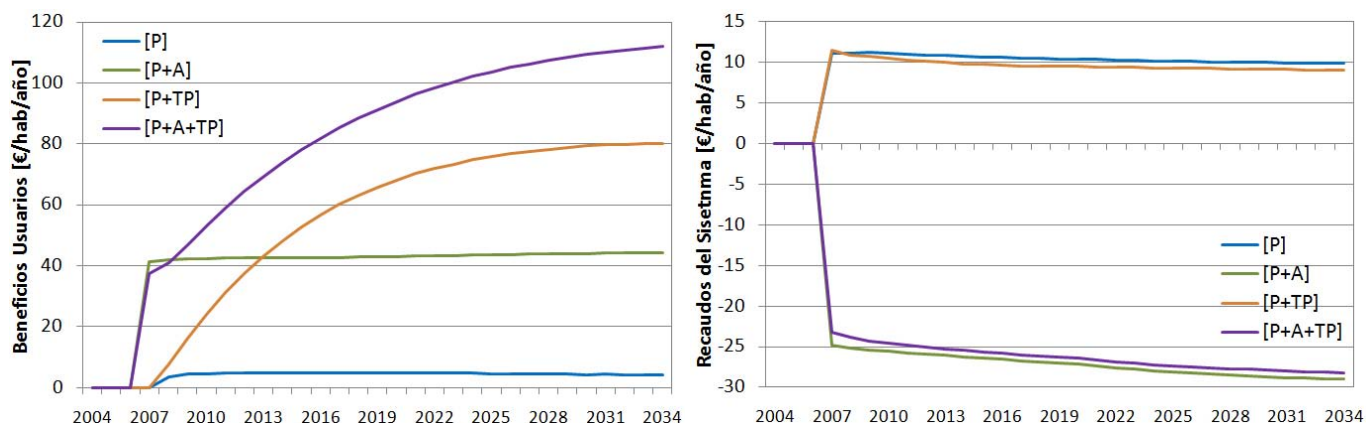


Figura 7.31 Eficiencia de las Medidas – CBA

Desafortunadamente, al no contar en el momento con la información detallada relacionada con el monto de las subvenciones al transporte público, no es posible distinguir, de forma detallada, cuál sería el escenario más eficiente en términos puramente económicos. Sin embargo, suponiendo un subsidio medio de 116 €/hab para los modos ferroviarios y 56 €/hab para los autobuses (Monzón et al., 2009), y que dichas subvenciones aumentan de la misma forma que aumentaría el coste de operación del transporte público, tenemos que los ratios de beneficios entre costes de operación del transporte público (Tabla 7.10) aumentan cerca de 380% para los escenarios [P] y [P+A]; y entre 200 y 220% para los escenarios [P+TP] y [P+A+TP].

Entonces, analizando los ratios de eficiencia de los beneficios obtenidos y los costes de operación del TP entre el recaudo, es posible concluir que el escenario [P+TP] es quien presenta los mejores indicadores, aunque no necesariamente tiene el valor de la función objetivo más alta. Estos resultados van en la misma línea de algunos autores como Ferrari (2005), que dice que el cobro de una tasa por congestión puede ser utilizada en zonas urbanas, no solamente como una medida para mantener los índices de congestión y contaminación a un nivel aceptable, sino también para generar un beneficio extra a los usuarios del sistema de transporte.

También se observa que gran parte de los beneficios de los usuarios depende sustancialmente de la reducción de las tarifas de aparcamiento en los escenarios [P+A] y [P+A+TP]; pero por otro lado también dependen en gran medida de la reducción del coste percibido del transporte público debido a la disminución de la congestión ([P+TP]). La efectividad de las medidas probadas (ratios) puede ser baja o incluso negativa si las estrategias no incluyen medidas que se complementen entre sí.

En zonas urbanas de gran tamaño y con altos niveles de congestión, como es el caso de Madrid, con la implementación de medidas combinadas, el coste percibido del transporte público por parte de los usuarios puede reducirse significativamente por la disminución de la congestión y el aumento de las frecuencias de paso. Así, la eficiencia de un paquete de medidas puede ser vista como un medio, no solamente para reducir la congestión, sino también para mejorar el bienestar de sus habitantes en los tres aspectos de la sostenibilidad: reduciendo las emisiones (ambiental), mejorando a accesibilidad al TP (equidad) y reduciendo el uso del coche (eficiencia del sistema).

7.3.6 Distribución de Beneficios

Otra de las ventajas de esta metodología, es que se pueden hacer análisis geográficos del comportamiento de los indicadores analizados, según la zonificación del área de estudio y mediante la utilización de herramientas de GIS. Bajo la evaluación CBA se ha encontrado que las zonas con los ingresos medios más altos (zona noreste de Madrid y corredor de la A6, ver Figura 7.5) son quienes se verán más favorecidos con la implementación de un peaje (Figura 7.32), gracias a su mayor capacidad de pago y la menor congestión en los viajes hacia el centro, lo que hace que sus viajes sean más rápidos. En cuanto al escenario [A], como es de esperarse, el mayor beneficio recae principalmente sobre los habitantes del municipio de Madrid.

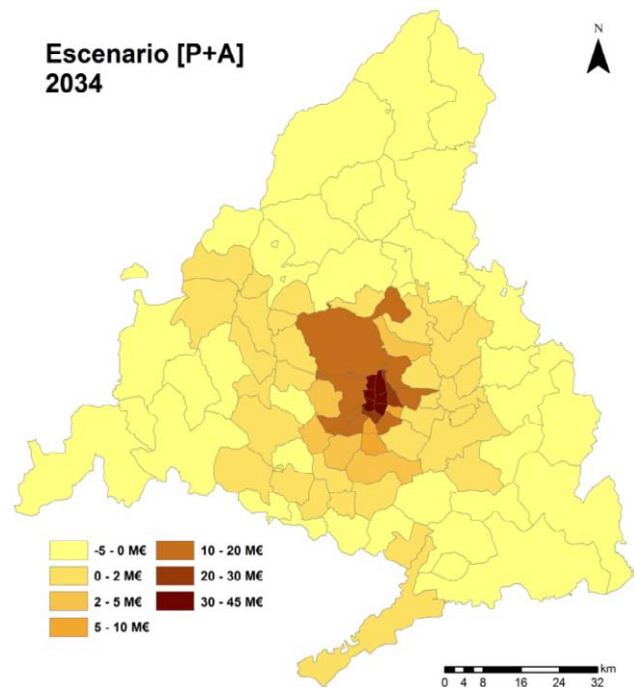
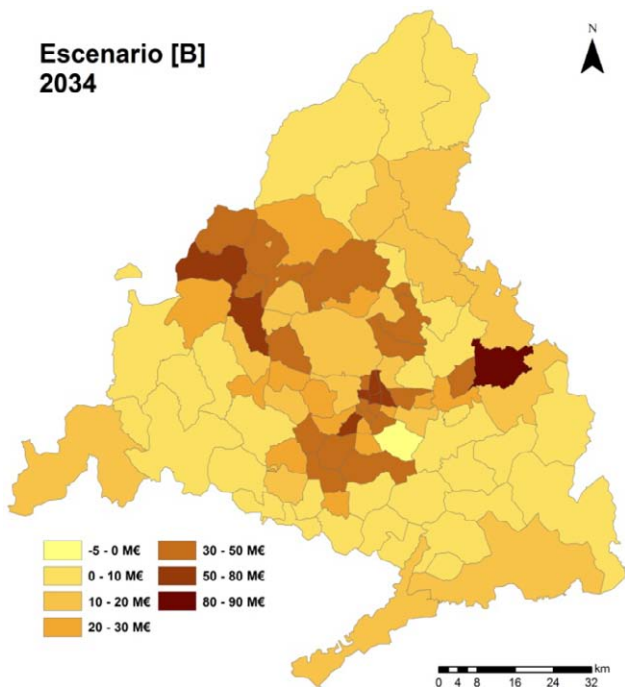
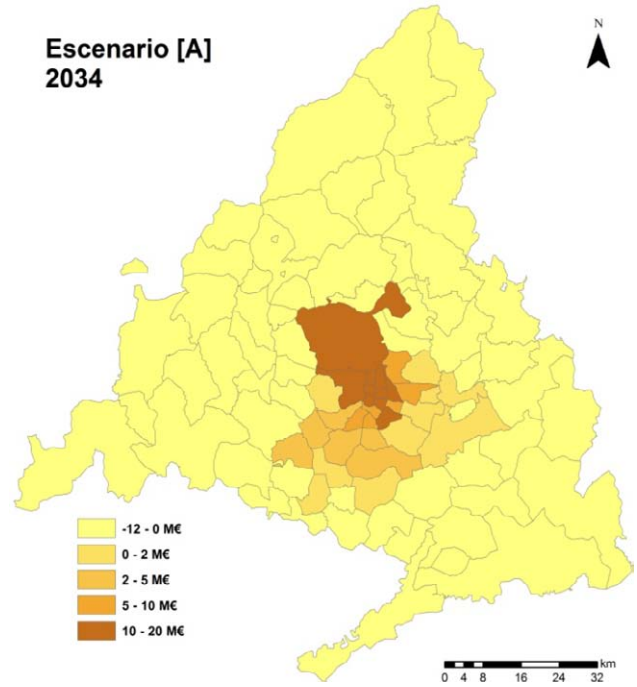
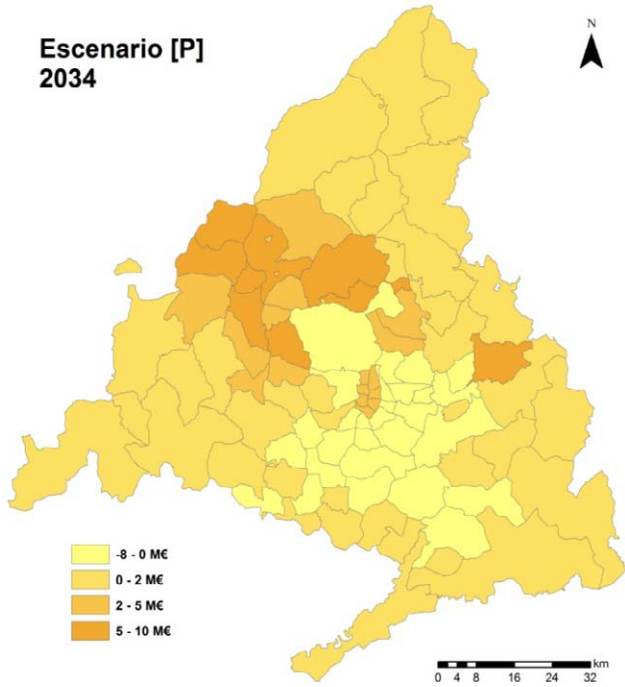
Los beneficios en el escenario [B], son distribuidos de una forma más equitativa dentro de una zona más amplia de la Comunidad de Madrid. En este caso se puede ver la forma en que algunas zonas de la corona más externa obtienen beneficios importantes debido a la reducción del tiempo de espera del transporte público. Sin embargo, al igual que en el escenario anterior, las zonas más beneficiadas en este escenario es la zona noreste de Madrid.

Los beneficios netos para el escenario [P+A], son mucho más importantes que en los escenarios [P] y [A], teniendo como los mayores beneficiarios a la zona limitada al municipio de Madrid, en particular a los residentes de la Almendra. En este caso, la combinación de una tasa de peaje con una reducción en el cobro por aparcar, va en beneficio directo de las zonas donde se aplican las medidas.

Desde una perspectiva global, este esquema combinado presenta beneficios netos, produciendo ganadores y perdedores. Los claros ganadores serán los residentes quienes disfrutarán de una menor congestión en el centro de la ciudad y los usuarios de transporte público, particularmente los de autobús, ya que verán reducidos sus tiempos de recorrido y disfrutarán de una mayor accesibilidad. Claramente, los perdedores serán quienes viajen al centro en coche, debido al incremento en sus costes de viaje. También se beneficiarán quienes pagan plazas de aparcamiento privadas, ya que en comparación, sus costes en este nuevo escenario serían menores.

Por otro lado, algunos autores sugieren que bajo ciertas circunstancias, la introducción de un sistema combinado de implementación de peaje urbano y abolición de tarifas de aparcamiento, podría reducir la congestión en las horas punta, preservando al mismo tiempo el centro de la ciudad como concentrador de actividades y aumentando los niveles de equidad (Bonsall y Young, 2010). Sin embargo, la eliminación de las tasas de aparcamiento crearía una situación que en general beneficiaría principalmente el uso del coche en una zona donde el transporte público es altamente competitivo y eficiente.

De otro lado, estos resultados van en la misma línea de otros autores (Albert y Mahalel, 2006), quienes dicen que los usuarios del coche son más sensibles a los cobros por congestión y estarían dispuestos a cambiar sus hábitos (ya sea en modo o destino) para evitar estos costes adicionales. La sensibilidad a pagar por aparcar es mucho mayor, por lo que la eficacia de un sistema de cobro por congestión en cuanto a la regulación de la demanda también es mayor.



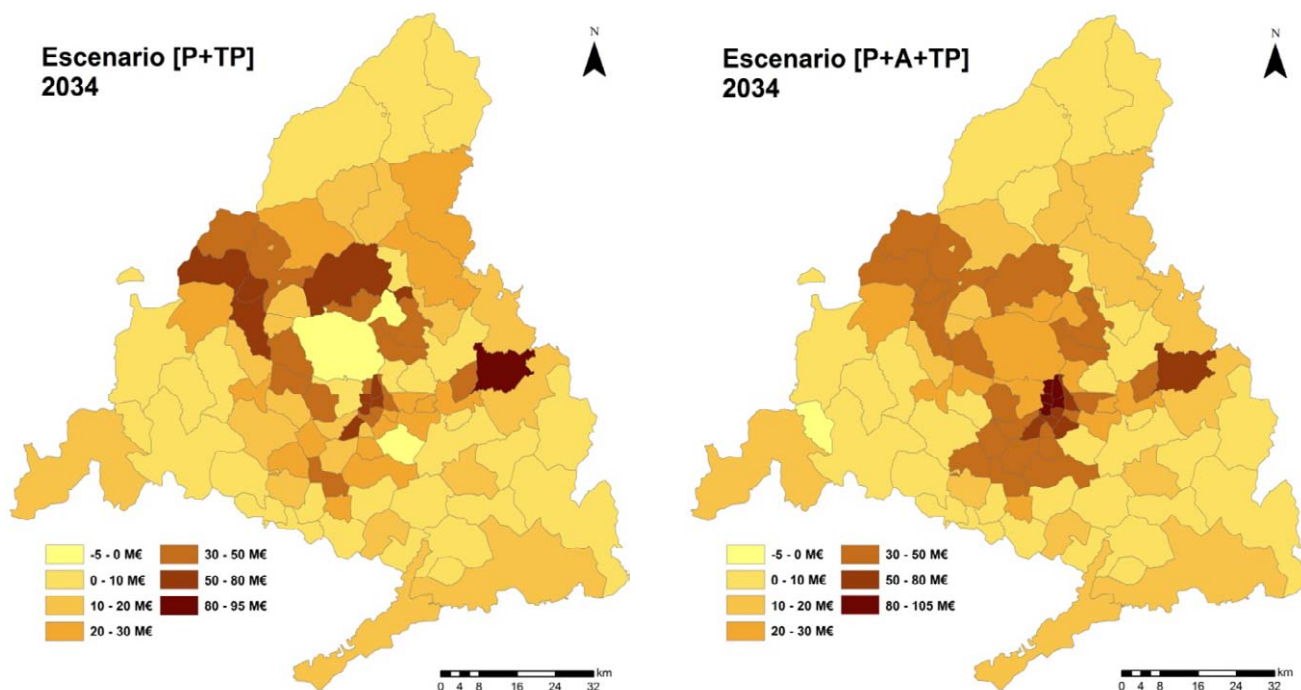


Figura 7.32 Beneficios Netos por Zona

Para corroborar estas hipótesis, al realizar un ejercicio paralelo, evaluando un escenario alternativo donde el coste por aparcar es cero, el valor óptimo de la tarifa de peaje subiría a 3.95 € (+16%), con un excedente social neto igual a 359 M€. Bajo la metodología MCA esta tarifa sería de 20 € para la hora punta y 6.5 € en la valle, dando como resultado un valor de 48.34 para la función objetivo MCA¹. Estos resultados plantearían la pregunta acerca de si reemplazando una tasa por otra, se reduciría la congestión en las zonas de aplicación y en general, se produciría un mejor esquema global.

Para este caso en concreto, reemplazar una tasa por otra, reduciría un poco la congestión en el centro de Madrid en la hora punta, pero durante el resto del día la congestión aumentaría mucho más de lo que disminuye en las horas punta, y el uso del transporte público decaería en favor del coche. En consecuencia, debido a las características definidas en los escenarios evaluados, no es conveniente quitar una tasa que opera todo el día (aparcamiento), para reemplazarla por una que solo opera en ciertos momentos del día (peaje en la hora punta) y que tendría una cobertura menor, ya que quienes ya están en el centro (residentes, por ejemplo), no tendrían ningún tipo de restricción para usar el coche. Así que las circunstancias de las que hablan estos autores, son elementos fundamentales a tener en cuenta en el momento de diseñar e implementar estas políticas.

Aparte de las barreras logísticas y tecnológicas inherentes a su implementación, un inconveniente es la inequidad presentada, ya que para que un sistema de transporte sea equitativo, lo ideal sería tarificar los viajes según su recorrido o duración. Por lo tanto este tipo de medidas siempre contendrán algunos elementos que distorsionan un cobro justo o que con la tecnología disponible sería imposible o demasiado costoso de medir y controlar. En segundo lugar, en la práctica existe un grupo de usuarios del coche que se escapa a esta regulación: quienes disponen de parking privado. Y en tercer lugar, los efectos de *spillover* adversos sobre las áreas cercanas, deberán tenerse en cuenta.

¹ En este resultado, el valor de la función objetivo sería ligeramente mayor que en E1 (48.21 frente a 48.34).

Teniendo en cuenta el análisis anterior, en los escenarios [P+TP] y [P+A+TP], el beneficio es mayor en las zonas externas, principalmente en el oeste y noreste de la región de Madrid. Sin embargo, también en estos casos, las zonas con los mayores ingresos son quienes se verán más favorecidas en general, sin importar el escenario.

La distribución de beneficios totales se puede ver en la Figura 7.32. Adicionalmente, en el Anexo 5 se muestran resultados adicionales obtenidos por la metodología, que permiten estudiar las diferencias geográficas de la distribución de población y empleos, los beneficios por ahorros de tiempo de viaje en cada zona y la distribución modal (por modo prioritario) según el origen del viaje.

7.3.7 Análisis de Sensibilidad

La incertidumbre puede surgir en los escenarios en donde se están probando las estrategias, en la estructura, el tiempo y secuencia de los valores de las medidas, en los impactos previstos y en los pesos que se van a asignar a los indicadores individuales. Una de las formas más comunes de tratar esta valoración es mediante un análisis de sensibilidad y consistencia.

La estrategia a analizar se prueba en relación con las variaciones producidas en un escenario, o variando las hipótesis del modelo, y si los resultados empeoran bajo algunas de esas situaciones, es señal de que es menos consistente y, por tanto, más arriesgada (May et al., 2005). Como se ha visto en el Capítulo 5, este tipo de análisis se encarga precisamente de estudiar la forma en que la solución óptima obtenida y la función objetivo, son afectadas por el cambio (dentro de un rango predeterminado) de uno de los parámetros (medidas), manteniendo fijos los restantes.

Básicamente, el análisis de sensibilidad se ha utilizado para examinar los efectos de cambios en tres áreas diferenciadas del problema:

- Los valores óptimos hallados
- Los pesos de la función de sostenibilidad
- El valor del tiempo¹

Hay dos maneras de estudiar la incertidumbre de una solución respecto a cambios en alguna de las áreas antes mencionadas. La primera de ellas sería volver a resolver todo el problema cada vez que alguno de los datos originales se haya modificado. Obviamente, utilizando este método, podría llevar bastante tiempo determinar todas las variantes cuando nos encontremos ante un conjunto amplio de posibles cambios. La otra forma consistiría en, una vez resuelto un problema, analizar cómo afectaría a la solución obtenida y al valor de la función objetivo la variación dentro de un rango “tolerable”, de uno de los parámetros, manteniendo fijos los restantes (Moura, 2005). Por supuesto, en caso de que se quieran estudiar los efectos de la variación de más de un parámetro (o de un parámetro más allá del rango de tolerancia) se deberá reprogramar el problema con los nuevos datos.

De esta manera, el planteamiento adoptado en los resultados anteriores puede ser formalizado a través de un análisis de sensibilidad o multivariante, utilizando el análisis de Monte-Carlo (Metropolis y Ulam, 1949). Este enfoque se realizó bajo las siguientes hipótesis:

- Cierta número de medidas fueron simuladas a la vez, dentro de un rango de valores factibles, obteniendo resultados en términos de ganancias en el bienestar general y en la sostenibilidad.

¹ Debido al gran peso que tienen los ahorros del tiempo dentro de la función objetivo.

- El valor óptimo de cada medida maximiza la función objetivo. Este óptimo puede ser un óptimo global o encontrarse dentro de la frontera definida por los rangos de valores factibles.

Se debe analizar la forma en que variaría el resultado de la función objetivo en función de cada una de las variables optimizadas. Para hacer el análisis de sensibilidad es necesario definir el tipo de distribución de probabilidad que cada parámetro adoptaría. La distribución adoptada es la **Distribución Uniforme Aleatoria** en la que es igualmente probable que la variable analizada tome cualquier valor dentro del rango definido.

Los resultados mostrados aparecerán enmarcados dentro de unos límites de confianza. Estos límites significan por ejemplo, que en un nivel de confianza igual a 50, el 25% de las simulaciones tendrán valores mayores que el límite superior de ese nivel de confianza. De igual forma, el 25% tendrán valores menores que el mínimo.

En consecuencia, el enfoque asumido para el análisis de sensibilidad es el siguiente:

- Se ha simulado un conjunto de diferentes medidas de transporte dentro de un rango factible de valores, donde los resultados se han dispuesto en términos de ganancias de bienestar sobre la base de un análisis coste-beneficio dinámico. Los resultados también se han dispuesto en términos de la función de sostenibilidad, utilizando una evaluación multicriterio.
- El nivel óptimo de cada medida (o combinación de ellas) se ha identificado como aquel que maximiza la función objetivo.

En primer lugar se ha analizado la forma en que variaría el beneficio total en el escenario más sencillo, en donde solo se ha optimizado una sola variable: los escenarios [P], [A] y [B]. A manera de ejemplo, en la Figura 7.33 se muestra el cambio producido en el beneficio social como consecuencia de la variación de la tarifa de peaje ([P]).

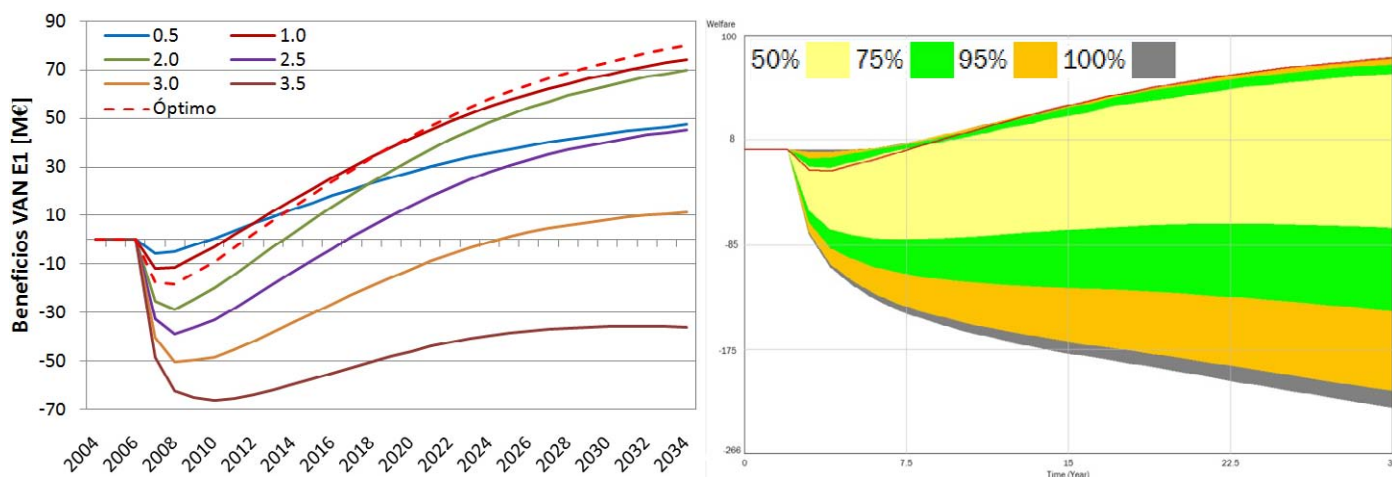


Figura 7.33 Sensibilidad en la Función Objetivo CBA (E1) al Variar el Peaje

Este gráfico muestra la incertidumbre en el valor actual neto de la función de bienestar a lo largo del tiempo. Para la figura de la derecha, en cualquier momento, la mitad de las simulaciones han generado valores dentro de la región del 50%, tres cuartas partes de las simulaciones dentro del 75% y así sucesivamente. Hay dos cosas que valen la pena resaltar de estos resultados: la primera, como es de esperarse, la incertidumbre aumenta con el tiempo (un resultado natural de carácter acumulativo del cálculo del VAN). En segundo lugar, los percentiles no son uniformes a lo largo del tiempo, lo que quiere decir que el

comportamiento de la función, depende de la interacción entre todos los parámetros del modelo, los cuales van cambiando con el tiempo debido a la implementación del peaje. También de acuerdo con la figura anterior, solamente un valor de peaje entre 0 y 3 € tendrán un impacto positivo dentro de la función objetivo. Fuera de ese rango, se presentarán pérdidas.

Los límites exteriores de la incertidumbre (100%) indican los valores máximos de aproximadamente 80 millones de euros y un valor mínimo de aproximadamente -230 M€ al final de la simulación. Observe la posibilidad de una disminución importante en los beneficios de la sociedad, al variar la tarifa de peaje. La simulación óptima (peaje=1.45 €, figura derecha) se dibuja como una línea roja. En la figura de la izquierda, el valor óptimo se representa por medio de la línea punteada.

Para todo el periodo de evaluación, se observa que la posibilidad de que se presente un resultado negativo es importante, en particular al sobrepasar el límite los 3 € en la tarifa. A partir de ese valor, los ahorros de tiempo y los ingresos provenientes del recaudo, no compensan el coste que deberán asumir los usuarios.

De forma análoga, en la Figura 7.34 se muestra el mismo análisis, pero para la función objetivo MCA en el mismo escenario. A diferencia del gráfico anterior, en este caso es notable la menor sensibilidad de la función con respecto a la variación de las tarifas de peaje, ya sean en hora punta u hora valle, ya que la diferencia al final entre el valor óptimo hallado y los demás, no llega a superar el 1.5%. Esto se debe a que esta metodología mide el cambio relativo de cada variable con respecto a su valor inicial (año 2004) y además no hay parámetros adicionales bastante sensibles para los usuarios como el valor del tiempo.

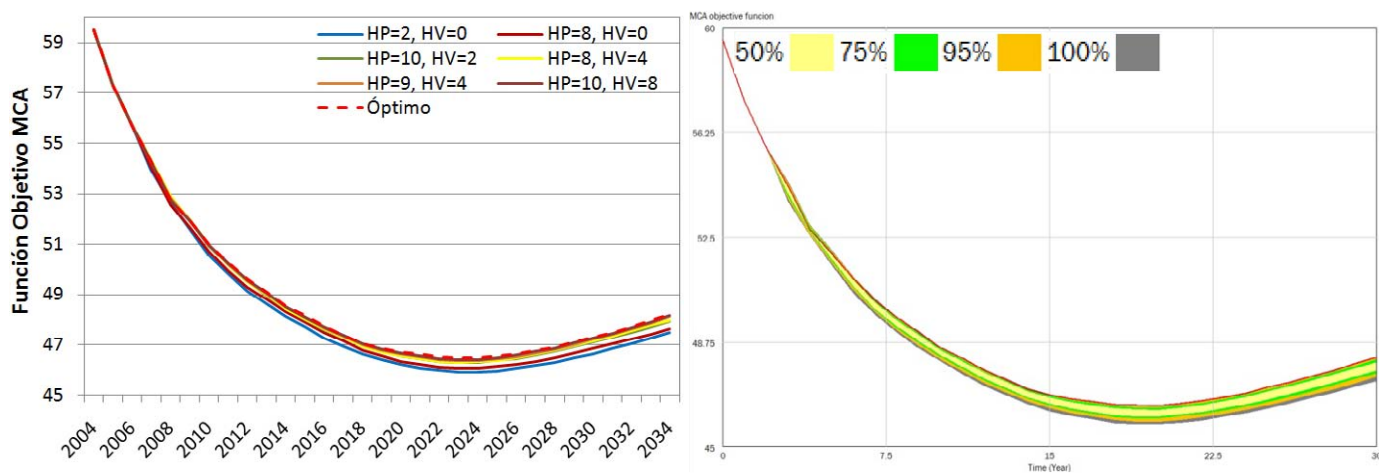


Figura 7.34 Sensibilidad en la Función Objetivo MCA (E1) al Variar el Peaje

En este caso, comparando el mismo escenario [P] bajo los dos tipos de evaluación diferentes, es claro que la implementación de una tarifa por ingresar al centro de la ciudad en coche es mucho más sensible y tiene un impacto mayor dentro del sistema de beneficios y costes de un sistema de transporte que dentro de un índice de sostenibilidad, dónde se le ha dado similar importancia a los tres aspectos del desarrollo sostenible.

Esta poca variación en este escenario también se debe a que los viajes al centro van perdiendo su peso relativo en relación con la movilidad total a lo largo del tiempo. Esto quiere decir que debido al aumento de la movilidad en las zonas externas de la Comunidad de Madrid, el efecto que produce la implementación de una restricción por acceder al centro se va diluyendo a medida que el centro pierde atractividad como destino y estos viajes son

sustituidos por unos de mayor longitud en zonas periféricas, lo que hace que el descenso en el uso del coche a nivel regional no sea importante.

Las simulaciones optimizadas (líneas rojas) se encuentran justo en el límite superior del rango de valores posibles. Esto confirma que la solución encontrada es óptima para cada caso. Para los otros escenarios analizados se realizó un ejercicio análogo. Los resultados se pueden consultar en el Anexo 5.

Por otro lado, en la Figura 7.35 se puede ver la variación de la función MCA y de los tres criterios de sostenibilidad, al variar entre un rango de 0 a 1 los valores de los diferentes pesos dados a cada criterio. De este resultado se puede concluir que los pesos son un factor clave para comparar los diferentes aspectos de la sostenibilidad y según sus valores tendremos mejores o peores resultados, según los expertos consultados.

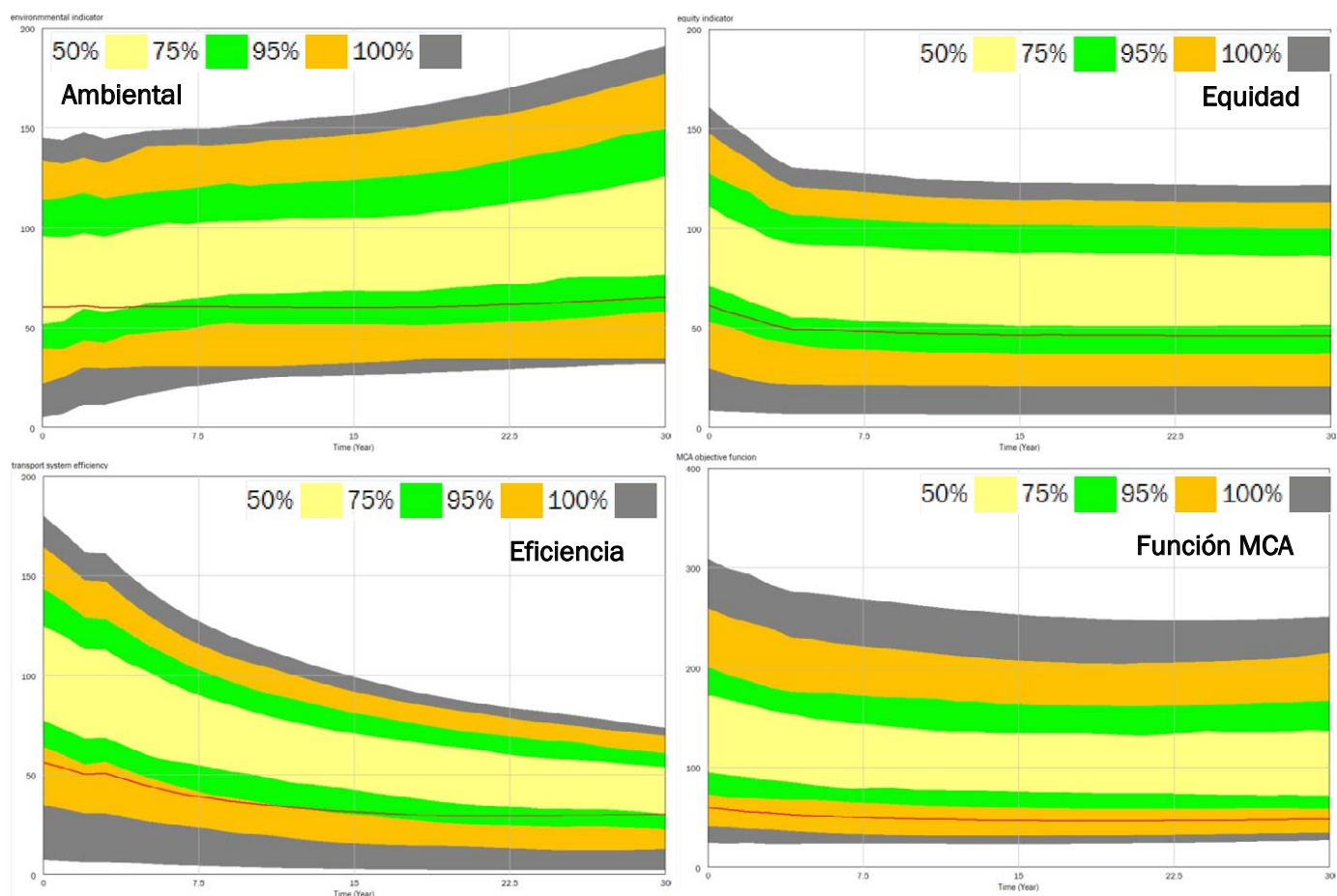


Figura 7.35 Sensibilidad Pesos Indicadores Función MCA

La incertidumbre de los pesos de la función MCA, tiende a comportarse de manera más o menos uniforme. Esto quiere decir que estos pesos solamente definen la importancia relativa de un criterio sobre otro, dando un mejor o peor resultado dentro de la escala definida previamente. En este caso, si los pesos dieran una mayor importancia al criterio ambiental sobre el de la eficiencia del sistema, la función objetivo mostraría una tendencia hacia mejores resultados.

Pasando a otras variables importantes y según varias investigaciones, uno de los impactos más importantes en la modelización y evaluación de proyectos de transporte, son los ahorros de tiempo de los viajeros (Salling y Leleur, 2007; 2011). Estos elementos incluyen tiempos de

espera, de recorrido, de acceso y de transbordo, entre otros. En este sentido, viendo las incertidumbres mostradas en la Figura 7.36, donde se observa el cambio en el bienestar debido a la variación del valor del tiempo de viaje (motivo trabajo) entre -50 y +50%, es claro el fuerte efecto que tendría este valor sobre el resultado final.

Al realizar un ejercicio análogo sobre la sensibilidad del valor del tiempo para motivos diferentes al trabajo (tiempo de ocio), se han obtenido resultados similares. Nuestros resultados se pueden comparar con los obtenidos por el uso de un modelo de simulación dinámico en red (de Palma et al., 2005), aunque aparte del comportamiento de los patrones de viaje, se debe tener un cuidado especial con los valores del tiempo de viaje.

La aplicación del análisis de sensibilidad en el impacto del valor del tiempo, se ha evaluado mediante el beneficio potencial de la sociedad debido a la implementación de estrategias de transporte cuyo objetivo es reducir los tiempos de viaje, en los diferentes modos analizados, en comparación con el escenario de referencia.

Viendo los resultados de la Figura 7.36, es claro que con pequeñas variaciones del valor del tiempo, se producen grandes cambios en la función objetivo. Esto indica la importancia de definir cuidadosamente estos valores, ya que de ahí dependerá en gran medida el resultado final.

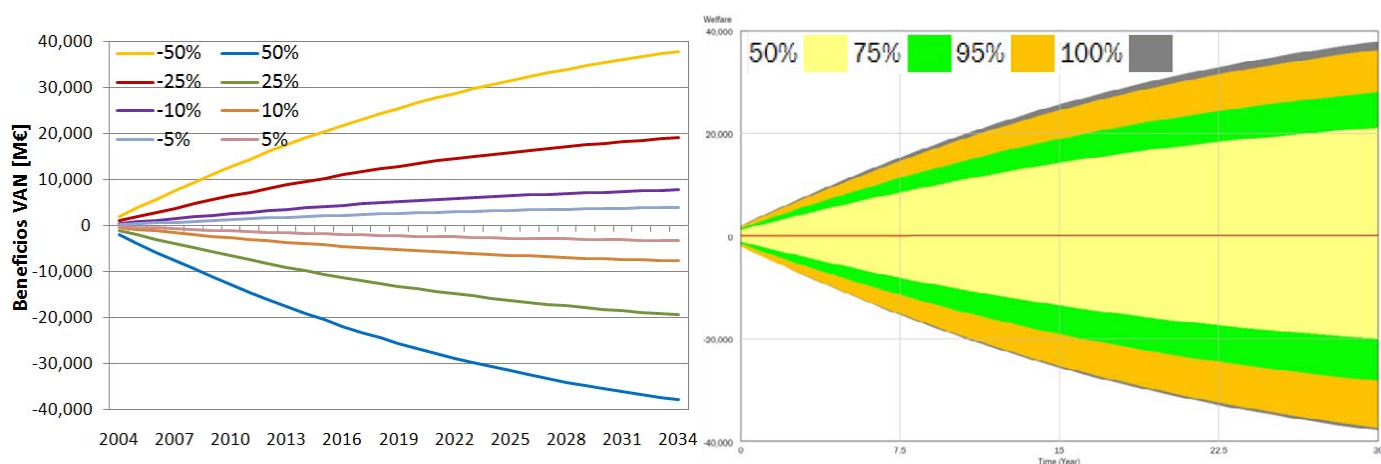


Figura 7.36 Sensibilidad Función CBA al Valor del Tiempo

Finalmente, la adaptación del análisis de Monte-Carlo en investigaciones relacionadas con el transporte, debe basarse en el mejor conocimiento posible de la situación estudiada, ya que claramente los beneficios de los usuarios obtenidos por menores tiempos de viaje, dependerán de la calidad de los modelos de transporte.

La utilización de esta técnica integrada con un modelo LUTI, proporciona un amplio intervalo de resultados alternativos de cada escenario, lo que permite conocer el impacto potencial de casi cualquier parámetro dentro de la solución final. También proporciona información acerca de la magnitud del impacto de las hipótesis planteadas en el inicio del estudio. Entonces, esta metodología integrada puede ser una herramienta que ayude a los responsables de la toma de decisiones para hacer frente a la incertidumbre de manera explícita.

Este análisis también permite conocer en cierta medida el riesgo que cada estrategia tendría en la sostenibilidad a largo plazo y permitirá la identificación de parámetros sensibles, los cuales pueden ser objeto de estudios más detallados.

Es difícil concluir con total certeza qué componentes pueden influir en el resultado final con la menor incertidumbre: el valor del tiempo, el rango de tarifas o la importancia relativa de los

pesos de los tres criterios de sostenibilidad. También existen otros elementos influyentes, como el valor de las emisiones, accidentes o combustibles.

Un elemento a tener en cuenta es la evolución de la población, el índice de motorización y el nivel de empleo.

7.4 RESUMEN Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta la evolución negativa de la movilidad en la Comunidad de Madrid (escenario base), al considerar las estrategias a implementar que intenten mitigar esa tendencia, se han tenido en cuenta los siguientes elementos:

- Reducir la necesidad de viajar, por lo menos viajes largos (que son los más propensos a usar el coche).
- Mejorar el sistema del transporte público.
- Mejorar la eficiencia de la red vial (menos congestión).
- Racionalizar el uso del coche y de su consumo energético.

Aunque estos puntos parezcan objetivos, no lo son. Cualquier ciudad o zona urbana desearía que esto sucediera. Pero a diferencia de ser un fin, es necesario partir de estos preceptos para alcanzar los objetivos propuestos. Sin embargo, si uno de estos puntos no se cumple, que lo haga otro puede ser aún mucho más complicado: si no se logra reducir el uso irracional del coche en las zonas urbanas, la posibilidad de mejorar la eficiencia de la red vial se vería seriamente comprometida, incluso la mejora del transporte público.

Una buena estrategia debe contener políticas destinadas a contemplar estos cuatro puntos. Es más, un elemento clave en el diseño de estrategias eficaces es determinar la forma en que las políticas interactúan, así como el equilibrio entre ellas.

En consecuencia, el desarrollo y puesta en práctica de esta Tesis Doctoral ha permitido llevar a cabo un **análisis integral** de proyectos de planificación urbana a **largo plazo** desde **dos** puntos de vista diferentes, teniendo en cuenta las incertidumbres relacionadas con los parámetros claves en el desarrollo urbano y **permitiendo comparar** los efectos entre estrategias. En el caso práctico se ha visto como una ventaja, que las evaluaciones tipo CBA o MCA puedan ser complementadas por un análisis de riesgos. Sin embargo, a pesar que el análisis de Monte Carlo es una técnica ya establecida en el campo de análisis de riesgos e incertidumbres, aún es necesario profundizar más en su desarrollo e integración con el área de planificación del transporte.

La aplicación práctica de esta metodología, dependerá de la estructura particular del sistema de transporte, la distribución geográfica de los habitantes y puestos de trabajo y los patrones de movilidad. Para este caso de estudio, Madrid tiene un sistema de transporte público que funciona bien y con tarifas moderadas comparadas con otras ciudades europeas. Según los resultados obtenidos, las tasas propuestas para las medidas de *pricing* deberán ser más altas en horas punta e implementadas en el centro de la ciudad, donde la accesibilidad del transporte público es mayor. Esto va en concordancia con resultados similares obtenidos en otras ciudades europeas con sistemas de transporte similares (Mattsson y Eliasson, 2006; Rotaris et al., 2010).

Uno de los problemas del diseño de estrategias integradas es el **gran número** de diferentes tipos de medidas que pueden utilizarse (§7.2.5). Esto tiene como consecuencia, la **dificultad** de predecir la forma de interactuar de las diferentes combinaciones en el largo plazo y aún

más difícil es estimar su potencial, teniendo en cuenta que entre más medidas se combinen, mayor dificultad habrá en estudiar sus impactos e incertidumbres. He aquí la **ventaja** de esta metodología: se da un paso en la dirección de permitir este tipo de análisis, así como su potencial para **analizar** sinergias

Teniendo en cuenta lo anterior, es imposible proponer un conjunto de medidas específicas que satisfagan las necesidades de todas las ciudades. Esto dependerá en gran medida de las condiciones particulares de cada ciudad. Sin embargo, existen unas normas generales sobre el tipo de medidas que es probable que tengan un mayor impacto sobre determinados objetivos.

Por ejemplo, la implementación de un peaje urbano se complementa con una mejora en la prestación del transporte público, obteniendo mayores beneficios, bajo los dos tipos de evaluación utilizadas. También es probable que estos escenarios se complementen aún más con medidas de usos del suelo, donde se eleven las tarifas de peaje según la distancia de recorrido, beneficiando la generación de viajes cortos, en transporte público y en zonas de desarrollos mixtos. Estas estrategias deberían ir acompañadas de medidas que compensen a los sectores más vulnerables.

Al implementar las diversas estrategias, en principio la sociedad en su conjunto se ha visto beneficiada en todos los casos estudiados, pero al entrar en el detalle de los resultados, se ha encontrado evidencia que unos individuos han sido más beneficiados que otros. Incluso hay evidencias que algunas zonas han sido afectadas negativamente. En este caso, si por alguna medida del gobierno, la porción de población que resultó beneficiada pagara una compensación a quienes resultaran afectados, estos últimos también se verían favorecidos por la medida y así la sociedad en su conjunto resultaría ganadora. El problema es que en la práctica, estas compensaciones no se pagan nunca.

Comparando los resultados obtenidos entre los dos tipos de evaluaciones realizadas, es claro que el CBA da gran prioridad a la eficiencia del sistema, la cual consiste en gran medida en el ahorro de tiempos de viaje. Estos resultados relacionados con la baja sensibilidad de las externalidades, son similares a los obtenidos por otros autores en investigaciones similares (Timms et al., 2002). En este caso, será muy importante el valor asumido del coste del tiempo, ya que de esta cifra dependerán los resultados. Por otro lado, la evaluación MCA depende de valores subjetivos que nos dicen qué tan importante es cada criterio de sostenibilidad. En este caso, según quien defina el valor de los pesos de los indicadores, los resultados se orientarán en uno u otro sentido.

Otra diferencia importante entre los dos tipos de evaluación es la forma en que se han medido sus resultados finales: en CBA se ha utilizado un valor acumulado (VAN) a lo largo de los 30 años de evaluación, mientras que en la MCA se mide el cambio del indicador del año 30, con respecto al año 0, dentro de un rango definido.

Como solamente se han probado medidas relacionadas con el transporte, encaminadas a mejorar su situación, los mejores resultados se han producido en este campo: tanto en CBA como MCA, los indicadores que muestran un mejor desempeño son los relacionados con la eficiencia del sistema (distribución modal y patrones de movilidad). De esta manera, sería importante implementar, probar y optimizar otro tipo de medidas relacionadas con otros campos con el fin de observar sus impactos sobre los otros aspectos de la sostenibilidad. Por ejemplo, al introducir medidas de incentivos al uso de coches "limpios" (eléctricos, híbridos), al igual que un transporte público más eficiente energéticamente hablando, seguramente los indicadores ambientales experimentarán una mejoría notable.

Los resultados también muestran que la evaluación MCA dependerá de la información del proyecto (objetivos) que se quiera llevar a cabo. En este sentido, algunos autores dicen que

esto podría afectar el proceso de toma de decisiones cuando se utiliza la participación del público como un dato de entrada en este proceso (Tudela et al., 2006).

Para terminar, existe una gran variedad de literatura en la actualidad que proporciona resúmenes interesantes, en donde se sugieren formas en que los diferentes tipos de medidas pueden complementarse unos a otros según sus características propias; tal es el caso del Programa de Investigación de la Unión Europea en Usos del Suelo y Transporte (EU, 2010).

También está la página web KonSULT (ITS, 2010), donde se han considerado cerca de 60 tipos de medidas agrupadas en seis categorías: usos del suelo, oferta de infraestructura, gestión y regulación, información, cambios de comportamiento y *pricing*. Allí se ha evaluado la contribución potencial de varias medidas en diferentes contextos. También se intenta identificar aquellas medidas que se complementan unas a otras reforzando los beneficios (sinergias), mediante la reducción de barreras financieras y políticas. También hay literatura que demuestra que la combinación de varias medidas con tasas o impuestos, permite asegurar las necesidades actuales del transporte sin comprometer las necesidades o recursos de generaciones futuras (Santos et al., 2010a).

7.4.1 Simulación del Modelo

Como una forma práctica de visualizar el resultado de esta investigación, en el CD anexo se ha desarrollado una aplicación donde se puede poner en práctica la combinación de las medidas utilizadas de diversas formas.

Esta aplicación tiene tres ventajas principales:

- Visualizar el contenido del modelo MARS (modelo de transporte, usos del suelo, emisiones, etc.) y los modelos de evaluación/optimización (CBA y MCA).
- Simular escenarios combinando las cuatro medidas usadas en el caso práctico, con diferentes valores y periodos de aplicación en el tiempo.
- Ver y analizar las causalidades y ciclos dinámicos de las variables intervinientes.

En el **Anexo 4**, se explica detalladamente la forma en que se puede utilizar dicha aplicación. Para esto es necesario disponer e instalar el archivo “venred32.exe” (*Vensim Model Reader*) en cual se encuentra disponible y libre en la página web www.vensim.com.

7.4.2 Limitaciones de la Metodología

Al ser esta una evaluación de tipo estratégico, no debe confundirse con herramientas más desagregadas y de alcance local. Al utilizar modelos existen riesgos tanto por exceso como por defecto, al interpretar los resultados. El enfoque tradicional, racional y analítico de la planificación (May et al., 2001a), puede conducir fácilmente a un exceso de confianza en los modelos, sin tener en cuenta que éstos no consideran todos los aspectos de la realidad, haciendo que algunos desconfíen de su aplicación. De esta manera, la modelización aquí realizada es usada solamente como un **instrumento para formular estrategias** y en ningún momento se le da el valor de obtener soluciones por sí solo. Las hipótesis con que se han trabajado se han dejado claras y los resultados se han presentado de la manera más sencilla posible.

Las limitaciones de la propuesta metodológica están relacionadas con el modelo de evaluación utilizado y con la asertividad de los resultados obtenidos. Dentro de las limitaciones se tiene:

- Debido a la configuración del modelo MARS y a su nivel de agregación, puede que no sea sensible al impacto de algunas estrategias y no sean captadas por el modelo. Por este motivo, es necesario tener un alto conocimiento del modelo de evaluación y de las estrategias utilizadas.
- No se ha tenido en cuenta la limitación de capacidad del transporte público.
- La configuración del modelo de transporte en MARS, para los viajes de movilidad no obligada, basada en la teoría del presupuesto de tiempo de viaje constante, tiene algunos contradictores.
- Al carecer de un modelo de asignación, se ha desarrollado un modelo agregado en donde la congestión se estima bajo una aproximación de grandes zonas (macrozonas), donde se estiman factores de demanda para cada relación OD. En el caso de medidas de *pricing* no es posible calcular las rutas del tráfico desviado. Además, este efecto no puede ser considerado si las diferentes rutas se superponen (debido a la simplificación del modelo, donde sólo existe una ruta entre cada par origen-destino).
- Debido al nivel de agregación del modelo, los modos alternativos (caminar y bicicleta) entre zonas, no tienen la relevancia suficiente (distancias largas, entre zona y zona que hace que estos modos sean poco atractivos). Sin embargo, estos modos cobran gran importancia en los viajes internos de cada zona, donde será necesario detallar los análisis para este tipo de viajes.

Adicionalmente a las limitaciones del modelo LUTI (MARS), están las dificultades relacionadas con su calibración, en particular con la predicción de resultados a largo plazo. La calibración para el año base fue realizada utilizando técnicas de iteración y modelos de calibración (ver Anexo 4).

CAPÍTULO 8.

CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

TABLA DE CONTENIDO

8.1 CONCLUSIONES FINALES	225
8.1.1 CONTRIBUCIONES.....	225
8.1.2 RESULTADOS Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	226
<i>Evaluación, Optimización y Estrategias Exitosas</i>	<i>226</i>
<i>Los Escenarios y Medidas Evaluadas</i>	<i>228</i>
Peaje Urbano	229
Tasas de Aparcamientos	229
Oferta de Transporte Público	229
Análisis de Sensibilidad.....	230
8.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	230

8.1 CONCLUSIONES FINALES

Esta investigación ha pretendido sentar las bases e iniciar el desarrollo de un proceso integral de modelización estratégica y dinámica de los sistemas de transporte y de usos del suelo, así como su interacción con un modelo de red.

En consecuencia, las siguientes **conclusiones principales** responden directamente las preguntas planteadas en el inicio de la investigación:

- La metodología diseñada y probada muestra su capacidad para evaluar y optimizar a largo plazo diferentes tipologías de políticas de transporte en un contexto complejo de usos del suelo y transporte.
- La modelización dinámica y su aplicación conjunta con una rutina de optimización en un módulo integrado, proporciona un paso adelante en la comprensión y estudio de la compleja relación transporte-territorio-estrategias.
- El efecto hallado de las sinergias evidencia la ventaja que tiene la optimización conjunta de políticas distintas, en diferentes espacios de actuación y en periodos diferentes del día. El método desarrollado permite el análisis cuantitativo de diversas sinergias. Esta evidencia de efectos secundarios positivos sugiere que la integración de medidas aumenta la posibilidad de alcanzar los objetivos deseados. Aunque aún es necesario profundizar en la investigación de los efectos de la aplicación de medidas combinadas, los resultados positivos obtenidos sugieren que es mejor diseñar e implementar estrategias combinadas que de forma individual.
- La metodología permite la localización geográfica (según la zonificación de la zona de estudio) de los efectos producidos por la implementación de políticas.
- Independientemente del tipo de evaluación utilizado, los resultados muestran que los mejores escenarios son aquellos que combinan e integran restricciones e incentivos: en el caso de aplicación de esta tesis, restricciones al uso del coche e incentivos al uso del transporte público.
- La evaluación basada en el análisis coste-beneficio da prioridad a la eficiencia de la red, en lugar de tratar de lograr un equilibrio con los demás aspectos de la sostenibilidad (aspectos sociales y ambientales).

8.1.1 Contribuciones

La principal contribución de esta investigación es haber desarrollado y definido una metodología útil, transparente y flexible, capaz de integrar los aspectos estratégicos de la movilidad sostenible en la evaluación y optimización de diferentes tipos de políticas de transporte. Además, su aplicación permite distinguir los efectos de las estrategias implementadas según su localización geográfica, lo que favorece una visión global de las consecuencias de su aplicación a lo largo del tiempo.

En esta tesis se han identificado dos tipos de evaluación útiles en el análisis y estudio de los complejos sistemas de transporte-territorio. Estos desarrollos proponen una aplicación práctica de la planificación integral desde una visión de la movilidad sostenible.

Dentro del proceso de planificación (optimización y evaluación), las tres dimensiones de la sostenibilidad pueden tenerse en cuenta de diversas formas (sostenibilidad económica y sostenibilidad multiobjetivo) para la elección de alternativas. Además, también se han tenido

en cuenta un conjunto de criterios monetarios y no monetarios que cubren todos los aspectos de las partes interesadas y afectadas.

Se puede por tanto, afirmar que es posible poner en práctica medidas de movilidad urbana sostenible con un enfoque estratégico y mediante el uso de procesos de toma de decisiones sistémicos y multiobjetivo.

8.1.2 Resultados y Recomendaciones Generales

Reflejadas las conclusiones principales y los aportes de la presente investigación, a continuación se hará un breve resumen y comentarios de la aplicación de la metodología en el caso práctico y las principales consideraciones a tener en cuenta en un proceso de planificación estratégica, dentro del marco de una movilidad sostenible a largo plazo.

Dentro del proceso de planificación y toma de decisiones, más importante que la integración, es que una estrategia contenga medidas que creen sinergias entre ellas, con el fin de alcanzar con mayor facilidad y menor esfuerzo los objetivos. Al nivel desarrollado, el proceso de integración y optimización ha tenido en cuenta:

- La integración operacional de diferentes servicios.
- Integración estratégica que relacione las políticas que afectan los diferentes modos de transporte y las políticas que tienen que ver con infraestructura, gestión, *pricing*, etc.
- Integración entre las políticas de transporte y las de usos del suelo.

Algunas estrategias pueden tener impactos negativos sobre algunos sectores y grupos de usuarios, así que se debe hacer una cuidadosa selección de las políticas para mitigar el impacto sobre ellos.

Evaluación, Optimización y Estrategias Exitosas

Debido a las características de agregación de información y de estimaciones a largo plazo de la metodología desarrollada, puede haber cierta resistencia por parte de expertos que critican el valor predictivo de los modelos estratégicos. Sin embargo, es posible desarrollar una metodología integrada de evaluación-optimización cuyas propiedades puedan rebatir estos argumentos, ya que la sostenibilidad es un objetivo estratégico y solo puede medirse a largo plazo.

Entonces, de qué vale optimizar si está en duda la calidad y robustez de la información del modelo dinámico? Este problema puede ser abordado desde otros puntos de vista, aparte del posible valor real de los resultados.

Por esto, la metodología desarrollada se ha centrado en **comparar** diferentes estrategias de transporte, con el fin de estudiar y analizar sus diferencias y patrones de comportamientos a largo plazo, más que centrarse en los resultados de los valores óptimos como tal. La idea principal es conocer la forma y los efectos que políticas de transporte tendrán sobre los indicadores de sostenibilidad seleccionados. De esta manera, se dispondrá de información valiosa para una planificación más efectiva, que de otro modo no estaría disponible.

La modelización estratégica ayuda a describir matemáticamente todo el conocimiento, hipótesis y comportamientos de un sistema de transporte de forma sistemática, relativamente rápida y a costes razonables, aunque sin grandes detalles. Tal como está desarrollada la metodología, la modelización del problema evaluación-optimización es consistente con los objetivos y alcances planteados. Nunca se ha pretendido disponer de una predicción perfecta

ni exacta; sin embargo, se puede afirmar que si se ha trabajado con supuestos válidos y reales, y si se han calibrado los modelos, los resultados obtenidos serán aceptables. El modelizador debe tener en cuenta que el proceso de modelización y optimización es consecuencia de sus hipótesis.

La propuesta metodológica ha sido desarrollada teniendo en cuenta los siguientes elementos, muy importantes en una evaluación estratégica:

- Disponibilidad de un modelo integrado. El objetivo del modelo es que sirva de ayuda en el complejo razonamiento y relaciones causales entre objetivos y medidas.
- Formulación de políticas realistas. No es realista pedir que un modelo incluya todos los procesos relevantes para redes de transporte detalladas. En la práctica, esto significa que las características más importantes de un sistema de transporte deben ser modelizadas, evitando los detalles que no interesen o que se escapen del objetivo.
- Relaciones causales claras. Esto quiere decir que el proceso de optimización no solamente debe producir un resultado claro y coherente, sino también proveer una explicación del por qué dicha solución es óptima en relación con los objetivos y condiciones determinadas. Es por esto que un modelo tipo 'caja negra' no sería el más adecuado para este tipo de análisis. Las relaciones causa-efecto deben ser claras y se deben poder explicar con facilidad.

Es claro que en la modelización de la realidad siempre habrá limitaciones, pero siempre que estas limitaciones se respeten y tengan en cuenta, el poder predictivo de los modelos estratégicos puede ser aceptable.

De otro lado, la implementación de esta propuesta en la práctica habitual de la planificación y modelización, debe tener en cuenta varios pasos:

1. **Entorno Dinámico.** La demanda de transporte ha sido considerada con base en la situación socioeconómica de la población (en términos de generación de viajes para la movilidad obligada y elección modal), así como la accesibilidad a la red de transporte (en términos de impedancias por modo). Estos dos elementos, que operan a escalas de tiempo diferente, hacen que un cambio de ruta o elección modal de un viajero, se produzca relativamente rápido en el tiempo, mientras que un cambio en la capacidad de la infraestructura o en los usos del suelo, lleva mucho más tiempo. Por esta razón, entre otras, el sistema transporte-territorio debe ser estudiado en un entorno de sistemas dinámicos.
2. **Selección y Aplicación de Medidas.** Aunque el logro de los objetivos es siempre lo más importante, es necesario tener en cuenta que no se pueden alcanzar a toda costa. Es decir, no es recomendable, desde el punto de vista del desarrollo sostenible que un objetivo sea alcanzado en detrimento de otro. También es necesario tener en cuenta el coste necesario para implementar cada medida.

La flexibilidad de la metodología desarrollada permite la implementación de diferentes tipos de medidas en espacios geográficos y temporales específicos: en una ciudad completa (por ejemplo la variación de la frecuencia del transporte público, ó un impuesto por contaminación), en una zona en particular (un peaje urbano, restricción de velocidad), o en un momento particular en el día (peajes en hora punta, aparcamientos restringidos). También se pueden aplicar con diferentes niveles de intensidad: peaje distintos según el periodo del día, velocidades diferentes según el tipo de vía, etc.

La aplicación de las políticas probadas en el caso de estudio, han afectado al sistema urbano en al menos tres aspectos:

- Modificando la demanda de viajes
 - Cambiando la oferta de los servicios de transporte
 - Cambiando los costes de transporte
3. ***Integración de Medidas.*** Según las características generales de las medidas modelizadas, se puede decir que ninguna de ellas, de forma aislada, es la solución a los problemas del transporte. Aunque la mayoría de dichas medidas tiene aportes positivos en la reducción de los tiempos de viaje o de las emisiones, también tienen efectos colaterales negativos, particularmente en la equidad o en la accesibilidad. Unas medidas pueden generar beneficios en sus zonas de aplicación, pero sus efectos negativos pueden trasladarse a otros lugares, tal como se ha visto en el capítulo anterior.

Un paquete de medidas cuidadosamente seleccionado, puede hacer frente a más problemas, compensando entre ellas sus efectos negativos y positivos y/o evitando el traslado de los problemas a zonas diferentes. En el caso de estudio, se han implementado medidas restrictivas al uso del coche, pero para compensar esta restricción, se ha aumentado la oferta de transporte público, dando alternativas a los usuarios del coche que se vean más perjudicados. La identificación y selección de las medidas que conformarán nuestro paquete de acciones es el punto clave del éxito en la planificación sostenible del transporte. Es importante tener en cuenta que para cada zona de estudio, se debe hacer un análisis meticuloso para poder escoger el conjunto de medidas más adecuadas.

4. ***Los Beneficios de la Integración.*** Los beneficios de la integración se han visto de varias maneras: el primero es la complementariedad de efectos en las medidas. En segundo lugar, hay medidas que hacen que otras sean financieramente viables, como en los escenarios con excedentes de dinero, donde este beneficio puede destinarse a financiar la operación del aumento de oferta del transporte público. Finalmente y a nivel teórico, el tercer aspecto se refiere a la aceptación popular y a las medidas que por propia naturaleza son rechazadas, aunque su nivel de aceptación entre la gente aumente si sus beneficios revierten a los usuarios, como en los escenarios donde se reduce la tarifa por aparcar.

A pesar que en el caso práctico no se han desarrollado políticas de inversión en carreteras o de usos del suelo, éstas por sí mismas, no producen efectos significativos sobre los objetivos de desarrollo sostenible, aunque pueden usarse en combinación con otras para lograrlo. Las políticas de equilibrio o desarrollo mixto entre empleo y residencia, podrían ser, entre otras, las medidas más eficaces, ya que concentran diversas actividades en una zona y así, reduciendo viajes largos para satisfacer las necesidades diarias.

Analizando los resultados obtenidos, una buena política urbana es aquella que combina elementos que conjuntamente produzcan efectos acumulativos, con un equilibrio entre los objetivos ambientales, sociales y económicos.

Los Escenarios y Medidas Evaluadas

De forma complementaria al apartado anterior, a continuación se describirán las conclusiones más importantes obtenidas en referencia al tipo particular de medidas aplicadas en el caso de estudio.

Peaje Urbano

La implementación de esta medida ha producido cambios importantes en los patrones de tráfico a lo largo del día, así como en la distribución modal en los viajes periferia-centro. Una

parte de la transferencia de viajes ha sido hacia el transporte público, que en el caso de los autobuses, serán los beneficiados por la reducción de la congestión. Otra parte de los viajeros en coche cambiarán de destino, aunque en menor proporción. Este es un buen ejemplo de los efectos colaterales de una medida que busca descongestionar el centro: el primer y mayor impacto de esta medida es disminuir la congestión en el centro y fomentar el uso del transporte público en esta zona. El efecto secundario es que algunas personas cambian su destino, haciendo viajes más largos, con mayor consumo de combustibles y favoreciendo la dispersión de actividades.

Según los resultados, el cobro por congestión puede brindar a los usuarios ahorros importantes en tiempo y mejorar la calidad ambiental. En este mismo sentido, también se generan recursos importantes, los cuales pueden ser utilizados para financiar otros aspectos del transporte que no generen ingresos.

Podemos añadir tres consideraciones básicas acerca de este tipo de medidas. La primera es tener en cuenta el posible impacto negativo que el cobro de una tarifa tendría en la zona de implementación, debido a que los viajeros podrían cambiar sus destinos bajando el valor del suelo, aunque algunos estudios han concluido que este impacto es marginal y que también depende mucho de las características de la zona. La segunda consideración se refiere a la equidad, ya que los usuarios de modos no motorizados y del autobús van a salir altamente beneficiados; los usuarios del tren, un poco menos, pero los usuarios del coche se verán perjudicados al aumentar el coste de sus viajes, en particular los de menores ingresos. Por último, está la parte tecnológica; es decir, la forma en que se controlará el ingreso, el pago y las sanciones a los infractores.

Tasas de Aparcamientos

La disminución de la tarifa del aparcamiento producirá cambios importantes en el patrón de viajes en coche dentro del centro de Madrid, en detrimento del uso del transporte público en una zona donde éste es muy competitivo.

Al disminuir esta tasa se incentiva el uso del coche mucho más que cualquier otro modo de transporte. Su consecuencia es el aumento de la congestión, incluso con tasas de peaje altas. Estos resultados confirman que la sensibilidad al pago por aparcar es mayor que al peaje. Sin embargo, en escenarios donde los valores óptimos reducen la tasa de aparcamiento original, los beneficios obtenidos por los usuarios del coche son tan importantes que este ahorro compensa las pérdidas por el aumento de la congestión y el coste adicional (peaje). Es decir, estos casos particulares dan prioridad a los usuarios del coche, frente a los del transporte público y, en general, de la eficiencia total del sistema.

Tampoco se ha hallado evidencia que la imposición o disminución de estas tasas vaya en contra de la vitalidad del centro urbano, ya que no se aprecian cambios importantes en la distribución de actividades con las nuevas tarifas en vigor (Ver Figuras 5.23 y 5.24 del Anexo 5). Por el contrario, parece ser que al imponer tarifas altas, la zona central gana atractividad debido a su menor congestión y contaminación, aunque su efecto es apenas perceptible.

Oferta de Transporte Público

El transporte público es el que más favorece que el sistema de transporte urbano sea sostenible. El aumento de la oferta produce claros beneficios a los viajeros, en particular ahorro en tiempos de viaje, gracias a la notable mejora en los tiempos de acceso. Sin embargo, estas medidas tiene dos elementos importantes que hace que pierdan atractividad: desde el punto de vista de los usuarios está la poca flexibilidad (en particular los modos ferroviarios) y desde el punto de vista de los operadores (administraciones), su alto coste (de operación y de nuevas infraestructuras).

En cuanto al primer punto, la flexibilidad hace que muchos viajeros elijan el coche como modo principal de desplazamiento, en particular si la oferta de transporte público no es adecuada (zonas periféricas).

En cuanto al segundo elemento, el alto coste de inversión y de operación, además de la necesidad de subvenciones, hace que este tipo de transporte sea financieramente poco atractivo (en particular los modos ferroviarios).

Sin embargo, combinando una estructura urbana adecuada con un buen sistema de transporte público y teniendo en cuenta los patrones de movilidad, se puede lograr que el sistema de transporte sea bastante eficiente y sostenible en el tiempo.

Análisis de Sensibilidad

Como se ha visto en el capítulo anterior para la evaluación CBA, las estrategias óptimas son muy sensibles a valores de algunos parámetros involucrados en la función objetivo, particularmente al valor del tiempo. Esto indica el coste de oportunidad del uso de fondos públicos para el transporte, en particular las subvenciones al transporte público o el coste de la contaminación.

Las estrategias óptimas son relativamente insensibles al valor de las externalidades. Cuando estos costes se basan en los valores actualmente aceptados, las estrategias óptimas son similares a aquellas que no tienen en cuenta valores asignados a las externalidades. Sin embargo, si se hace un mayor énfasis en la evaluación de estos efectos mediante la utilización de costes unitarios mucho más altos, las estrategias óptimas seguramente restringirían aún más el uso del coche, en particular en zonas donde el transporte público es una alternativa verdaderamente atractiva.

Dada la situación actual, la restricción del gasto público y que los ingresos de las estrategias óptimas no pueden cubiertos por tarifas, una opción potencialmente atractiva consiste en obtener recursos adicionales a través de la 'captura de valor'. Esto quiere decir que es posible 'capturar' parte de los beneficios netos de los usuarios para usarlos en beneficio del sistema. Investigaciones previas dicen que al menos 30% de estos beneficios tendrían que ser capturados y que si esto llegase a ser posible, se desarrollaría un importante mecanismo para la inyección de recursos en el sector transporte (Timms et al., 2002).

8.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La metodología deja abierto campos que serán de gran interés para futuras investigaciones, como por ejemplo:

1. **Integración de Metodologías de Evaluación.** Es posible combinar las evaluaciones CBA y MCA en una sola función objetivo, con el fin de incorporar las fortalezas de ambas en los resultados y mitigar sus debilidades.
2. **Optimización de Otras Variables.** Aparte de optimizar tarifas y rangos de medidas relacionadas directamente con el transporte, la metodología deja abierta la posibilidad de explorar otro tipo medidas, teniendo en cuenta restricciones de cualquier tipo. Por ejemplo:
 - a. **Consumo de petróleo.** Sería posible invertir el ciclo de optimización con el fin de obtener precios medios de carburantes con el fin de cumplir ciertas restricciones económicas o ciertos objetivos (emisiones objetivo, proporción de coches "limpios", por ejemplo).

- b. **Reducción de emisiones.** Plan de eficiencia energética para el cumplimiento de los acuerdos sobre reducción de gases efecto invernadero y contaminantes atmosféricos.
3. **Análisis de Otras Medidas.** Aparte de las medidas analizadas en el Capítulo 7, hay una gran cantidad de medidas que pueden estudiarse:
 - a. Cambios y restricciones en la velocidad de circulación.
 - b. Mejoras en la accesibilidad al transporte público.
 - c. Cambios en precios de los combustibles.
 - d. Mejora de la eficiencia energética de los vehículos (introducción de vehículos eléctricos).
 - e. Tarifas de transporte público.
 - f. Medidas sobre usos del suelo (densificación, usos mixtos, restricciones el consumo de suelo)

Además, será importante llevar a cabo análisis de sensibilidad de los resultados frente a variaciones de las hipótesis de las variables exógenas, con el fin de estudiar y analizar los efectos de estos cambios, en particular a largo plazo.

Las investigaciones realizadas hasta el momento muestran que este enfoque funciona, aunque pone de manifiesto algunas preguntas relacionadas con el modelo de evaluación, que pueden ser respondidas en investigaciones futuras:

- ¿Qué nivel de influencia tiene el modelo LUTI utilizado sobre el conjunto de medidas utilizadas?
- Investigar más a fondo los beneficios debidos a los cambios en los usos del suelo
- ¿Cuál es el mejor modelo de solución espacial y temporal para probar un conjunto de medidas y sus combinaciones a largo plazo?
- ¿Es suficiente con el modelo MARS?
- ¿Se puede mejorar el modelo de transporte? ¿El de usos del suelo?
- ¿La interacción del algoritmo de optimización con un modelo de red?
- Cambiar las funciones objetivo

CHAPTER 8.

CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

CONTENTS

8.1 FINAL CONCLUSIONS	225
8.1.1 CONTRIBUTIONS.....	225
8.1.2 RESULTS AND GENERAL RECOMMENDATIONS	226
<i>Evaluation, Optimization and Successful Strategies</i>	226
<i>The Scenarios and Policies Evaluated</i>	228
Urban Toll.....	228
Parking Charges.....	228
Public Transport Supply.....	229
Sensibility Analysis	229
8.2 FUTURE RESEARCH.....	229

8.1 FINAL CONCLUSIONS

This thesis has pretended to set out the bases and to initiate the development of transportation and land use dynamic modeling as well as their interaction with a network model.

Accordingly, the following **main conclusions** respond to the questions considered at the beginning of the research:

- The proved and designed methodology shows its capacity to evaluate and optimize over the time different types of transport policies within a complex context of land-use and transportation.
- The dynamic modeling and its application with an optimization routine proportionate a step ahead in the comprehension and study of the complex relation of transportation-territory-strategies.
- The effect of the synergies demonstrates the advantage of different policies optimization in diverse zones and time periods. The developed method allows the quantitative analysis of different synergies. These positive collateral effects suggest that the integration of measures increases the possibility of reaching the desired objectives. Although it is still needed to further research in the effects of the application of policy integration, the positive results suggest that integrated strategies are better than isolated.
- The methodology allows a geographic localization (according to the zoning in this study) of the effects produced by policy implementation.
- Regardless of the used methodology, the results show that the best scenarios are those that integrate restrictions and incentives: in the particular application case of the thesis, restrictions of car use and incentives of public transport.
- Environmental aspects are not assigned significant value under the optimum scenario which may indicate that the assessment method and the CBA based objective function prioritize the efficiency of the network itself, rather than other aspects of sustainability (social and environmental issues).

8.1.1 Contributions

The main contribution of this Thesis is the development and definition of a transparent, flexible and useful methodology, able to integrate the strategic aspects of sustainable mobility in the evaluation and optimization of different transport policies. Furthermore, its application allows distinguishing the effects of the implemented strategies according to its geographic localization, which benefits a global vision of the consequences over the time.

This research has identified two types of evaluation, both useful in the analysis and study of the complex systems of transport-territory. These developments propose a practical application of a complete planning from a sustainable mobility point of view.

During the planning process (optimization and evaluation), the three dimensions of sustainability can be studied in diverse ways (economic sustainability and multi-objective sustainability) to select for alternatives. Moreover, it has also taken into account a group of monetary and non monetary criteria that cover all the aspects of the involved parties.

Thus, it can be stated that it is possible to put in practice those policies of urban sustainable mobility with a strategic point of view by using systemic and multi-objective decision making processes.

8.1.2 Results and General Recommendations

A short summary and comments to the methodology applied to the practical case will be shown, as well as the main considerations to take into account during a strategic planning process, all this within a long-term framework of sustainable mobility.

In a planning and decision making process and more important than the integration, the strategy should include measures creating synergies among them to obtain the objectives more easily and effortlessly. To a developed level, the integration and optimization process has considered:

- Operational integration of several services and policy instruments.
- Strategic integration that relates the policies affecting different ways of transportation and the policies affecting infrastructure, management, pricing, etc.
- Integration between transport policies and land use policies.

Because a few strategies could have negative impacts over some sectors and groups of users, a careful selection of policies to mitigate those impacts should be done.

Evaluation, Optimization and Successful Strategies

Due to the characteristics of the aggregation of information and long-term estimates of the developed methodology, some experts who criticize the predictive value of strategic models have shown some resistance. However, it is possible to develop an integrated methodology of evaluation-optimization which properties could refute those arguments, since the sustainability is a strategic objective and it only can be measured over the time.

Then why is it important to optimize if the quality and soundness of the information in the dynamic model is questioned? This problem could be approached from other points of view besides the possible real value of its results.

The methodology developed has focused on **compare** diverse transport strategies to study and analyze their long-term behavior patterns and differences instead of focusing in the results of the optimal values. The main idea is to know the effects that transport policies will have on the selected sustainable indicators. In this way, valuable information for a more effective planning will be available.

The strategic modeling helps to mathematically describe the knowledge, hypothesis and behavior of a transportation system in a systematic way, being relatively fast and at reasonable costs. As the methodology is developed, the modeling of the evaluation-optimization problems is consistent with the objectives exposed. It has never pretended to provide a perfect or exact prediction. However, it can be affirmed that if the work is done on real and valid postulations and the models have been weighed up, the obtained results would be acceptable. The modeler should take into account that the modeling and optimization process is a consequence of its hypothesis.

The methodology proposed has been developed taking into account the following elements, keys of a strategic evaluation:

- Availability of an integrated model. The objective of the model is to support the complex reasoning and the causal relations between objectives and policies.
- Formulation of realistic policies. It is unrealistic to ask a model to include all the relevant processes for transportation networks. In practice, this suggests that the most important characteristics of a transportation system should be modeled while avoiding the details that are not of their interest or that are out of the scope.
- Clear causal relations. This means that the optimization model should not only produce a clear and coherent result but also provide an explanation of why such solution is optimal in relation with the defined objectives and conditions. This is reason of why a “black box” model would not be adequate. The cause-effect relations should be comprehensible and should be explained easily.

It is clear that reality modeling has always limitations, but if those are taken into account, the predictive power of strategic models can be acceptable.

On the other hand, the implementation of this proposal, planning and modeling, should follow many steps

1. ***Dynamic Environment.*** The transportation demand has been considered based on the socioeconomic situation of the population (in terms of trips generated for commuting mobility and mode choice), as well as the accessibility to the transportation network (in terms of impedances). These two elements, which operate in different time scales, make a relatively fast change in route or mode election of a traveler, as opposed to a change in infrastructure capacity or land use, which usually takes longer. This is one of the reasons why the transport-territory system should be analyzed in dynamic system environments.
2. ***Policy Selection and Application.*** It is not recommended, from a sustainable development approach, that an objective is to be reached to the detriment of another one. It is also necessary to be aware of the cost to implement each policy.

The flexibility of the developed methodology allows the implementation of different policies in specific geographic and temporal scenarios: a whole city (e.g. the variation of the frequency of public transport, or a fuel tax), a particular zone (e.g. urban toll or speed restrictions), or in a particular day time (rush hour toll or restricted parking). These are also applied with different levels of intensity such as different tolls according to the day period, different speeds according to the road, etc.

The application of the proved policies in the case study has affected the urban system in at least three ways:

- Modifying trips demand
 - Changing the transport supply
 - Changing the transport costs
3. ***Policy Integration.*** According to general characteristics of measures modeled, it is clear that any of those by itself is the solution to transportation problems. Although most of those policies have positive impacts in the reduction of travel times or emissions, they also have collateral effects, particularly in equity and accessibility. Certain policies can generate benefits in their application zones, but their negative effects could be moved to other zones.

A carefully selected pack of policies could face many problems, compensating the positive and negative effects and/or avoiding transferring problems to other zones. In the case

study, the car use has been restricted and to compensate this restriction, the offer of public transport has increased, giving alternatives to those car users that were affected. The identification and selection of policies that are part of our pack of actions is the key of success when planning transport sustainability.

4. ***The Benefits of Integration.*** The first benefit is the complementarity of the policy effects. In second place, some policies make others being financially viable, such as those in scenarios with money surplus, where the benefit could be destined to finance the increase the supply of public transport. Finally, the third benefit is the popular acceptance.

Despite no development of investment policies on roads or land use has been done in the case study, those do not produce meaningful effects on the objectives of sustainable development. Equity policies or those of mixed development between employment and housing could be the most effective policies since they bring together diverse activities in one zone and moreover, reducing long trips to satisfy daily needs.

Analyzing the obtained results, a good urban policy is that which combine elements that jointly produce aggregate effects with a balance between environmental and socioeconomic objectives.

The Scenarios and Policies Evaluated

Completing the last section, the most important conclusions pertaining the particular policies applied in the case study will be described next.

Urban Toll

The implementation of the urban toll has produced important changes in travel patterns along the day, as well as the modal split in periphery-center trips. A part of the trip transfer has gone to public transport, in which buses are the big winners with the reduction of traffic congestion. This is a good example of collateral effects of a policy that looks to clear the center. The main impacts would be the reduction of traffic congestion and the promotion of public transport. A collateral effect could be that people will change their destination by making longer trips with more fuel consumption and favoring urban sprawl.

According to the results, the urban toll charge could offer time saving and environmental quality improvement. In this sense, important resources are generated, which could be used to finance other transportation policies that do not generate income.

It could be added three basic considerations about these types of policies. The first one is the possible negative impact of charging a fee on the zone affected because travelers could change their destinations and therefore lowering land value. On the other hand, some studies have concluded that this impact is marginal and depends on the zone's characteristics. The second consideration relates to equity, because slow modes and buses users will get highly favored; train users a little bit less, but car uses will be harmed by the cost of their trips, particularly those with less income. Finally, the third consideration relates to technology and the way income will be controlled, as well as payments and fines by offenders.

Parking Charges

The reduction of parking charges will produce important changes in the patterns of car trips going to the centre of Madrid, decreasing the use of public transportation in a zone where this is very competitive.

When this fee is reduced the car use is promoted. Its consequence is congestion increase even with higher tolls. These results confirm that sensibility to parking fees is stronger than

tolls payments. However, in scenarios where the optimum values reduce the original parking fee, the benefits obtained by car users are that significant that these savings compensate the loss produced by the increase of congestion and additional costs (tolls). That is that these particular cases give priority to car users as opposed to public transport and the whole system efficiency.

It has not been found evidence that the imposition or decrease of these fees go against the urban center vitality since there is no important changes in the distribution of activities with the current tariffs (Figures 5.23 and 5.24, Annex 5). On the other hand, it seems that by having higher tariffs, the center gains activity due to less congestion and contamination, although the effects are barely perceptible.

Public Transport Supply

Public transportation supports the sustainability of the urban transportation system. Offer increase produce clear benefits to travelers, particularly time saving due to the outstanding improvement of times of access.

Regarding the first subject, the flexibility is an issue that makes travelers to choose a car as a displacement mode, particularly if the public transportation offer is not adequate (peripheral zones)

Concerning the second element, the high cost of investment and management, added to the need of subventions, make this type of transport not too attractive finally speaking (principally railroad systems)

However, combining an adequate urban structure with a good public transport system and having into account the mobility patterns, it is possible to achieve an efficient and sustainable transportation system over the time.

Sensibility Analysis

As shown in the last chapter, the optimal strategies are sensitive to some parameters involved in the objective function within the CBA evaluation. This indicates the cost opportunity of using public funds for transportation, predominantly subventions for public transportation or contamination costs.

Optimal strategies are not sensitive to externalities. When costs are based on current accepted values, optimal strategies are similar to those that do not have externalities assigned. However, if we make a deeper analysis on the evaluation of these effects by using higher unitary costs, optimal strategies will certainly limit car use, mainly in zones where public transportation is a valid alternative.

Given the current situation, meaning public expenditure limits and the fact that income from optimal strategies cannot be covered by fares; an attractive option would be to obtain additional resources by “value captured” in the sense of raising additional finance for transport policies. It is possible to capture part of the net benefits of users to use them in benefit of the system. Previous investigations state that at least 30% of these benefits would be captured and if this is true, an important mechanism would be developed to inject resources to transportation industry (Timms et al, 2002).

8.2 FUTURE RESEARCH

The methodology lives some open fields that would be of great interest for future investigations, such as:

1. **Integration of Evaluation Methodologies.** It is possible to combine the CBA and MCA evaluations in one only objective function, to incorporate the strengths of both results and mitigate their weaknesses.
2. **Optimization of Other Variables.** Besides optimizing fares and ranges of policies related directly with transportation, the methodology allows to explore other type of policies under any type of restriction. Such as:
 - a. **Fuel consumption.** It is possible to reverse the optimization cycle to obtain fuel average prices and reach certain economic restrictions or certain objectives (emissions objective, green cars proportion).
 - b. **Emissions Reduction.** Plan of energy efficiency to meet the agreements on atmospheric pollutants and greenhouse gasses reduction.
3. **Analysis of Other Policies.** Besides the analyzed policies on Chapter 7, there is a great deal of policies that could be studied:
 - a. Changes and restrictions in traffic speed.
 - b. Improvements in the accessibility of public transport.
 - c. Changes in fuels prices.
 - d. Improvement of energy efficiency in vehicles (introduction of electric and hybrids vehicles).
 - e. Public transportation fares.
 - f. Land use policies (densification, mixed uses, land use restrictions).

Moreover, it will be very important to perform a sensibility analysis of the results facing variations of hypothesis of exogenous variables in order to study and evaluate the effects of these changes in the long run.

The investigations performed demonstrate that this focus works; however, they also arouse other questions related to the evaluation model, which could be answer in later investigations:

- What level of influence has the LUTI model applied on the collection of policies used?
- What is the best spatial and temporal solution model to prove a collection of policies and their combinations over the time?
- Is the MARS model enough?
- Can the transportation model be improved? What about land use model?
- How would work the interaction between the optimization algorithm and a network model?
- Change the objective functions

CAPÍTULO 9.

BIBLIOGRAFÍA

1. AHMED, Qureshi I. and HUAPU LU, Shi Y., 2008. Urban transportation and equity: A case study of Beijing and Karachi. *Transportation Research Part A*, 42(1), pp. 125-139.
2. ALBERT, Gila and MAHALEL, David, 2006. Congestion tolls and parking fees: A comparison of the potential effect on travel behavior. *Transport Policy*, 13(6), pp. 496-502.
3. ALONSO, William, 1964. The Historic and the Structural Theories of Urban Form: Their Implications for Urban Renewal. *Land Economics*, 40(2), pp. 227-231.
4. ANAS, Alex, 1987. *Modeling in Urban and Regional Economics*. Chur, Switzerland. Harwood Academic Publishers. pp. 131. ISBN: 0-415-26973-3.
5. ARACIL, Javier, 1995. *Dinámica de Sistemas*. Publicaciones Ingeniería de Sistemas edn. Madrid. ISDEFE. ISBN: 84-683-38.
6. ARANCIBIA, Sara; CONTRERAS, Eduardo; MELLA, Sergio; TORRES, Pablo y VILLABLANCA, Ignacio, 2003. *Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
7. BANISTER, David, 2008. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), pp. 73-80.
8. BANISTER, David and HICKMAN, R., 2006. How to design a more sustainable and fairer built environment: transport and communications. *IEEE Proceedings of the Intelligent Transport System*, 156(4), pp. 276-291.
9. BANISTER, David, 2005. *Unsustainable Transport*. City Transport in the New Century. London. Routledge. pp. 304. ISBN: 978-0-415-35790-6.
10. BANISTER, David and STEAD, Dominic, 2004. Impact of Information and Communications Technology on Transport. *Transport Reviews*, 24(5), pp. 611-632.
11. BANISTER, David, 1999. Planning More to Travel Less: Land Use and Transport. *The Town Planning Review*, 70(3), pp. 313-338.
12. BARBA-ROMERO Sergio, 1998. Conceptos y soportes informáticos de la decisión multicriterio discreta. In: MARTÍNEZ Eduardo and ESCUDEY Mauricio, eds, *Evaluación y Decisión Multicriterio: Reflexiones y Experiencias*. Editorial Universidad de Santiago de Chile, pp. 34-49. Ch. 3. ISBN: 956-7069-28-X.
13. BARZILAI, J., COOK, W. D. and GOLANY, B., 1987. Consistent weights for judgements matrices of the relative importance of alternatives. *Operations Research Letters*, 6(3), pp. 131-134.
14. BERRINI, Maria; BONO, Lorenzo; FERRARI, Giulia; TARZIA, Valentina and MEROLA, Michele, 2003. *European Common Indicators. Towards a Local Sustainability Profile*. Milan: Ambiente Italia Research Institute. Final Project Report.
15. BERTAUD, Alain, 2004. *The spatial organization of cities: deliberate outcome or unforeseen consequence?* Berkeley: Institute of Urban and Regional Development. Working Paper 2004-01.
16. BERTOLINI, L., LE CLERCQ, F. and KAPOEN, L., 2005. Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), pp. 207-220.
17. BEUTHE, Michel; GRANT-MULLER, Susan; LELEUR, Steen; NELLTHORP, John; PANOU, Konstantinos; PEARMAN, Alan and REHFELD, Claus, 1998. *Innovations in Decision Analysis*

(for transport initiatives' evaluation). EUNET Project. Vol. Deliverable D10. European Commission. Work Package 1.

18. BICKEL, Peter; FRIEDRICH, Rainer; BURGESS, Arnaud; FAGIANI, Patrizia; HUNT, Alistair; DE JONG, Gerard; LAIRD, James; LIEB, Christoph; LINDBERG, Gunnar; MACKIE, Peter; NAVRUD, Stale; ODGAARD, Thomas; RICCI, Andrea; SHIRES, Jeremy and TAVASSZY, Lori, 2005. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. HEATCO Project. Sixth Framework Programme 2002-2006. Vol. Deliverable 5. Stuttgart: European Commission, Directorate General Energy and Transport.

19. BILBAO-UBILLOS, Javier, 2008. The costs of urban congestion: Estimation of welfare losses arising from congestion on cross-town link roads. *Transportation Research Part A*, 42(8), pp. 1098-1108.

20. BLACK, William R., 1996. Sustainable transportation: a US perspective. *Journal of Transport Geography*, 4(3), pp. 151-159.

21. BODILY, Samuel E., 1985. *Modern decision making : a guide to modeling with decision support systems*. New York. McGraw-Hill. pp. 300. ISBN: 0-070-06360-5.

22. BONSALL, Peter W. and YOUNG, William, 2010. Is there a case for replacing parking charges by road user charges? *Transport Policy*, 17(5), pp. 323-334.

23. BOSCHMANN, E. E. and KWAN, Mei-Po, 2008. Toward Socially Sustainable Urban Transportation: Progress and Potentials. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2(3), pp. 138-157.

24. BOWMAN, J. L. and BEN-AKIVA, M. E., 2000. Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research Part A*, 35(1), pp. 1-28.

25. BRENT, Richard P., 1973. *Algorithms for Minimization Without Derivatives*. Toronto. Prentice-Hall. ISBN: 0-486-41998-3.

26. BRISTOW, A. L. and NELLTHORP, John, 2000. Transport project appraisal in the European Union. *Transport Policy*, 7(1), pp. 51-60.

27. BROWN, M., 1994. Using Gini-style indices to evaluate the spatial patterns of health practitioners; theoretical considerations and an application based on the Alberta data. *Social Science and Medicine*, 38(9), pp. 1243-1256.

28. BRUECKNER, Jan K. and VERHOEF, Erik T., 2010. Manipulable congestion tolls. *Journal of Urban Economics*, 67(3), pp. 315-321.

29. BUEHLER, Ralph and PUCHER, John, 2011. Sustainable Transport in Freiburg: Lessons from Germany's Environmental Capital. *International Journal of Sustainable Transportation*, 5(1), pp. 43-70.

30. BURNS, James R. and JANAMANCHI, Balaji, (2007). Optimal control and optimization of system dynamics models: some experiences and recommendations. Southwest Decision Sciences Institute Annual Conference, San Diego, CA.

31. BUTTON, Kenneth J. and HENSHER, David A., 2005. *Handbook of transport strategy, policy and institutions*. Handbooks in Transport. Vol. 6. Amsterdam: Elsevier.

32. BUTTON, Kenneth J., 1993. *Transport Economics*. 2 edn. Cheltenham, MA. Edward Elgar Publishing Ltd. ISBN: 1-85278-521-7.

33. CAREY, Malachy, (2004). ¿What is sustainable? Workshop, 9th Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, Hong Kong. Paper presented in Postconference.
34. CERVERO, Robert, 1998. *The Transit Metropolis: A Global Inquiry*. Washington D.C. Island Press. ISBN: 1-55963-591-6.
35. CERVERO, Robert, 1996. Mixed land uses and commuting: evidence from the american housing survey. *Transportation Research Part A*, 30(5), pp. 361-377.
36. CM, 2007. *Estrategia de calidad del aire y cambio climático de la Comunidad de Madrid (2006-2012)*. Plan Azul. Madrid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Comunidad de Madrid.
37. COELLO, Carlos A., 2000. Constraint-handling using an evolutionary multiobjective optimization technique. *Civil Engineering Systems*, 17pp. 319-346.
38. COHEN, Jeffrey P., 2010. The broader effects of transportation infrastructure: Spatial econometrics and productivity approaches. *Transportation Research Part E*, 46(3), pp. 317-326.
39. CONTRERAS, Eduardo and PACHECO, Juan F., 2007. *Evaluación Multicriterio para Programas y Proyectos Públicos*. Vol. Documento No. 92. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
40. COYLE, Geoff, 2000. Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. *System Dynamics Review*, 16(3), pp. 225-244.
41. CRTM, 2004. *Encuesta Domiciliaria de Movilidad de 2004 en la Comunidad de Madrid*. Madrid: Consorcio Regional de Transportes de Madrid. Resumen Ejecutivo.
42. CRTM, 1996. *Encuesta Domiciliaria de Movilidad de 1996 en la Comunidad de Madrid*. Madrid: Consorcio Regional de Transportes de Madrid. Resumen Ejecutivo.
43. DAMART, Sébastien and ROY, Bernard, 2009. The uses of cost-benefit analysis in public transportation decision-making in France. *Transport Policy*, 16(4), pp. 200-212.
44. DANGERFIELD, Brian and ROBERTS, Carole, 1999. Optimisation as a statistical estimation tool: an example in estimating the AIDS treatment-free incubation period distribution. *System Dynamics Review*, 15(3), pp. 273-291.
45. DANGERFIELD, Brian and ROBERTS, Carole, 1996. An Overview of Strategy and Tactics in System Dynamics Optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 47(3), pp. 405-423.
46. DANTZIG, George B. and THAPA, Mukund N., 1997. *Linear programming*. New York. Springer. ISBN: 0-387-94833-3.
47. DE LA HOZ Daniel; GUZMÁN Luis A.; PFAFFENBICHLER Paul C. and SHEPHERD Simon P., 2008. Fuel Tax Levels Necessary to Achieve the Agreed Reduction Targets of CO2 Emissions. The Case of Madrid. In: RAUCH Sébastien, MORRISON Gregory M. and MONZÓN Andrés, eds, *Highway and Urban Environment*. Madrid: Springer, pp. 377-386. Vol. 17. Alliance for Global Sustainability Bookseries. ISBN: 978-90-481-3042-9.
48. DE LA HOZ, Daniel and GUZMÁN, Luis A., 2006. *Estudios de estrategias de movilidad urbana en el marco del área metropolitana de Madrid*. Madrid: Centro de Investigación del Transporte - TRANSyT. Proyecto de Investigación.

49. DE PALMA André and LINDSEY Robin, 2007. Transport user charges and cost recovery. In: DE PALMA André, LINDSEY Robin and PROOST Stef, eds, *Research in Transportation Economics*. Elsevier, pp. 29-57. Vol. 19. Ch. 2. Investment and the Use of Tax and Toll Revenues in the Transport Sector. ISSN: 0739-8859.
50. DE PALMA, André and LINDSEY, Robin, 2006. Modelling and evaluation of road pricing in Paris. *Transport Policy*, 13(2), pp. 115-126.
51. DE PALMA, André, LINDSEY, Robin and NISKANEN, Esko, 2006. Policy insights from the urban road pricing case studies. *Transport Policy*, 13(2), pp. 149-161.
52. DE PALMA, André, LINDSEY, Robin and PROOST, Stef, 2006. Research challenges in modelling urban road pricing: An overview. *Transport Policy*, 13(2), pp. 97-105.
53. DE PALMA, André, KILANI, Moez and LINDSEY, Robin, 2005. Congestion pricing on a road network: A study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS. *Transportation Research Part A*, 39(7-9), pp. 588-611.
54. DECICCO, John and DELUCCHI, Mark, 1997. *Transportation, Energy, and the Environment: How Far Can Technology Take Us?* Paperback edn. American Council for an Energy-Efficient Economy. pp. 278. ISBN: 0918249287.
55. DELAURENTI, Marco, 1999. *Design and optimization techniques of high-speed VLSI circuits*. Torino: Politecnico di Torino. Dissertation, Doctoral Thesis.
56. DETR, 2010a. Cost Benefit Analysis. *Transport Analysis Guidance*. Vol. TAG Unit 3.5.4. London: Department for Transport.
57. DETR, 2010b. Transport User Benefit Calculation. *Transport Analysis Guidance*. Vol. TAG Unit 3.5.3. London: Department for Transport.
58. DETR, 2010c. The Transport Economic Efficiency Sub-Objectives. *Transport Analysis Guidance*. Vol. TAG Unit 3.5.2. Department for Transport.
59. DETR, 2009. *NATA Refresh: Appraisal for a Sustainable Transport System*. London: Department for Transport. ISBN: 978-1-906581-92-3.
60. DETR, 2007a. *Planning for a Sustainable Future*. White Paper. Vol. Cm 7120. London: Communities and Local Government. Department for Transport.
61. DETR, 2007b. *Design Manual for Roads and Bridges*. Vol. 11. London: Department for Transport. Environmental Assessment Techniques.
62. DETR, 2005. Land-Use / Transport Interaction Models. *Transport Analysis Guidance*. Vol. TAG Unit 3.1.3. London: Department for Transport.
63. DETR, 2004. MSA: Cost Benefit Analysis. *Transport Analysis Guidance*. Vol. TAG Unit 3.9.2. London: Department for Transport.
64. DETR, 2001. *Planning Policy Guidance 13: Transport*. London: Department for Communities and Local Government. Department of Transport. ISBN: 0-11-753558-3.
65. DETR, 2000. *Transport 2010: The 10 Year Plan*. London: Department of Environment, Transport and the Regions. Department of Transport.
66. DETR, 1998. *A new deal for transport: better for everyone*. White Paper. The Government's White Paper on the Future of Transport. London: The Stationery Office. Department for Transport.

67. DGT, 2004. Anuario estadístico de accidentes 2004. Estadísticas e Indicadores. Dirección General de Tráfico.
68. DODGSON, J.; SPACKMAN, M.; PEARMAN, Alan and PHILLIPS, L., 2009. Multi-criteria Analysis: a Manual. Department for the Environment, Transport and the Regions. London: Communities and Local Government Publications. Good practice and guidance, Manuals leaflets and booklets. ISBN: 978-1-4098-1023-0.
69. DOLL, Claus and JANSSON, Jan O., 2005. Measuring the Marginal Social Cost of Transport. User Costs and Benefits. *Research in Transportation Economics*, 14pp. 125-154.
70. DREW, Donald R., 1995. Dinámica de Sistemas Aplicada. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas edn. Madrid. Isdefe. pp. 224. ISBN: 84-89338-03-5.
71. DTT, 2004. Instruction Cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport. Paris: Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. Direction des Transports Terrestres. Service de l'observation et des statistiques.
72. DURANTON, Gilles, (2006). The insatiable demand for land: urban change and land (re-)development. ECMT Regional Round, ISBN: 978-92-821-0164-3. pp. 27-48.
73. DYER, James S., 1990. Remarks on the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 36(3), pp. 249-258.
74. ECHENIQUE, Marcial, 1975. Urban development models. Cambridge. University of Cambridge.
75. ECMT, 2003. Implementing Sustainable Urban Travel Policies. Paris: OECD Publications Service. European Conference of Ministers of Transport. ISBN: 9789282112892.
76. EEA, 2006. Urban sprawl in Europe. The ignored challenge. Vol. EEA Report No 10/2006. Copenhagen: European Environment Agency. ISBN: 92-9167-887-2.
77. ELIASSON, Jonas, 2009. A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A*, 43(4), pp. 468-480.
78. ELIASSON, Jonas, HULTKRANTZ, Lars, NERHAGEN, Lena and SMIDFELT ROSQVIST, Lena, 2009. The Stockholm congestion - charging trial 2006: Overview of effects. *Transportation Research Part A*, 43(3), pp. 240-250.
79. ELMAHDI, Amgad, MALANO, H., ETCHELLS, T. and KHAN, S., (2005). System Dynamics Optimisation Approach to Irrigation Demand Management. International Congress on Modelling and Simulation, Melbourne. ISBN: 0-9758400-2-9. MODSIM 2005. pp. 196-202.
80. EPER-ESPAÑA, (2008). Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. [Homepage of Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino], [Online] Available: www.eper-es.es.
81. ERIKSSON, Louise, GARVILL, Jörgen and NORDLUN, Annika M., 2008. Acceptability of single and combined transport policy measures: The importance of environmental and policy specific beliefs. *Transportation Research Part A*, 42(8), pp. 1117-1128.
82. EU, (2010). Land Use and Transportation Research. [Homepage of European Commission's Community Research], [Online] Available: www.lutr.net [2010].
83. EU, 2007. Libro Verde: Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana. COM(2007) 551. Bruselas: Dirección General de Energía y Transportes. Comisión Europea.

84. EU, 2006. Towards a Thematic Strategy on the Urban Environment. Vol. COM(2005) 718. Brussels: Commission of the European Communities.
85. EU, 2001. Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible. COM(2001) 264. Bruselas: Comisión de las Comunidades Europeas.
86. FERGUSON, Erik, 2004. Zoning for parking as a policy process: a historical review. *Transport Reviews*, 24(2), pp. 177-194.
87. FERRARI, Paolo, 2010. Willingness to spend and road pricing rates. *Transport Policy*, 17(3), pp. 160-172.
88. FERRARI, Paolo, 2005. Road pricing and users' surplus. *Transport Policy*, 12(6), pp. 477-487.
89. FERRARI, Paolo, 2002. Road network toll pricing and social welfare. *Transportation Research Part B*, 36(5), pp. 471-483.
90. FIORELLO, Davide; HUISMANS, Gé; LÓPEZ, Elena; MARQUES, Carlos; STEENBERGHEN, Thérèse; WEGENER, Michael and ZOGRAFOS, Konstantinos G., 2006. Scenarios for the Transport system and Energy supply and their Potential effects. Transport strategies under the scarcity of energy supply, STEPs Project. Netherlands: Buck Consultants International. European Commission. ISBN-13: 978-90-9020880-0.
91. FITSA, 2002. El valor de la seguridad vial. Conocer los costes de los accidentes de tráfico para invertir más en su prevención. Madrid.
92. FONTAINE, Ernesto R., 1981. Evaluación Social de Proyectos. Santiago de Chile. Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile.
93. FORMAN, Ernest H. and GASS, Saul I., 2001. The Analytic Hierarchy Process: An Exposition. *Operations Research*, 49(4), pp. 469-486.
94. FORRESTER, Jay W., 1969. Urban Dynamics. Portland. Productivity Press. ISBN: 1-56327-058-7.
95. FOWKES, A. S., BRISTOW, A. L., BONSALE, Peter W. and MAY, Anthony D., 1998. A short-cut method for strategy optimisation using strategic transport models. *Transportation Research Part A*, 32(2), pp. 149-157.
96. FRIDSTRØM, Lasse; MINKEN, Harald; MOILANEN, Paavo; SHEPHERD, Simon P. and VOLD, Arild, 2000. Economic and Equity Effects of Marginal Cost Pricing in Transport: Case studies from three European cities. AFFORD Project. Helsinki: Government Institute for Economic Research. Deliverable 2A.
97. GALLO, Mariano, D'ACIerno, Luca and MONTELL, Bruno, 2006. Optimisation models for the urban parking pricing problem. *Transport Policy*, 13(1), pp. 34-48.
98. GANDOLFO Giancarlo, 1993. Continuous time-econometrics has come of age. In: MOTAMEN-SCOBIE Homa, ed, Continuous Time Econometrics: Theory and Applications. London: Chapman & Hall, pp. 1-11. Vol. 12. Ch. 1. International Studies in Economic Modelling. ISBN: 0-412-45020-8.
99. GARCÍA, Juan M., 2007. Dinámica de Sistemas. Barcelona: Fundació UPC, Universitat Politècnica de Catalunya.

100. GARIN, Robert A., 1966. A Matrix Formulation of the Lowry Model for Intrametropolitan Activity Allocation. *Journal of the American Institute of Planners*, 32(6), pp. 361-364.
101. GÄRLING, Tommy and SCHUIITEMA, Geertje, 2007. Travel Demand Management Targeting Reduced Private Car Use: Effectiveness, Public Acceptability and Political Feasibility. *Journal of Social Issues*, 63(1), pp. 139-153.
102. GEERLINGS, Harry and STEAD, Dominic, 2003. The integration of land use planning, transport and environment in European policy and research. *Transport Policy*, 10(3), pp. 187-196.
103. GEGENFURTNER, Karl R., 1992. PRAXIS: Brent's algorithm for function minimization. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 24(4), pp. 560-564.
104. GENNAIO, Maria-Pia, HERSPERGER, Anna M. and MATTHIAS, B., 2009. Containing urban sprawl—Evaluating effectiveness of urban growth boundaries set by the Swiss Land Use Plan. *Land Use Policy*, 26(2), pp. 224-232.
105. GERD, Sammer; ROMAN, Klementschtz and OLIVER, Roider, 2003. Urban TRANSPORT and local Socio-ECONOMIC development. TRANSECON. 5th Framework Programme. Vienna: European Commission. Final Report.
106. GEURS, Karst T. and VAN WEE, Bert, 2004. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), pp. 127-140.
107. GEURS, Karst T. and RITSEMA VAN ECK, J. R., 2001. Accessibility measures: review and applications. Bilthoven: Netherlands Environmental Assessment Agency.
108. GIULIANO Genevieve, 1994. Equity and fairness considerations of congestion pricing. Curbing Gridlock, Peak-Period Fees to Relieve Traffic Congestion. Special Report 242. Washington, DC: Transportation Research Board, pp. 250-279. Vol. 2. Commissioned Papers. ISBN: 0309055059.
109. GLACHANT, Matthieu and BUREAU, Benjamin, 2008. Distributional effects of road pricing: Assessment of nine scenarios for Paris. *Transportation Research Part A*, 42(7), pp. 994-1007.
110. GOLUB, Gene H. and VAN LOAN, Charles F., 1996. Matrix Computations. 3 edn. Baltimore. Johns Hopkins Studies In The Mathematical Sciences. pp. 694. ISBN: 0-8018-5414-8.
111. GONZÁLEZ, M. J. and de Lázaro y Torres, M. Luisa, 2005. Indicadores Básicos para la Planificación de la Sostenibilidad Urbana Local. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 10.
112. GOODWIN, Phil; HALLETT, Sharon; KENNY, Francesca and STOKES, Gordon, 1991. *Transport: The New Realism*. Transport Studies Unit. Oxford: Rees Jeffreys Road Fund.
113. GOSS, Sue, 2005. *Making Local Governance Work: Networks, Relationships*. London. Palgrave Macmillan. pp. 224. ISBN: 978-0-333-91788-6.
114. GRAHAM, Alan K., MORECROFT, John D. W. and SENG, Peter M., 1992. Model-supported case studies for management education. *European Journal of Operational Research*, 59(1), pp. 151-166.

115. GRANT-MULLER, Susan, MACKIE, Peter, NELLTHORP, John and PEARMAN, Alan, 2001. Economic appraisal of European transport projects: The state of the art revisited. *Transport Reviews*, 21(2), pp. 237-261.
116. GREIVING, S. and WEGENER, Michael, (2001). Integration of transport and land use policies: state of the art. 9th World Conference on Transport Research, Seoul, Korea.
117. GÜHNEMANN, Astrid and KIMBLE, Mary, 2008. Weights for use in Multi-Criteria Analysis. *CityMobil, Towards advanced transport for the urban environment*. Vol. 5.1.2. European Commission. WP 5.1: Definition of the evaluation framework.
118. GÜHNEMANN, Astrid; KIMBLE, Mary; CHERNYAV'SKA, Liliya; SCHOLZ, Aaron; SIEGELE, Jochen; ENEI, Riccardo; OHLAU, Katrin; SIEBER, Niklas; MARTÍN, Belén; DOSTAL, Ivo; DUFEK, Jiri; MONIGL, János; BERKI, Zsolt and LIEB, Christoph, 2008. *Analysing Policy Instruments. ASSET. Assessing Sensitiveness to Transport*. Vol. D4. Sixth Framework Programme.
119. GUZMÁN, Luis A., DE LA HOZ, Daniel and MONZÓN, Andrés, (2011). Dynamic Long-Term Optimization Procedure for Pricing Transport Policies Based on Social Welfare Assessment. Transportation Research Board (TRB) 90th Annual Meeting, Washington D.C.
120. GUZMÁN, Luis A., (2010). Los Costes de la Congestión Urbana. Estimación de Cambios en el Bienestar Derivados de la Implementación de un Cobro por Congestión. IX Congreso de Ingeniería de Transporte, Madrid. ISBN 978-84-96398-41-2.
121. GUZMÁN, Luis A. and DE LA HOZ, Daniel, 2009. Concentración urbana: hacia una nueva cultura de la movilidad. *Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera*, 167(76-87).
122. GUZMÁN Luis A. 2008. Análisis de Impactos en la Tarifa de Cobro por Congestión, sus Corredores y su Relación con el Centro. Trabajo Tutelado Gestión y Financiación del Transporte. Universidad Politécnica de Madrid. pp. 53. <http://oa.upm.es>.
123. GUZMÁN, Luis A. and DE LA HOZ, Daniel, (2008). Dispersión Urbana. Estudio de la Comunidad de Madrid por Corredores y su Dependencia del Centro. VIII Congreso de Ingeniería de Transporte, A Coruña. ISBN: 978-84-380-0394-7.
124. GUZMÁN, Luis A., DE LA HOZ, Daniel and PFAFFENBICHLER, Paul C., (2008). Análisis de Impactos en la Tarifa de Cobro por Congestión en Madrid Utilizando la Dinámica de Sistemas. XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Cartagena de Indias. ISBN: 978-958-8252-82-7.
125. HAGHANI, Ali, LEE, Sang Y. and BYUN, Joon H., 2003a. A system dynamics approach to land use/transportation system performance modeling Part I: Methodology. *Journal of Advanced Transportation*, 37(1), pp. 1-41.
126. HAGHANI, Ali, LEE, Sang Y. and BYUN, Joon H., 2003b. A system dynamics approach to land use/transportation system performance modeling Part II: Application. *Journal of Advanced Transportation*, 37(1), pp. 43-82.
127. HALDEN, Derek, 2002. Using accessibility measures to integrate land use and transport policy in Edinburgh and the Lothians. *Transport Policy*, 9(4), pp. 313-324.
128. HANDY, Susan, 1994. Regional Versus Local Accessibility: Implications for Nonwork Travel. *Transportation Research Record*, 1400pp. 58-66.
129. HANSEN, Walter G., 1959. How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Planning Association*, 25(2), pp. 73-76.

130. HARKER, Patrick T. and VARGAS, Luis G., 1990. Reply to "Remarks on the Analytic Hierarchy Process" by J. S. Dyer. *Management Science*, 36(3), pp. 269-273.
131. HATZOPOULOU, M. and MILLER, Eric J., 2009. Transport policy evaluation in metropolitan areas: The role of modelling in decision-making. *Transportation Research Part A*, 43(4), pp. 323-338.
132. HENSHER, David A. and PUCKETT, Sean M., 2007. Congestion and variable user charging as an effective travel demand management instrument. *Transportation Research Part A*, 41(7), pp. 615-626.
133. HERBERT, John D. and STEVENS, Benjamin H., 1960. A model for the distribution of activities in residential areas. *Journal of Regional Science*, 2(2), pp. 21-36.
134. HINE, J., 2000. Integration, integration, integration... Planning for sustainable and integrated transport systems in the new millennium. *Transport Policy*, 7(3), pp. 175-177.
135. HOLDER, R. D., 1991. Response to Holder's Comments on the Analytic Hierarchy Process: Response to the Response. *Journal of the Operational Research Society*, 42(10), pp. 914-917.
136. HOLDER, R. D., 1990. Some Comments on the Analytic Hierarchy Process. *Journal of the Operational Research Society*, 41(11), pp. 1073-1076.
137. HOLZ-RAU, Christian and SCHEINER, Joachim, 2011. Safety and travel time in cost-benefit analysis: A sensitivity analysis for North Rhine-Westphalia. *Transport Policy*, 18(2), pp. 336-346.
138. HOOKE, Robert and JEEVES, Terry, 1961. Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems. *Journal of the ACM*, 8(2), pp. 212-229.
139. HTM, 2003. *Green Book: Appraisal and Evaluation in Central Government*. London: HM Treasury.
140. HUANG, Shu-Li, WONG, Jui-Hao and CHEN, Tzy-Chuen, 1998. A framework of indicator system for measuring Taipei's urban sustainability. *Landscape and Urban Planning*, 42(1), pp. 15-27.
141. HULL, Angela, 2008. Policy integration: What will it take to achieve more sustainable transport solutions in cities? *Transport Policy*, 15(2), pp. 94-103.
142. HULL, Angela, 2005. Integrated transport planning in the UK: From concept to reality. *Journal of Transport Geography*, 13(4), pp. 318-328.
143. HUNT, J. D., KRIGER, David S. and MILLER, Eric J., 2005. Current Operational Urban Land use-Transport Modelling Frameworks: A Review. *Transport Reviews*, 25(3), pp. 329-376.
144. HUPKES, Geurt, 1982. The law of constant travel time and trip-rates. *Futures*, 14(1), pp. 38-46.
145. IRIS PLAN, 1998. *Regional Mobility Plan*. Brussels: Ministry of the Region of Brussels.
146. IRWIN, Elena G. and BOCKSTAEL, Nancy E., 2007. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14(52), pp. 20672-20677.
147. ITS, (2010). *Knowledgebase on Sustainable Urban Land use and Transport*. [Homepage of KonSULT], [Online] Available: www.konsult.leeds.ac.uk.

148. JANSEN, Heinz and DENIS, Cécile, 1999. A welfare cost assessment of various policy measures to reduce pollutant emissions from passenger road vehicles. *Transportation Research Part D*, 4(6), pp. 379-396.
149. JARA-DÍAZ, Sergio, 2007. *Transport Economic Theory*. 1 edn. Oxford. Elsevier. pp. 140. ISBN: 978-0-08-045028-5.
150. JEPPESEN, Sara L., 2009. *Sustainable Transport Planning - A Multi-Methodology Approach to Decision Making*. Dissertation, Doctoral Thesis. Technical University of Denmark. Kgs. Lyngby.
151. JOHANSSON, Per-Olov, 1987. *The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits*. Cambridge, UK. Cambridge University Press. ISBN-13: 9780521348102.
152. JOHNSTON, Robert A., 2008. Indicators for Sustainable Transportation Planning. *Transportation Research Record*, 2067pp. 146-154.
153. JONES, Peter, LUCAS, Karen and WHITTLES, Martin, 2003. Evaluating and implementing transport measures in a wider policy context: the 'Civilising Cities' initiative. *Transport Policy*, 10(3), pp. 209-221.
154. JONES Peter, 1998. Urban road pricing: public acceptability and barriers to implementation. In: BUTTON Kenneth J. and VERHOEF Erik T., eds, *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*. Cheltenham, England: Edward Elgar Publishing Limited, pp. 263-284. Ch. 12. ISBN: 1-85898-365-7.
155. JONSSON, Daniel, 2008. Analysing sustainability in a land-use and transport system. *Journal of Transport Geography*, 16(1), pp. 28-41.
156. KAHN, H. and WIENER, A. J., 1967. *The year 2000: a framework for speculation on the next thirty-three years*. New York. Macmillan.
157. KAHN, Matthew, (2006). The quality of life in sprawled versus compact cities. ECMT Regional Round, ISBN: 978-92-821-0164-3. pp. 87-100.
158. KAMOLA, Mariusz and MIAZGA, Przemysław, 2001. Global and local optimization algorithms in automated waveguide design. *Evolutionary Computation and Global Optimization*, 139pp. 123-135.
159. KAMPMANN Christian E. and OLIVA Rogelio, 2009. Analytical methods for structural dominance analysis in system dynamics. In: MEYERS Robert A., ed, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springer, pp. 8948-8967. Ch. 19. ISBN: 978-0-387-30440-3.
160. KAMPMANN, Christian E. and OLIVA, Rogelio, 2008. Structural Dominance Analysis and Theory Building in System Dynamics. *Systems Research and Behavioral Science*, 25(4), pp. 505-519.
161. KARLSTRÖM, Anders and FRANKLIN, Joel P., 2009. Behavioral adjustments and equity effects of congestion pricing: Analysis of morning commutes during the Stockholm Trial. *Transportation Research Part A*, 43(3), pp. 283-296.
162. KASANKO, Marjo, BARREDO, José I., LAVALLE, Carlo, DEMICHELI, Luca, SAGRIS, Valentina and BREZGER, Arne, 2006. ¿Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 77(1-2), pp. 111-130.
163. KEENEY, Ralph L. and RAIFFA, Howard, 1993. *Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs*. New York. Cambridge University Press. ISBN: 0-521-43883-7.

164. KELLY, Kristine L., 1998. A systems approach to identifying decisive information for sustainable development. *European Journal of Operational Research*, 109(2), pp. 452-464.
165. KELOHARJU, R. and WOLSTENHOLME, E. F., 1988. The basic concepts of system dynamics optimization. *Systemic Practice and Action Research*, 1(1), pp. 65-86.
166. KENWORTHY, Jeffrey R. and LAUBE, Felix B., 1999. Patterns of automobile dependence in cities an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. *Transportation Research Part A*, 33(7-8), pp. 691-723.
167. KENWORTHY, Jeffrey R. and LAUBE, Felix B., 1996. Automobile dependence in cities: an international comparison of urban transport and land use patterns with implications for sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4-6), pp. 279-308.
168. KISHIHARA, Mitsuyoshi, YAMANE, Kuniyoshi and OHTA, Isao, (2005). Parallel processing of Powell's optimization algorithm and its application to design of multi-way power dividers. *Microwave Conference, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific, Zushou, China*.
169. KLEIJNEN, Jack P. C., 1995. Sensitivity analysis and optimization of system dynamics models: Regression analysis and statistical design of experiments. *System Dynamics Review*, 11(4), pp. 275-288.
170. KOENIG, J. G., 1980. Indicators of urban accessibility: Theory and application. *Transportation*, 9(2), pp. 145-172.
171. KÖLBL, Robert, NIEGL, Martin and KNOFLACHER, Hermann, 2008. A strategic planning methodology. *Transport Policy*, 15(5), pp. 273-282.
172. KÖLBL, Robert, 2000. A bio-physical model of trip generation/trip distribution. Dissertation, Doctoral Thesis. University of Southampton, Department of Civil and Environmental Engineering. Southampton.
173. KOPP, Andreas and SHORT, Jack, 2005. Transport infrastructure: Investment and planning. Policy and research aspects. *Transport Policy*, 12(4), pp. 360-367.
174. KRAINER, John, BAJARI, Patrick and BENKARD, C. L., 2005. House prices and consumer welfare. *Journal of Urban Economics*, 58(3), pp. 474-487.
175. KRIGER, David S., MILLER, Eric J. and HUNT, J. D., (1999). *Integrated Urban Models: Improving the State-of-the-Practice*. 7th TRB Conference on the Application of Transportation Planning Methods, Boston.
176. LAIRD James; NASH Chris and SHEPHERD Simon P., 2007. Cordon charges and the use of revenue: A case study of Edinburgh. In: DE PALMA André, LINDSEY Robin and PROOST Stef, eds, *Research in Transportation Economics*. Elsevier, pp. 161-187. Vol. 19. Ch. 8. Investment and the Use of Tax and Toll Revenues in the Transport Sector. ISSN: 0739-8859.
177. LANGMYHR, Tore, 1997. Managing equity: The case of road pricing. *Transport Policy*, 4(1), pp. 25-39.
178. LAURIDSEN, Henning, 2011. The impacts of road tolling: A review of Norwegian experience. *Transport Policy*, 18(1), pp. 85-91.
179. LAUTSO, Kari; SPIEKERMANN, Klaus; WEGENER, Michael; SHEPPARD, Ian; STEADMAN, Philip; MARTINO, Angelo; DOMINGO, Roberto and GAYDA, Sylvie, 2004. *Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability*. PROPOLIS Project. Helsinki: European Commission. Final Report.

180. LAWSON, Charles L. and HANSON, Richard J., 1974. Solving Least Square Problems. New Jersey. Prentice-Hall. ISBN: 0-89871-356-0.
181. LEAPE, Jonathan, 2006. The London Congestion Charge. *The Journal of Economic Perspectives*, 20(4), pp. 157-176.
182. LEITMANN, Josef, 1999. Sustaining Cities: Environmental Planning and Management in Urban Design. New York. McGraw-Hill Publications. pp. 416. ISBN: 0070383162.
183. LEVINSON, David M. and KUMAR, Ajay, 1994. The Rational Locator: Why Travel Times Have Remained Stable. *Journal of the American Planning Association*, 60(3), pp. 319-332.
184. LIGHT, Thomas, 2009. Optimal highway design and user welfare under value pricing. *Journal of Urban Economics*, 66(2), pp. 116-124.
185. LITMAN, Todd, 2007. Evaluating Transportation Equity: Guidance For Incorporating Distributional Impacts in Transportation. Victoria: Victoria Transport Policy Institute.
186. LITMAN, Todd, 2004. London Congestion Pricing, Implications for Other Cities. Victoria: Victoria Transport Policy Institute.
187. LOO, Becky P. Y. and CHOW, S. Y., 2006. Sustainable Urban Transportation: Concepts, Policies and Methodologies. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(2), pp. 76-79.
188. LOOTSMA, Freerk A., 1992. The REMBRANDT system for multicriteria decision analysis via pairwise comparisons or direct rating. Vol. Technical Report 92-05. Delft, Netherlands: Faculty of Technical Mathematics and Informatics. Delft University of Technology. Internal Report.
189. LOOTSMA, Freerk A., 1989. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*, 40(1), pp. 109-116.
190. LOWRY, Ira S., 1964. A Model of Metropolis. Santa Monica, CA. Rand Corporation.
191. LOWRY, Michael B., 2010. Using optimization to program projects in the era of communicative rationality. *Transport Policy*, 17(2), pp. 94-101.
192. LU, L., BROWN, B. H., BARBER, D. C. and LEATHARD, A. D., 1995. A fast parametric modelling algorithm with the Powell method. *Physiological Measurement*, 16(3A), pp. 39-47.
193. LUCAS, Karen, 2006. Providing transport for social inclusion within a framework for environmental justice in the UK. *Transportation Research Part A*, 40(10), pp. 801-809.
194. LUENBERGER, David G., 1989. Linear and Nonlinear Programming. 2 edn. New York. Kluwer Academic Publishers Group. ISBN: 1-4020-7593-6.
195. LYONS, Glenn and URRY, John, 2005. Travel time use in the information age. *Transportation Research Part A*, 39(2-3), pp. 257-276.
196. MAKRIDAKIS, Spyros G., 1990. Forecasting and Planning for the 21st Century. New York. The Free Press, Macmillan Inc. ISBN: 9-02-919781-3.
197. MALCZEWSKI, Jacek, 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-32944-4.
198. MANN, Stefan, 2009. Institutional causes of urban and rural sprawl in Switzerland. *Land Use Policy*, 26(4), pp. 919-924.

199. MARCHETTI, C., 1994. Anthropological Invariants in Travel Behavior. *Technological Forecasting and Social Change*, 47(1), pp. 75-88.
200. MARSDEN, Greg and BONSALL, Peter W., 2006. Performance targets in transport policy. *Transport Policy*, 13(3), pp. 191-203.
201. MARSHALL Stephen, 2001. The challenge of sustainable transport. In: LAYARD Antonia, DAVOUDI Simin and BATTY Susan, eds, *Planning for a Sustainable Future*. London: Spon Press, pp. 131-148. Ch. 9. ISBN 0-415-23408-5.
202. MARTÍNEZ, Francisco J., BRAVO, Mario, BRICEÑO, Luis, COMINETTI, Roberto and CORTÉS, Cristián E., 2009. An integrated behavioral model of the land-use and transport systems with network congestion and location externalities. *Transportation Research Part B*, 44(4), pp. 584-596.
203. MARTÍNEZ, Francisco J., 1997. MUSSA: Land Use Model for Santiago City. *Transportation Research Record*, 1556pp. 126-134.
204. MASSAM, Bryan H., 1988. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques in planning. *Progress in Planning*, 30(1), pp. 1-84.
205. MASSOTH, M. H. and ROY, E., 2004. Lieu de vie–lieu de travail, 25ans d'évolution d la distance au travail. Paris: INRETS. Rapport de Contrat INRETS pour L'ademe.
206. MATTSSON, Lars-Göran and ELIASSON, Jonas, 2006. Equity effects of congestion pricing Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research Part A*, 40(7), pp. 602-620.
207. MAY, Anthony D., KELLY, Charlotte and JOPSON, Ann F., 2008. The development of an option generation tool to identify potential transport policy packages. *Transport Policy*, 15(6), pp. 361-371.
208. MAY, Anthony D., PAGE, Matthew and HULL, Angela, 2008. Developing a set of decision-support tools for sustainable urban transport in the UK. *Transport Policy*, 15(6), pp. 328-340.
209. MAY, Anthony D., KELLY, Charlotte and SHEPHERD, Simon P., 2006. The principles of integration in urban transport strategies. *Transport Policy*, 13(4), pp. 319-327.
210. MAY, Anthony D.; KARLSTRÖM, Anders; MARLER, Nick; MATTHEWS, Bryan; MINKEN, Harald; MONZÓN, Andrés; PAGE, Matthew; PFAFFENBICHLER, Paul C. and SHEPHERD, Simon P., 2005a. Decision Makers' Guidebook. PROSPECTS Project. Vol. Deliverable 15. Leeds: Institute for Transport Studies.
211. MAY, Anthony D., SHEPHERD, Simon P., EMBERGER, Günter, ASH, Andrew, ZHANG, Xiaoyan and PAULLEY, Neil, 2005b. Optimal Land Use—Transport Strategies: Methodology and Application to European Cities. *Transportation Research Record*, 1924pp. 129-138.
212. MAY, Anthony D., JOPSON, Ann F. and MATTHEWS, Bryan, 2003. Research challenges in urban transport policy. *Transport Policy*, 10(3), pp. 157-164.
213. MAY, Anthony D.; JARVI-NYKANEN, Tuuli; MINKEN, Harald; RAMJERDI, Farideh; MATTHEWS, Bryan and MONZÓN, Andrés, 2001a. Cities' Decision-Making Requirements. PROSPECTS Project. Vol. Deliverable 1. Leeds: Institute of Transport Economics. European Commission.

214. MAY, Anthony D., SHEPHERD, Simon P., MINKEN, Harald, MARKUSSEN, T., EMBERGER, Günter and PFAFFENBICHLER, Paul C., 2001b. The use of response surfaces in specifying transport strategies. *Transport Policy*, 8(4), pp. 267-278.
215. MAY, Anthony D.; SHEPHERD, Simon P. and TIMMS, Paul M., 2000a. Optimisation of Policies for Transport Integration in Metropolitan Areas. OPTIMA Project. Leeds: European Commission, 4th Framework Programme.
216. MAY, Anthony D., SHEPHERD, Simon P. and TIMMS, Paul M., 2000b. Optimal transport strategies for European cities. *Transportation*, 27(3), pp. 285–315.
217. MAY, Anthony D. and STILL, Ben, 2000. The instruments of transport policy. Vol. Working Paper 545. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds.
218. MAY, Anthony D. and TIMMS, Paul M., 2000c. Financial Assistance for Transport Integration in Metropolitan Areas. FATIMA Project. European Commission, 4th Framework Programme. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds.
219. MAY, Anthony D. and ROBERTS, M., 1995. The design of integrated transport strategies. *Transport Policy*, 2(2), pp. 97-105.
220. MAY, Anthony D.; ROBERTS, M. and MASON, P., 1992. The development of transport strategies for Edinburgh. Vol. Paper 9865. Edinburgh: Proc Instn Civil Engineers Transp.
221. MAYERES, I.; PROOST, Stef; EMBERGER, Günter; GRANT-MULLER, Susan; KELLY, Charlotte and MAY, Anthony D., 2003. Synergies and conflicts of transport packages. SPECTRUM Project. Study of Policies regarding Economic instruments Complementing Transport Regulation and the Undertaking of physical Measures. Vol. Deliverable D4. Leeds: Institute for Transport Studies.
222. MAYHEW, Les and HYMAN, Geoffrey, 2002. Optimizing the benefits of urban road user charging. *Transport Policy*, 9(3), pp. 189-207.
223. MEDINA, Fernando, 2001. Consideraciones Sobre el Índice de Gini Para Medir la Concentración del Ingreso. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas - Cepal. ISBN: 92-1-321793-5.
224. METROPOLIS, Nicholas and ULAM, S., 1949. The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247), pp. 335-341.
225. MEURS, Henk and HAAIJER, Rinus, 2001. Spatial Structure and Mobility. *Transportation Research Part D*, 6(6), pp. 429-446.
226. MEYER John R. and STRASZHEIM Mahlon R., 1971. Pricing and Project Evaluation. In: KRESGE David T. and ROBERTS Paul O., eds, *Techniques of Transport Planning*. Washington D.C.: Brookings Institution, pp. 232-236. Vol. 1. Ch. 14. Transport Research Program.
227. MEYER, Michael D. and MILLER, Eric J., 2001. *Urban Transportation Planning: A Decision-Oriented Approach*. 2 edn. New York. McGraw-Hill. pp. 642. ISBN: 9780072423327.
228. MIFO, 2009. *Estrategia Española de Movilidad Sostenible*. Madrid: Ministerio de Fomento.
229. MILLER, John H., 1998. Active Nonlinear Tests (ANTs) of Complex Simulation Models. *Management Science*, 44(6), pp. 820-830.
230. MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2006. Real Decreto 1370/2006. BOE núm. 282 edn. Madrid: España.

231. MINKEN, Harald; JONSSON, Daniel; SHEPHERD, Simon P.; JÄRVI, Tuuli; MAY, Anthony D.; PAGE, Matthew; PEARMAN, Alan; PFAFFENBICHLER, Paul C.; TIMMS, Paul M. and VOLD, Arild, 2003. A Methodological Guidebook. PROSPECTS Project. Vol. Deliverable 14. Oslo: Institute of Transport Economics. European Commission. ISBN: 82-480-0313-2.
232. MINKEN, Harald; SHEPHERD, Simon P.; JÄRVI, Tuuli; MAY, Anthony D.; PEARMAN, Alan; PAGE, Matthew; ARJAMAA, Heidi; VOLD, Arild; JONSSON, Daniel and PFAFFENBICHLER, Paul C., 2002. Evaluation Tools. PROSPECTS Project. Vol. Deliverable 2. Leeds: Institute of Transport Economics. European Commission.
233. MINNS, David E., 1994. Mathematical modelling as a tool to aid R&D investment decisions in a sustainable development policy climate. *Technology Analysis & Strategic Management*, 6(4), pp. 457-472.
234. MOKHTARIAN, Patricia L., 2005. Travel as a desired end, not just a means. *Transportation Research Part A*, 39(2-3), pp. 93-96.
235. MOKHTARIAN, Patricia L. and SALOMON, Ilan, 2001. ¿How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations. *Transportation Research Part A*, 35(8), pp. 695-719.
236. MONZÓN, Andrés; CASCAJO, Rocío and JORDÁ, Pablo, 2009. Observatorio de la Movilidad Metropolitana. Madrid: Centro de Investigación del Transporte, Universidad Politécnica de Madrid.
237. MONZÓN, Andrés; GUTIÉRREZ, Javier; ROBUSTÉ, Francesc and DI CIOMMO, Floridea, 2009. Modelo Español de Tarifación de Carreteras. META. Vol. PT-2006-048-05CCPP. Madrid: CEDEX. Resumen final.
238. MONZÓN, Andrés; GUZMÁN, Luis A. and DE LA HOZ, Daniel, 2009. Metodología para la evaluación multiobjetivo de estrategias de movilidad urbana y regional. MEMORYAL. Madrid: Ministerio de Fomento. Proyecto de Investigación.
239. MONZÓN Andrés; FERNANDEZ Alvaro and JORDÁ Pablo, 2008. Environmental Costs Account: A Base for Measuring Sustainability in Transport Plans. In: RAUCH Sébastian, MORRISON Gregory M. and MONZÓN Andrés, eds, *Proceedings of the 9th Highway and Urban Environment Symposium*. Madrid: Springer, pp. 23-30. Vol. 17. ISBN: 978-90-481-3042-9.
240. MONZÓN, Andrés; CASCAJO, Rocío; MADRIGAL, Esther and LÓPEZ, Cristina, 2006. PMUS: Guía práctica para la elaboración e implantación de planes de movilidad urbana sostenible. Eficiencia y Ahorro Energético. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE. ISBN: 84-86850-98-3.
241. MORDECAI, Avriel, 2003. *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. New Jersey. Prentice-Hall. pp. 528. ISBN: 0-486-43227-0.
242. MORÉ, Jorge J., GARBOW, Burton S. and HILLSTROM, Kenneth E., 1981. Testing unconstrained optimization software. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 7(1), pp. 17-41.
243. MULLEY, Corinne and NELSON, John D., 1999. Interoperability and transport policy: the impediments to interoperability in the organisation of trans-European transport systems. *Journal of Transport Geography*, 7(2), pp. 93-104.
244. NAIDU, Desineni S., 2003. *Optimal Control Systems*. Florida. CRC Press. ISBN: 0-8493-0892-5.

245. NELDER, J. A. and MEAD, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 4(7), pp. 308-313.
246. NELLTHORP, John and HYMAN, Geoffrey, (2001). Alternatives to the rule of a half in matrix-based appraisal. *European Transport Conference*, Cambridge.
247. NEWMAN, Peter W. G. and KENWORTHY, Jeffrey R., 1996. The land use-transport connection. *Land Use Policy*, 13(1), pp. 1-22.
248. NICOLAS, J. P., POCHEP, P. and POIMBOEUF, H., 2003. Towards sustainable mobility indicators: application to the Lyons conurbation. *Transport Policy*, 10(3), pp. 197-208.
249. NIJKAMP, Peter and BLAAS, Eddy, 1994. Impact assessment and evaluation in transportation planning. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. pp. 268. ISBN: 0-7923-2648-2.
250. NIJKAMP, Peter, WOODG, Henk and RIETVELD, Piet, 1990. Multicriteria evaluation in physical planning. Amsterdam. North Holland. pp. 259. ISBN: 0444881247.
251. OECD, 2003. OECD environmental indicators development, measurement and use. Environmental Performance and Information Division. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Reference Paper.
252. OECD, 1999. Indicators for the integration of environmental concerns into transport policies. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Working Group on the State of the Environment.
253. OLIVA, Rogelio, SALEH, Mohamed, KAMPMANN, Christian E. and DAVIDSEN, Pål I., 2010. A comprehensive analytical approach for policy analysis of system dynamics models. *European Journal of Operational Research*, 203(3), pp. 673-683.
254. OLIVA, Rogelio, 2003. Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. *European Journal of Operational Research*, 151(3), pp. 552-568.
255. OLSON David L., 2008. Multi-Criteria Decision Support. In: BURSTEIN Frada and HOLSAPPLE Clyde W., eds, *Handbook on Decision Support Systems 1*. Lincoln, NE: Springer Berlin Heidelberg, pp. 299-314. Vol. 2. Ch. 15. ISBN: 978-3-540-48712-8.
256. OLSON, David L., FLIEDNER, Gene and CURRIE, Karen, 1995. Comparison of the REMBRANDT system with analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 82(3), pp. 522-539.
257. ONGKITTIKUL, Sumet and GEERLINGS, Harry, 2006. Opportunities for innovation in public transport: Effects of regulatory reforms on innovative capabilities. *Transport Policy*, 13(4), pp. 283-293.
258. ORTÚZAR, Juan d. D. and WILLUMSEN, Luis G., 2008. Modelos de Transporte. Santander. Universidad de Cantabria. pp. 709. ISBN: 978-848102-512-5.
259. OSE, (2009). Observatorio de la Sostenibilidad en España. Available: www.sostenibilidad-es.org.
260. PAULLEY, Neil and PEDLER, Annette, 2000. Integration of transport and land-use planning. TRANSLAND. UK: Transport Research Foundation.
261. PEARMAN, Alan, 1988. Scenario construction for transport planning. *Transportation Planning and Technology*, 12(1), pp. 73-85.

262. PERRINGS Charles, 1991. Reserved Rationality and the Precautionary Principle: Technological Change, Time and Uncertainty in Environment Decision-Making. In: COSTANZA Robert, ed, *Ecological Economics: The science and management of sustainability*. New York: Columbia University Press, pp. 153. Ch. 11.
263. PFAFFENBICHLER Paul C.; MONZÓN Andrés; PARDEIRO Ana and VIEIRA Paula, 2006. Development of a Hierarchical Approach to Assess the Impacts of Transport Policies - The Madrid case study. In: VAN LEEUWEN Hos P. and TIMMERMANS Harry J. P., eds, *Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 19-34. Ch. 1. ISBN: 978-1-4020-5060-2.
264. PFAFFENBICHLER, Paul C., 2003. The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator). Dissertation, Doctoral Thesis. Technische Universität Wien - Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik. Vienna.
265. PFAFFENBICHLER, Paul C. and SHEPHERD, Simon P., 2003. A Dynamic Model to Appraise Strategic Land-Use and Transport Policies. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2(3-4), pp. 255-283.
266. PIKE Ralph W., 2001. *Multivariable Optimization Procedures. Optimization for Engineering Systems*. Baton Rouge, Louisiana: Louisiana State University.
267. PITOMBO, C. S., KAWAMOTO, E. and SOUSA, A. J., 2011. An exploratory analysis of relationships between socioeconomic, land-use, activity participation variables and travel patterns. *Transport Policy*, 18(2), pp. 347-357.
268. POLZIN, Steven E., 1999. Transportation land use relationship: public transit's impact on land use. *Journal of Urban Planning and Development*, 125(4), pp. 135-151.
269. POWELL, M. J. D., 2007. A view of algorithms for optimization without derivatives. Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics. Vol. DAMTP 2007/NA03. Cambridge: Cambridge Numerical Analysis. Cambridge NA Reports.
270. POWELL, M. J. D., 1968. On the Calculation of Orthogonal Vectors. *The Computer Journal*, 11(2), pp. 302-304.
271. POWELL, M. J. D., 1965. A Method for Minimizing a Sum of Squares of Non-Linear Functions Without Calculating Derivatives. *The Computer Journal*, 7(4), pp. 303-307.
272. POWELL, M. J. D., 1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 7(2), pp. 155-162.
273. PRESS, William H., TEUKOLSKY, Saul A., VETTERLING, William T. and FLANNERY, Brian P., 2007. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3rd Edition edn. Cambridge. Cambridge University Press. pp. 1248. ISBN: 0-521-88068-8.
274. PRESTON, John, 2009. Epilogue: Transport policy and social exclusion - Some reflections. *Transport Policy*, 16(3), pp. 140-142.
275. PROOST, Stef and VAN DENDER, Kurt, 2008. Optimal urban transport pricing in the presence of congestion, economies of density and costly public funds. *Transportation Research Part A*, 42(9), pp. 1220-1230.
276. PROOST, Stef and SEN, Ahksaya, 2006. Urban transport pricing reform with two levels of government: A case study of Brussels. *Transport Policy*, 13(2), pp. 127-139.

277. PRUD'HOMME, Rémy and BOCAREJO, Juan P., 2005. The London congestion charge: a tentative economic appraisal. *Transport Policy*, 12(3), pp. 279-287.
278. PUY HUARTE, José, 1997. *Cálculo Numérico*. Madrid. ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones. pp. 277. ISBN: 84-7493-043-X.
279. QUINN, John C., BRYANT, Paul H., CREVELING, Daniel R., KLEIN, Sallee R. and ABARBANEL, Henry D. I., 2009. Parameter and state estimation of experimental chaotic systems using synchronization. *Physical Review E*, 80(1), pp. 016201.
280. RAMJERDI Farideh; MINKEN Harald and ØSTMØE Knut, 2004. Norwegian Urban Tolls. Road Pricing: Theory and Evidence. Elsevier, pp. 237-249. Vol. 9. Ch. 10. *Research in Transportation Economics*. ISSN: 0739-8859.
281. RECKER, W. W., 2001. A bridge between travel demand modeling and activity-based travel analysis. *Transportation Research Part B*, 35(5), pp. 481-506.
282. REKLAITIS, G. V., RAVINDRAN, A. and RAGSDELL, K. M., 2006. *Engineering Optimization: Methods and Applications*. 2 edn. New Jersey. John Wiley & Sons. pp. 688. ISBN: 978-0-471-55814-9.
283. RENDERS, Jean-Michel and BERSINI, Hugues, (1994). Hybridizing genetic algorithms with hill-climbing methods for global optimization: two possible ways. *IEEE World Congress on Computational Intelligence, Bruxelles. Evolutionary Computation*. pp. 312-317.
284. REYMOND, Mathias and MIRABEL, François, 2011. Bottleneck congestion pricing and modal split: Redistribution of toll revenue. *Transportation Research Part A*, 45(1), pp. 18-30.
285. RICHARDSON, Barbara C., 2005. Sustainable transport: analysis frameworks. *Journal of Transport Geography*, 13(1), pp. 29-39.
286. RICHARDSON, Barbara C., 1997. Toward a Policy on a Sustainable Transportation System. *Transportation Research Record*, 1670pp. 27-34.
287. RIENSTRA, Sytze A., RIETVELD, Piet and VERHOEF, Erik T., 1999. The social support for policy measures in passenger transport. A statistical analysis for the Netherlands. *Transportation Research Part D*, 4(3), pp. 181-200.
288. ROBÈRT, Markus and JONSSON, Daniel, 2006. Assessment of Transport Policies Toward Future Emission Targets. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 8(4), pp. 451-478.
289. Rodrigues da Silva, Antônio Néilson, DA SILVA COSTA, Marcela and MACEDO, Márcia H., 2008. Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil. *Transport Policy*, 15(6), pp. 350-360.
290. ROSENBROCK, Howard H., 1960. An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. *The Computer Journal*, 3(3), pp. 175-184.
291. ROTARIS, Lucia, DANIELIS, Romeo, MARCUCCI, Edoardo and MASSIANI, Jérôme, 2010. The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost-benefit analysis assessment. *Transportation Research Part A*, 44(5), pp. 359-375.
292. ROTMANS, Jan, VAN ASSELTA, Marjolein and VELLINGA, Pier, 2000. An integrated planning tool for sustainable cities. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(3), pp. 265-276.

293. RUBERTI, Giovanni; CARLIER, Kristof; SCHRIJVER, Jeroen and SESSA, Carlo, 2009. City Application Manual - Outline of the Business Case Analysis Tool. CityMobil Project. Towards Advanced Road Transport for the Urban Environment. Vol. Del. 2.2.4. European Commission.
294. SAATY, R. W., 1987. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), pp. 161-176.
295. SAATY, Thomas L., 2000. *Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh. RWS Publications.
296. SAATY, Thomas L., 1991. Response to Holder's Comments on the Analytic Hierarchy Process. *Journal of the Operational Research Society*, 42(10), pp. 909-913.
297. SAATY, Thomas L., 1991. Response to Holder's Comments on the Analytic Hierarchy Process: Response to the Response to the Response. *Journal of the Operational Research Society*, 42(10), pp. 918-924.
298. SAFIROVA Elena; GILLINGHAM Kenneth; PARRY Ian; NELSON Peter; HARRINGTON Winston and MASON David, 2004. Welfare and distributional effects of road pricing schemes for metropolitan Washington DC. In: DE PALMA André, LINDSEY Robin and PROOST Stef, eds, *Research in Transportation Economics*. Cambridge: Elsevier, pp. 179-206. Vol. 9. Ch. 8. Road Pricing: Theory and Evidence. ISSN: 0739-8859.
299. SALLING, Kim B. and LELEUR, Steen, 2011. Transport appraisal and Monte Carlo simulation by use of the CBA-DK model. *Transport Policy*, 18(1), pp. 236-245.
300. SALLING, Kim B., LELEUR, Steen and SKOUGAARD, Britt Z., (2010). Reference Scenario Forecasting: A New Approach to Transport Project Assessment. *Proceedings of the World Conference on Transport Research (WCTR)*, Lisbon. ISBN: 978-989-96986-0-4.
301. SALLING, Kim B. and BANISTER, David, 2009. Assessment of large transport infrastructure projects: The CBA-DK model. *Transportation Research Part A*, 43(9-10), pp. 800-813.
302. SALLING, Kim B. and LELEUR, Steen, (2007). Appraisal of Airport Alternatives in Greenland by the use of Risk Analysis and Monte Carlo Simulation. *Proceedings of the 41st Winter Simulation Conference (WSC)*, Washington D.C. pp. 1986-1993.
303. SAMARAS, Zissis and NTZIACHRISTOS, Leonidas, 1998. Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport. MEET Project. COST 319 WG A3A. Vol. Deliverable 7. Thessaloniki: European Commission / DG VII.
304. SANCHEZ, Thomas W.; STOLZ, Rich and MA, Jacinta S., 2003. *Moving to Equity: Addressing Inequitable Effects of Transportation Policies on Minorities*. Cambridge, MA: The Civil Rights Project at Harvard University.
305. SANTOS, Georgina, BEHRENDT, Hannah, MACONI, Laura, SHIRVANI, Tara and TEYTELBOYM, Alexander, 2010a. Part I: Externalities and economic policies in road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), pp. 2-45.
306. SANTOS, Georgina, BEHRENDT, Hannah and TEYTELBOYM, Alexander, 2010b. Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), pp. 46-91.
307. SANTOS, Georgina and BHAKAR, Jasvinder, 2006. The impact of the London congestion charging scheme on the generalised cost of car commuters to the city of London from a value of travel time savings perspective. *Transport Policy*, 13(1), pp. 22-33.

308. SANTOS, Georgina and ROJEY, Laurent, 2004. Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth. *Transportation*, 31(1), pp. 21-42.
309. SARABIA, Angel A., 1995. *La Teoría General de Sistemas*. 1 edn. Madrid. Isdefe. pp. 171. ISBN: 84-68338-01-9.
310. SCHAFFER, Andreas, 2000. Regularities in Travel Demand: An International Perspective. *Journal of Transportation and Statistics*, 3(3).
311. SCHIPPER, Lee, (2001). *Sustainable Urban Transport in the 21st Century: A New Agenda. Transportation, Energy, and Environmental Policy: Managing Transitions*, ISBN: 0-309-08571-3. Transportation Research Board. pp. 42-62.
312. SCHLICH, Robert, SCHÖNFELDER, Stefan, HANSON, Susan and AXHAUSEN, Kay W., 2004. Structures of Leisure Travel: Temporal and Spatial Variability. *Transport Reviews*, 24(2), pp. 219-237.
313. SCHÖLLER-SCHWEDES, Oliver, 2010. The failure of integrated transport policy in Germany: a historical perspective. *Journal of Transport Geography*, 18(1), pp. 85-96.
314. SCHUITEMA, Geertje, STEG, Linda and FORWARD, Sonja, 2010. Explaining differences in acceptability before and acceptance after the implementation of a congestion charge in Stockholm. *Transportation Research Part A*, 44(2), pp. 99-109.
315. SEN, Amartya, 1987. *The Standard of Living*. Cambridge, MA: Cambridge University Press. ISBN-13: 9780521368407.
316. SHEPHERD, Simon P.; BALIJEPALLI, Chandra; KOH, Andrew and PFAFFENBICHLER, Paul C., 2010. *MARS - DISTILLATE Future developments*. Institute for Transport Studies, University of Leeds. Leeds: Department for Transport.
317. SHEPHERD, Simon P. and PFAFFENBICHLER, Paul C., 2006. Sustainable transport policies under scarcity of oil supply. *Engineering Sustainability*, 159(2), pp. 63-70.
318. SHEPHERD, Simon P., TIMMS, Paul M. and MAY, Anthony D., 2006a. Modelling requirements for local transport plans: An assessment of English experience. *Transport Policy*, 13(4), pp. 307-317.
319. SHEPHERD, Simon P., ZHANGB, X., EMBERGER, Günter, HUDS, M., MAY, Anthony D. and PAULLEY, Neil, 2006b. Designing optimal urban transport strategies: The role of individual policy instruments and the impact of financial constraints. *Transport Policy*, 13(1), pp. 49-65.
320. SHIFTAN, Yoram, KAPLAN, Sigal and HAKKERT, Shalom, 2003. Scenario building as a tool for planning a sustainable transportation system. *Transportation Research Part D*, 8(5), pp. 323-342.
321. SIKOW-MAGNY Catharina, 2003. Efficient pricing in transport - Overview of european commission's transport research programme. In: SCHADE Jens and SCHLAG Bernhard, eds, *Acceptability of Transport Pricing Strategies*. Amsterdam: Elsevier, pp. 13-26. Ch. 2. ISBN: 0-08-044199-8.
322. SIMMONDS, David, 2001. *Appraisal in Land Use/Transport Interaction: Design*. Cambridge, UK: Secretary of State for the Environment, Transport and the Regions. Report to Government Office for the North-West.
323. SIMMONDS, David and STILL, Ben, 2000. The economic impacts of parking restraint policies. *Transport Reviews*, 20(3), pp. 291-316.

324. SIVAKUMAR, Aruna, 2007. *Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies*. London: Imperial College.
325. SMALL Kenneth A., 1999. Project Evaluation. In: GÓMEZ-IBÁÑEZ José A., TYE William and WINSTON Clifford, eds, *Essays in Transportation Economics and Policy: A Handbook in Honor of John R. Meyer*. Washington, DC: Brookings Institution Press, pp. 137-180. Ch. 5. ISBN: 0-8157-3184-7.
326. SMITH, C. S., 1962. The automatic computation of maximum likelihood estimates. Vol. S.C. 846/MR/40. N.C.B. Scientific Department.
327. SOUTO NIEVES, Guadalupe, 2003. Tasas de descuento para la evaluación de inversiones públicas: estimaciones para España. Instituto de Estudios Fiscales. Vol. P. T. No. 8/03. Barcelona: Dirección General de Investigación de la Generalitat de Catalunya. ISSN: 1578-0252.
328. SPANG, H. A., 1962. A Review of Minimization Techniques for Nonlinear Functions. *SIAM Review*, 4(4), pp. 343-365.
329. SPENDLEY, W., HEXT, G. R. and HIMSWORTH, F. R., 1962. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation. *Technometrics*, 4(4), pp. 441-461.
330. STANLEY, Janet and VELLA-BRODRICK, Dianne, 2009. The usefulness of social exclusion to inform social policy in transport. *Transport Policy*, 16(3), pp. 90-96.
331. STEAD, Dominic, 2001. Relationships between land use, socioeconomic factors, and travel patterns in Britain. *Environment and Planning B*, 28(7), pp. 499-528.
332. STEG, Linda and GIFFORD, Robert, 2005. Sustainable transportation and quality of life. *Journal of Transport Geography*, 13(1), pp. 59-69.
333. STEG Linda and VLEK C., 1997. The role of problem awareness in willingness-to-change car use and in evaluating relevant policy measures. In: ROTHENGATTER T. and CARBONELL VAYA E., eds, *Traffic and transport psychology. Theory and application*. Oxford: Pergamon, pp. 465-475.
334. STERMAN, John D., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston. Irwin/McGraw-Hill. ISBN: 0-07-231135-5.
335. STEWART, John Q., 1948. Demographic Gravitation: Evidence and Applications. *Sociometry*, 11(1-2), pp. 31-58.
336. STEWART, John Q., 1947. Empirical Mathematical Rules concerning the Distribution and Equilibrium of Population. *Geographical Review*, 37(3), pp. 461-485.
337. STEWART, Murray; GOSS, S.; GILLANDERS, G.; CLARKE, R.; ROWE, J. and SHAFTOE, H., 1999. *Cross-cutting issues affecting local government*. London: University of the West of England and the Office for Public Management. Communities and Local Government. Full Report.
338. SU, Qing, 2010. Travel demand in the US urban areas: A system dynamic panel data approach. *Transportation Research Part A*, 44(2), pp. 110-117.
339. SUGDEN, Robert, 2002. *Multi-modal transport appraisal investment*. London: Department for Transport.

340. SUGDEN, Robert, 1999. Developing a consistent cost-benefit framework for multimodal transport appraisal. London: Report to the Department of the Environment, Transport and the Regions.
341. TfL, 2008. Central London congestion charging - Impacts monitoring. London: Transport for London. Sixth Annual Report.
342. THOMSON, Ian and BULL, Alberto, 2002. La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. Revista de la CEPAL, 76pp. 109-121.
343. TIGHT, M. R. and MAY, Anthony D., 2006. Innovation and integration in urban transport policy. *Transport Policy*, 13(4), pp. 281-282.
344. TIMMS, Paul M., MAY, Anthony D. and SHEPHERD, Simon P., 2002. The sensitivity of optimal transport strategies to specification of objectives. *Transportation Research Part A*, 36(5), pp. 383-401.
345. TORCZON, Virginia, LEWIS, Robert M. and TROSSET, Michael W., 2000. Direct search methods: then and now. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124(1-2), pp. 191-207.
346. TRESSIDER, J. O., MEYERS, D. A., BURRELL, J. E. and POWELL, T. J., (1968). The London transportation study: methods and techniques. Institute of Civil Engineers Proceedings, London. E-ISSN: 1753-7789. pp. 433-464.
347. TSAMBOULAS, D. and KOPSACHEILI, A. G., 2003. Methodological Framework for Strategic Assessment of Transportation Policies: Application for Athens 2004 Olympic Games. *Transportation Research Record*, 1848(03-2930), pp. 19-28.
348. TUDELA, Alejandro, AKIKI, Natalia and CISTERNAS, Rene, 2006. Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis. An application to urban transport investments. *Transportation Research Part A*, 40(5), pp. 414-423.
349. United Nations, 1987. Our common future. Brundtland Report. Oxford: The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press.
350. UNIVERSIDAD DE CHILE, (2009). MUSSA, Modelo del Uso del Suelo. Available: www.mussa.cl.
351. VALL-ILOSSERA, Mercè, 1994. Aplicación del modelado geométrico a problemas de difracción electromagnética. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
352. VAN DE VOOREN, F. W. C. J., 2004. Modelling transport in interaction with the economy. *Transportation Research Part E*, 40(5), pp. 417-437.
353. Van den Honert, R. C. and LOOTSMA, Freerk A., 2000. Assessing the quality of negotiated proposals using the REMBRANDT system. *European Journal of Operational Research*, 120(1), pp. 162-173.
354. VAN DER HOORN, Toon, ERADUS, Paul and SCHOEMAKERS, Arnout, 2002. Four applications of the TIGRIS model in the Netherlands. *Journal of Transport Geography*, 10(2), pp. 111-121.
355. VAN WEE, Bert, 2002. Land use and transport: research and policy challenges. *Journal of Transport Geography*, 10(4), pp. 259-271.
356. VENTANA SYSTEMS INC., (2010). Ventana Systems. Available: www.vensim.com [2010].

357. VERHOEF, Erik T., NIJKAMP, Peter and RIETVELD, Piet, 1995. The economics of regulatory parking policies: The (IM)possibilities of parking policies in traffic regulation. *Transportation Research Part A*, 29(2), pp. 141-156.
358. VIEIRA, Paula, 2005. Modelización de la interacción de usos del suelo y transporte. Aplicación al corredor de la A-3 de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
359. VOLD, Arild, 2005. Optimal land use and transport planning for the Greater Oslo area. *Transportation Research Part A*, 39(6), pp. 548-565.
360. VREEKER, Ron, NIJKAMP, Peter and WELLE, Chris T., 2002. A multicriteria decision support methodology for evaluating airport expansion plans. *Transportation Research Part D*, 7(1), pp. 27-47.
361. WALLENIUS, Jyrki, DYER, James S., FISHBURN, Peter C., STEUER, Ralph E., ZIONTS, Stanley and DEB, Kalyanmoy, 2008. Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. *Management Science*, 54(7), pp. 1336-1349.
362. WALTERS, Frederick H., MORGAN, Stephen L., PARKER, Lloyd R. and STANLEY N., Jr, 2001. *Sequential simplex optimization: a technique for improving quality and productivity in research, development, and manufacturing*. 1 edition edn. Boca Raton, FL. CRC Press. pp. 352. ISBN-10: 0849358949.
363. WALTHER, K.; OETTING, A. and VALLÉE, D., 1997. Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung auf der Basis eines neuen Verkehrswiderstands. Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen.
364. WANG, Jian and SUN, Guanglin, 2010. Combinatorial Optimization of Congested Road and Parking Charging. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 10(3), pp. 24-28.
365. WEGENER Michael, 2003. Overview of land-use transport models. In: HENSHER David A., BUTTON Kenneth J., HAYNES Kingsley E. and STOPHER Peter R., eds, *Transport Geography and Spatial Systems*. Kidlington: Emerald, Inc., pp. 127-146. Vol. 5. Ch. 9. *Handbook in Transport*. ISBN: 978-0-08-044108-5.
366. WEGENER, Michael and FÜRST, Franz, 1999. *Land-Use Transport Interaction: State of the Art*. Dortmund: Institut für Raumplanung. Deliverable 2a of the project TRANSLAND.
367. WEGENER, Michael, 1994. Operational Urban Models: State of Art. *Journal of the American Planning Association*, 60(1), pp. 17-29.
368. WIERINGA, Keimpe, 1995. *Environment in the European Union*. Luxemburgo: Report for the Review of the Fifth Environmental Action Programme. ISBN: 92-827-5263-1.
369. WILSON, A. G., 1998. Land-use/transport Interaction Models: Past and Future. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32(1), pp. 3-26.
370. WINGO, Lowdon, 1961. An Economic Model of the Utilization of Urban Land for Residential Purposes. *Papers in Regional Science*, 7(1), pp. 191-205.
371. WOLFRAM, Marc, 2004. Expert Working Group on Sustainable Urban Transport Plans. Cologne: Rupprecht Consult - Forschung & Beratung GmbH. Final Report.

372. WOLSTENHOLME, E. F. and AL-ALUSI, Abdul-Sattar, 1987. System dynamics and heuristic optimisation in defence analysis. *System Dynamics Review*, 3(2), pp. 102-115.
373. WOON, Siew F. and REHBOCK, Volker, 2010. A critical review of discrete filled function methods in solving nonlinear discrete optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 217(1), pp. 25-41.
374. YANG, Hai, XU, Wei and HEYDECKER, Benjamin, 2010. Bounding the efficiency of road pricing. *Transportation Research Part E*, 46(1), pp. 90-108.
375. YÜCEL, Gönen and BARLAS, Yaman, (2007). Pattern-based system design/optimization. 25th International Conference of the System Dynamics Society, Boston, MA. ISBN: 978-0-9745329-8-1.
376. ZAHAVI, Yacov, (1976). The Effects of Transportation Systems on the Spatial Distributions of Population and Jobs. Joint National Meeting of the Operations Research Society, Miami.
377. ZANGWILL, Willard I., 1967. Minimizing a function without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 10(3), pp. 293-296.
378. ZHANG, Xiaoyan, PAULLEY, Neil, HUDSON, Mark and GLYN, R., 2006. A method for the design of optimal transport strategies. *Transport Policy*, 13(4), pp. 329-338.
379. ZUIDGEEST, Marcus H. P., 2005. Sustainable Urban Transport Development: A Dynamic Optimisation Approach. Dissertation, Doctoral Thesis. University of Twente, Centre for Transport Studies. Twente.

ANEXOS

ANEXO 1.

APLICACIÓN DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

1.1 PRUEBA QUE LA FUNCIÓN A OPTIMIZAR ES MINIMIZADA

El algoritmo de optimización descrito en el Capítulo 4, funciona de forma iterativa buscando diferentes puntos a lo largo de direcciones conjugadas linealmente independientes hasta hallar un óptimo global. La prueba que el algoritmo funciona y minimiza una función objetivo se describe a continuación. Si la función a minimizar tiene la forma de:

$$f(x) = xAx + bx + c \quad (1.1)$$

Luego, las direcciones \mathbf{p} y \mathbf{q} se definen como conjugadas si:

$$\mathbf{p}A\mathbf{q} = 0 \quad (1.2)$$

En este caso, para que un mínimo sea definido es necesario que la matriz A sea definida positiva, aunque dentro de la prueba no se haga uso de este hecho. Consecuentemente, el procedimiento descrito en el Capítulo 4 deberá encontrar el punto estacionario de cualquier función cuadrática, siempre y cuando cada búsqueda lineal encuentre un máximo o un mínimo (Powell, 1964). Esta prueba requiere de dos teoremas:

Teorema 1. Si $q_1, q_2, \dots, q_m, m \leq n$, son direcciones mutuamente conjugadas, significa que el mínimo de la función cuadrática $f(x)$, donde x es un punto general en el espacio m -dimensional que contiene x_0 y las direcciones q_1, q_2, \dots, q_m , puede encontrarse haciendo una sola búsqueda a lo largo de cada una de las direcciones. El mínimo requerido es el punto

$$x_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \mathbf{q}_i \quad (1.3)$$

Donde los parámetros $\alpha_i, i=1, 2, \dots, m$, reducen al mínimo

$$f\left(x_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \mathbf{q}_i\right) = \sum_{i=1}^m \left(\alpha_i^2 \mathbf{q}_i A \mathbf{q}_i + \alpha_i \mathbf{q}_i (2Ax_0 + b)\right) + f(x_0) \quad (1.4)$$

No hay términos en $\alpha_i \alpha_j$, para $i \neq j$, debido a la mutua conjugación de las direcciones. De esta manera, el efecto de la búsqueda en la dirección \mathbf{q}_i es encontrar un α_i que minimice

$$\alpha_i^2 \mathbf{q}_i A \mathbf{q}_i + \alpha_i \mathbf{q}_i (2Ax_0 + b) \quad (1.5)$$

Donde el valor resultante de α_i es independiente de los demás términos de la función. Por la tanto, una sola búsqueda en cada una de las direcciones, encontrará el mínimo absoluto en el espacio.

Teorema 2. Si x_0 es el mínimo en un espacio que contiene la dirección \mathbf{q} , y x_1 es también un mínimo dentro de un espacio de este tipo, la dirección $(x_1 - x_0)$ es conjugada con \mathbf{q} .

Por definición $\frac{\partial}{\partial \alpha} (f(x_0 + \alpha q)) = 0$ cuando $\alpha = 0$

De esta manera, $2\alpha q A q + q(2Ax_0 + b) = 0$ cuando $\alpha = 0$

También $2\alpha q A q + q(2Ax_1 + b) = 0$ cuando $\alpha = 0$

Así que $qA(x_1 + x_0) = 0$... la cual es la condición para la conjugación

La convergencia al mínimo de una función cuadrática en n iteraciones, puede ser probada por inducción, por lo que se asume que se deben completar k iteraciones y que las direcciones $s_{n-k+1}, s_{n-k+2}, \dots, s_n$, son definidas para la $(k+1)$ -ésima iteración, y son mutuamente conjugadas. Ya que éstas fueron las últimas k direcciones de la búsqueda, al aplicar el **Teorema 1**, la aproximación inicial para la $(k+1)$ -ésima iteración, p_0 , es el mínimo en un espacio que contenga las direcciones. De nuevo por el **Teorema 1**, el punto p_n , se define en la $(k+1)$ -ésima iteración, es también el mínimo en este espacio. De esta manera, aplicando el **Teorema 2**, la nueva dirección definida por la iteración es conjugada con $s_{n-k+1}, s_{n-k+2}, \dots, s_n$, por lo que el paso general de la inducción está probado (Powell, 1964).

El punto p_0 , definido para la segunda iteración y el consecuente p_n son mínimos en la dirección s_n . Después de n iteraciones todas las direcciones de búsqueda son mutuamente conjugadas, así que según el **Teorema 1**, el mínimo de una función podrá ser hallado.

1.2 EL MÉTODO DE POWELL MODIFICADO

El procedimiento básico podría no llegar a converger en determinadas circunstancias. Cuando algunas direcciones de búsqueda lleguen a ser dependientes, la solución sugiere el cálculo de la función en un punto extrapolado a partir de las soluciones correspondientes a la última dirección x_n y la dirección inmediatamente anterior x_{n-1} . Esto se hace de acuerdo con (cada etapa incluye n iteraciones en las n direcciones conjugadas):

$$P_s = 2P_n - P_{n-1}$$

Donde,

$$v_n = f(P_n)$$

$$v_{n-1} = f(P_{n-1})$$

$$v_s = f(P_s)$$

Y a partir de los cuales se calculan los siguientes parámetros:

$$\delta_1 = v_s - v_{n-1}$$

$$\delta_2 = (v_{n-1} - 2v_n + v_s) \cdot (v_{n-1} - v_n - \Delta) - \frac{1}{2}\Delta(v_{n-1} - v_n)^2$$

Donde Δ representa la mayor disminución del valor de la función objetivo en cada una de las iteraciones de la etapa.

1. Si $\delta_1 \geq 0$ ó $\delta_2 \geq 0$, conservar para la siguiente etapa las mismas direcciones.

2. Si $\delta_1 < 0$ ó $\delta_2 < 0$, definir la dirección $\mathbf{u} = \mathbf{p}_n - \mathbf{p}_{n-1}$ y obtener el mínimo de la función en dicha dirección. Este punto será el punto de inicio de la siguiente etapa, modificándose la dirección s_j utilizada en la iteración en que se ha producido el mayor descenso que se hace igual a la de la última iteración de la etapa, mientras que esta se sustituye por la dirección \mathbf{u} definida anteriormente:

$$s_j = s_{n-1} = \mathbf{u}$$

1.3 EJEMPLO DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN

Según el método descrito, las direcciones conjugadas son el eje de coordenadas ortogonal, en un inicio. De esta manera, a continuación se describirá en detalle un ejemplo de aplicación con una función sencilla, para n variables independientes. En este caso el número de n será igual a dos.

En el algoritmo modificado de Powell (Press et al., 2007), el proceso empieza con un punto conocido de inicio \mathbf{p}_0 y cada aplicación del algoritmo consiste en $n+2$ búsquedas sucesivas sobre una dirección. La primera búsqueda ($n+1$) es a lo largo del eje de coordenadas n . La búsqueda $n+2$, va desde el punto obtenido en la búsqueda inmediatamente anterior hasta el mejor punto hallado (obtenido al final de la búsqueda $n+1$). Si la función es cuadrática, con este procedimiento se localizaría el punto óptimo. De lo contrario, se debe continuar la búsqueda con una de las primeras n direcciones, la cual debe ser reemplazada por una dirección $n+1$ (ver Capítulo 4) y se repite el procedimiento hasta que se cumpla el criterio buscado (los límites de tolerancia admitidos).

De esta manera, a continuación se presenta un ejemplo de encontrar el mínimo de una función descrita por la ecuación (1.6). Esta función describe la superficie mostrada en la Figura 1.1, para un rango comprendido entre $0 \leq x \leq 5$ y $0 \leq y \leq 5$.

$$f(x, y) = x^2 - 4x + y^2 - y - xy$$

(1.6)

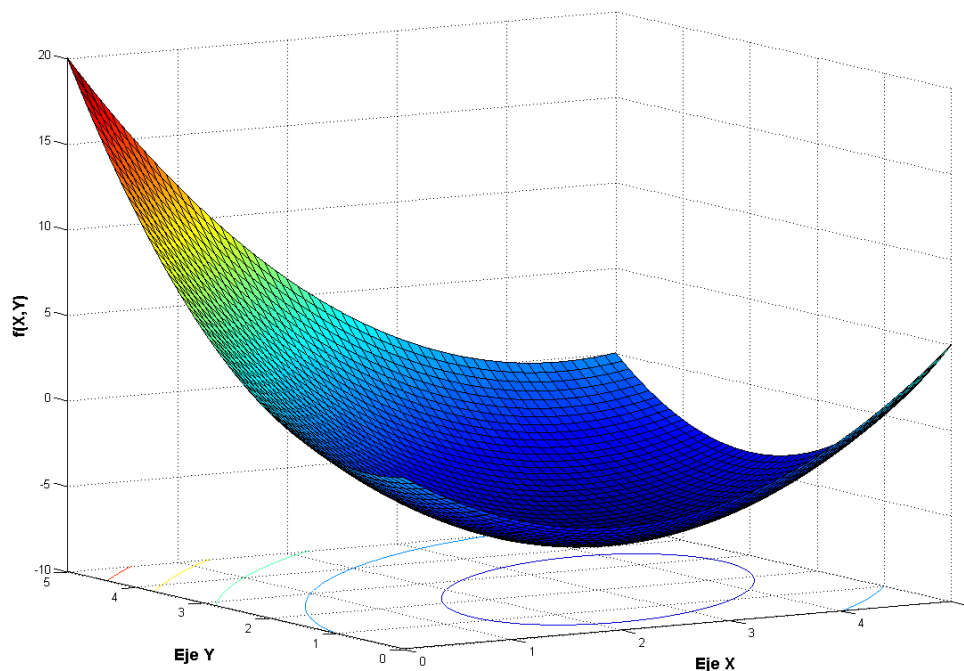


Figura 1.1 Superficie de la Función

Como se muestra en la Figura 1.2, el procedimiento empieza en el punto $p_0^T = (0.5 \ 0.5)$ y el primer paso localiza el punto mínimo sobre el contorno tangente a la línea s_n , p_0 , de la siguiente manera:

	Punto Inicial	Dirección 1	Dirección 2	Tolerancia x	Tolerancia y
Etapa 1: ($i=0$)	$p_0 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$ $f(p_0) = -2.25$	$s_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$s_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\varepsilon_1 = 1.0E^{-8}$	$\varepsilon_2 = 1.0E^{-8}$

Etapa 2: ($i=0$) ($k=1$)	$p_1 = p_0 + \alpha_1 \cdot s_1$ $p_1 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} + \alpha_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 + \alpha_1 \\ 0.5 \end{bmatrix}$ $f(\alpha_1) = (0.5 + \alpha_1)^2 - 4(0.5 + \alpha_1) + 0.5^2 - 0.5 - (0.5 + \alpha_1) \cdot 0.5$ $f'(\alpha_1) = 2\alpha_1 - 3.5$ $\alpha_1^* = 1.75$ $p_1 = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 0.50 \end{bmatrix}$ $f(p_1) = -5.3125$				
($i=0$) ($k=2$)	$p_2 = p_1 + \alpha_2 \cdot s_2$ $p_2 = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 0.50 \end{bmatrix} + \alpha_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 0.5 + \alpha_2 \end{bmatrix}$ $f(\alpha_2) = 2.25^2 - 4 \cdot 2.25 + (0.5 + \alpha_2)^2 - (0.5 + \alpha_2) - 2.25(0.5 + \alpha_2)$ $f'(\alpha_2) = 2\alpha_2 - 2.25$ $\alpha_2^* = 1.125$ $p_2 = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 1.625 \end{bmatrix}$ $f(p_2) = -6.5781$				
($i=0$) ($k=3$)	$s_3 = p_i - p_0$ $s_3 = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 1.625 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.75 \\ 1.125 \end{bmatrix}$ $p_3 = p_2 + \alpha_3 \cdot s_3$ $p_3 = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 1.625 \end{bmatrix} + \alpha_3 \begin{bmatrix} 1.75 \\ 1.125 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.25 + 1.75\alpha_3 \\ 1.625 + 1.125\alpha_3 \end{bmatrix}$ $f(\alpha_3) = (2.25 + 1.75\alpha_3)^2 - 4 \cdot (2.25 + 1.75\alpha_3) + (1.625 + 1.125\alpha_3)^2 - (1.625 + 1.125\alpha_3) - (2.25 + 1.75\alpha_3) \cdot (1.625 + 1.125\alpha_3)$				

$$f'(\alpha_3) = 4.7187\alpha_3 - 1.9688$$

$$\alpha_3^* = 0.4172 \quad p_3 = \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 2.0944 \end{bmatrix}$$

$$f(p_3) = -6.9888$$

Etapa 3:

$$|\Delta f| = f(p_i) - f(p_0)$$

$$|\Delta f| = 4.7388 > \varepsilon_1 \dots \text{continúa}$$

$$\Delta p = p_i - p_0$$

$$\Delta p^T = [2.4801 \quad 1.5944] \quad \Delta p = \begin{bmatrix} 2.4801 \\ 1.5944 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta p^T \cdot \Delta p| = 8.6931 > \varepsilon_2 \dots \text{continúa}$$

→ $j=2$ un ciclo adicional

Volver al paso 2

Etapa 2:

$$p_0 = \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 2.0944 \end{bmatrix} \quad s_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

($i=1$) ($k=1$)

$$p_4 = \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 2.0944 \end{bmatrix} + \alpha_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 2.0944 + \alpha_4 \end{bmatrix}$$

$$f(\alpha_4) = 2.9801^2 - 4 \cdot 2.9801 + (2.0944 + \alpha_4)^2 - (2.0944 + \alpha_4) - 2.9801(2.0944 + \alpha_4)$$

$$f'(\alpha_4) = 2\alpha_4 + 6.9997$$

$$\alpha_4^* = -0.1043 \quad p_4 = \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 1.9901 \end{bmatrix}$$

$$f(p_4) = -6.9997$$

($i=1$) ($k=2$)

$$p_5 = p_4 + \alpha_5 \cdot s_5$$

$$p_5 = \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 1.9901 \end{bmatrix} + \alpha_5 \begin{bmatrix} 1.75 \\ 1.125 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9801 + 1.75\alpha_5 \\ 1.9901 + 1.125\alpha_5 \end{bmatrix}$$

$$f(\alpha_5) = (2.9801 + 1.75\alpha_5)^2 - 4(2.9801 + 1.75\alpha_5) + (1.9901 + 1.125\alpha_5)^2 - (1.9901 + 1.125\alpha_5) - (2.9801 + 1.75\alpha_5)(1.9901 + 1.125\alpha_5)$$

$$f'(\alpha_5) = 4.7187\alpha_5 - 0.0521$$

$$\alpha_5^* = 0.011 \quad p_5 = \begin{bmatrix} 2.9995 \\ 2.0025 \end{bmatrix}$$

$$f(p_5) = -6.9999$$

$(i=1) (k=3)$

$$s_6 = \begin{bmatrix} 2.9995 \\ 2.0025 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2.9801 \\ 2.0944 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0194 \\ -0.0919 \end{bmatrix}$$

$$p_6 = \begin{bmatrix} 2.9995 \\ 2.0025 \end{bmatrix} + \alpha_6 \begin{bmatrix} 0.0194 \\ -0.0919 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9995 + 0.0194\alpha_6 \\ 2.0025 - 0.0919\alpha_6 \end{bmatrix}$$

$$f(\alpha_6) = 0.0106\alpha_6^2 - 0.006\alpha_6 - 7$$

$$f'(\alpha_6) = 0.02121\alpha_6 - 0.006$$

$$\alpha_6^* = 0.0275 \quad p_6 = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix} \rightarrow \text{Punto óptimo}$$

$$f(p_6) = -7.00$$

Si la función del ejemplo anterior no hubiera sido cuadrática, se debería seguir el procedimiento hasta que se cumplan los criterios de tolerancia.

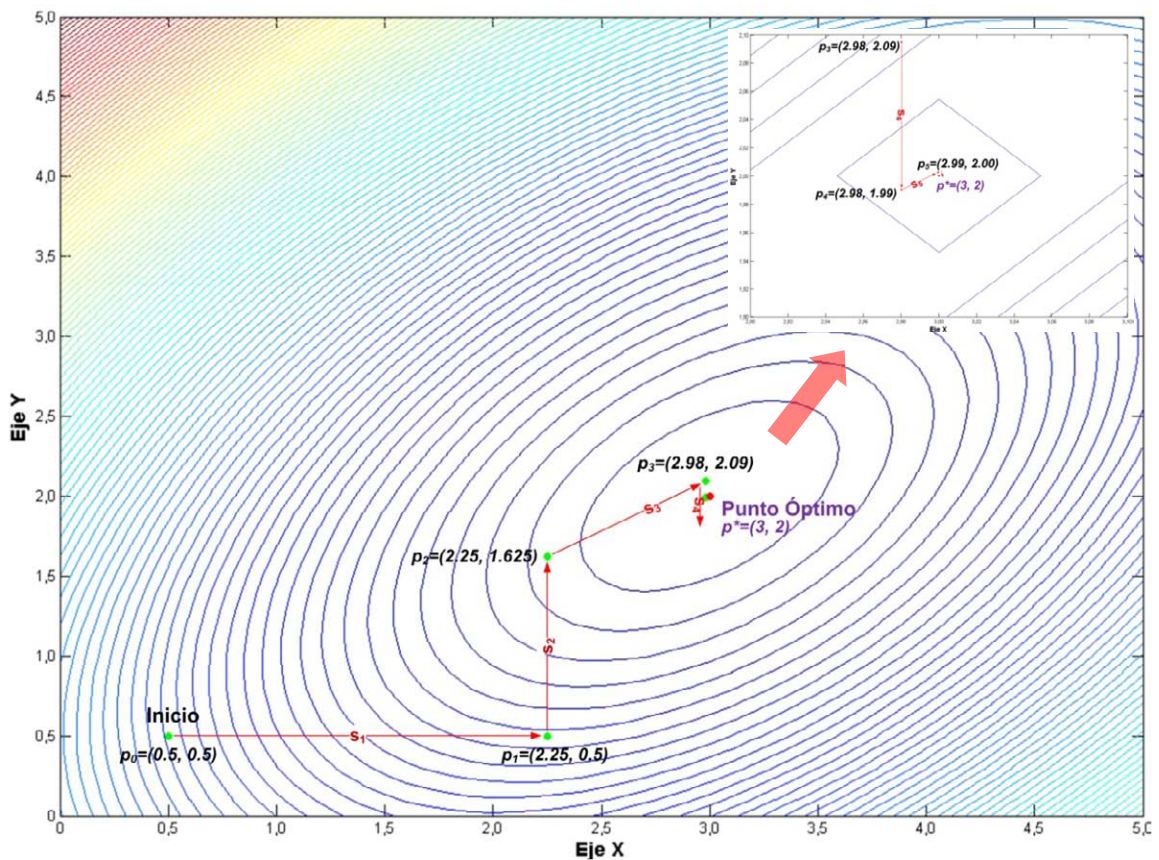


Figura 1.2 Búsqueda del Óptimo

Como se ha visto en el Capítulo 4, Powell ha señalado que es necesario hacer una modificación si las direcciones de búsqueda tienden a volverse linealmente dependientes, aunque existen varias formas de solucionar este problema de dependencia lineal (Press et al., 2007).

Por todo lo anterior, este método es conocido como uno de los procedimientos más eficientes y fiables de los métodos de búsqueda directa (Reklaitis et al., 2006). Esto se debe a su relativa simplicidad y a la propiedad de convergencia cuadrática (Pike, 2001).

Sin embargo, en este ejemplo tan sencillo conviene hacer un par de observaciones:

- En este ejemplo en particular, se hace uso de derivadas, lo que debería evitarse.
- Es de suponer que se presenten casos donde las funciones no sean cuadráticas, ni la matriz Hessiana (A) positiva. Por ello, la función utilizada en el ejemplo anterior, aunque válida para la explicación del procedimiento, resulta demasiado simple, para garantizar que el procedimiento será convergente en su aplicación al problema de optimización planteado.

Teniendo en cuenta las consideraciones descritas en el apartado 4.3.4 del Capítulo 4, y recordando que la función (1.7) toma su valor mínimo en $A \cdot x = b$; el procedimiento de búsqueda define a partir de un punto x_m , unos nuevos puntos x_{m+1} con la condición $f(x_{m+1}) < f(x_m)$.

$$f(x) = a + b^T x + \frac{1}{2} x^T Q x \quad (1.7)$$

El punto x_{m+1} se obtiene a partir del x_m por la expresión:

$$x_{m+1} = x_m + \alpha_m \cdot u_m$$

Donde u_m representa una función determinada y α_m es un escalar que se calcula con la condición de que $f(x_{m+1})$ sea mínimo en la dirección u_m .

Entonces, conocida la dirección u_m el valor de α se determina teniendo en cuenta las siguientes propiedades (Puy Huarte, 1997):

1. Si $r_m = Ax_m - b$

$$\text{grad}_x F = r_m \quad (1.8)$$

2. Si

$$x_{m+1} = x_m + \alpha_m \cdot u_m \quad (1.9)$$

Se verifica

$$r_{m+1} = r_m + \alpha_m \cdot Au_m \quad (1.10)$$

3. Para un determinado valor de \mathbf{u}_m , el valor de α_m para el que $f(\mathbf{x}_{m+1})$ es mínimo, es:

$$\alpha_m = -\frac{\mathbf{u}_m^T \mathbf{r}_m}{\mathbf{u}_m^T \cdot A \mathbf{u}_m} \quad (1.11)$$

Y se cumple

$$\mathbf{r}_{m+1} \cdot \mathbf{u}_m = 0 \quad (1.12)$$

Ahora, para los criterios de elección de la dirección de búsqueda, se tiene que la dirección del gradiente de mayor descenso del valor de la función f es:

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{r}_m \quad (1.13)$$

$$\alpha_m = -\frac{\|\mathbf{r}_m\|^2}{\mathbf{r}_m^T \cdot A \mathbf{r}_m} \quad (1.14)$$

Una condición suficiente de convergencia es que la relación entre el mayor y menor autovalor de A sea inferior a 2.

Ahora, en el plano $\mathbf{u}_{m-1}, \mathbf{r}_m$ (gradiente conjugado):

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{r}_m + \beta_m \cdot \mathbf{u}_{m-1} \quad (1.15)$$

Donde para el valor de β_m que hace mínimo $f(\mathbf{x}_{m+1})$ se cumple:

$$\mathbf{r}_{m+1}^T \cdot \mathbf{u}_{m-1} = 0 \quad (1.16)$$

$$\mathbf{r}_{m+1}^T \cdot \mathbf{r}_m = 0 \quad (1.17)$$

$$\mathbf{u}_{m-1}^T \cdot A \mathbf{u}_m = 0 \quad (1.18)$$

$$\mathbf{u}_{m-1}^T \cdot \mathbf{r}_m = \|\mathbf{r}_m\|^2 \quad (1.19)$$

$$\beta_m = -\frac{\|\mathbf{r}_m\|^2}{\|\mathbf{r}_{m-1}\|^2} \quad (1.20)$$

La prueba de la convergencia puede verse en detalle en el libro “Cálculo Numérico” (Puy Huarte, 1997).

En este ejemplo en particular, el número de iteraciones es igual al número de variables, en este caso dos. Este mismo ejemplo sin la utilización de derivadas se explica a continuación.

Etapa 1: $x_0 = p_0$

$$p_0 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

$$f(p_0) = -2.25$$

$$r_0 = \begin{bmatrix} 3.5 \\ -0.5 \end{bmatrix}$$

$$\beta_0 = 0$$

$$u_0 = r_0 = \begin{bmatrix} 3.5 \\ -0.5 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ec. (1.14)} \quad \alpha = -\frac{\|r_0\|^2}{r_0^T \cdot A u_0} = -0.58139$$

$$\text{Ec. (1.9)} \quad p_1 = p_0 + \alpha_0 \cdot u_0 = \begin{bmatrix} 2.53488 \\ 0.79069 \end{bmatrix}$$

Etapa 2: $p_1 = \begin{bmatrix} 2.53488 \\ 0.79069 \end{bmatrix}$

$$f(p_1) = -5.88372$$

$$r_1 = \begin{bmatrix} 0.27907 \\ -1.95349 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ec. (1.20)} \quad \beta_m = -\frac{\|r_1\|^2}{\|r_0\|^2} = 0.31152$$

$$u_1 = \beta u_0 r_1 = \begin{bmatrix} -0.81125 \\ -2.10925 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = -0.57333$$

$$p_2 = p_1 + \alpha_1 \cdot u_1 = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow f(p_2) = -7$$

Por la simplicidad del ejemplo anterior, se ha decidido proponer otra función de prueba para el algoritmo: la función de *Rosenbrok* (ecuación (1.21)), es una función donde no es posible alcanzar el punto óptimo con el procedimiento básico de Powell. Se debe utilizar el procedimiento modificado.

$$f(x, y) = 100 \cdot (y - x^2)^2 - (1 - x)^2$$

(1.21)

Esta función suele ser muy usada como función de prueba en optimización por su lenta convergencia para la mayoría de los métodos. El área de interés para la búsqueda local está

definida por $-2 \leq x \leq 2$ y $-2 \leq y \leq 2$. Esta función presenta un mínimo global dentro del área de interés. La superficie de esta función se muestra a continuación.

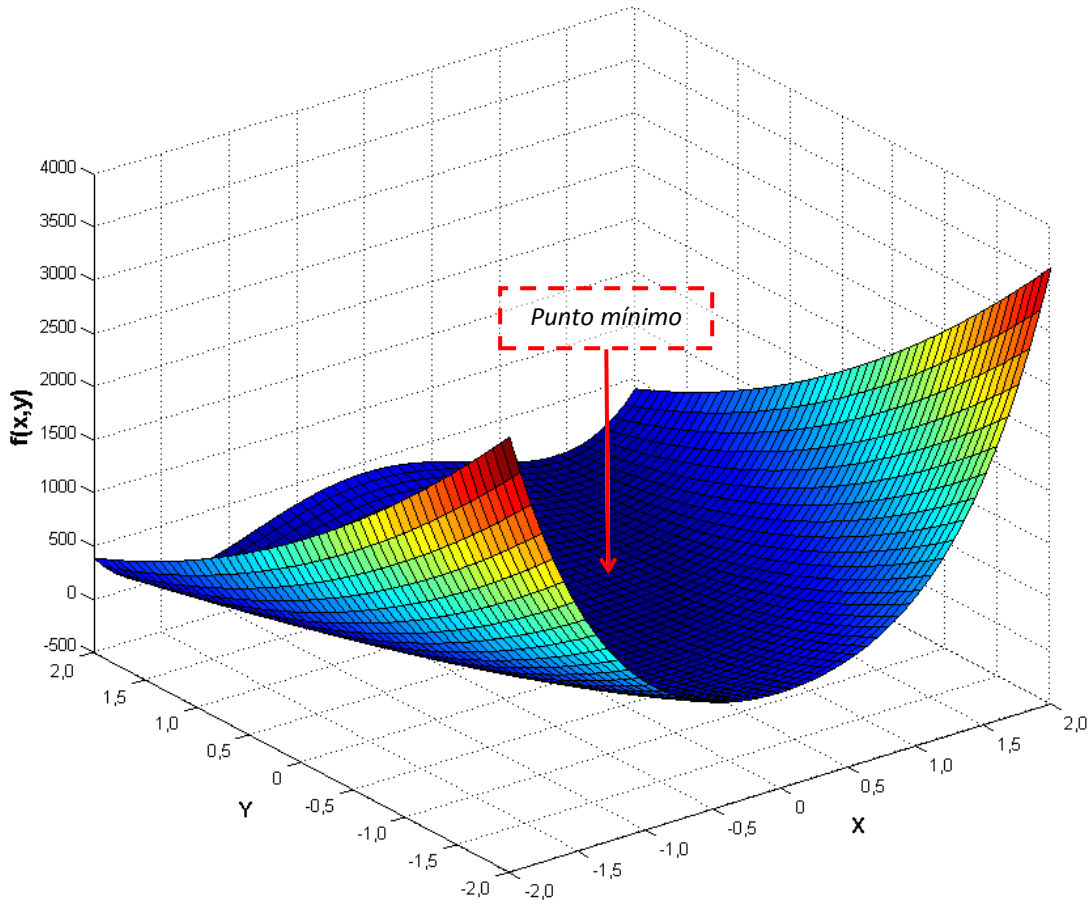


Figura 1.3 Función de *Rosenbrok*

Entonces, tomando como punto de inicio $\mathbf{p}_0 = (-1.2, 1.0)$, se tiene que el método modificado de Powell actúa de la forma en que se ilustra en la Figura 1.4 (se muestran sólo algunos puntos del total de iteraciones):

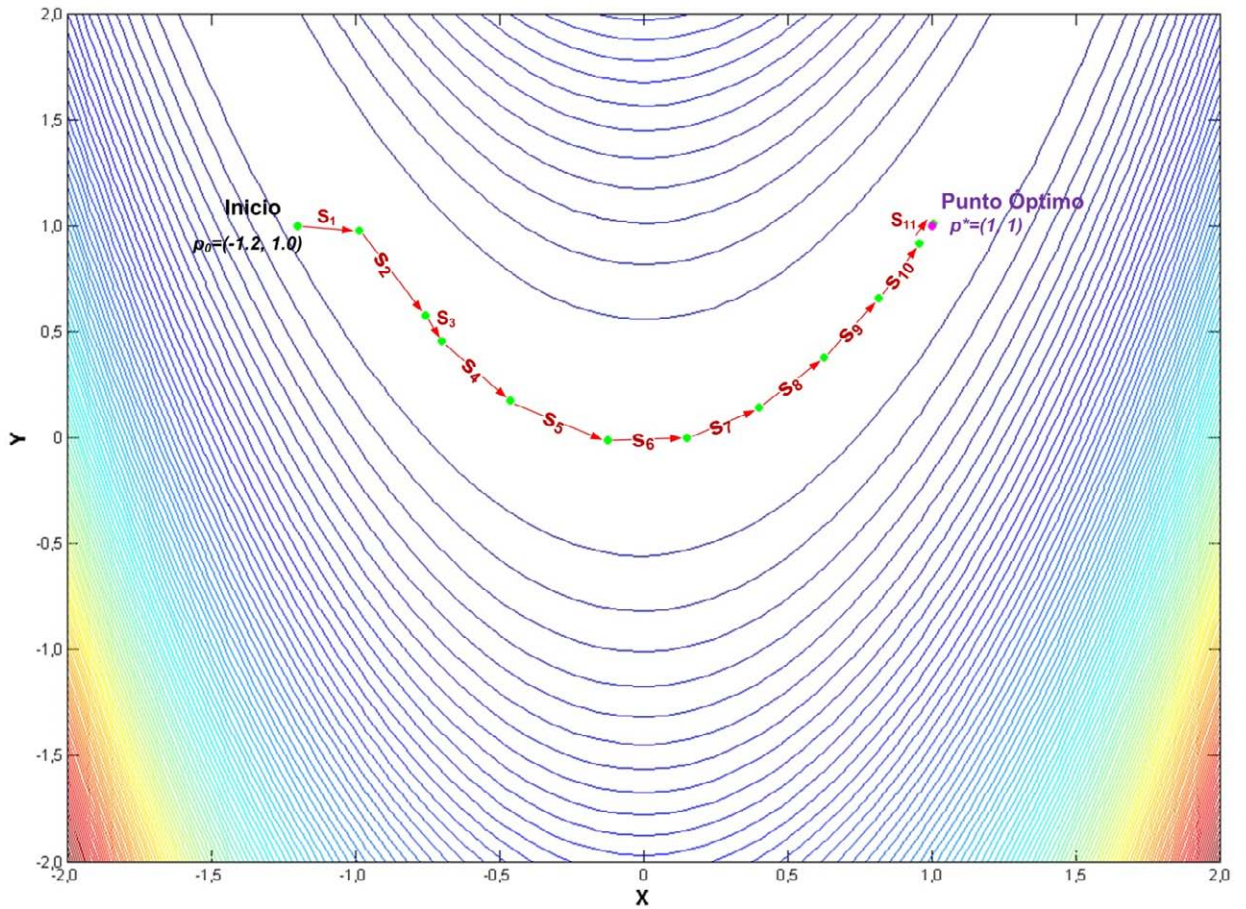


Figura 1.4 Iteraciones del Método Modificado de Powell en la Función de Rosenbrok

Habiéndose obtenido en la última etapa el mínimo absoluto:

$$x = 1.000 \qquad y = 1.000 \qquad f(x,y) = 0.000$$

En la Tabla 1.1 se incluyen los resultados de la iteración. Cada etapa incluye tres líneas, correspondientes al punto de inicio (p_0) y a las dos iteraciones de cada etapa. Los valores s_x y s_y son las componentes de la dirección utilizada en cada iteración y Δ es el valor del descenso de la función en la iteración. Los valores que aparecen entre etapas, representan el punto extrapolado P_s , el valor v_s de la función en dicho punto y los valores de los parámetros $\bar{\delta}_1$ y $\bar{\delta}_2$ (ver sección 1.2).

Tabla 1.1 Resultados de la Iteración de la función de Rosenbrok

x	y	$f(x,y)$	s_x	s_y	Δ
-1.2000	1.0000	24.2000			
-0.9950	1.0000	3.9900	1.0000	0.0000	20.2100
-0.9950	0.9900	3.9799	0.0000	1.0000	0.0101
-0.7899	0.9800	15.8731	$\delta_1 = -8.32688$ y $\delta_2 = -700.327$		
-0.9897	0.9897	3.9693			
-0.9897	0.9794	3.9588	0.0000	1.0000	0.0106
-0.9843	0.9791	3.9480	0.9988	-0.0488	0.0107
-0.9789	0.9686	3.9267	$\delta_1 = -0.0426393$ y $\delta_2 = -1.03838e-5$		
-0.7573	0.5341	3.2431			
-0.7573	0.5735	3.0880	0.0000	1.0000	0.1551
-0.6978	0.4569	2.9729	0.4543	-0.8908	0.1151
-0.6389	0.3798	2.7615	$\delta_1 = -0.481637$ y $\delta_2 = -0.0112344$		
-0.4993	0.1992	2.4986			
-0.5347	0.2687	2.3851	0.4543	-0.8908	0.1136
-0.4621	0.1744	2.2906	0.6103	-0.7922	0.0944
-0.4249	0.1496	2.1258	$\delta_1 = -0.372802$ y $\delta_2 = -0.00381421$		
-0.1925	-0.0053	1.6016			
-0.2242	0.0359	1.5195	0.6103	-0.7922	0.1136
-0.1584	-0.0080	1.4515	0.8321	-0.7922	0.0944
-0.1243	-0.0107	1.3326	$\delta_1 = -0.268991$ y $\delta_2 = -0.000851743$		
0.0884	-0.0277	0.9571			
0.0596	-0.0084	0.8988	0.8321	-0.5547	0.0583
0.1197	-0.0132	0.8509	0.9968	-0.0795	0.0479
0.1510	0.0012	0.7673	$\delta_1 = -0.189782$ y $\delta_2 = 3.54055e-5$		
0.3461	0.0914	0.5083			
0.3207	0.0934	0.4704	0.9968	-0.0795	0.0380
0.3742	0.1181	0.4395	0.9078	0.4195	0.0309
0.4023	0.1449	0.3858	$\delta_1 = -0.122484$ y $\delta_2 = 0.000185777$		
0.5765	0.3111	0.2245			
0.5550	0.3012	0.2027	0.9078	0.4195	0.0218
0.6007	0.3448	0.1854	0.7237	0.6902	0.0174
0.6250	0.3784	0.1554	$\delta_1 = -0.069128$ y $\delta_2 = 0.000107185$		
0.7757	0.5879	0.0695			
0.7592	0.5721	0.0598	0.7237	0.6902	0.0097
0.7952	0.6221	0.0524	0.5842	0.8116	0.0074
0.8146	0.6563	0.0397	$\delta_1 = -0.027775$ y $\delta_2 = 2.89501e-5$		
0.9336	0.8654	0.0081			
0.9241	0.8522	0.0060	0.5842	0.8116	0.0021
0.9457	0.8903	0.0046	0.4944	0.8693	0.0014
0.9579	0.9152	0.0023	$\delta_1 = -0.00582224$ y $\delta_2 = 1.76459e-6$		
0.9938	0.9886	0.0002			
0.9986	0.9971	0.0000	0.4944	0.8693	0.0001
1.0000	1.0000	0.0000	0.4391	0.8985	0.0000
1.0062	1.0113	0.0002	$\delta_1 = 1.38684e-5$ y $\delta_2 = 7.73258e-10$		
1.0000	1.0000	0.0000	0.4944	0.8693	0.0000
1.0000	1.0000	0.0000	0.4391	0.8985	0.0000

Teniendo en la última etapa el punto mínimo.

ANEXO 2.

DEFINICIÓN DE PESOS EN LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO

2.1 INTRODUCCIÓN

Dado el carácter estratégico de la metodología de evaluación desarrollada en esta investigación, el análisis multicriterio se ha centrado en criterios definidos previamente como componentes esenciales del desarrollo sostenible.

En este anexo se describen en detalle los valores empleados para los pesos de la función multicriterio de sostenibilidad. Una vez el procedimiento general se ha definido, es necesario explicar la forma en que los criterios escogidos se tendrán en cuenta, es decir, cuál será el peso de cada uno de ellos a la hora de ser integrados dentro de la metodología. Existen varios métodos para estimar estos pesos. En Nijkamp et al., (1990) se muestra una revisión completa de las técnicas existentes.

Así, en Julio de 2010 durante la realización del IX Congreso de Ingeniería de Transporte realizado en Madrid (CIT2010), se llevó a cabo una encuesta con los participantes de dicho evento, con el fin de dar pesos relativos a cada uno de los aspectos que definen la sostenibilidad dentro de este contexto. En la Figura 2.1 se muestra el esquema de la encuesta realizada.

Evaluación Multicriterio Para la Optimización Dinámica de Estrategias de Movilidad Sostenible en Áreas Metropolitanas

Solicitamos su colaboración, dándonos su opinión sobre la importancia de los diferentes objetivos que a su juicio deberían motivar el desarrollo de políticas de movilidad sostenible. Para esto, por favor, complete el siguiente cuestionario.

El cuestionario está enmarcado dentro del contexto de la Tesis Doctoral "Optimización Dinámica de Estrategias de Movilidad Sostenible en Áreas Metropolitanas" la cual es una investigación que busca desarrollar un modelo de evaluación estratégica de medidas y estrategias de transporte que contribuyen a la sostenibilidad en áreas urbanas y metropolitanas.

Tras una revisión de los trabajos relacionados con los planes de movilidad urbana sostenible, se ha definido un conjunto de criterios de sostenibilidad. Esta encuesta tiene como objetivo valorar la importancia de esos criterios para medir las sostenibilidad de un sistema de transporte. Para ello, solicitamos su colaboración, dándonos su valoración por objetivos para el desarrollo de políticas de movilidad sostenible.

Estructura de la Encuesta

Por favor, complete las cuatro partes que conforman el cuestionario. En la primera parte, se pide su opinión para clasificar, según su importancia relativa, los objetivos generales de sostenibilidad. En las siguientes partes, se le pide que valore diferentes aspectos de movilidad sostenible, según los criterios expuestos en la primera parte.

La escala de valoración es la siguiente:

Valor +1: Valora ligeramente más un criterio sobre el otro
 Valor +3: Valora como más importante un criterio sobre el otro
 Valor +5: Valora cómo mucho más importante un criterio sobre el otro
 Valor +7: Valora absolutamente más importante un criterio sobre el otro

Muchas gracias por su colaboración.

Antes de empezar, indique por favor el área en qué desarrolla su actividad:

Directivo Administración Técnico Administración Académico/Investigador
 Directivo Empresa Privada Técnico Empresa Privada Otro_____

1. OBJETIVOS GENERALES DE SOSTENIBILIDAD

Este cuestionario consiste en ordenar cada par de criterios (filas), según considere de mayor o menor importancia uno respecto al otro. Los criterios seleccionados son:

Impacto Ambiental: protección sobre el medio ambiente urbano (contaminación global) y local, crecimiento de zonas urbanizadas.)
 Equidad Social: acceso al transporte en condiciones igualitarias (cobertura y costes), aumento de la seguridad vial.
 Eficiencia del Sistema: reducción de la congestión, mayor uso del transporte público y ciudades más sostenibles y compactas.

Valore comparativamente los criterios siguiendo el esquema mostrado a continuación:

CRITERIO A	+7	+5	+3	+1	Igual de importante	-1	-3	-5	-7	CRITERIO B
Impacto Ambiental	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Equidad Social
Impacto Ambiental	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eficiencia del Sistema
Equidad Social	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eficiencia del Sistema

Es absolutamente más importante A que B Es absolutamente más importante B que A
 Es mucho más importante A que B Es mucho más importante B que A
 Es más importante A que B Es más importante B que A
 Es algo más importante A que B Es algo más importante B que A
 Es igualmente importante A que B

¡¡Por favor sólo seleccione una sola casilla en cada fila!!

2. IMPACTO AMBIENTAL

Dentro del aspecto ambiental, por favor compare la importancia de un criterio frente al otro, de los siguientes pares de criterios:

El cambio climático consiste en reducir las emisiones de CO2, la contaminación del aire en reducir la emisión de partículas y óxidos de nitrógeno y el consumo de suelo, a evitar la expansión cada vez mayor de las ciudades.

CRITERIO A	+7	+5	+3	+1	Igual de importante	-1	-3	-5	-7	CRITERIO B
Cambio Climático	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polución del Aire
Cambio Climático	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Consumo de Suelo
Polución del Aire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Consumo de Suelo

3. EQUIDAD SOCIAL

Dentro del aspecto de equidad social, por favor compare la importancia de un criterio frente al otro, de los siguientes pares:

La accesibilidad mide el acceso al transporte, a la vivienda y a los lugares de empleo de forma igualitaria. Los costes de transporte se refieren a que la proporción gastada por los hogares en transportarse sea equitativa en todas las zonas de la región.

CRITERIO A	+7	+5	+3	+1	Igual de importante	-1	-3	-5	-7	CRITERIO B
Aumento Accesibilidad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Reducción Accidentes
Aumento Accesibilidad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Costes Transporte
Reducción Accidentes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Costes Transporte

4. EFICIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE

En cuanto a la eficiencia del sistema de transporte, por favor compare la importancia de un criterio frente al otro, de los siguientes pares:

Los ahorros de tiempo se refieren a la reducción de los tiempos de viaje. La reducción de los costes de operación consiste en reducir el consumo de combustible y las distancias medias de viaje.

CRITERIO A	+7	+5	+3	+1	Igual de importante	-1	-3	-5	-7	CRITERIO B
Ahorros de Tiempo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Reducción Costes Op.
Ahorros de Tiempo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Reducción Uso Coche
Reducción Costes Op.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Reducción Uso Coche

Para obtener más información sobre la Tesis Doctoral no dude en contactar con Luis Angel Guzmán-García (Centro de Investigación del Transporte TRANSyV-LUPM) (luzguzman@caminos.upm.es)

¡Gracias por su colaboración!

Figura 2.1 Esquema de la Encuesta

Los indicadores de sostenibilidad definidos dentro de esta metodología, son descritos en detalle en el Capítulo 6.

Con las respuestas obtenidas, se dispone de una muestra válida que representa las preferencias de los expertos españoles en movilidad, planificadores y técnicos de transporte e investigadores.

Aparte de los indicadores de sostenibilidad, la encuesta fue dividida en cinco categorías diferentes, según el experto que la responde:

- Directivos de la Administración Pública
- Directivos de Empresas Privadas
- Técnicos de la Administración Pública
- Técnicos de Empresas Privadas
- Académicos y/o Investigadores

El procedimiento de análisis multicriterio REMBRANDT (Lootsma, 1992), requiere que los participantes expresen sus preferencias por medio de comparar un par de criterios dentro de una escala cualitativa, tal como se puede ver en la Figura 2.2. Estas respuestas cualitativas se expresan en valores numéricos dentro de un rango que oscila entre -8 y +8. Estos valores se transforman posteriormente, utilizando una escala logarítmica, para obtener finalmente el peso correspondiente.

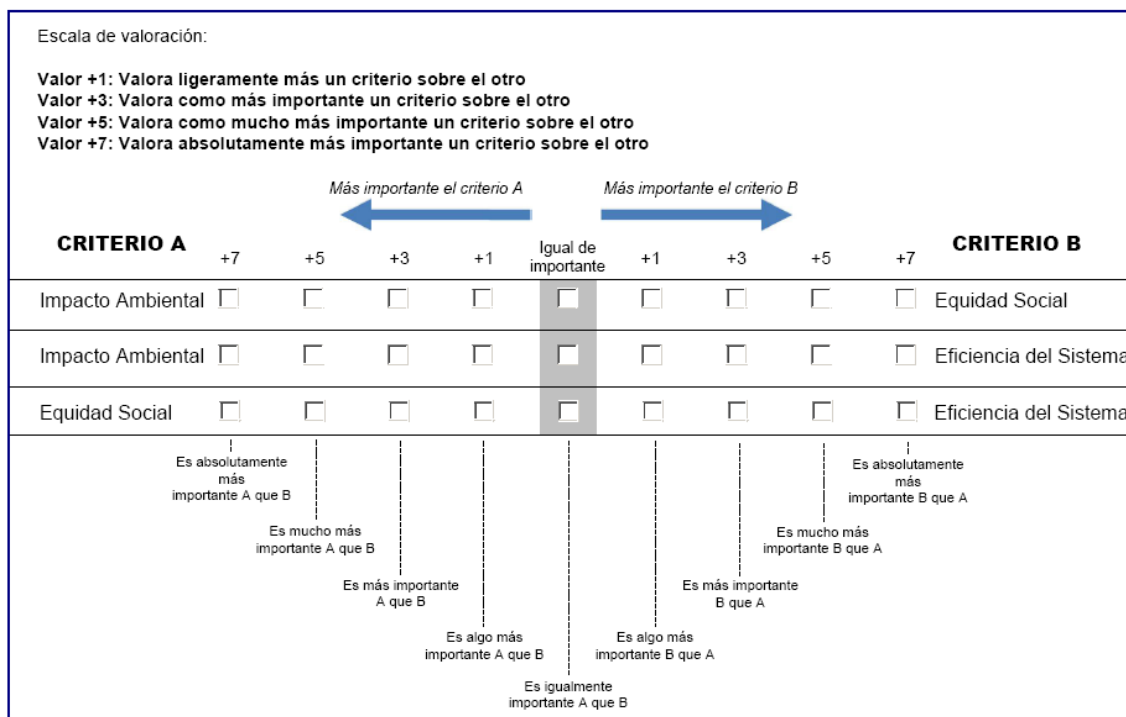


Figura 2.2 Escala Cualitativa del Método REMBRANT

La Tabla 2.1 muestra el resumen de los resultados de los pesos de cada indicador, después de aplicar el procedimiento de ponderación, a la información contenida en una muestra de **84** encuestas.

2.2 DEFINICIÓN DE PESOS

Para esta metodología, se ha utilizado una escala que varía entre 0 y 100. Para poder traducir los diferentes valores de los indicadores, a valores dentro de esta escala normalizada, es necesario definir puntos de referencia. El punto de referencia utilizado en este caso es conocido como 'escala global' (Dodgson et al., 2009), el cual consiste en asignar una calificación de 0 para representar el peor valor posible que un indicador pueda llegar a alcanzar dentro de un problema de decisión. Por otro lado, 100 sería el mejor valor.

La ventaja de esta escala sobre otras, es que es más fácil incluir nuevas opciones/criterios en etapas posteriores si el desempeño observado se encuentra fuera del rango definido previamente.

Por otro lado, el modelo lineal aditivo utilizado para calcular el valor de la función objetivo, es intuitivo, sencillo y garantiza la transparencia de los resultados. En este modelo, la valoración de cada indicador se multiplica por el peso de cada criterio, donde posteriormente todos los resultados ponderados se suman para obtener el resultado global. Al igual que muchos procedimientos de multicriterio, esta herramienta debe usarse cuidadosamente en el momento de identificar los criterios claves.

Gran variedad de investigadores han desarrollado diferentes modelos lineales multiatributo, así como sus formas de aplicación, que serán útiles según sean las circunstancias. En este caso, dos referencias importantes se derivan de Keeney y Raiffa (1993): se han calculado tres valores de utilidad para cada uno de los tres criterios de sostenibilidad, de acuerdo con el siguiente modelo.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot s_{ij} = w_1 \cdot s_{i1} + w_2 \cdot s_{i2} + \dots + w_n \cdot s_{in}$$

(2.1)

Donde,

S_j = Valor global de la utilidad del escenario i

w_j = Valoración del experto para el criterio j

s_{ij} = Utilidad del criterio j en el escenario i

Finalmente, la normalización de los indicadores se realiza según la ecuación 6.1 descrita en el Capítulo 6.

2.3 EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN MARS

Con el fin de implementar el modelo MCA dentro del modelo MARS, se ha creado un módulo multicriterio, donde se definieron todas las variables necesarias para la evaluación multicriterio.

Este modelo MCA se centra en la 'utilidad ponderada de valores' y consiste en la disposición de varios indicadores con valores numéricos asignados tal como se puede ver en la Tabla 2.1. Un escenario base es utilizado como punto de partida para comparar y evaluar las diferentes políticas probadas. El esquema causal del modelo MCA puede verse en la Figura 2.3.

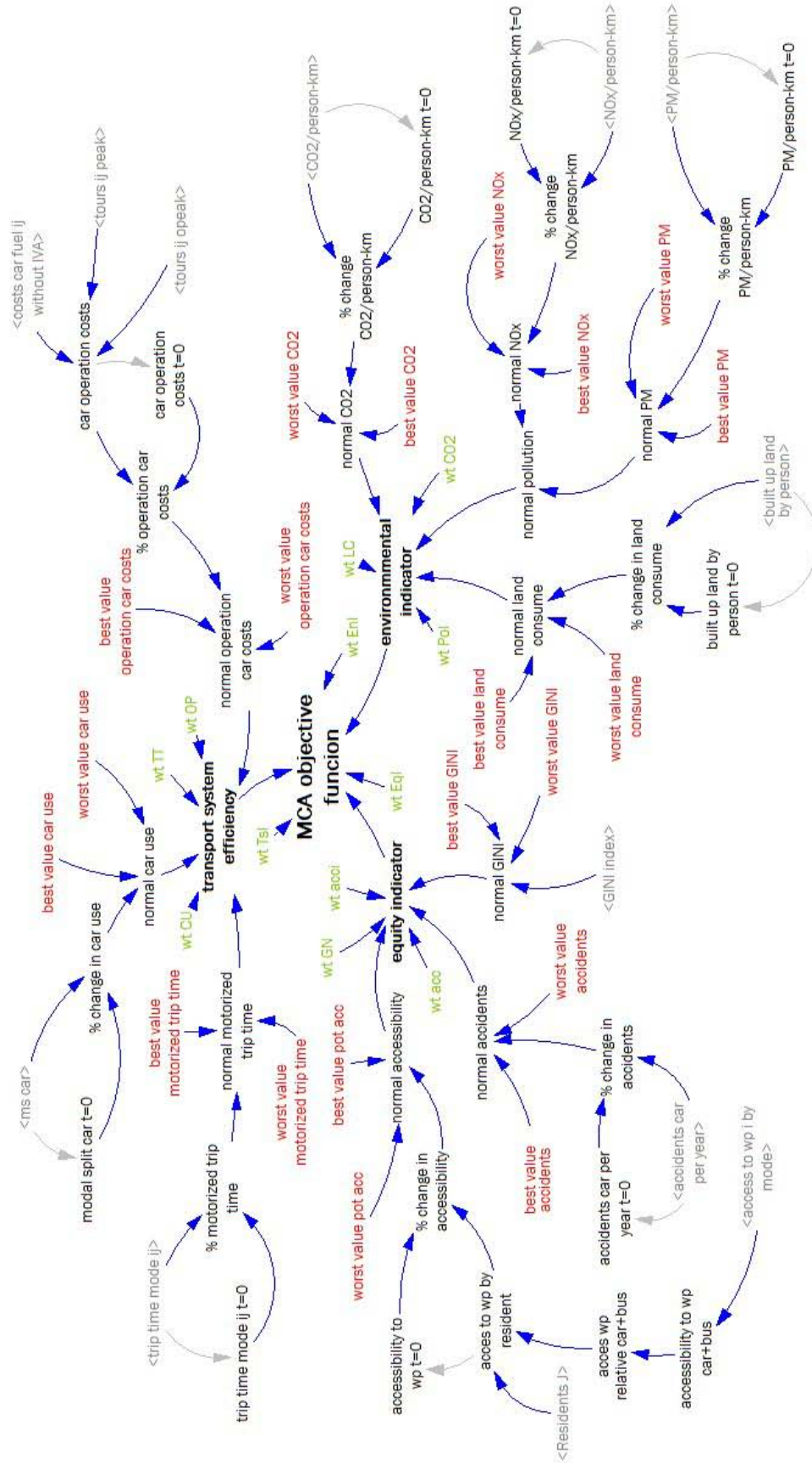


Figura 2.3 Vista del Modelo MCA en Vensim®

2.4 RESULTADOS

Finalmente, en las siguientes tablas se muestran los resultados finales de la encuesta realizada a diferentes expertos en transporte. Los valores mostrados en la Tabla 2.1, son los utilizados en el modelo MCA utilizado en el caso práctico.

Tabla 2.1 Criterios e Indicadores de Sostenibilidad y sus Pesos

Criterio	Peso	Indicador	Peso
Impacto Ambiental	0.354	Cambio Climático	0.470
		Polución del Aire	0.338
		Consumo del Suelo	0.192
Equidad Social	0.357	Accesibilidad Potencial	0.297
		Reducción de Accidentes	0.337
		Equidad en Costes de Transporte	0.366
Eficiencia del Sistema	0.289	Ahorros de Tiempo de Viaje	0.496
		Reducción en Costes de Operación	0.039
		Reducción en el Uso del Coche	0.465

La desviación estándar de los criterios de sostenibilidad es 3.8%. En el caso de los pesos de los indicadores, su desviación estándar se muestra en la Tabla 2.2, por criterio. Para el conjunto general de indicadores, la desviación es de 14.6%.

Tabla 2.2 Desviación Estándar de los Pesos

Indicador	DevS
Cambio Climático	0.139
Polución del Aire	
Consumo del Suelo	
Accesibilidad Potencial	0.035
Reducción de Accidentes	
Equidad en Costes de Transporte	
Ahorros de Tiempo de Viaje	0.255
Reducción en Costes de Operación	
Reducción en el Uso del Coche	

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto a su valor medio. Se observa que en cuanto a los criterios de sostenibilidad, en general los encuestados tienden a darles casi la misma importancia a todos ellos.

Según los resultados de la encuesta, es mucho más importante reducir las emisiones, disminuir los tiempos de viaje y propiciar un cambio modal (del coche al transporte público), que limitar el consumo de suelo y el incremento de los costes de operación del coche, que básicamente es combustible. Dentro de la equidad, la importancia de cada uno de los indicadores tiende a ser también muy similar, dando una ligera ventaja a la equidad en los costes de transporte.

Como una forma de complementar estos resultados, en las siguientes tablas se presentan los resultados de los pesos obtenidos por medio de la encuesta, pero clasificados según su categoría profesional: directivos, técnicos e investigadores.

Tabla 2.3 Criterios e Indicadores de Sostenibilidad y sus Pesos. Directivos

Criterio	Peso	Indicador	Peso
Impacto Ambiental	0.248	Cambio Climático	0.277
		Polución del Aire	0.388
		Consumo del Suelo	0.335
Equidad Social	0.370	Accesibilidad Potencial	0.341
		Reducción de Accidentes	0.365
		Equidad en Costes de Transporte	0.294
Eficiencia del Sistema	0.382	Ahorros de Tiempo de Viaje	0.446
		Reducción en Costes de Operación	0.388
		Reducción en el Uso del Coche	0.335

Tabla 2.4 Criterios e Indicadores de Sostenibilidad y sus Pesos. Técnicos

Criterio	Peso	Indicador	Peso
Impacto Ambiental	0.253	Cambio Climático	0.269
		Polución del Aire	0.415
		Consumo del Suelo	0.316
Equidad Social	0.367	Accesibilidad Potencial	0.333
		Reducción de Accidentes	0.397
		Equidad en Costes de Transporte	0.270
Eficiencia del Sistema	0.380	Ahorros de Tiempo de Viaje	0.405
		Reducción en Costes de Operación	0.278
		Reducción en el Uso del Coche	0.317

Tabla 2.5 Criterios e Indicadores de Sostenibilidad y sus Pesos. Investigadores

Criterio	Peso	Indicador	Peso
Impacto Ambiental	0.308	Cambio Climático	0.283
		Polución del Aire	0.390
		Consumo del Suelo	0.327
Equidad Social	0.353	Accesibilidad Potencial	0.301
		Reducción de Accidentes	0.441
		Equidad en Costes de Transporte	0.258
Eficiencia del Sistema	0.338	Ahorros de Tiempo de Viaje	0.416
		Reducción en Costes de Operación	0.250
		Reducción en el Uso del Coche	0.335

Como se puede observar en las tablas anteriores, la columna 'peso' indica el valor relativo de la importancia del indicador. Cada uno de los indicadores primarios posee una ponderación en base a la importancia que tienen sobre el logro del objetivo general (alcanzar una movilidad sostenible, según el criterio del experto). De la misma manera, cada uno de éstos

indicadores primarios, a su vez tienen sus propios indicadores los cuales contribuyen a su propio logro, con su correspondiente ponderación.

Finalmente, el resultado de los pesos puede ser más estable y coherente si éstos no dependieran de la opinión de un grupo de personas. Los métodos AHP y REMBRANDT encajan perfectamente con las circunstancias donde las opiniones, en lugar de datos fiables y precisos, son la forma predominante en que se dispone la información. Por todas estas razones, se consideró que este último método es el más apropiado a utilizar dentro de esta investigación ya que relaciona los sub-objetivos de sostenibilidad entre ellos y con el objetivo global, además de con sus propios indicadores.

ANEXO 3.

VARIABLES EXÓGENAS DEL MODELO MARS EN MADRID

3.1 INTRODUCCIÓN

Como primera parte de la descripción detallada del modelo MARS, a continuación se complementará la explicación de las variables exógenas y sus proyecciones utilizadas en el caso práctico. La descripción detallada del modelo, su comportamiento esperado y sus interacciones se muestran en el Anexo 4.

3.2 TASAS DE CRECIMIENTO

En la Figura 3.1 se muestra la proyección de la población de la comunidad de Madrid hasta el año 2034. Estos datos fueron obtenidos a través de cálculos propios y con base en información del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, INE (INE, 2010). Como se puede ver en el gráfico, existen tres tipos de valores: una proyección optimista, que estima un mayor crecimiento de la población, uno pesimista y un escenario tendencial.

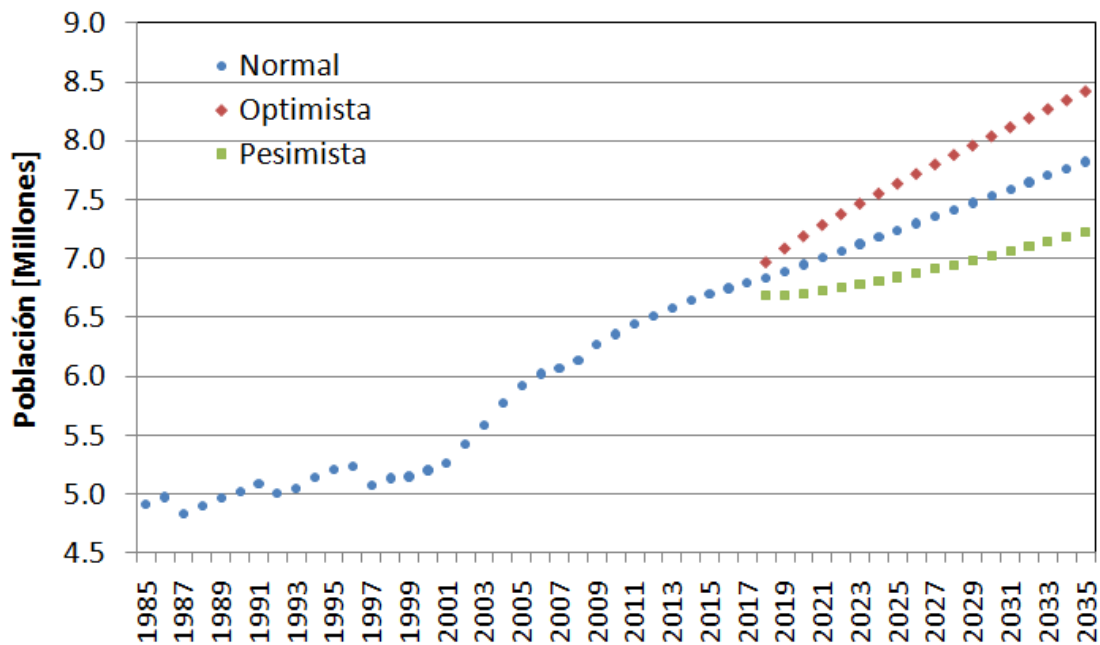


Figura 3.1 Evolución de la Población – Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

De la misma manera que en la figura anterior, en la Figura 3.2 se muestran las proyecciones para los puestos de empleo en el sector servicios de la Comunidad de Madrid. También se estimaron tres escenarios: uno optimista, otro pesimista y el tendencial.

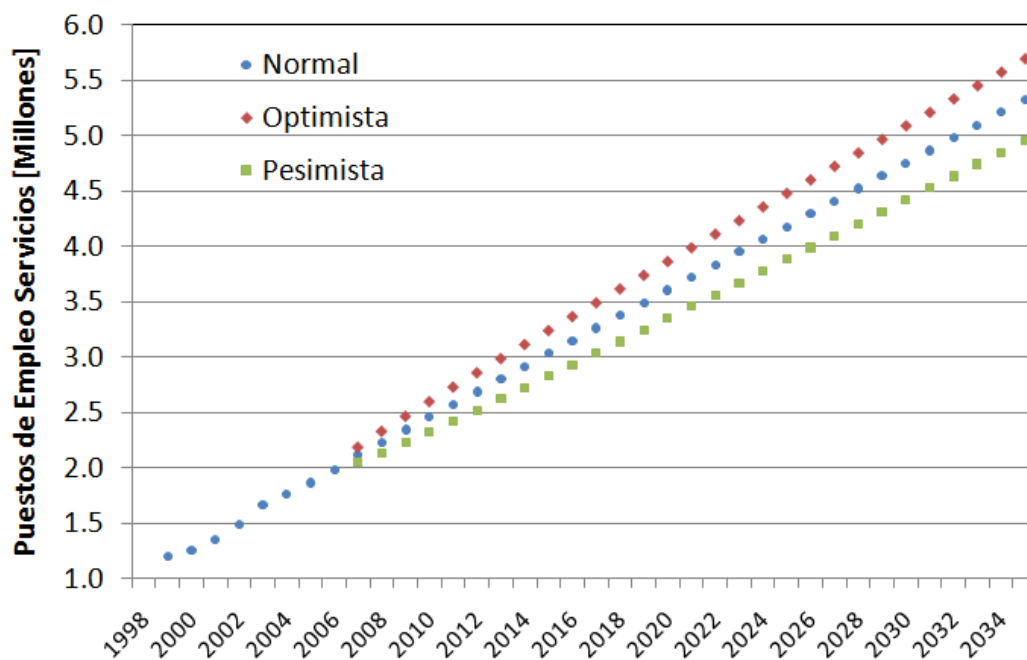


Figura 3.2 Evolución Puestos de Empleo Servicios – Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

En la Figura 3.3, se muestra la proyección de los puestos de empleo para el sector de la producción. Como se puede ver, su crecimiento es mucho menor que el de sector servicios, de lo cual se puede inferir que la Comunidad de Madrid, se centra cada vez menos en los grandes centros industriales y de producción.

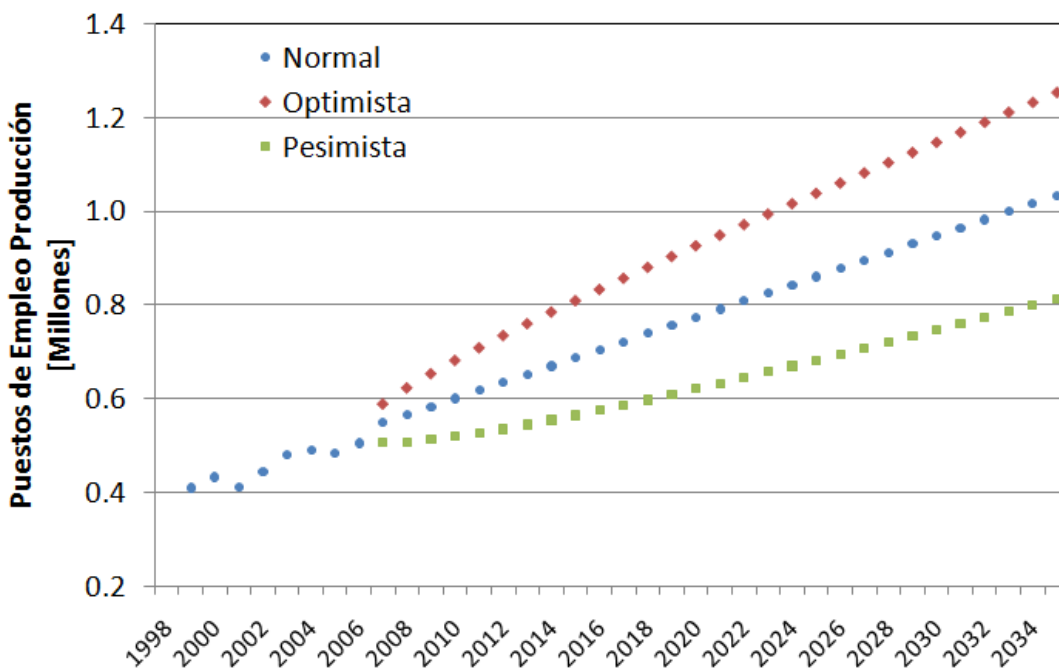


Figura 3.3 Evolución Puestos de Empleo Producción – Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

Estos escenarios sirven para simular la situación económica en la Comunidad de Madrid, ya que de estas variables dependerán algunos de los comportamientos claves del modelo, como por ejemplo la evolución de la movilidad y el consumo de suelo. En el caso de estudio (Capítulo 7), se han utilizado los escenarios tendenciales (normales); aunque sería posible estudiar el efecto de la actual crisis económica, reflejando la pérdida de empleos a lo largo del tiempo en cada sector, y así analizando sus implicaciones sobre la movilidad de la región.

En la Figura 3.4 se muestra la evolución supuesta de la composición de la flota vehicular en la Comunidad de Madrid, según el tipo de carburante utilizado por los vehículos. En este caso se muestran las proyecciones de la composición vehicular de coches que utilizan gasolina y diesel. Es evidente el cambio de preferencias por vehículos diesel a lo largo del tiempo, que aunque nuevos son más caros, contaminan más y su vida útil es menor, la gente en general se decide por ellos debido a que el carburante es más barato.

Para el caso de estudio, se trabajó con una hipótesis que consiste en que el parque automotor no tendría una composición importante de vehículos limpios (híbridos y eléctricos, ver Figura 7.7 del Capítulo 7), ya que en su momento no se disponía de la información suficiente para hacer las proyecciones necesarias. Sin embargo, un ejercicio interesante sería ver como la incorporación a la flota de vehículos de coches cada vez más limpios, influye sobre la emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes a largo plazo.

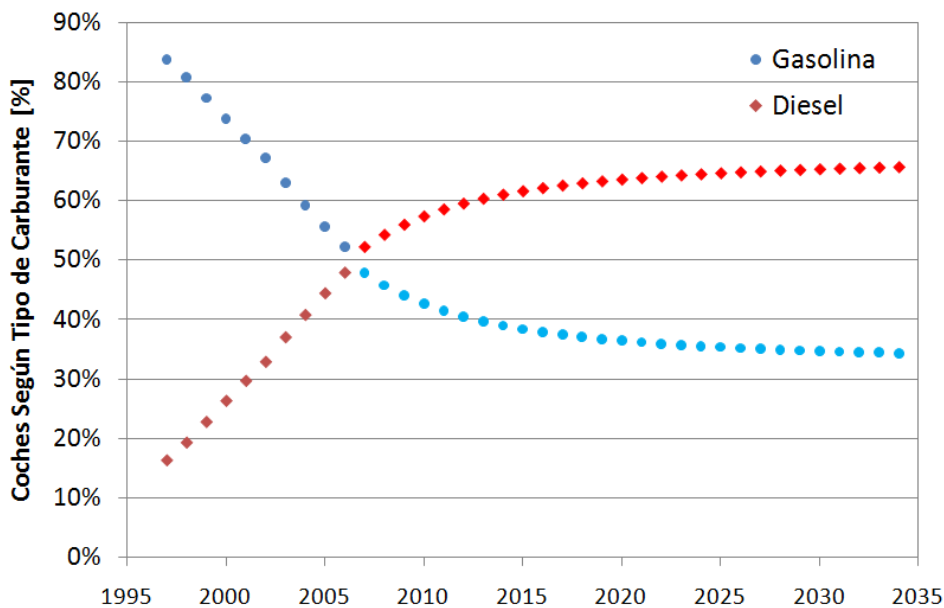


Figura 3.4 Evolución Flota Vehicular – Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

3.3 DATOS BÁSICOS DE MOVILIDAD

Adicionalmente a las variables exógenas, el modelo MARS necesita una serie de información básica para trabajar. La información utilizada se describe a continuación:

1. Media de viajes diarios por persona por motivo trabajo: 1.02 (ver Anexo 4)
2. Presupuesto medio de tiempo de viaje: 87 minutos (CRTM, 2004)

3. Velocidad media de los peatones en hora punta: 4.0 km/h (*commuting*)
4. Velocidad media de los peatones en hora valle: 3.5 km/h (otros viajes)
5. Ocupación media de los coches por motivo trabajo: 1.28 (Vieira, 2005)
6. Ocupación media de los coches por otros motivos: 1.50 (Vieira, 2005)
7. Porcentaje de personas empleadas que tienen carné de conducir: 77.4% (CRTM, 2004)
8. Porcentaje de residentes que tienen carné de conducir: 58.6% (CRTM, 2004)
9. Valor medio aparcamiento en la almendra de Madrid (\approx zona SER): 2.50 €
10. Valor del tiempo (trabajo): 10.45 €/h
11. Valor del tiempo (otros): 5.70 €/h
12. Rotación de viviendas (años que las personas viven en la misma vivienda): 10 años
13. Potencial de construcción de viviendas en al año base (2004): 51,802 (INE, 2010)
14. Costes del funcionamiento del vehículo privado¹ (Tabla 3.1):

Tabla 3.1 Coste Medio Operación del Coche [€₂₀₀₄]

Ítem	Madrid	C. Metropolitana	C. Regional
Reparaciones	229	285	253
Lubricantes	2	2	2
Repuestos	19	21	19
Tasas	27	7	6
Otros	29	23	19
Total	306	338	299

Fuente: Monzón et al., (2008) y elaboración propia.

De la tabla anterior, del número de viajes en coche, del total de veh-km y del total de turismos, se obtiene un gasto medio de 320.26 €, lo que permite estimar un coste de operación de un coche por kilómetro (sin incluir combustible) de 0.042 €/km.

15. Tiempos de acceso y búsqueda de aparcamiento:

Los tiempos de acceso al aparcamiento y de búsqueda de plaza de aparcamiento (por coronas), se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Tiempos Medios de búsqueda de Aparcamiento [min]

Tiempo	Almendra	Periferia	C. Metropolitana	C. Regional
Acceso (Hora Punta)	6	5	4	4
Acceso (Hora Valle)	6	5	4	4
Búsqueda (Hora Punta)	8	6	3	3
Búsqueda (Hora Valle)	7	5	3	3

Fuente: elaboración propia.

¹ No se incluye el coste del combustible (ni precio ni impuestos) debido a que éste se trata como un ítem aparte.

16. Valor medio de la tarifa de un viaje en transporte público según su origen y destino¹:

Tabla 3.3 Tarifas Medias Transporte Público [€/viaje]

Corona (O/D)	Almendra	Periferia	C. Metropolitana	C. Regional
Almendra	0.57	0.57	0.78	1.34
Periferia	0.57	0.57	0.78	1.34
C. Metropolitana	0.78	0.78	0.78	1.34
C. Regional	1.34	1.34	1.34	1.34

Fuente: elaboración propia.

17. Adicionalmente a estos valores, los factores de fricción (impedancias) del transporte público requieren información adicional. Las frecuencias medias por corona de transporte público se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Frecuencias Medias Transporte Público [min]

Tiempo	Periodo	Almendra	Periferia	C. Metropolitana	C. Regional
Frecuencia Bus	Punta	8	8	10	15
Frecuencia Bus	Valle	10	10	15	20
Frecuencia Rail	Punta	4	4	6	10
Frecuencia Rail	Valle	5	5	10	15

Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la tabla anterior, se calcula el valor subjetivo del tiempo medio de espera en la parada de origen, utilizando la ecuación (3.1).

$$WT_{ij} = 8 \cdot [1 - 1.1046 \cdot \exp(-0.0852 \cdot Frecuencia_{ij})] \quad (3.1)$$

El resto de tiempo de transporte público utilizados en los factores de fricción (tiempo de acceso, tiempo de transbordo y tiempo de salida, son obtenidos por medio del modelo VISUM. Todos los demás valores para todos los modos restantes se obtienen del mismo modelo.

3.4 DATOS BÁSICOS DE USOS DEL SUELO

Al igual que en la parte del modelo de transporte, el modelo de usos del suelo requiere información básica. Estos son los datos utilizados en el caso de estudio para el año 2004:

¹ Incluye abono mensual de transporte (joven, normal y tercera edad), metrobus (10 billetes) y el billete sencillo para el año 2004.

Tabla 3.5 Datos Socio-Demográficos del Modelo

Zona	Residentes	Empleados	Ingreso por Hogar	Personas por Hogar	Zona	Residentes	Empleados	Ingreso por Hogar	Personas por Hogar
1	150,159	80,127	3,962.01	2.56	46	14,011	7,674	3,793.36	3.68
2	146,402	73,126	4,142.37	2.57	47	35,199	16,253	3,929.87	3.30
3	126,283	57,535	3,475.86	1.93	48	86,912	37,435	3,449.25	3.55
4	151,366	77,904	4,551.11	2.59	49	202,496	104,217	3,601.70	3.30
5	142,735	61,714	4,964.45	2.76	50	30,541	15,429	5,473.51	3.51
6	150,834	72,578	4,205.02	2.69	51	32,813	15,750	7,926.37	3.87
7	151,766	68,640	4,656.14	2.62	52	13,198	6,546	7,254.72	3.57
8	209,361	98,354	4,585.81	2.91	53	15,706	8,002	6,034.12	4.01
9	118,297	57,291	4,873.45	2.84	54	28,255	14,168	5,247.03	3.38
10	259,199	121,369	3,881.21	2.83	55	50,695	25,542	4,263.44	3.33
11	237,093	104,068	3,883.13	2.92	56	18,043	9,930	5,022.54	3.50
12	129,015	51,917	3,716.21	2.94	57	12,850	6,497	4,744.13	3.20
13	240,917	114,690	3,565.62	2.87	58	6,428	2,839	3,764.14	3.25
14	107,877	49,144	4,047.08	2.75	59	7,690	4,313	4,073.58	3.30
15	233,730	113,271	4,271.64	2.74	60	10,920	5,365	3,289.80	3.23
16	152,483	71,151	4,554.62	2.90	61	16,799	7,035	4,178.70	3.74
17	140,205	61,033	3,701.75	2.99	62	16,680	7,772	3,828.65	3.61
18	65,162	31,955	3,979.86	3.09	63	40,839	19,615	4,345.37	3.70
19	61,165	30,189	3,814.40	2.79	64	8,152	4,458	4,124.90	3.60
20	146,963	64,274	3,918.67	2.66	65	19,962	8,338	4,510.13	3.94
21	41,292	21,341	4,955.91	2.97	66	10,973	4,783	5,031.70	4.09
22	100,307	52,250	6,287.18	3.60	67	6,899	2,815	5,250.94	4.59
23	62,242	33,682	4,513.55	3.17	68	7,575	3,687	4,428.79	3.79
24	21,390	10,658	6,149.63	3.60	69	8,406	3,610	3,124.19	3.20
25	7,806	3,695	6,383.73	3.76	70	10,441	5,401	4,742.08	3.50
26	17,481	7,284	4,671.32	3.43	71	2,697	871	3,504.09	3.27
27	16,469	7,797	5,035.47	3.64	72	27,946	12,594	4,836.70	3.32
28	82,418	44,131	3,911.07	3.34	73	28,330	14,465	4,803.96	3.35
29	39,175	18,075	3,798.73	3.30	74	3,787	1,432	2,530.53	2.48
30	106,740	51,674	3,800.23	3.42	75	12,969	7,604	4,456.54	3.30
31	191,545	92,477	4,041.33	3.36	76	4,308	1,547	2,522.55	2.75
32	58,436	26,813	4,845.58	3.92	77	1,248	460	2,181.53	2.20
33	19,178	10,427	3,761.61	3.57	78	14,765	6,486	4,034.72	3.64
34	155,997	76,116	3,643.00	3.11	79	8,990	3,070	3,294.17	2.97
35	178,630	91,056	3,433.42	3.14	80	3,835	1,572	3,362.76	3.47
36	192,458	91,272	3,485.71	3.42	81	8,924	3,040	2,592.07	2.94
37	156,592	77,022	3,680.78	3.06	82	16,969	7,463	2,799.73	3.11
38	75,079	35,693	8,881.56	3.75	83	4,738	2,382	3,108.58	3.08
39	58,377	26,303	8,005.21	3.81	84	3,018	895	2,658.29	3.01
40	68,061	32,056	7,038.30	3.32	85	43,416	18,504	3,211.82	3.10
41	18,228	8,127	8,136.65	3.97	86	5,930	2,534	3,000.76	2.93
42	6,892	3,044	5,125.62	3.07	87	2,196	1,028	3,167.38	3.24
43	38,882	19,005	6,260.03	3.34	88	18,674	8,399	3,050.92	3.17
44	38,866	19,384	4,816.81	3.51	89	16,416	7,641	3,985.72	3.58
45	38,269	17,601	4,084.70	3.80	90	13,838	6,353	3,577.15	3.26

Fuente: INE (2010), CRTM (2004) y elaboración propia.

Tabla 3.6 Datos de Empleo del Modelo

Zona	Puestos de Empleo	Empleos Producción	Empleos Servicios	Coches /1.000 hab	Zona	Puestos de Empleo	Empleos Producción	Empleos Servicios	Coches /1.000 hab
1	154,039	5.0%	95.0%	326.24	46	3,705	34.6%	65.4%	409.89
2	54,098	23.0%	77.0%	333.58	47	17,781	45.2%	54.8%	458.39
3	92,133	8.9%	91.1%	447.15	48	9,899	29.9%	70.1%	402.90
4	169,112	10.7%	89.3%	509.68	49	32,516	33.9%	66.1%	470.32
5	151,315	17.6%	82.4%	543.31	50	7,022	22.7%	77.3%	810.68
6	118,343	15.5%	84.5%	529.95	51	11,648	8.6%	91.4%	657.03
7	138,655	10.3%	89.7%	458.64	52	2,953	12.1%	87.9%	464.24
8	71,208	13.3%	86.7%	446.56	53	1,872	33.7%	66.3%	409.91
9	64,536	11.1%	88.9%	443.89	54	3,170	30.7%	69.3%	463.00
10	25,585	20.4%	79.6%	382.34	55	10,935	18.4%	81.6%	480.46
11	41,836	26.4%	73.6%	346.96	56	2,138	28.6%	71.4%	1,885.55
12	23,114	29.8%	70.2%	331.78	57	1,588	18.3%	81.7%	414.09
13	31,446	18.6%	81.4%	316.74	58	1,034	33.6%	66.4%	391.88
14	8,655	12.8%	87.2%	370.93	59	728	30.9%	69.1%	708.32
15	80,184	16.1%	83.9%	397.06	60	1,833	33.6%	66.4%	541.67
16	45,750	17.8%	82.2%	426.80	61	4,452	68.4%	31.6%	436.75
17	30,266	48.0%	52.0%	343.18	62	3,332	27.7%	72.3%	370.92
18	17,037	33.2%	66.8%	369.83	63	14,677	32.5%	67.5%	390.44
19	8,632	22.5%	77.5%	303.59	64	2,495	56.2%	43.8%	491.41
20	82,873	25.4%	74.6%	405.80	65	16,110	60.2%	39.8%	534.16
21	32,711	38.6%	61.4%	427.90	66	5,727	23.2%	76.8%	436.53
22	60,259	19.4%	80.6%	1,122.88	67	1,140	57.3%	42.7%	414.41
23	33,149	22.1%	77.9%	541.16	68	1,248	36.5%	63.5%	422.97
24	7,320	40.2%	59.8%	534.17	69	1,748	45.1%	54.9%	374.26
25	2,955	41.8%	58.2%	842.94	70	1,252	30.4%	69.6%	470.74
26	3,871	48.5%	51.5%	444.65	71	158	30.4%	69.6%	438.64
27	11,020	65.0%	35.0%	554.56	72	4,402	15.6%	84.4%	437.52
28	24,660	24.4%	75.6%	497.35	73	4,201	28.4%	71.6%	917.51
29	18,418	28.4%	71.6%	467.44	74	729	28.4%	71.6%	408.24
30	27,499	37.8%	62.2%	549.78	75	2,291	15.9%	84.1%	403.58
31	52,176	35.7%	64.3%	455.68	76	871	15.7%	84.3%	363.51
32	13,507	39.7%	60.3%	419.18	77	296	19.3%	80.7%	404.65
33	5,709	50.1%	49.9%	447.44	78	4,361	52.7%	47.3%	512.36
34	50,140	25.4%	74.6%	437.01	79	873	31.3%	68.7%	500.44
35	41,932	27.4%	72.6%	438.36	80	926	65.2%	34.8%	407.30
36	43,211	43.2%	56.8%	436.30	81	1,226	31.6%	68.4%	372.14
37	34,398	21.5%	78.5%	469.38	82	3,384	60.4%	39.6%	387.88
38	35,001	12.9%	87.1%	558.03	83	955	29.2%	70.8%	370.62
39	13,573	13.3%	86.7%	573.29	84	325	34.2%	65.8%	478.13
40	29,081	18.0%	82.0%	526.41	85	11,020	36.5%	63.5%	452.60
41	2,851	12.7%	87.3%	1,155.58	86	913	45.6%	54.4%	373.19
42	497	18.9%	81.1%	468.80	87	390	49.0%	51.0%	394.81
43	26,584	32.1%	67.9%	450.11	88	3,058	30.2%	69.8%	360.77
44	7,975	32.3%	67.7%	439.54	89	5,110	30.8%	69.2%	432.02
45	19,822	60.4%	39.6%	436.10	90	2,176	30.8%	69.2%	1,503.25

Fuente: INE (2010), CRTM (2004) y elaboración propia.

Tabla 3.7 Datos de Vivienda del Modelo

Zona	Alquiler Medio	Precio del Suelo [€]	Espacio Medio/Piso	Pisos Libres	Zona	Alquiler Medio	Precio del Suelo [€]	Espacio Medio/Piso	Pisos Libres
1	16.88	1,692	70.65	22,721	46	7.12	405	99.84	1,342
2	15.00	1,505	74.29	8,485	47	11.89	1,031	83.31	1,123
3	15.41	1,877	91.90	4,601	48	5.69	273	78.22	3,812
4	19.11	2,356	93.63	12,188	49	8.75	588	84.15	7,197
5	16.39	2,274	95.32	9,054	50	9.10	649	125.77	1,738
6	14.31	1,659	73.29	12,990	51	10.65	841	136.91	2,188
7	19.18	2,272	88.45	13,253	52	7.37	432	151.55	1,138
8	13.86	1,527	86.23	8,185	53	8.82	568	111.89	741
9	15.30	1,714	90.76	7,549	54	8.14	516	113.65	1,427
10	11.64	1,030	70.22	10,116	55	7.69	465	94.86	2,636
11	11.75	940	68.61	13,434	56	8.27	533	109.64	850
12	9.83	897	73.12	5,331	57	8.66	586	109.82	801
13	11.16	924	68.14	11,932	58	11.23	977	92.34	356
14	12.60	1,139	77.53	2,708	59	10.48	962	102.64	267
15	13.18	1,461	74.67	11,140	60	7.77	576	98.13	651
16	14.19	1,457	83.23	5,877	61	6.91	431	114.10	1,405
17	8.96	866	68.66	8,337	62	6.98	392	91.15	1,540
18	10.39	867	74.49	2,587	63	6.97	391	87.63	2,536
19	11.28	1,119	68.69	4,627	64	7.26	426	122.27	262
20	12.19	1,201	72.44	8,705	65	9.18	584	97.07	1,621
21	13.10	1,357	89.51	2,022	66	6.62	371	135.36	1,192
22	14.67	1,529	91.23	1,733	67	6.81	386	122.59	614
23	9.77	719	83.52	3,516	68	6.62	410	113.26	384
24	10.11	794	119.96	1,672	69	6.06	305	99.42	1,498
25	8.63	573	107.62	742	70	8.22	536	112.13	255
26	9.60	942	108.28	1,286	71	7.84	437	90.26	627
27	9.08	632	111.10	1,031	72	10.05	814	98.37	2,479
28	8.50	558	82.33	2,482	73	6.03	345	103.24	2,698
29	10.00	750	80.55	2,006	74	7.63	510	92.31	237
30	7.93	492	86.04	3,558	75	10.54	848	100.48	1,106
31	7.40	435	86.96	6,919	76	7.55	466	92.14	792
32	8.29	572	109.99	2,198	77	7.51	435	88.61	270
33	12.40	1,116	85.72	946	78	6.48	344	121.50	1,935
34	9.45	676	76.59	4,424	79	6.97	382	114.96	966
35	7.98	497	73.31	5,020	80	9.36	648	102.95	324
36	6.89	383	81.08	5,427	81	5.17	229	94.30	1,423
37	8.80	595	78.70	6,282	82	7.52	426	97.10	2,716
38	12.71	1,168	129.62	2,088	83	5.57	264	94.45	562
39	9.49	682	114.68	2,708	84	7.66	462	91.22	561
40	9.90	736	122.57	5,489	85	6.83	374	84.22	3,791
41	9.79	721	142.50	746	86	8.25	601	87.59	587
42	11.56	980	114.19	190	87	6.53	348	97.95	398
43	9.95	744	106.42	628	88	6.81	400	92.96	1,947
44	8.11	512	101.80	3,511	89	6.80	374	100.57	1,234
45	8.22	525	90.37	1,936	90	7.34	442	103.61	1,055

Fuente: INE (2010), CRTM (2004) y elaboración propia.

Tabla 3.8 Usos del Suelo del Modelo

Zona	Superficie [km ²]	Suelo sin Desarrollar	Suelo Urbanizable			Zona	Superficie [km ²]	Suelo sin Desarrollar	Suelo Urbanizable		
			Residencial	Económico	Protegido				Residencial	Económico	Protegido
1	5.24	0.55%	3.25%	2.63%	94.12%	46	105.90	96.91%	0.26%	4.14%	95.61%
2	6.55	4.07%	15.56%	1.51%	82.93%	47	62.20	87.89%	0.65%	7.65%	91.70%
3	5.38	0.20%	0.58%	0.08%	99.34%	48	24.50	73.33%	8.96%	5.44%	85.60%
4	5.41	0.91%	6.88%	2.58%	90.54%	49	45.40	78.38%	7.92%	16.97%	75.11%
5	9.20	0.17%	1.83%	0.30%	97.87%	50	117.00	89.79%	2.04%	2.09%	95.88%
6	5.37	0.40%	2.68%	0.40%	96.92%	51	47.20	66.20%	21.87%	14.54%	63.59%
7	4.69	0.32%	9.45%	2.98%	87.58%	52	34.90	84.46%	14.56%	1.97%	83.47%
8	243.45	90.08%	0.22%	0.17%	99.61%	53	57.00	94.07%	5.80%	1.81%	92.39%
9	44.93	49.65%	0.24%	0.08%	99.68%	54	65.00	85.28%	46.86%	10.67%	42.47%
10	25.43	35.47%	0.60%	0.11%	98.29%	55	25.20	67.39%	3.07%	1.27%	95.66%
11	14.09	12.76%	7.55%	0.82%	91.70%	56	112.70	90.98%	2.50%	0.30%	97.20%
12	7.70	0.62%	2.30%	0.12%	97.58%	57	171.60	96.42%	5.28%	0.27%	94.45%
13	14.89	19.84%	4.33%	0.11%	95.57%	58	114.00	96.05%	1.35%	0.20%	98.45%
14	6.34	20.59%	0.41%	1.00%	98.61%	59	114.30	94.37%	2.13%	0.37%	97.50%
15	11.36	0.08%	0.56%	0.12%	99.32%	60	251.60	96.82%	1.18%	0.16%	98.66%
16	28.01	35.37%	2.47%	0.61%	96.94%	61	152.70	94.35%	0.94%	1.89%	97.17%
17	20.29	33.79%	0.07%	1.03%	98.91%	62	49.60	95.21%	2.05%	5.57%	92.38%
18	51.56	86.83%	0.60%	0.20%	99.20%	63	64.20	79.27%	1.56%	3.82%	94.63%
19	32.72	69.91%	0.19%	0.05%	99.76%	64	61.30	97.13%	4.64%	3.88%	91.48%
20	21.81	35.01%	0.96%	0.31%	98.73%	65	36.90	80.11%	6.96%	7.87%	85.17%
21	42.67	50.24%	0.03%	0.39%	99.58%	66	52.00	92.46%	13.41%	6.99%	79.60%
22	45.00	65.82%	5.76%	3.64%	90.60%	67	31.40	91.09%	11.27%	6.30%	82.43%
23	58.70	82.61%	11.28%	3.02%	85.70%	68	43.80	90.43%	1.24%	0.62%	98.14%
24	58.70	88.24%	23.27%	8.01%	68.72%	69	94.10	97.49%	0.09%	1.43%	98.49%
25	38.30	93.21%	2.31%	1.94%	95.75%	70	119.40	90.85%	0.92%	0.05%	99.03%
26	171.40	95.58%	5.28%	0.86%	93.86%	71	104.20	98.30%	3.12%	0.02%	96.86%
27	107.30	93.01%	2.97%	3.46%	93.57%	72	125.20	90.37%	0.70%	0.50%	98.79%
28	12.00	41.51%	8.28%	57.47%	34.25%	73	92.20	85.41%	3.80%	0.52%	95.68%
29	38.80	89.74%	0.10%	17.85%	82.05%	74	404.60	98.94%	0.10%	0.03%	99.87%
30	32.60	39.93%	55.83%	24.00%	20.17%	75	87.90	91.81%	2.64%	0.66%	96.70%
31	87.70	81.12%	5.34%	16.84%	77.83%	76	318.10	98.71%	0.45%	0.07%	99.48%
32	125.90	87.24%	4.89%	1.73%	93.39%	77	229.30	99.43%	0.10%	0.10%	99.80%
33	17.20	82.38%	6.45%	7.11%	86.43%	78	148.40	95.39%	3.46%	2.64%	93.90%
34	78.40	75.54%	6.18%	13.05%	80.77%	79	185.70	94.23%	0.14%	0.26%	99.60%
35	43.10	77.57%	10.55%	32.10%	57.35%	80	92.70	97.82%	1.59%	0.69%	97.72%
36	39.20	73.55%	16.69%	21.70%	61.61%	81	326.20	98.88%	0.22%	0.11%	99.67%
37	33.70	66.91%	11.72%	16.33%	71.95%	82	400.60	98.84%	2.24%	0.24%	97.51%
38	43.20	45.00%	17.68%	19.70%	62.61%	83	115.90	98.47%	0.10%	0.10%	99.80%
39	38.50	79.27%	21.81%	12.15%	66.04%	84	33.00	97.42%	0.10%	0.10%	99.80%
40	58.30	53.48%	5.86%	1.70%	92.44%	85	199.00	97.06%	0.54%	0.25%	99.21%
41	21.90	64.55%	3.44%	1.34%	95.22%	86	241.30	96.27%	0.26%	0.01%	99.72%
42	45.30	90.39%	3.18%	0.40%	96.42%	87	50.80	97.33%	0.10%	0.10%	99.80%
43	38.00	72.03%	4.33%	6.11%	89.56%	88	348.40	95.11%	1.41%	0.12%	98.47%
44	182.60	96.48%	1.37%	0.48%	98.15%	89	100.20	97.01%	2.87%	1.59%	95.54%
45	79.70	90.78%	0.99%	0.67%	98.34%	90	271.20	96.50%	0.93%	0.13%	98.94%

Fuente: INE (2010), CRTM (2004) y elaboración propia.

ANEXO 4.

LA COMUNIDAD DE MADRID Y EL MODELO MARS

TABLA DE CONTENIDO

4.1 INTRODUCCIÓN	41
4.2 LA REGIÓN DE MADRID.....	43
4.2.1 EQUILIBRIOS TERRITORIALES EN MADRID	47
4.2.2 LA MOVILIDAD EN MADRID	49
4.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MARS.....	50
4.3.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MODELO	50
4.3.2 EL MODELO DE TRANSPORTE.....	54
<i>Factores de Fricción</i>	<i>57</i>
Slow Modes.....	57
Transporte Público.....	58
Transporte Privado	60
4.3.3 EL MODELO DE USOS DEL SUELO.....	61
<i>Modelo de Localización Residencial</i>	<i>62</i>
Submodelo de Desarrollo de Viviendas.....	62
Submodelo de Oferta Residencial	62
Submodelo de Demanda Residencial	63
Submodelo de Redistribución.....	65
<i>Modelo de Localización de Puestos de Trabajo</i>	<i>67</i>
Submodelo de Oferta de Espacio	67
Submodelo de Desarrollo y de Demanda de Espacio	68
4.3.4 LA EVOLUCIÓN DE MARS EN EL TIEMPO	69
4.3.5 EL MODELO EN EL ENTORNO VENSIM®	70
4.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	72
4.4.1 GENERACIÓN DE VIAJES	72
4.4.2 ATRACTIVIDAD.....	73
4.4.3 DISTRIBUCIÓN DE VIAJES.....	74
4.5 SIMULACIÓN DEL MODELO	81

4.1 INTRODUCCIÓN

En la Figura 4.1 se muestra la zonificación con la que se ha trabajado en el caso práctico. Esta zonificación se realizó tratando de agrupar las zonas bajo territorios homogéneos en cuanto a población, condiciones socioeconómicas, división política y movilidad. Un factor importante para definir esta zonificación fue la disponibilidad de información, así como su nivel de agregación, razón por la que en el municipio de Madrid se trabajó a nivel de distritos. Fuera de este ámbito, se trabajó a nivel de municipios y en zonas alejadas y poco pobladas se trabajó con una agregación de municipios. En la Tabla 4.1 se muestran los municipios de la Comunidad, la zonificación MARS y la corona a la cual pertenecen.

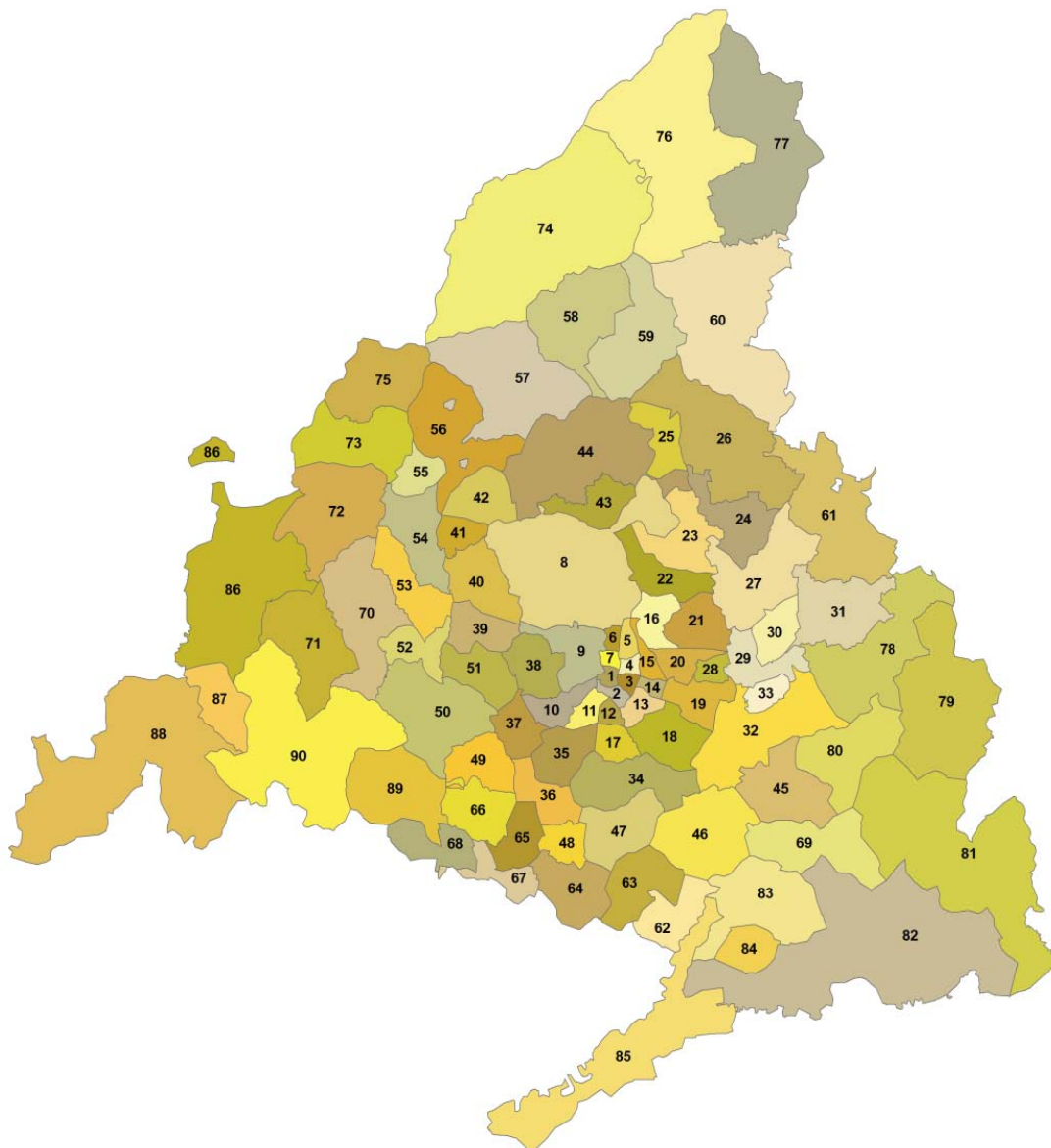


Figura 4.1 Zonas MARS Madrid

Tabla 4.1 Zonificación Comunidad de Madrid

Municipio	MARS	Corona	Municipio	MARS	Corona
Madrid-Centro	1	1	Moraleja de Enmedio	66	3
Madrid-Arganzuela	2	1	Casarrubuelos	67	4
Madrid-Retiro	3	1	Cubas de la Sagra	67	4
Madrid-Salamanca	4	1	Serranillos del Valle	67	4
Madrid-Chamartín	5	1	Álamo (El)	68	4
Madrid-Tetuán	6	1	Batres	68	4
Madrid-Chamberí	7	1	Morata de Tajuña	69	4
Madrid-Fuencarral	8	2	Perales de Tajuña	69	4
Madrid-Moncloa	9	2	Quijorna	70	4
Madrid-Latina	10	2	Valdemorillo	70	4
Madrid-Carabanchel	11	2	Fresnedillas de la Oliva	71	4
Madrid-Usera	12	2	Navalagamella	71	4
Madrid-Puente de Vallecas	13	2	Escorial (El)	72	4
Madrid-Moratalaz	14	2	San Lorenzo de El Escorial	72	4
Madrid-Ciudad Lineal	15	2	Alpedrete	73	4
Madrid-Hortaleza	16	2	Collado Mediano	73	4
Madrid-Villaverde	17	2	Guadarrama	73	4
Madrid-Villa de Vallecas	18	2	Alameda del Valle	74	4
Madrid-Vicalvaro	19	2	Canencia	74	4
Madrid-San Blas	20	2	Garganta de los Montes	74	4
Madrid-Barajas	21	2	Gargantilla del Lozoya y Pinilla de Buitrago	74	4
Alcobendas	22	3	Lozoya	74	4
San Sebastián de los Reyes	23	3	Navarredonda y San Mamés	74	4
Algete	24	3	Pinilla del Valle	74	4
Cobaña	24	3	Rascafría	74	4
San Agustín del Guadalix	25	3	Cercedilla	75	4
Fuente el Saz de Jarama	26	4	Molinos (Los)	75	4
Molar (El)	26	4	Navacerrada	75	4
Pedrezuela	26	4	Acebeda (La)	76	4
Valdeolmos-Alalpardo	26	4	Braojos	76	4
Valdetorres de Jarama	26	4	Buitrago del Lozoya	76	4
Ájahir	27	3	Gascones	76	4
Daganzo de Arriba	27	3	Horcojo de la Sierra	76	4
Paracuellos de Jarama	27	3	Madaros	76	4
Coslada	28	3	Piñuécar-Gandullas	76	4
San Fernando de Henares	29	3	Robregordo	76	4
Torrejón de Ardoz	30	3	Serna del Monte (La)	76	4
Alcalá de Henares	31	3	Somosierra	76	4
Loeches	32	3	Villavieja del Lozoya	76	4
Rivas-Vaciamadrid	32	3	Lozoyuela-Navas-Sieteiglesias	76	4
Velilla de San Antonio	32	3	Puentes Viejas	76	4
Mejorada del Campo	33	3	Atazar (El)	77	4
Getafe	34	3	Berzosa del Lozoya	77	4
Leganés	35	3	Cervera de Buitrago	77	4
Fuenlabrada	36	3	Hiruela (La)	77	4
Alcorcón	37	3	Horcajuelo de la Sierra	77	4
Pozuelo de Alarcón	38	3	Montejo de la Sierra	77	4
Majadahonda	39	3	Prádena del Rincón	77	4
Rozas de Madrid (Las)	40	3	Puebla de la Sierra	77	4
Torrelodone	41	3	Robledo de la Jara	77	4
Hoyo de Manzanares	42	3	Anchuelo	78	4
Tres Cantos	43	3	Santos de la Humosa (Los)	78	4
Colmenar Viejo	44	3	Torres de la Alameda	78	4
Arganda del Rey	45	3	Valverde de Alcalá	78	4
San Martín de la Vega	46	3	Villaalbilla	78	4
Pinto	47	3	Ambite	79	4
Parla	48	3	Corpa	79	4
Móstoles	49	3	Pezueta de las Torres	79	4
Brunete	50	3	Santorcaz	79	4
Villaviciosa de Odón	50	3	Villar del Olmo	79	4
Boadilla del Monte	51	3	Nuevo Baztán	79	4
Villanueva de la Cañada	52	3	Olmeda de las Fuentes	79	4
Colmenarejo	53	3	Campo Real	80	4
Villanueva del Pardillo	53	3	Pozuelo del Rey	80	4
Galapagar	54	3	Brea de Tajo	81	4
Collado Villalba	55	3	Carabaña	81	4
Becerril de la Sierra	56	4	Estremera	81	4
Boalo (El)	56	4	Orusco de Tajuña	81	4
Moralzarzal	56	4	Tielmes	81	4
Manzanares el Real	57	4	Valdaracete	81	4
Soto del Real	57	4	Valdilecha	81	4
Bustarviejo	58	4	Belmonte de Tajo	82	4
Miraflores de la Sierra	58	4	Colmenar de Oreja	82	4
Cabanillas de la Sierra	59	4	Fuente de Tajo	82	4
Guadalix de la Sierra	59	4	Valdelaguna	82	4
Navalafuente	59	4	Villamanrique de Tajo	82	4
Valdemanco	59	4	Villarejo de Salvanés	82	4
Venturada	59	4	Chinchón	83	4
Berrueco (El)	60	4	Villaconejos	84	4
Cabrera (La)	60	4	Aranjuez	85	4
Patones	60	4	Titulcia	85	4
Redueña	60	4	Robledo de Chavela	86	4
Talamanca de Jarama	60	4	Santa María de la Alameda	86	4
Torrelaguna	60	4	Valdemaqueda	86	4
Torrecocha de Jarama	60	4	Zarzalejo	86	4
Valdepiñeros	60	4	Navas del Rey	87	4
Vellón (El)	60	4	Cadalso de los Vidrios	88	4
Camarma de Esteruelas	61	4	Ceniceros	88	4
Fresno de Torote	61	4	Pelayos de la Presa	88	4
Meco	61	4	Rozas de Puerto Real	88	4
Ribatejada	61	4	San Martín de Valdeiglesias	88	4
Valdeavero	61	4	Villa del Prado	88	4
Ciempozuelos	62	3	Navalcarnero	89	3
Valdemoro	63	3	Aldea del Fresno	90	4
Torrejón de la Calzada	64	3	Colmenar del Arroyo	90	4
Torrejón de Velasco	64	3	Chapinería	90	4
Griñón	65	3	Sevilla la Nueva	90	4
Humanes de Madrid	65	3	Villamanta	90	4
Arroyomolinos	66	3	Villamantilla	90	4
			Villanueva de Perales	90	4

El modelo MARS necesita información socioeconómica, de movilidad y estadística de la Comunidad de Madrid para su funcionamiento. De la calidad de ésta dependerá en gran parte la fiabilidad de los resultados.

Como una herramienta necesaria para alimentar MARS, se está trabajando con un modelo completo de toda la red de transporte principal de la Comunidad de Madrid bajo el modelo VISUM. Esta red incluye las vías principales (con sus rutas de buses urbanos e interurbanos) y toda la red de metro y cercanías al año 2004. Este modelo nos proporciona información muy útil relacionada con los tiempos de viaje y de espera, las distancias recorridas por modo, entre otros datos.

4.2 LA REGIÓN DE MADRID

El área de la Comunidad de Madrid está conformada actualmente por 179 municipios cuya población llega a 6'271.638 habitantes en 2008 (INE, 2010) con una superficie total de 8.030 km².

Funcionalmente, la Comunidad de Madrid está compuesta por cuatro zonas bien diferenciadas entre sí: el municipio de Madrid, se divide en los anillos conocidos como Almendra y Periferia, y el resto de la región se divide entre la corona Metropolitana y el anillo más exterior, el cual es conocido como la corona Regional. Ver Figura 4.2.

Este modelo territorial está estrechamente relacionado con un modelo de corredores de carácter radial y originado a partir de las carreteras que unen a Madrid con el resto del país, las cuales son la carretera de Burgos (A-1), la A-2 (nordeste), la A-3 (sureste), la A-4 (sur), la carretera a Toledo (A-42), la A-5 (suroeste), la de la Coruña (A-6) y la de Colmenar (M-607).

En cuanto a la población residente sobre estos corredores, en la Tabla 4.2 se presenta el crecimiento de la población en los corredores entre los periodos de 1996 y 2004. Los datos muestran un acentuado crecimiento, especialmente en los últimos años. Algunos corredores como el de Colmenar (M-607) o el de la carretera a la Coruña (A-6), su población ha aumentado más de la mitad en los últimos 15 años.

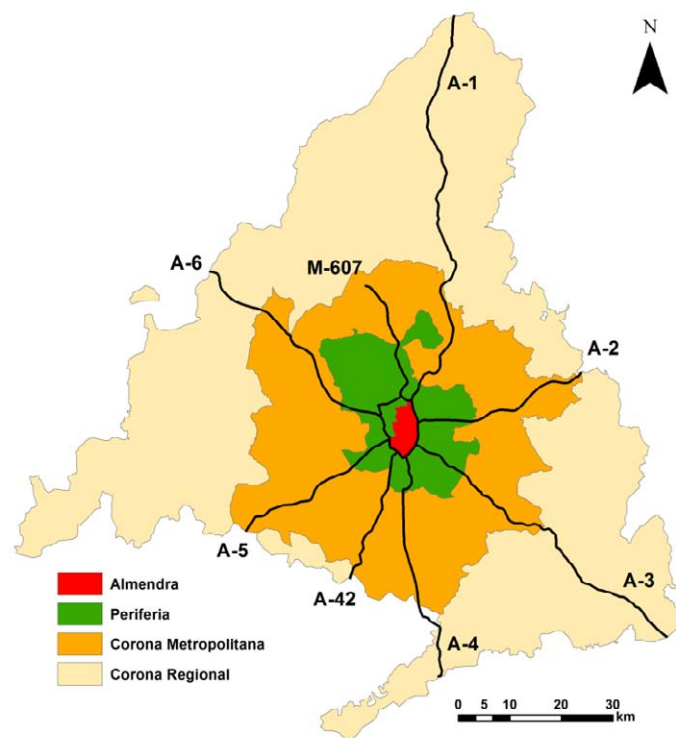


Figura 4.2 Coronas de la Comunidad de Madrid

Tabla 4.2 Crecimiento de la Población por Corredores

Corredor	$\Delta 1996-2004$
A-1	24.4%
A-2	22.7%
A-3	46.2%
A-4	38.7%
A-5	16.6%
A-6	49.0%
A-42	14.0%
M-607	45.0%

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

Madrid es en la actualidad la mayor aglomeración urbana de España y la tercera de la Unión Europea, tras Londres y París. En este proceso de crecimiento, el peso relativo del Municipio de Madrid respecto a las coronas externas ha ido decreciendo. Aunque en los últimos años la población del Municipio de Madrid ha presentado crecimientos, su peso relativo dentro de la Comunidad sigue con tendencia a la baja, dando espacio para un gran crecimiento de la población en las coronas externas.

Las políticas de desarrollo basadas en bajas densidades y dispersión de actividades conducen a un escenario en que el vehículo privado resulta la alternativa más favorable. En la Figura 4.3 se observa cómo evoluciona la densidad urbana entre 1996 y 2004, la cual se va comportando como una mancha en aumento, en particular hacia el sur y sureste, con densidades bajas y medias.

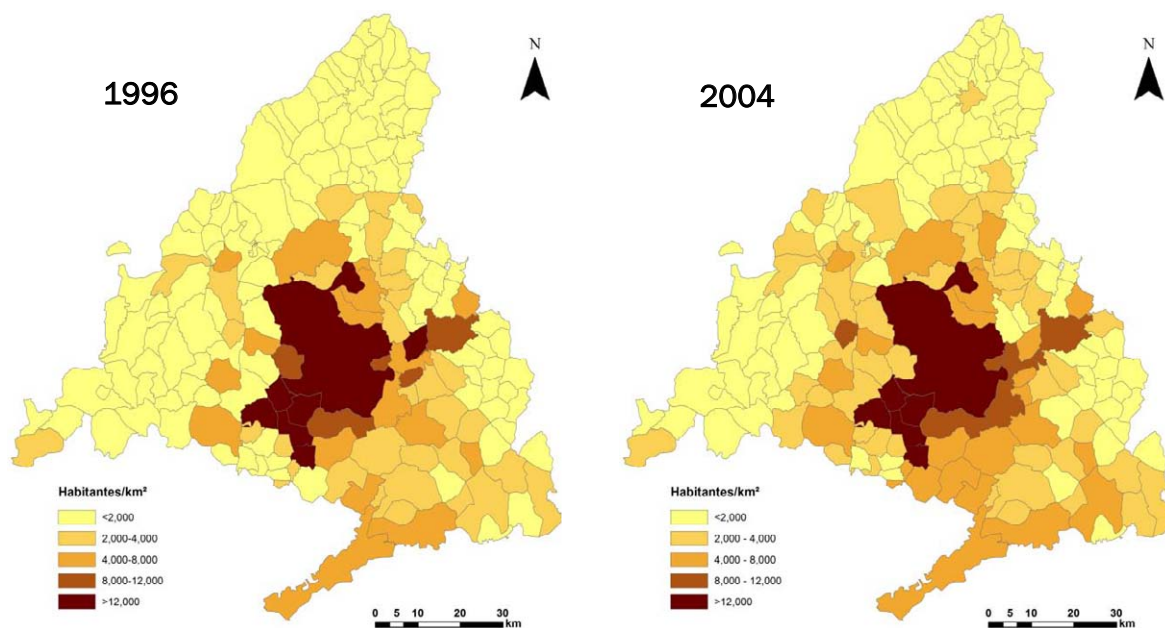


Figura 4.3 Evolución de la Densidad Urbana Comunidad de Madrid 1996 a 2004

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

La influencia entre la estructura urbana y la infraestructura del transporte en la eficiencia económica está presente de forma continua en la definición de las políticas urbanas, sobre todo en un escenario de creación de ‘mega-ciudades’. La dispersión y el uso intensivo del

vehículo privado están normalmente asociados a altos niveles de servicio de las infraestructuras y, por tanto, a un alto consumo de recursos, lo cual conduce a un escenario de menor eficiencia económica (Kenworthy y Laube, 1999).

En la Figura 4.4 se muestra cómo ha evolucionado la distribución de población en la Comunidad de Madrid a lo largo de los últimos años. Se aprecia el crecimiento del peso de las áreas periféricas frente a las centrales, particularmente en un radio de entre 10 a 30 km del centro.

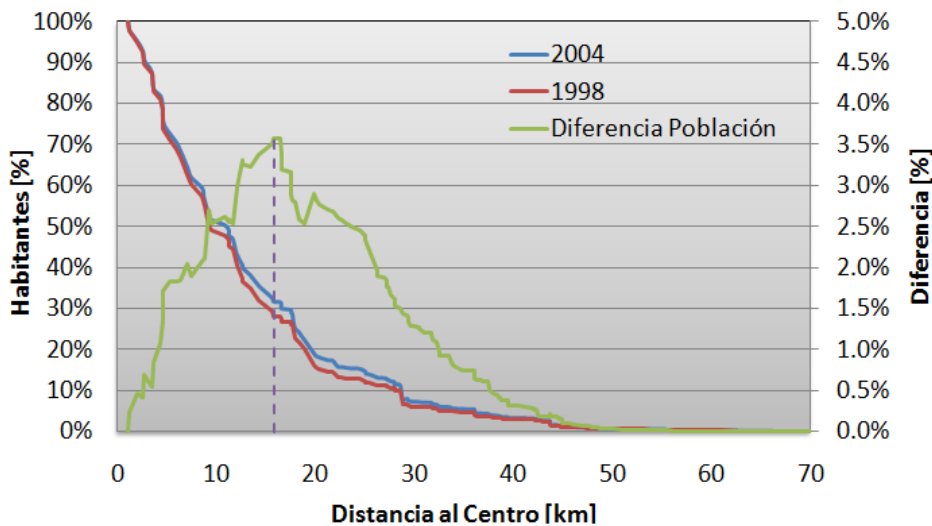


Figura 4.4 Distribución de la Población Acumulada Respecto al Centro de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

Por otro lado, la distribución de los lugares de empleo (Figura 4.5) muestra que su localización también ha sufrido un proceso de dispersión, es decir, se están generando más puestos de empleo en las zonas externas que las internas, aumentando su peso relativo. De esta manera, la región mantiene una tendencia hacia la dispersión, tanto en población como en empleo, lo cual puede conducir hacia escenarios de un mayor desequilibrio territorial.

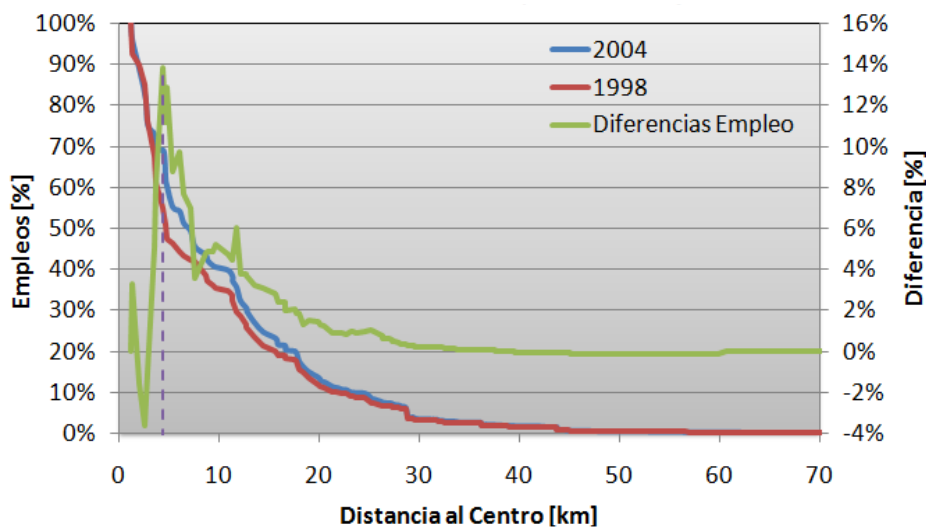


Figura 4.5 Distribución Acumulada de Puestos de Trabajo

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

Este desplazamiento territorial de la población aumenta las necesidades de movilidad (por el aumento de las distancias) y sitúa al transporte público en peores condiciones de competencia relativa con respecto al vehículo privado (por las menores densidades de población), condicionando de manera grave el equilibrio modal de las pautas de movilidad en la región de Madrid.

El crecimiento de población y empleo en áreas periféricas están directamente vinculado el modo de transporte utilizado. Al realizar un análisis de la localización residencial y del empleo en función del reparto modal de cada zona, se percibe como se está produciendo una ubicación de residentes en las zonas de menor potencial de uso de transporte público, de la misma manera, la tendencia creciente a ubicar empleos en zonas donde el uso del coche es predominante, solo contribuye a la dispersión de las actividades. Según los datos de la Figura 4.6 se observa que las zonas en dónde la población crece con mayor rapidez, son las mismas zonas donde precisamente el uso del transporte público es menor, lo que refuerza la tendencia de una mayor dependencia del coche. Y la dispersión se ve impulsada por la cada vez mayor tendencia de localizar núcleos generadores de empleo en zonas donde el transporte público es muy poco competitivo.

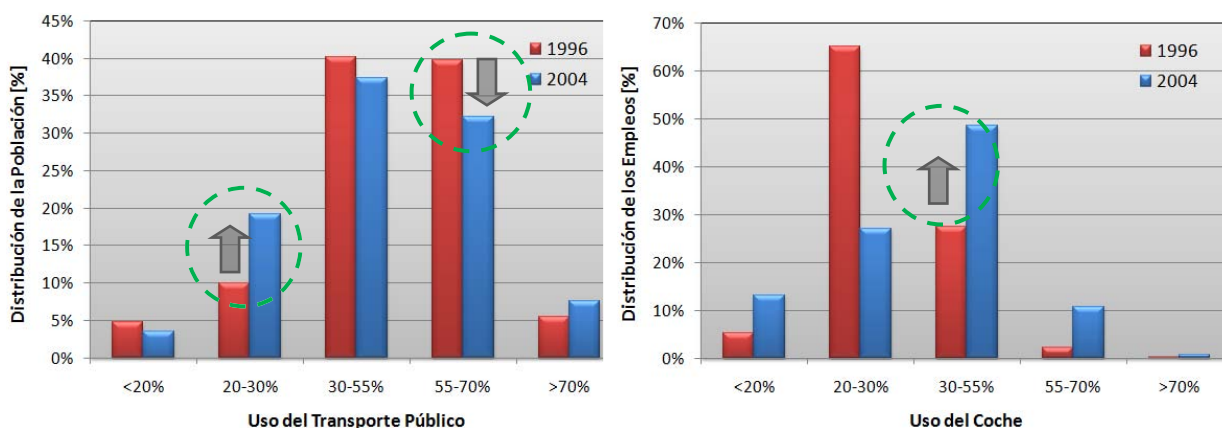


Figura 4.6 Reparto Modal Según la Distribución de la Población y del Empleo

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

Esta evolución de localización del empleo, ahora por coronas (Figura 4.7), refuerza claramente el proceso de deslocalización de los puestos de trabajo, ya que la tendencia muestra que se busca suelo más barato y un intento para evitar los problemas de aglomeración.

Aunque en 2004 el nivel de empleo en el centro de Madrid se mantiene prácticamente estable con respecto a 1996 (pasa de 38% a 39%), la diferencia importante se presenta en la periferia urbana y la corona metropolitana, donde parece haber una migración de puestos de empleo de una hacia la otra.

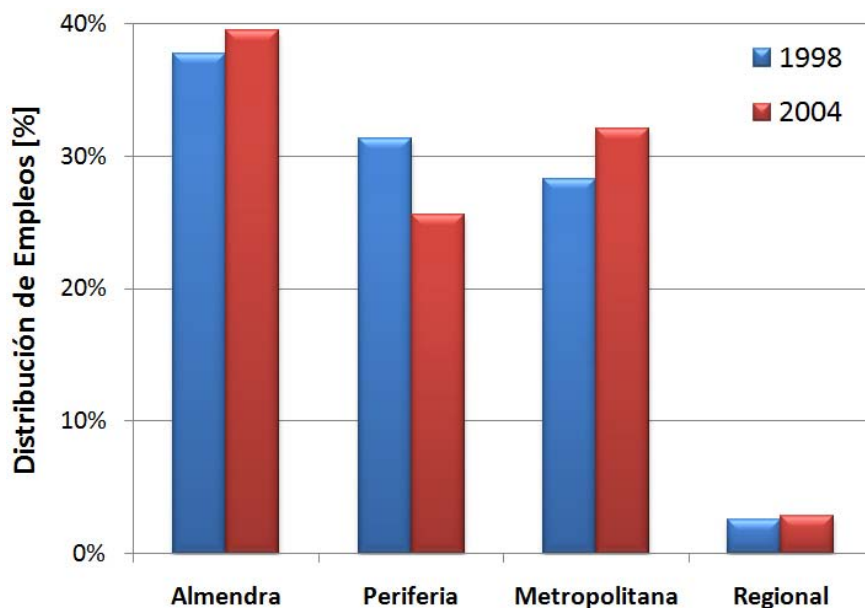


Figura 4.7 Distribución de Empleos en la Comunidad de Madrid

Fuente: INE (2010) y elaboración propia.

4.2.1 Equilibrios Territoriales en Madrid

Múltiples y complejas son las causas de los cambios urbanos en Madrid, aunque dentro de las principales razones se encuentran factores sociales, demográficos, económicos y estructurales. Entre los primeros cabe citar el aumento de la población, la estructura demográfica en la que el grueso de la pirámide coincide con aquellos segmentos de edad que están en situación de conformar nuevos hogares así como en disposición de comprar y utilizar un coche. El tamaño de los hogares que desciende de forma continuada, mientras que el grado de motorización aumenta produciendo una mayor disponibilidad de vehículo (por persona o por hogar), el aumento de la inmigración como segmento de usuarios con clara orientación hacia el transporte público, lo cual condiciona también su decisión de localización residencial.

Entre los aspectos económicos influye de manera decisiva un mercado inmobiliario con costes que influyen sobre la decisión de localización residencial. También hay elementos estructurales como la densidad de los desarrollos urbanísticos, la planificación de la localización de los usos del suelo, el diseño del desarrollo hacia el transporte público o el vehículo privado, la estructuración de los servicios de transporte público, las medidas fiscales o tarifarias, entre otros.

Las metrópolis europeas han experimentado en los últimos años una expansión sin precedentes. Se trata por lo tanto de un crecimiento superficial desproporcionado en relación a la evolución de la población. Las metrópolis crecen en extensión y sus límites son más inciertos que nunca. Los principales rasgos que pueden apreciarse en estas estructuras espaciales en las periferias metropolitanas tiene que ver con:

- Alta rapidez de expansión.
- Límites cada vez más difusos (cinturones verdes).
- Dispersión residencial en baja densidad.

- Descentralización de actividades y nuevas centralidades.
- Fragmentación del territorio. Especialización de actividades.
- Redes de transporte basados en el modelo automóvil.

Las estructuras urbanas monocéntricas, desde el punto de vista de organización del transporte, pueden ser modelos territoriales más eficientes, principalmente porque escenarios policéntricos en los que existe una multicentralidad de actividades y en las que la red de transporte está altamente dominada por el uso del coche, no aseguran la existencia de centros 'autosuficientes', con el consecuente descenso en la demanda de transporte (tanto en la longitud de los desplazamientos como en el uso intensivo del coche). Las políticas de desarrollo basadas en bajas densidades y dispersión de actividades conducen a cierto escenario desorganizado en los que el vehículo privado se presenta como la alternativa más favorable

De esta manera, al hablar de la estructura urbana de una ciudad, una forma de explicarla es a través de la distribución y localización de la población y los lugares donde se concentra el empleo. En este caso, se describirá el equilibrio urbano como una diferencia acumulada de población vs. ubicación de empleos, expresando esta diferencia con base en la distancia media al centro de la ciudad.

La localización de las personas se describe por una distribución acumulada de su localización según las distancias desde sus zonas de residencia hasta el centro de la ciudad. De manera similar se describe la localización de los puestos de trabajo. El proceso de diferencias acumuladas se puede definir, por tanto, de la siguiente manera:

$$g(x_k) = \sum_{j=k}^n [PE(x_j) - E(x_j)] \quad (4.1)$$

$$g(x_1) = 0$$

Donde,

$g(x_k)$ = Diferencias acumuladas
 $PE(x_j)$ = Distribución acumulada de personas empleadas
 $E(x_j)$ = Distribución acumulada de empleos

Esta función representa las diferencias acumuladas entre las distribuciones de los trabajadores y los empleos. En la Figura 4.8 se representa la proporción de trabajadores que deben desplazarse hacia el centro con el fin de poder acceder a su lugar de empleo. Aunque en la región el equilibrio ha mejorado (pasa de 28% a 17% en sus máximos), aún sigue existiendo un potencial claro de mejora. También es importante ver que en las zonas más externas el desequilibrio ha aumentado, lo que quiere decir que ha crecido más el peso de población de esas zonas que su correspondiente peso de puestos de trabajo.

En este sentido, y si se considera tal y como se conceptualiza en la teoría económica urbana, que dice que los trabajadores intentan minimizar su distancia de desplazamiento entre sus residencias y sus trabajos bajo ciertas condiciones de contorno, se podría decir que el escenario óptimo podría alcanzarse en el momento en que la distribución de los puestos de trabajo según la distancia al centro sea igual a la distribución de la población (Zahavi, 1976).

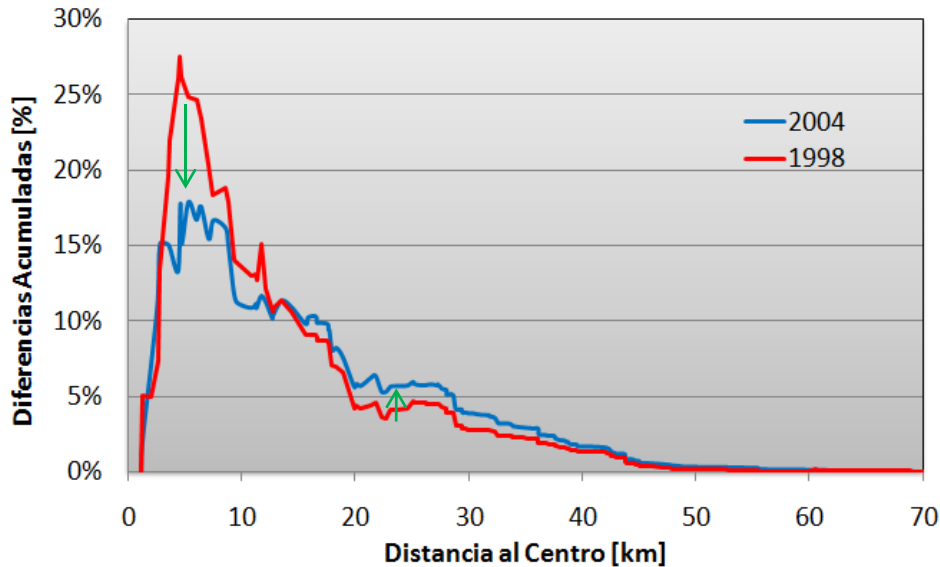


Figura 4.8 Diferencias Acumuladas de Población

Fuente: Basado en los datos del Instituto Estadístico de la Comunidad de Madrid.

4.2.2 La Movilidad en Madrid

La demanda de movilidad en la Comunidad de Madrid crece de forma continua. El número de desplazamientos según la última encuesta de movilidad de Madrid alcanza, en un día laborable, 14.511.397 viajes, lo que representa un incremento de un 38.6% con respecto a la anterior encuesta de 1996 (CRTM, 2004). Un factor importante en este incremento de la movilidad está en el aumento de población, pero no es el único factor; por ejemplo, la movilidad ha pasado de 2.16 viajes por persona en 1996, a 2.60 viajes en el año 2004, lo que supone un incremento de cerca del 20%.

Esta situación pone de manifiesto un cambio significativo frente a la EDM'96 como es el aumento de la importancia de las coronas externas frente al municipio de Madrid, en un proceso de dispersión de actividades, tanto residenciales como económicas. Los viajes generados por la corona Metropolitana aumentan cerca de un 83%, mientras que los viajes en la corona Regional aumentan en 2.5 veces

Todo lo anterior tiene importantes implicaciones en el reparto modal y en la eficiencia del sistema, dado que los mayores crecimientos se producen precisamente en aquellas relaciones en las que el coche es el modo dominante. Los costes económicos del viaje crecen, en consecuencia, pues son cada vez más largos, y crece la proporción en vehículo privado.

Según lo visto anteriormente se podría decir que el transporte público es una alternativa competitiva en las relaciones con el centro de la ciudad, pero pierde esta competitividad frente al coche en las relaciones transversales, justo donde la movilidad ha sufrido un mayor incremento, soportada principalmente por el uso del vehículo privado. Este hecho provoca una mayor complejidad de las redes de flujos de viajeros, en las que el vehículo privado es el modo dominante, lo que reduce la cuota del transporte público en estas zonas y aumenta las distancias medias diarias de desplazamiento. En definitiva, un escenario claramente alejado de lo recomendable, tanto en términos económicos, eficiencia y sostenibilidad.

Generalmente, los desplazamientos realizados en la Comunidad de Madrid presentaban una alta dependencia con la zona central de la región. Sin embargo, esta tendencia “dependiente” del centro poco a poco ha venido mostrando un quiebre y ahora muestra una inclinación a darle una mayor importancia a los movimientos internos de cada corredor.

Este comportamiento, claro está, se ve afectado por otro tipo de componentes, como las dinámicas sociales, demográficas o culturales, y los cambios en las pautas de actividad individual. Pero en todo caso pone en énfasis, sobre todo de cara al crecimiento que va a desarrollarse en los próximos años de las áreas urbanas que es necesario afrontar el problema de la movilidad bajo una articulación de los sistemas de transporte y la configuración espacial (tamaño, localización de usos del suelo, diseño urbano, entre otros elementos).

Dado que la situación de la dependencia del automóvil ha dejado de ser un símbolo de bienestar en las ciudades, dentro del modelo futuro de ciudad se debe encontrar el equilibrio para un uso racional del vehículo privado y del suelo, que asegure un mayor bienestar duradero para sus habitantes. Un sistema de transporte basado en el automóvil maximiza la movilidad (desplazamiento de bienes y personas), pero dispersa las actividades y hace un uso poco eficiente del suelo, mientras que un sistema equilibrado puede optimizar la accesibilidad (entendida como la posibilidad de acceder a servicios, bienes o actividades) y compacta el territorio. Este cambio de orientación podría conducir a reducir los costes totales del transporte, alcanzando escenarios más eficientes, tal como muestran los resultados.

Con el fin de encaminarnos hacia una nueva cultura de movilidad que combine actividades, compacte los núcleos urbanos y dé prioridad a modos de transporte alternativos, no es suficiente con diseñar y aplicar medidas aisladas, es necesario tener en cuenta una estrategia global que incluya alternativas reales de transporte en todos los modos, incluidos el caminar y la bicicleta. Un sistema de transporte colectivo de alta calidad, no sólo es una alternativa al vehículo privado en muchos ámbitos territoriales, sino que además es un incentivo para hacer más eficiente el uso del suelo.

Finalmente, un diseño territorial anidado y coordinado con el diseño de la movilidad regional, con un desarrollo óptimo de densidades, usos mixtos del suelo, desarrollos orientados al uso del transporte público, entre otros, pueden ayudar a reducir la dependencia del coche, mejorando la accesibilidad y el bienestar en general.

Podemos concluir que los tres objetivos de una movilidad sostenible: la equidad social, la mejora ambiental y la eficiencia económica llevan nos llevan hacia una nueva movilidad mucho más sostenible y a replantear los procesos de planificación y toma de decisiones desde una óptica sistémica, que busque la optimización del sistema de transporte en todas sus facetas, en conjunción con el planeamiento urbano. Este es el objetivo principal de esta investigación.

4.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MARS

Una vez vista la descripción general del modelo en el Capítulo 5, a continuación se explica cómo funciona el modelo, cómo es su interacción entre las diferentes variables y la información necesaria para alimentarlo y calibrarlo.

4.3.1 Principales Características del Modelo

La hipótesis principal de MARS es que la movilidad es sólo un medio de satisfacer unas necesidades, pero no es una necesidad en sí misma. Adicionalmente supone que la gente

tiene un presupuesto de tiempo de viaje disponible para gastar en desplazarse, ya que estudios empíricos han demostrado que el tiempo destinado a viajar permanece constante a lo largo del tiempo y entre zonas (Hupkes, 1982; Marchetti, 1994; Levinson y Kumar, 1994; Kölbl, 2000; Schafer, 2000). Bajo estos conceptos, el modelo trabaja además con los siguientes parámetros:

- Usa ratios de viajes constantes para los desplazamientos de trabajo.
- MARS trabaja con dos grupos de personas: personas en hogares con y sin coche.
- Hay dos tipos de viajes: trabajo (*commuting*) y otros (resto).
- Tres o cuatro modos de transporte: *slow*¹, transporte público y coche; *slow*, transporte público, coche y motos; *slow, bus*², *rail*³ y coche.
- El número de viajes totales de trabajo se distribuye por zonas y por modos de transporte simultáneamente.
- El tiempo empleado en los viajes de trabajo se extrae del presupuesto de viaje. El tiempo restante, MARS supone que queda libre para realizar el resto de actividades.

Como ya se ha mencionado, MARS trabaja sobre la plataforma Vensim® y a su vez éste trabaja con libros de Excel. El módulo inicial del modelo en Excel se muestra en Figura 4.9.

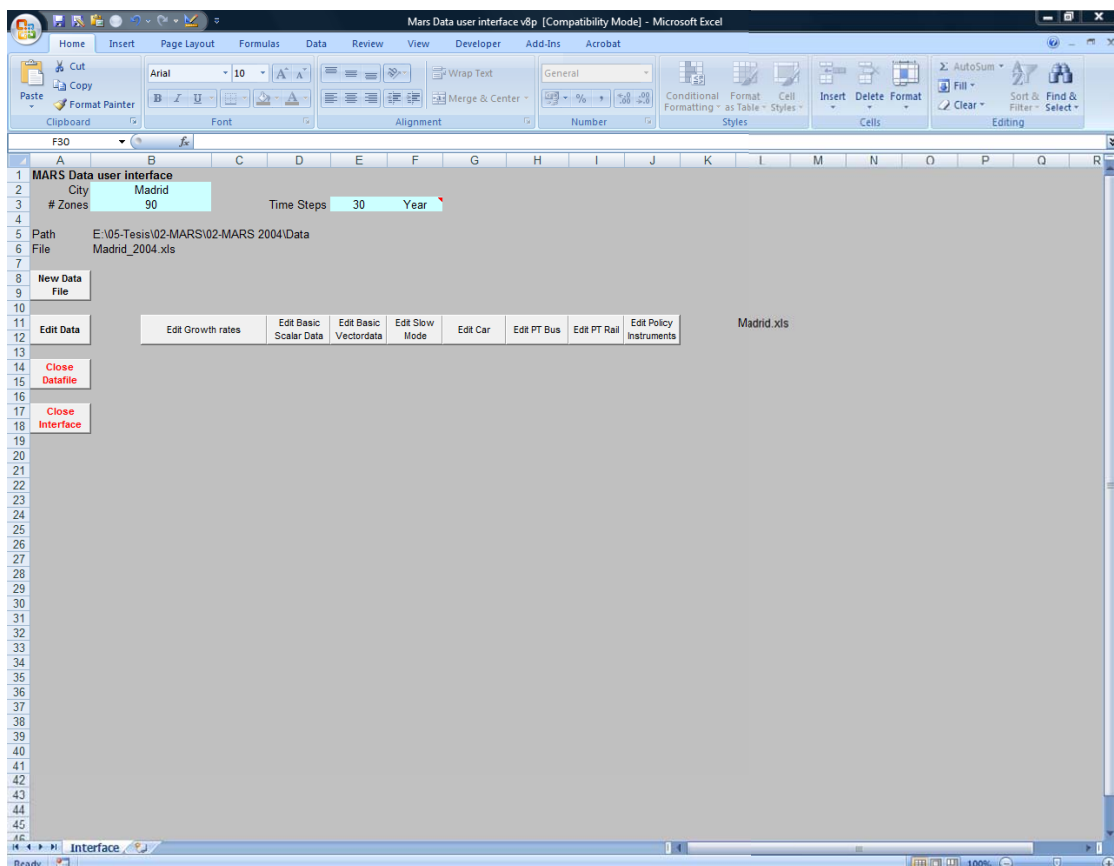


Figura 4.9 MARS Data User Interface

¹ Se refiere básicamente a modos no motorizados.

² Modo de transporte público que comparte la vía con el tráfico normal.

³ Modo de transporte público que utiliza una vía exclusiva.

Como se observa en dicha figura, el módulo de inicio consta de libros en donde se introducirá la información correspondiente al año base de la simulación. A continuación se realizará una breve explicación de cada uno de ellos.

- **Edit Growth Rates.** Se definen las tasas de crecimiento en porcentaje (%) para:
 - Población residente
 - Crecimiento de la motorización (coches y/o motos)
 - Puestos de trabajo en el sector de servicios y producción
- **Edit Basic Scalar Data.** Se requiere información particular relacionada con diferentes campos del modelo.
 - Número medio de viajes por empleado al día
 - Presupuesto de tiempo de viaje (tiempo medio para toda la Comunidad de Madrid) [min]
 - Tiempo medio de permanencia en una vivienda [años]
 - Número de viviendas a construir en el año base (en este caso, 2004)
 - Velocidad media de los peatones en hora punta [km/h]
 - Velocidad media de los peatones en hora valle [km/h]
 - Valores límites para el aumento de la capacidad vial¹ (porcentaje de cambio en nuevos desarrollos y velocidad mínima del coche)
 - Factor de ocupación del coche en hora punta y en hora valle
 - Porcentaje de empleados que tienen carnet de conducir
 - Porcentaje de residentes que tienen carnet de conducir
 - Coste del combustible² [€/km]
 - Vehículos-km de transporte público en el año base en hora punta y en hora valle
- **Edit Basic Vector Data.** En este punto se requiere información de hogares, vivienda, empleos, suelo, entre otras cosas:
 - Número de residentes por zona
 - Número de empleados por zona³
 - Ingreso medio por hogar y por zona [€/mes]
 - Tamaño medio del hogar por zona
 - Valor medio del alquiler por zona [€/m²]
 - Tamaño medio de un piso por zona [m²]

¹ MARS, en su versión original, aumenta su capacidad vial automáticamente si los nuevos desarrollos en la zona *i* cumplen estas dos condiciones (por ejemplo si el cambio en el nuevo desarrollo es mayor que 15% y la velocidad cae por debajo de 40 km/h).

² Precio del combustible en la estación de servicio.

³ De ser posible, se deben incluir los autónomos y los informales.

- Ratio entre el espacio habitable y el espacio del terreno por zona¹
- Número medio de pisos vacíos por zona
- Número de puestos de trabajo por zona
- Participación del sector de servicios y de producción por zona² [%]
- Número medio de puestos de trabajo por sector y por unidad productiva
- Superficie media por sector de negocios y por unidad [m²]
- Índice de motorización (coches y/o motos) por cada 1.000 habitantes
- Área de cada zona [km²]
- Suelo no desarrollado [%]
- Suelo desarrollable para zonas residenciales, de producción o protegidas³ [%]
- Posibilidad de desarrollo de cada sector por zona
- Precio del suelo [€/m²]
- Edit Slow Mode. Se debe introducir la matriz de distancias de caminata entre zonas, en este caso, una matriz de 90 x 90 [km].
- Edit Car. Se requiere la siguiente información relacionada con los recorridos en coche:
 - Car Distance. Matriz de distancias en coche [Km]
 - Car Vector Data. Información relacionada con el aparcamiento en hora punta y en hora valle.
 - Distancia media de caminata del punto de origen al punto de aparcamiento [min]
 - Tiempo medio de búsqueda de aparcamiento en el lugar de destino [min]
 - Distancia media de caminata del punto de aparcamiento de destino al destino principal [min]
 - Tarifa de aparcamiento de larga duración [€/duración]
 - Ratio entre los aparcamientos de larga duración ocupados en la zona
 - Tarifa de aparcamiento de corta duración [€/duración]
 - Ratio entre los aparcamientos de corta duración ocupados en la zona
 - Ratio de viajes que usan aparcamiento de larga duración

¹ Por ejemplo si se tiene dentro de un terreno de 100 m² un edificio cuya superficie ocupa 50 m² y éste tiene 5 plantas, entonces la variable es aproximadamente $5 \cdot 50 / 100 = 2.5$.

² En MARS esta información debe sumar 100%. La producción equivale aproximadamente a la producción de productos no agrícolas. En el sector de servicios, puede tomarse el comercio.

³ Por ejemplo, una zona tiene una superficie de 100 km². De ese total, 30% ya está desarrollado (construido) en el año base, así que quedan 70 km² para desarrollar (suelo no desarrollado). De esos 70 km², pueden por ejemplo, destinar 50% a zonas residenciales, 10% a producción y 40% a zonas protegidas. Estas zonas protegidas también incluyen bosques, montañas, ríos, etc.

- Car Free Flow Speed. Matriz de velocidades a flujo libre del coche [Km/h]
- Car Speed Off Peak. Matriz de velocidades de recorrido del coche en hora valle [Km/h]
- Car Speed Peak. Matriz de velocidades de recorrido del coche en hora punta [Km/h]
- Car Road Charge Off Peak. Matriz de costes adicionales (peajes) entre zonas en hora valle [€/viaje]
- Car Road Charge Peak. Matriz de costes adicionales (peajes) entre zonas en hora punta [€/viaje]
- Edit PT Bus. Se requiere la siguiente información relacionada con el transporte público en vía compartida (bus):
 - PT Bus Distance. Matriz de distancias en transporte público de vía compartida [Km]
 - PT Bus Distance PT Bus Stop. Matriz de distancias desde el punto de origen hasta la parada más próxima [min]
 - PT Bus Headway Time Off Peak. Frecuencia del transporte público de vía compartida en hora valle [min]
 - PT Bus Headway Time Peak. Frecuencia del transporte público de vía compartida en hora punta [min]
 - PT Bus Changing Time Off Peak. Tiempo medio de transbordo del transporte público de vía compartida en hora valle [min]
 - PT Bus Changing Time Peak. Tiempo medio de transbordo del transporte público de vía compartida en hora punta [min]
 - PT Bus Share Metro Peak. Ofrece la posibilidad de considerar que un parte de los viajes en bus y en tren está independiente de la velocidad de la circulación de los coches y otro no, en hora punta. Por ejemplo si X% de la longitud de las líneas de autobús tienen carriles-bus entonces el valor en la hoja es X% entre cada zona [%]
 - PT Bus Share Metro Off Peak. Igual que el punto anterior, pero en hora valle [%]
 - PT Fare Off Peak. Tarifa entre zonas en hora valle [€]
 - PT Fare Peak. Tarifa entre zonas en hora punta [€]
- Edit PT Rail. Para este modo se requiere la misma información del punto anterior. La diferencia es que acá se debe tener en cuenta solo el transporte público en vía exclusiva (metro y cercanías, por ejemplo).

4.3.2 El Modelo de Transporte

En este apartado se pretende describir brevemente el funcionamiento del modelo de transporte bajo el cual funciona MARS. Este modelo está formado por dos elementos: la generación de viajes y la distribución zonal y modal de los mismos.

Los modelos estratégicos de transporte utilizan una red de transporte muy simplificada, como es el caso del MARS, donde la red es agregada, de forma que sólo existe un arco por cada par de origen-destino (OD). La consecuencia es que no existe la etapa de asignación de rutas (como muestra la Figura 4.10), puesto que se supone que existe una única ruta entre cada par de zonas.

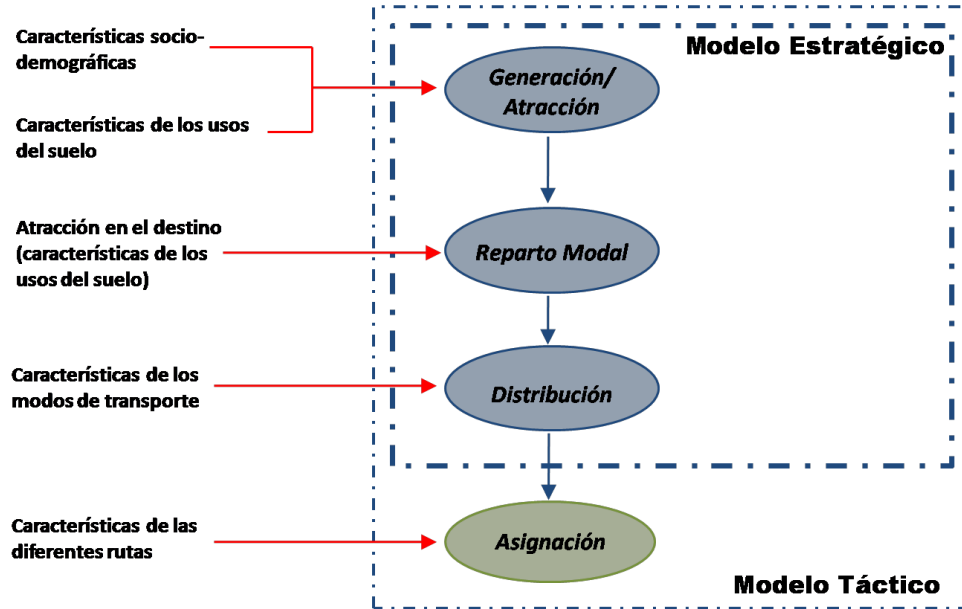


Figura 4.10 Modelo Estratégico y Táctico de Transporte

El método de generación de viajes se utiliza para estimar el número medio de viajes/día que hace cada persona empleada, es decir, estima el número de viajes/día que se realizan debido al recorrido casa - trabajo - casa (*commuting*). En este caso, el número de residentes empleados en la zona i es afectado por un valor constante (tasa de viajes) para obtener como resultado el número total de viajes de dicha zona, realizados por motivos de trabajo. Esta expresión se puede ver en la ecuación (4.2).

$$P_{i_{commuting}} = r_{commuting} \cdot E_i \quad (4.2)$$

Donde,

- P_j = Viajes producidos en el origen i
- r = Tasa de viajes/día (casa-trabajo-casa)
- E_j = Número de empleados residentes en la zona i

El tiempo total empleado por los viajes *commuting* es estimado por la expresión dada en la ecuación (4.3). Posteriormente, el tiempo restante que queda del presupuesto total de tiempo de viaje es calculado según la ecuación (4.4).

$$t_{commuting} = \sum_{ijm} T_{ij}^m \cdot t_{ij}^m \quad (4.3)$$

Donde,

t_c = Tiempo total de viaje (casa-trabajo-casa) [min]
 T_{ij} = Viajes de i a j en el modo m (casa-trabajo-casa)
 t_{ij} = Tiempo de viaje de i a j en el modo m (casa-trabajo-casa)

$$t_{P_{OTROS}} = \frac{(t_p \cdot N - t_{Commuting})}{N} \quad (4.4)$$

Donde,

t_p = Presupuesto de tiempo de viaje (motivo diferente commuting) [min]
 t_p = Presupuesto de tiempo de viaje por persona [min]
 N = Número de residentes en la zona de estudio

El tiempo total disponible por zona para realizar los viajes no relacionados con la movilidad obligada, se calcula multiplicando el presupuesto de tiempo de viaje por el número de residentes en dicha zona, según la ecuación (4.5).

$$t_{i_{OTROS}} = t_{P_{OTROS}} \cdot N_i \quad (4.5)$$

Donde,

t_j = Tiempo total de viaje con motivo distinto *commuting* [min]
 N_j = Número de residentes en la zona i

Finalmente, para el modelo de distribución zonal y modal, se utiliza una combinación de la analogía de la ley de la gravedad y de la ley de Kirchoff's de la ingeniería eléctrica (ecuación (4.6)). La producción de viajes P_i descrita anteriormente, es distribuida entre las zonas disponibles j y los modos m de acuerdo con la relación entre la atractividad de cada zona (A_j), la función de fricción (impedancia) de cada par O-D y la sumatoria de la atractividad de todos los destinos y sus impedancias.

$$T_{ij}^m = \left[P_i \frac{\frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}}{\sum_{mj} \frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}} \right]_{Comm} + \left[P_i \frac{\frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}}{\sum_{mj} \frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}} \right]_{Otros} \quad (4.6)$$

Donde,

T_{ij}^m = Número de viajes en el modo m que van del origen i al destino j
 P_i = Producción de viajes en el origen i
 A_j = Atractividad de una zona en el destino j
 t_{ij}^m = Tiempo de viaje en el modo m para ir de i a j [min]
 c_{ij}^m = Coste del viaje en el modo m para ir de i a j [€]
 $f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)$ = Factor de fricción en el modo m para ir de i a j [min]

La atractividad de cada zona depende de las actividades que se realicen en ella. Para los viajes de movilidad obligada, la atractividad de una zona es igual al número de puestos de trabajo que existan en ella. Para el resto de viajes, la atractividad está definida por el número de residentes y la cantidad de puestos de trabajo en el sector de servicios.

Las impedancias o factores de fricción, son indicadores que tratan de medir el esfuerzo percibido en tiempo y en dinero por un viajero al tratar de ir de un origen i a un destino j en un modo m . Las matrices de viajes de casa-trabajo-casa se deben calcular independientemente de la de resto de viajes.

La distribución zonal y modal considera dos grupos diferentes de personas: los que tienen coche a su disponibilidad y los que no. Los que pertenecen al primer grupo, al momento de realizar un viaje tienen la opción de decidir el modo: no motorizados¹, coche o transporte público; mientras que el segundo grupo solo podrá elegir entre los modos no motorizados y el transporte público. La estimación de la disponibilidad de coche en cada zona depende de los índices de motorización, las tasas de crecimiento de dichos índices, los factores de ocupación del coche y los porcentajes de tenencia de carnet de conducir (ecuación (4.7)).

$$Ac^c = \frac{I_{mot}^c \cdot F \cdot O \cdot P_c}{1.000} \quad (4.7)$$

Donde,

- Ac^c = Porcentaje de población que tiene acceso a coche
 I_{mot} = Índice de motorización [coches/1.000 residentes]
 $F \cdot O$ = Factor medio de ocupación del coche [personas/coche]
 P_c = Porcentaje de licencias de conducir

Factores de Fricción

Los factores de fricción son funciones que dependen de los tiempos de viaje, incluido las percepciones subjetivas de los usuarios del sistema según las diferentes partes del viaje y sus costes. Los parámetros de fricción usados en MARS fueron desarrollados por el *Institute of Transport Science, Aachen University of Technology* (Walther et al., 1997) y tienen una forma exponencial.

Slow Modes

En la ecuación (4.8) se muestra el factor de fricción para este modo de transporte usado en MARS, donde t_{ij} es el tiempo de recorrido en este modo desde la zona i a la j .

$$f_{slow} = \alpha \cdot t_{ij} \cdot \exp(\beta \cdot t_{ij}) \quad (4.8)$$

Walther et al., (1997) utilizaron la distancia de recorrido para estimar diferentes parámetros en función de ella. Luego, usando esos resultados y la ecuación anterior, se estimaron los siguientes parámetros.

Tabla 4.3 Parámetros de Fricción para *Slow Modes*

Parámetro	Valor
α	0.2060
β	0.0463

Fuente: Pfaffenbichler y Shepherd (2003).

¹ Como se ha visto, en MARS los viajes no motorizados (en bicicleta y a pie) se conocerán como *slow modes*.

Transporte Público

Un viaje en transporte público consta de las siguientes etapas (Figura 4.11):

- Tramo de caminata desde el origen hasta la parada del transporte público (w)
- Tiempo de espera en la parada (wt)
- Recorrido desde la parada hasta el destino (dr)
- Tiempo de transbordo (ch)
- Tramo de caminata desde la parada del transporte público hasta el destino final (w)

Cada una de estas etapas es percibida y evaluada diferente por cada usuario del sistema. De esta manera, cada etapa de un viaje de este tipo se ve afectada por un valor que le asigna cada usuario según su propia percepción.

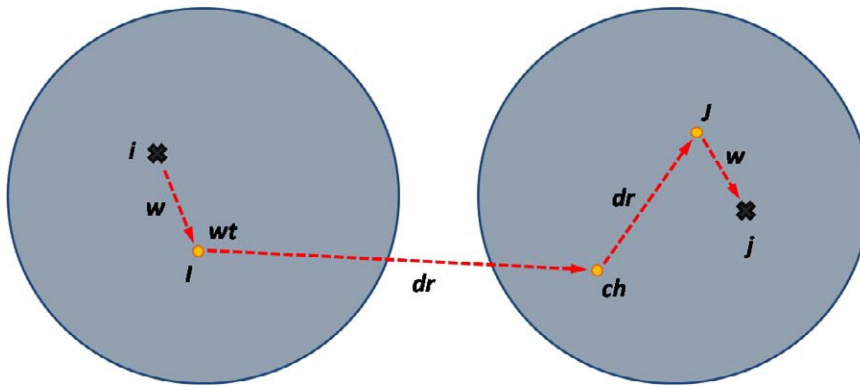


Figura 4.11 Etapas de un Viaje en Transporte Público en MARS

- i = Origen
- j = Destino
- l = Parada en el origen
- J = Parada en el destino
- w = Caminar
- wt = Tiempo de espera
- dr = Tiempo de recorrido
- ch = Tiempo de trasbordo

Entonces, el factor de fricción para un viaje de transporte público deberá incluir los aspectos inherentes al viaje, como tiempos y costes y la percepción de los usuarios. En la ecuación (4.9) se muestra la expresión para calcular el valor de la fricción entre un par ij .

$$f(t_{ij}^{TP}, c_{ij}^{TP}) = t_{il}^w \cdot FS_{il}^w + t_l^{wt} \cdot FS_l^{wt} + \sum t_{lj}^{dr} + \sum t_{ij}^{ch} \cdot FS_{ij}^{ch} + t_{jj}^w \cdot FS_{jj}^w + Z_{ij} \quad (4.9)$$

Donde,

- t_{ij}^w = Tiempo de caminata del origen i a la parada l [min]
- FS_{il}^w = Valor subjetivo de tiempo desde el origen i a la parada l
- t_l^{wt} = Tiempo de espera en la parada l [min]
- FS_l^{wt} = Valor subjetivo de tiempo de espera en la parada l
- t_{IJ}^{dr} = Tiempo de recorrido desde la parada l hasta la parada J [min]
- t_{IJ}^{ch} = Tiempo de transbordo [min]
- FS_{IJ}^{ch} = Valor subjetivo del tiempo de transbordo
- t_j^w = Tiempo de caminata de la parada J hasta el destino j [min]
- FS_{j^w} = Valor subjetivo del tiempo desde la parada J hasta el destino j
- Z_{ij} = Costes de viaje desde i hasta j [min]

Los factores subjetivos de percepción de los tiempos tienen la forma $\alpha + \beta \cdot \exp(\delta t)$, donde t es el tiempo en cuestión.

Por otro lado, el coste de viaje de una zona a otra, viene en función del ingreso medio del hogar y se calcula utilizando la ecuación (4.10).

$$Z_{ij} = \frac{c_{ij}}{\alpha \cdot \text{Ing}_i} \tag{4.10}$$

Donde,

- c_{ij} = Coste por ir del origen i hasta el destino j [€/viaje]
- α = Factor de valor del tiempo (0.17)
- Ing_i = Ingreso medio por hogar de la zona i [€/min]

MARS diferencia el transporte público si este circula por vía exclusiva o no. Si el sistema comparte la infraestructura con el tráfico vehicular, en el modelo se conoce como el modo *bus*; pero si el sistema tiene vía exclusiva (como un metro o un carril-bus exclusivo), se conoce como *rail*. Así, según la expresión característica de los factores subjetivos, en la Tabla 4.4 se muestran las constantes de los factores subjetivos según cada caso.

Tabla 4.4 Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Bus

Parámetro	Acceso $_{II}$	Espera $_I$	Transbordo $_{IJ}$	Salida $_{JJ}$
α	0.569179	0.787590	0.4985169	0.569179
β	0.274495	0.511118	0.5577460	0.274495
δ	0.342360	0.341750	0.3170020	0.342360

Fuente: Pfaffenbichler y Shepherd (2003).

En la Tabla 4.5 se muestran las mismas constantes, pero en este caso para el modo de vía exclusiva, conocido como *rail*.

Tabla 4.5 Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Rail

Parámetro	Acceso $_{II}$	Espera $_I$	Transbordo $_{IJ}$	Salida $_{JJ}$
α	0,572903	0,342126	0,194192	0,572903
β	0,299241	1,043380	0,926407	0,299241
δ	0,282115	1,043380	0,226000	0,282115

Fuente: Pfaffenbichler y Shepherd (2003).

Transporte Privado

Un viaje en transporte privado consta de las siguientes etapas (Figura 4.12):

- Tramo de caminata desde el origen hasta el lugar de aparcamiento (w)
- Recorrido desde el aparcamiento hasta el destino (dr)
- Tiempo de búsqueda de aparcamiento (dr^*)
- Tramo de caminata desde el lugar de aparcamiento hasta el destino final (w)

Al igual que en el transporte público, cada etapa del viaje en coche es percibido de forma diferente por los usuarios.

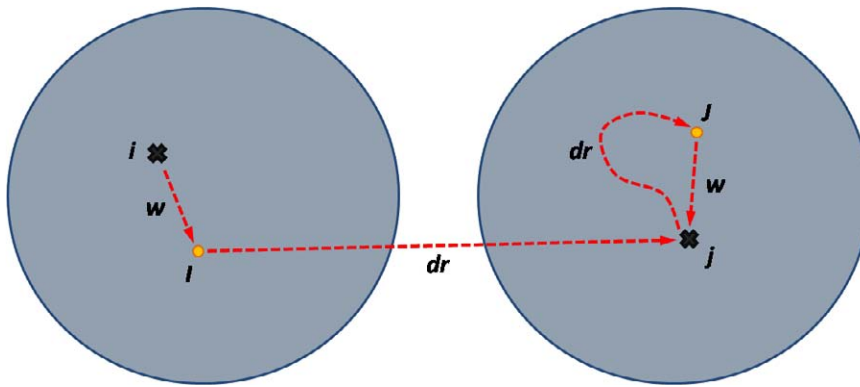


Figura 4.12 Etapas de un Viaje en Coche en MARS

- i = Origen
 j = Destino
 l = Aparcamiento en origen
 J = Aparcamiento en destino
 w = Caminar
 dr = Tiempo de recorrido

El factor de fricción para el coche viene dado por la expresión mostrada en la ecuación (4.11).

$$f(t_{ij}^C, c_{ij}^C) = \left(t_{il}^w \cdot FS_{il}^w + t_{lj}^{dr} + t_{jJ}^{ps} \cdot FS_{jJ}^{ps} + t_{Jj}^w \cdot FS_{Jj}^w \right) \cdot FS_{ij}^C + {}^k Z_{ij}^C \quad (4.11)$$

Donde,

- t_{il}^w = Tiempo de caminata del origen i al aparcamiento l [min]
 FS_{il}^w = Valor subjetivo de tiempo desde el origen i al aparcamiento l
 t_{lj}^{dr} = Tiempo de recorrido desde el aparcamiento l hasta el destino j [min]
 t_{jJ}^{ps} = Tiempo de búsqueda de aparcamiento J [min]
 FS_{jJ}^{ps} = Valor subjetivo del Tiempo de búsqueda de aparcamiento J
 t_{Jj}^w = Tiempo de caminata el aparcamiento J hasta el destino j [min]
 FS_{Jj}^w = Valor subjetivo del tiempo desde el aparcamiento J hasta el destino j

$FS_{ij}^c =$ Valor subjetivo adicional por percepción del tiempo de i a j
 ${}^kZ_{ij} =$ Costes de viaje desde i hasta j causados por el componente k^1 [min]

La expresión de los valores subjetivos es la misma que para el transporte público. De esta manera, en la Tabla 4.6 se muestran los valores de las constantes de dichos factores.

Tabla 4.6 Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Coche

Parámetro	Acceso α	Búsqueda β	Salida δ
α	1.00	2.00	2.00
β	0,0001	0,0001	0,0001
δ	0.800	0.800	0.800

Fuente: Pfaffenbichler y Shepherd (2003).

Para el factor subjetivo de percepción de tiempo adicional, en la ecuación (4.12) se muestra la expresión con la que se calcula, siendo D_{ij} la distancia de recorrido en km, de la zona i a la j .

$$FS_{ij}^c = 0.8507 \cdot [1 - 0.7318 \cdot \exp(-0.1879 \cdot D_{ij})] \quad (4.12)$$

En lo referente a los costes que componen el factor de fricción (ecuación (4.11)), éstos están compuestos principalmente por los costes de operación y de aparcamiento tal como se muestra en la ecuación (4.13). También se pueden adicionar otros costes de viaje, por ejemplo un peaje urbano.

$${}^kZ_{ij} = \frac{\text{parking } c_{ij}}{\alpha_{fuel} \cdot \alpha_{parking} \cdot Ing_i \cdot F.O} + \frac{\text{operación } c_{ij}}{\alpha_{fuel} \cdot Ing_i \cdot F.O} \quad (4.13)$$

Donde,

${}^kC_{ij} =$ Costes por ir de i a j por la tarifa k [€/viaje]
 ${}^k\alpha =$ Factor de disponibilidad a pagar (0.43 para el combustible y 0.769 para el aparcamiento)
 $Ing_i =$ Ingreso medio por hogar de la zona i [€/min]
 $F.O. =$ Factor de ocupación del coche [personas/coche]

4.3.3 El Modelo de Usos del Suelo

El modelo de usos del suelo consiste en dos submodelos de tipo LOGIT o gravitacional: el de localización residencial y el de localización de puestos de trabajo. Cada uno de estos submodelos está a su vez conformado por cuatro partes:

- Un modelo de desarrollo
- Un modelo de disponibilidad a salir de una zona
- Un modelo de disponibilidad a entrar en una zona

¹ Estos componentes son: costes de combustible, otros costes de operación, costes de aparcamiento, peajes urbanos, entre otros.

- Un modelo de redistribución de oferta y demanda

Modelo de Localización Residencial

En este modelo en primera instancia, los posibles urbanizadores deciden cuándo y dónde construirán nuevas viviendas. La decisión dependerá de:

- El precio del alquiler de las viviendas una vez estén listas para ser ocupadas
- El precio del suelo en el año de la toma de la decisión de construir
- La disponibilidad de suelo en el año de la toma de la decisión de construir

Submodelo de Desarrollo de Viviendas

El desarrollo de nuevos domicilios (unidad de vivienda familiar) se describe según la ecuación (4.14). Este modelo se basa en la premisa básica que hay un potencial general para desarrollar una cierta cantidad de viviendas $P^D(t-T)$ dentro de una zona j en la iteración t . La cantidad inicial de viviendas a construir en la iteración 0 se debe definir externamente (año base). En las siguientes iteraciones, el cálculo de nuevas viviendas se hace utilizando la ecuación (4.25). Por otro lado, la distribución espacial depende primero del precio del alquiler, el cual se paga en el momento $(t-T)$. Como este precio cambia según la ecuación (4.26), será diferente del precio del año t .

$$\Delta D_j(t) = P^D(t-T) \cdot \frac{a^D \cdot \frac{R_j^D(t-T)}{LP_j(t-T)} + b^D}{\sum_j a^D \cdot \frac{R_j^D(t-T)}{LP_j(t-T)} + b^D} \quad (4.14)$$

Donde,

$\Delta D_j(t)$ =	Número de nuevas viviendas construidas disponibles en el mercado en la zona j en el tiempo t
$P^D(t)$ =	Cantidad de viviendas demandadas en el tiempo t y percibidas por los urbanizadores en el año $t-T$
T =	Periodo de tiempo en planear y construir las nuevas viviendas
$R_j^D(t-T)$ =	Alquiler mensual de una vivienda en la zona j en el tiempo $t-T$ [€]
$LP_j(t-T)$ =	Precio del suelo en la zona j en el tiempo $t-T$ [€/m ²]
a^D, b^D =	Constates (obtenidas de análisis de regresiones de datos observados)

La decisión de construir nuevas viviendas depende del precio del suelo en el momento $(t-T)$ (que es el momento en donde se toma la decisión). El precio del suelo también cambia de forma endógena, según la ecuación (4.27). El número de viviendas es controlado por la disponibilidad de suelo, ya que si no hay suelo disponible, la decisión no se tomará. Se asume que los costes de construcción y mantenimiento son homogéneos por cada zona.

Submodelo de Oferta Residencial

El número de residentes que emigran a una zona j en la iteración t es calculado por la ecuación (4.15). El número total de personas que se van de su lugar de residencia (ya sea por mudanza o por muerte) en la iteración t es estimada al dividir la población total por el tiempo medio de permanencia en una vivienda (ecuación (4.16)). La distribución espacial de estas personas que se mueven depende de la accesibilidad en coche, la cantidad de zonas verdes y el precio de la vivienda en la zona j . La accesibilidad en coche intenta reflejar la gran utilidad para el residente de vivir cerca a las grandes infraestructuras viales. Las zonas verdes son utilizadas como un indicador que aumenta la calidad de vida en dicha zona. El precio de la

vivienda visto como alquiler, obviamente, mide el coste de vivir en la zona de estudio. La forma básica de la ecuación (4.15), fue obtenida con base en información recolectada en la ciudad de Viena.

$$N_j^{mv}(t) = P^{mv}(t) \cdot \frac{a^{mv} \cdot \exp(b^{mv} \cdot {}^{wp}Acc_j^C(t) + c^{mv} \cdot ShGr_j(t) + d^{mv} \cdot R_j^D(t))}{\sum_j a^{mv} \cdot \exp(b^{mv} \cdot {}^{wp}Acc_j^C(t) + c^{mv} \cdot ShGr_j(t) + d^{mv} \cdot R_j^D(t))} \quad (4.15)$$

Donde,

- $N_j^{mv}(t)$ = Número de residentes que se mueven de la zona j en el tiempo t
- $P^{mv}(t)$ = Potencial de movimiento de residentes en el tiempo t
- ${}^{wp}Acc_j^C$ = Accesibilidad a los puestos de trabajo en coche desde la zona j en el tiempo t
- $ShGr_j(t)$ = Zonas verdes en la zona j en el tiempo t
- $R_j^D(t)$ = Alquiler mensual (o hipoteca) de una vivienda en la zona j en el año t [€]
- a^{mv} , b^{mv} , c^{mv} , d^{mv} = Constantes (obtenidas de análisis de regresiones de datos observados y calibrados)

Como se mencionó anteriormente, el potencial de residentes que salen de la zona se calcula utilizando la ecuación (4.16).

$$P^{mv}(t) = \frac{N^R(t)}{\Delta T^{mv}} \quad (4.16)$$

Donde,

- $N^R(t)$ = Residentes en la zona de estudio en el tiempo t
- T^{mv} = Tiempo medio de permanencia en una vivienda

La cantidad de residentes que se mudan, las nuevas viviendas construidas y las viviendas desocupadas, vienen de la iteración anterior $t-1$, lo que da como resultado la oferta total de viviendas por zona para la iteración t , según la siguiente ecuación.

$$S_j^D(t) = \Delta D_j(t) \cdot n_j^{HH}(t) + N_j^{mv}(t) + S_j^D(t-1) - N_j^{in}(t-1) \quad (4.17)$$

Donde,

- $S_j^D(t)$ = Oferta de vivienda en la zona j en el tiempo t
- $n_j^{mv}(t)$ = Número de residentes por vivienda en la zona j en el tiempo t
- $N_j^{in}(t-1)$ = Número de gente que se mueve en la zona j en el tiempo t

Submodelo de Demanda Residencial

Inicialmente, el número total de personas que necesitan una vivienda en una zona en el año t es igual al número de personas que se mudan (ecuación (4.16)) más la población debida a la migración y al crecimiento natural. Las tasas de crecimiento de la población se definen como una variable exógena al modelo (la ecuación (4.19) se refiere al cambio en la población en el año 0). Si la oferta de viviendas no es suficiente para satisfacer la demanda debida a las tasas de crecimiento externas, entonces, estas tasas de crecimiento se verán restringidas por un factor de demanda de viviendas (ecuaciones (4.20) y (4.21), factor de demanda de

viviendas y demanda total de viviendas, respectivamente). La sobredemanda en la iteración t es almacenada y se acumula con el crecimiento externo de la iteración $t+1$ (ecuación (4.22)). Un aumento en el potencial de personas que se mudan dentro de la zona de estudio, estimula el desarrollo de nuevas actividades en las siguientes iteraciones (ecuación (4.21)), donde se calcula la relación entre el potencial de construcción y el factor de demanda. Así, en la ecuación (4.18) se muestra la forma de calcular la demanda de viviendas por zona.

$$P^{in,d}(t) = P^{mv}(t) + N^{gr}(t) = \sum_j N_j^{mv}(t) + N^{gr}(t) \quad (4.18)$$

Donde,

$P^{in,d}(t)$ = Cantidad total de viviendas requeridas en el tiempo t
 $N^{gr}(t)$ = Cambio en la población en el tiempo t

Ahora, en la ecuación (4.19) se muestra cambio de la población en el año 0.

$$N^{gr}(0) = p^{gr}(0) \cdot N^R(0) \quad (4.19)$$

Donde,

$p^{gr}(0)$ = Porcentaje en el cambio de población en el tiempo 0

$$DF^D(t) = \frac{P^{in,d}(t)}{S^D(t)} \quad (4.20)$$

Donde,

$DF^D(t)$ = Factor de demanda de viviendas en el tiempo t

Ahora,

$$\text{Si } DF^D(t) > 1 \text{ entonces, } P^{in}(t) = \sum_j S_j^D(t) \text{ ó } P^{in}(t) = P^{in,d}(t) \quad (4.21)$$

Donde,

$P^{in}(t)$ = Demanda total de viviendas que se puede cubrir en el tiempo t

La demanda sin satisfacer se calcula empleando la ecuación (4.22).

$$N^{gr}(t+1) = p^{gr}(t+1) * N^{Res}(t) + (P^{in}(t) - S^D(t)) \quad (4.22)$$

La distribución espacial de la gente que se muda dentro de nuevas zonas residenciales depende de la accesibilidad conjunta de coche y transporte público, de las zonas verdes y del precio de las viviendas (ecuación (4.23)). La accesibilidad en transporte público y coche refleja la utilidad de acceder a más oportunidades de empleo. Las zonas verdes, al igual en el submodelo anterior, indican la calidad de vida en una zona. El precio del alquiler de la

vivienda, mide el coste de vivir en una zona. La forma básica de esta ecuación fue obtenida de un análisis realizado en la ciudad de Viena (Pfaffenbichler y Shepherd, 2003).

$$N_j^{in}(t) = P^{in}(t) \cdot \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))} = \frac{A_j^{in}(t)}{\sum_j \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))}} \tag{4.23}$$

$$P^{in}(t) \cdot \frac{a^{in} \cdot \exp[b^{in} \cdot {}^{wp}Acc_j^{C,TP}(t) + ShGr_j(t) \cdot (c^{in} \cdot ShGr_j(t) + d^{in}) + e^{in} \cdot R_j^D(t)]}{\sum_j a^{in} \cdot \exp[b^{in} \cdot {}^{wp}Acc_j^{C,TP}(t) + ShGr_j(t) \cdot (c^{in} \cdot ShGr_j(t) + d^{in}) + e^{in} \cdot R_j^D(t)]}$$

Donde,

- $N_j^{in}(t)$ = Número de residentes que requieren una vivienda de la zona j en el tiempo t
- $A_j^{in}(t)$ = Atractividad para mudarse a la zona j en el tiempo t
- $f(Z_j^{in}(t))$ = Factor de fricción para moverse a la zona j en el tiempo t , causada por la impedancia Z
- ${}^{wp}Acc_j^{C,TP}$ = Accesibilidad conjunta (coche y transporte público) a los puestos de empleo de una zona j en el tiempo t
- $ShGr_j(t)$ = Zonas verdes en la zona j en el tiempo t
- $R_j^D(t)$ = Alquiler mensual (o hipoteca) de una vivienda en la zona j en el año t [€]
- $a^{in}, b^{in}, c^{in}, d^{in}, e^{in}$ = Constantes (obtenidas de análisis de regresiones de datos observados y calibrados)

Submodelo de Redistribución

La redistribución geográfica de las personas que se mudan es necesaria en el caso en que más gente quiera irse a una determinada zona donde la oferta de vivienda ya está copada. La Figura 4.13 y la ecuación (4.24) muestran el proceso iterativo de la redistribución de la sobre-demanda de población hacia zonas con oferta disponible.

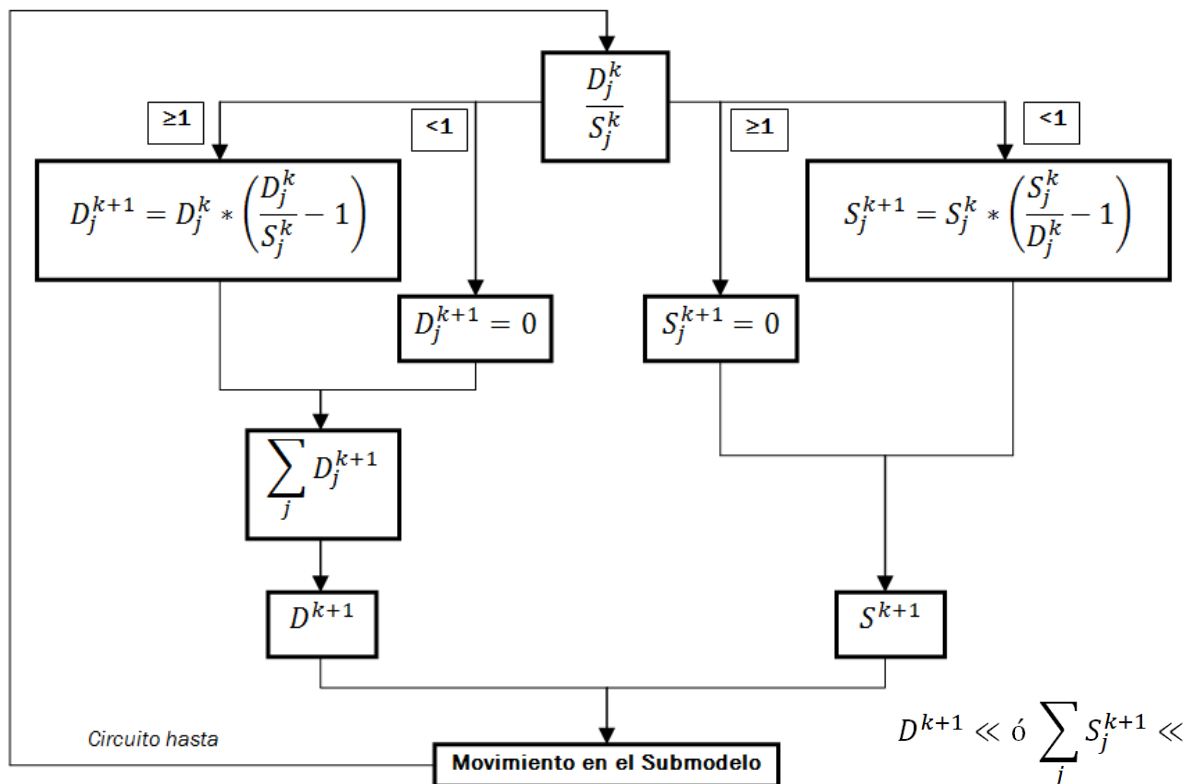


Figura 4.13 Diagrama de Redistribución de Zonas Residenciales

Donde,

k = Número de iteraciones en el proceso de redistribución
 j = Subíndice de la zona
 D = Cantidad de demanda de vivienda
 S = Cantidad de oferta de vivienda

Después de cada iteración t , la cantidad de viviendas demandadas, así como su precio se adaptan de acuerdo a la situación de oferta/demanda calculando la relación entre el potencial de construcción y el factor de demanda (ecuaciones (4.25) y (4.26)).

Por medio de la ecuación (4.24) se calcula la redistribución de la demanda de población.

Calcular hasta $\forall N_j^{in}(t)_k \leq S_j^D(t)_k$

Si $N_j^{in}(t)_k > S_j^D(t)_k$ entonces,

$$P_j^{in}(t)_{k+1} = N_j^{in}(t)_k - S_j^D(t)_k \quad y \quad \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))_{k+1}} = 0 \quad \text{ó} \quad (4.24)$$

$$P_j^{in}(t)_{k+1} = 0 \quad y \quad \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))_{k+1}} = \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))_k}$$

Siguiente k

Donde,

k = Número de iteraciones en el proceso de redistribución

Ahora, el desarrollo de nuevas viviendas viene dado por:

$$P^D(t+1) = [P^D(t) + a] \cdot [DF^D(t)]^2 \quad (4.25)$$

La evolución del precio de la vivienda (alquiler) depende del ratio de la demanda con la oferta del mercado inmobiliario residencial y los cambios en las intensidades de tráfico vehicular de la zona (ecuación (4.26)). Esta última tiene como objeto tratar de mostrar que el valor de las viviendas disminuye cuando se incrementan la polución y el ruido en la zona debido al tráfico vehicular.

$$R_j^D(t+1) = R_j^D(t) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \gamma \cdot \exp \left[-\delta \cdot DF_j^D(t) \cdot \frac{\sum_i T_{ij}^C(t-1) + \sum_j T_{ij}^C(t-1)}{\sum_i T_{ij}^C(t) + \sum_j T_{ij}^C(t)} \right]} \quad (4.26)$$

Donde,

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = Constantes

Si una zona de estudio tiene poco suelo para desarrollar, su precio aumenta (ecuación (4.27)). La demanda externa sin satisfacer se acumula (ecuación (4.22)) y estimula la construcción debido al factor de demanda de viviendas.

$$LP_j(t + 1) = LP_j(t) \cdot \exp\left(\frac{ShGr_j(t - 1)}{ShGr_j(t)} - 1\right) \quad (4.27)$$

Modelo de Localización de Puestos de Trabajo

Este modelo está dividido en dos partes: el sector de producción¹ y el de servicios². Su estructura básica es similar al modelo de localización residencial, excepto que acá no hay explícitamente un modelo de desarrollo. Negocios y empresas son vistos como sus propios desarrolladores, en este caso, de empleos. Los submodelos para el sector de servicios y producción son iguales con excepción de los parámetros en las ecuaciones de distribución. Los negocios de servicios se implementan más rápido que los del sector de producción.

Submodelo de Oferta de Espacio

MARS usa un modelo simple para estimar el movimiento de los puestos de empleo. La vida media de una empresa en una ubicación determinada se utiliza para estimar el porcentaje de negocios que cambian su sede en cada iteración (ecuación (4.28)). Este porcentaje se usa para calcular el número de empresas y puestos de empleo que se mueven a una zona (ecuación (4.29)). Al multiplicar la media de espacio disponible por los puestos de empleo dados, se tiene el espacio disponible por sector económico (ecuación (4.30)).

$$P_{mv}^s = \frac{1}{T_{mv}^s} \quad (4.28)$$

Donde,

P_{mv}^s = Porcentaje de puestos de empleo por sector económico s que salen de una zona cada año

T_{mv}^s = Media de tiempo en años en que una empresa por sector económico se relocaliza o va a la bancarrota

$$\Delta N_j^{s,mv}(t) = N_j^s(t - 1) \cdot p_{mv}^s \quad (4.29)$$

Donde,

$\Delta N_j^{s,mv}$ = Número de puestos de empleo en el sector s saliendo de la zona j en el tiempo t

$N_j^s(t)$ = Puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo $t-1$

$$F_j^{s,u}(t) = \Delta N_j^{s,mv}(t) \cdot F_j^s + F_j^{s,u}(t - 1) \quad (4.30)$$

Donde,

$F_j^{s,u}(t)$ = Espacio disponible para puestos de trabajo en el sector s en la zona j en el tiempo t

F_j^s = Espacio disponible por puesto de trabajo en el sector s en la zona j

¹ Minería, manufacturas, energía, agua y construcción.

² Comercio en general, transporte, comunicaciones, servicios financieros, sector real, administración pública, educación, salud.

Submodelo de Desarrollo y de Demanda de Espacio

El submodelo de movimiento de puestos de trabajo hacia una zona es similar al residencial. El número potencial de nuevas empresas y de nuevos puestos de trabajo son variables exógenas que se definen para cada año. Las tasas de crecimiento se limitan si no existiese espacio para desarrollar las nuevas actividades. La distribución espacial de los nuevos puestos de trabajo depende de la disponibilidad de suelo, de su precio y de la accesibilidad en coche (ecuación (4.31)).

$$\begin{aligned} \Delta N_j^{s,in}(t) &= P^s(t) \cdot \frac{\frac{A_j^{s,in}(t)}{f(Z_j^{s,in}(t))}}{\sum_j \frac{A_j^{s,in}(t)}{f(Z_j^{s,in}(t))}}} = \\ &= P^s(t) \cdot \frac{\exp[a^s + b^s \cdot AvLd_j(t) + c^s \cdot {}^{wp}Acc_j^c(t) + d^s \cdot LP_j(t)] - 1}{\sum_j \exp[a^s + b^s \cdot AvLd_j(t) + c^s \cdot {}^{wp}Acc_j^c(t) + d^s \cdot LP_j(t)] - 1} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Donde,

- $\Delta N_j^{s,in}(t)$ = Número de puestos de empleo en el sector s moviéndose a la zona j en el tiempo t
- $A_j^{s,in}(t)$ = Atractividad de un el sector s moviéndose a la zona j en el tiempo t
- $f(Z_j^{s,in}(t))$ = Factor de fricción del sector s moviéndose a la zona j en el tiempo t causada por la impedancia Z
- $AvLd_j(t)$ = Suelo disponible en la zona j en el tiempo t
- ${}^{wp}Acc_j^c(t)$ = Accesibilidad en coche a los puestos de empleo en la zona j en el tiempo t
- $LP_j(t)$ = Precio del suelo en la zona j en el tiempo t
- a^s, b^s, c^s, d^s = Constantes

El número potencial de puestos de empleo a ubicar se calcula según la ecuación (4.32).

$$P^s(t+1) = N^s(t) \cdot (p^s(t) - p_{mv}^s) \quad (4.32)$$

Donde,

- $P^s(t+1)$ = Puestos de empleo potenciales a localizar en el sector s en el tiempo $t+1$
- $P^s(t)$ = Porcentaje del cambio externo de los puestos de empleo en el sector s en el tiempo t

El cambio en los puestos de empleo por zona, viene dado por la ecuación (4.33).

$$\Delta N_j^s(t) = \Delta N_j^{s,in}(t) - \Delta N_j^{s,mv}(t) \quad (4.33)$$

Donde,

- $\Delta N_j^s(t)$ = Cambio en los puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo t

El espacio en el cual se desarrollarán las nuevas actividades es calculada para cada zona por medio de la ecuación (4.34).

$$F_j^{s,dv}(t) = \Delta N_j^{s,mv}(t) \cdot F_j^s - F_j^{s,u}(t) \quad (4.34)$$

Donde,

- $F_j^{s,dv}(t)$ = Espacio a desarrollar para puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo t

La limitación al desarrollo de puestos de empleo por disponibilidad de espacio viene dada por la Ecuación (4.35).

Si $F_j^{s,av}(t) < \Delta N_j^s(t) \cdot F_j^s$, entonces

$$\Delta N_j^{s,in}(t) = \frac{F_j^{s,dv}(t)}{F_j^s} \quad y \quad F_j^{s,dv}_k = 0 \quad y \quad \left[\frac{A_j^{s,in}(t)}{f(Z_j^{s,in}(t))} \right]_k = 0 \quad (4.35)$$

$$F_j^{s,av}(t)_k = F_j^{s,av}(t)_{k-1} - \Delta N_j^{s,in}(t) \cdot F_j^s$$

Donde,

k = Número de la iteración

$F_j^{s,av}(t)$ = Espacio disponible para ser desarrollado para puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo t

$F_j^s(t)$ = Espacio disponible para puestos de empleo en el sector s en la zona j

De esta manera, la redistribución de la sobredemanda para el espacio de puestos de empleo se hace según el siguiente procedimiento:

Calcular hasta

$$P^s(t) - \sum_j \Delta N_j^{s,in}(t)_k < 100 \quad \text{ó} \quad \sum_j \Delta N_j^{s,dv}(t)_k = 0$$

$$P^{s,re}(t)_{k+1} = P^s(t) - \sum_j \Delta N_j^{s,in}(t)_k \quad y$$

Calcular ecuaciones (4.31) y (4.35)

$$\Delta N_j^{s,in}(t) = \Delta N_j^{s,in}(t)_k + \Delta N_j^{s,in}(t)_{k-1}$$

Hacer de nuevo (loop)

Donde $P^{s,re}(t)_k$ es el número de puestos de empleo a redistribuir en el sector s en el tiempo t .

4.3.4 La Evolución de MARS en el Tiempo

En la Figura 4.14 se muestra la conexión entre los diferentes subsistemas que componen el modelo MARS y sus iteraciones. La simulación del modelo empieza con el cálculo de las variables del modelo de transporte. Los indicadores de accesibilidad (resultado del cálculo anterior) serán el *input* para el modelo de localización residencial. Después de este paso, MARS calcula la disponibilidad de suelo, la cual a su vez, será el *input* para el modelo de localización de puestos de trabajo. Luego, el modelo de transporte utiliza los cálculos de velocidad por cada par OD para pasarlos a la siguiente iteración. Ahora, los resultados de la distribución espacial de hogares obtenidos en el modelo de localización residencial, se utilizan en la siguiente iteración.

La información de las nuevas viviendas es un dato de entrada para el modelo de localización residencial, con un retraso en el tiempo de $t+n$ periodos, tal como se puede ver en la Figura 4.14. Finalmente, el modelo de localización de puestos de trabajo pasa sus resultados

(distribución espacial de los empleos y la disponibilidad de suelo) al modelo de transporte en la siguiente iteración. El ciclo continúa.

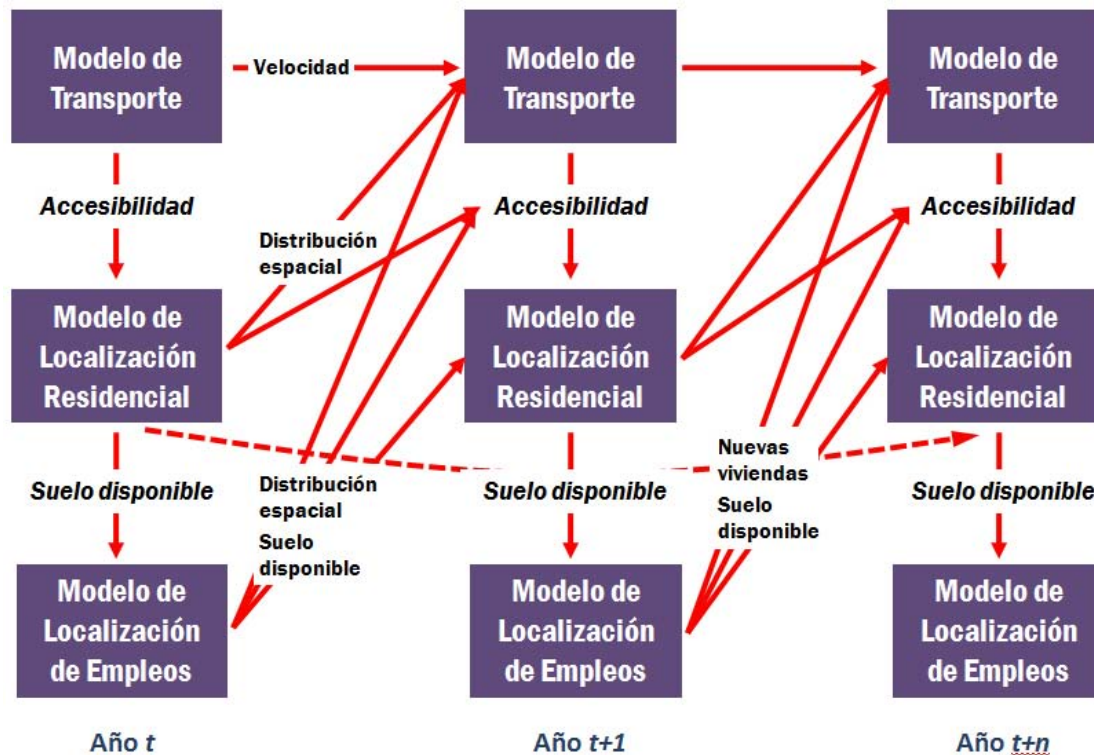


Figura 4.14 Iteraciones del Modelo a lo Largo del Tiempo

4.3.5 El Modelo en el Entorno Vensim®

Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. Vensim permite crear modelos de simulación, sea con diagramas causales o con diagramas de flujos.

Las relaciones entre los elementos del sistema representan las relaciones causales, que se muestran mediante la conexión de palabras con flechas. Esta información se usa después por el Editor de Ecuaciones para crear el modelo de simulación. Se puede analizar el modelo en el proceso de construcción teniendo en cuenta las causas y el uso de las variables, y también estudiando los ciclos relacionados con una variable.

Este apartado tiene como fin la introducción al modelo MARS funcionando sobre el software Vensim, mostrando las características fundamentales del modelo, donde se puede construir, examinar y modificar las ecuaciones del modelo, según la necesidad que se tenga. MARS puede modificarse, mejorarse y adaptarse si es necesario, para mostrar un nivel distinto de detalle y complejidad.

Vensim muestra las salidas de la simulación en un solo paso, permitiendo ver los resultados de la simulación al instante, para todas las variables del modelo. Durante la simulación, el comportamiento dinámico de todas las variables del modelo se va guardando en una base de datos con el nombre que se le haya dado a la simulación. También se puede seleccionar

cualquier variable y analizarla con las herramientas de análisis. En las páginas siguientes se muestran algunos de los desarrollos realizados en Vensim del modelo MARS.

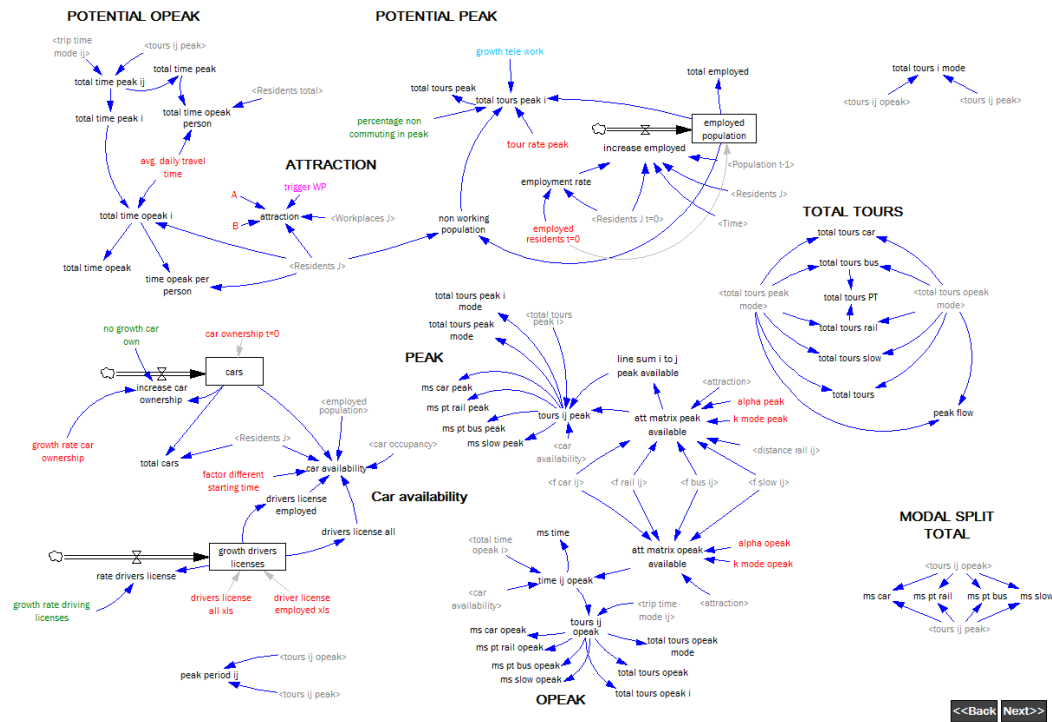


Figura 4.15 Estructura del Modelo de Transportes

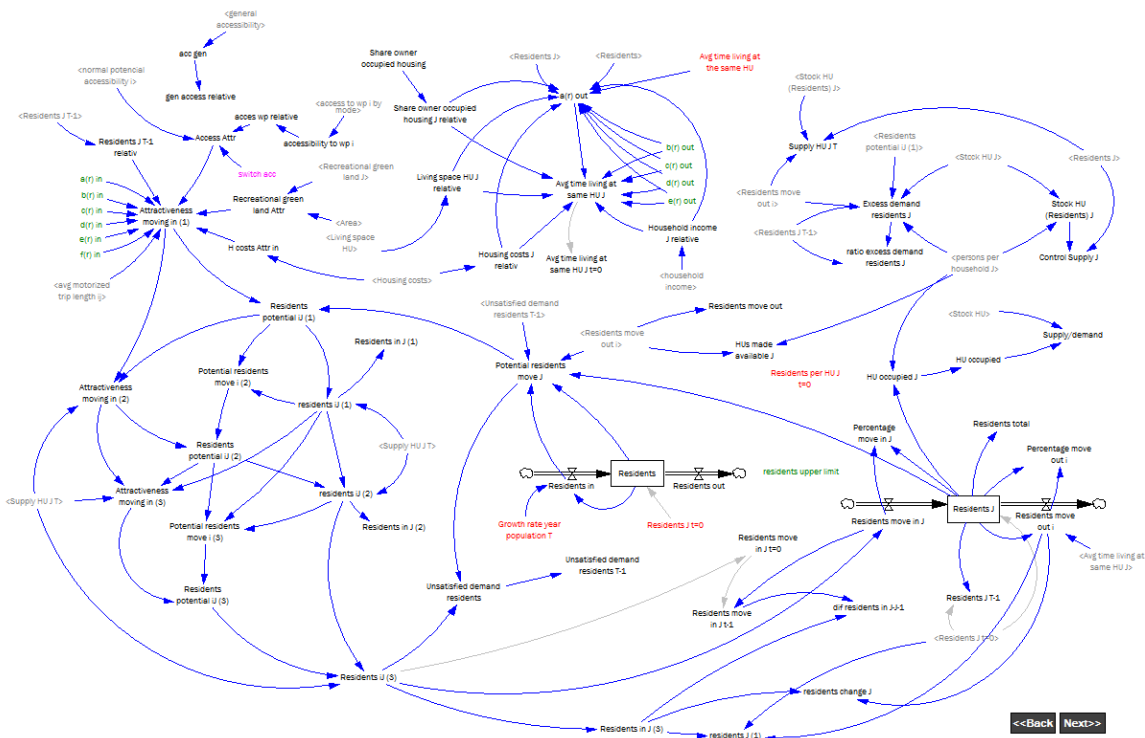


Figura 4.16 Estructura del Modelo de Localización Residencial

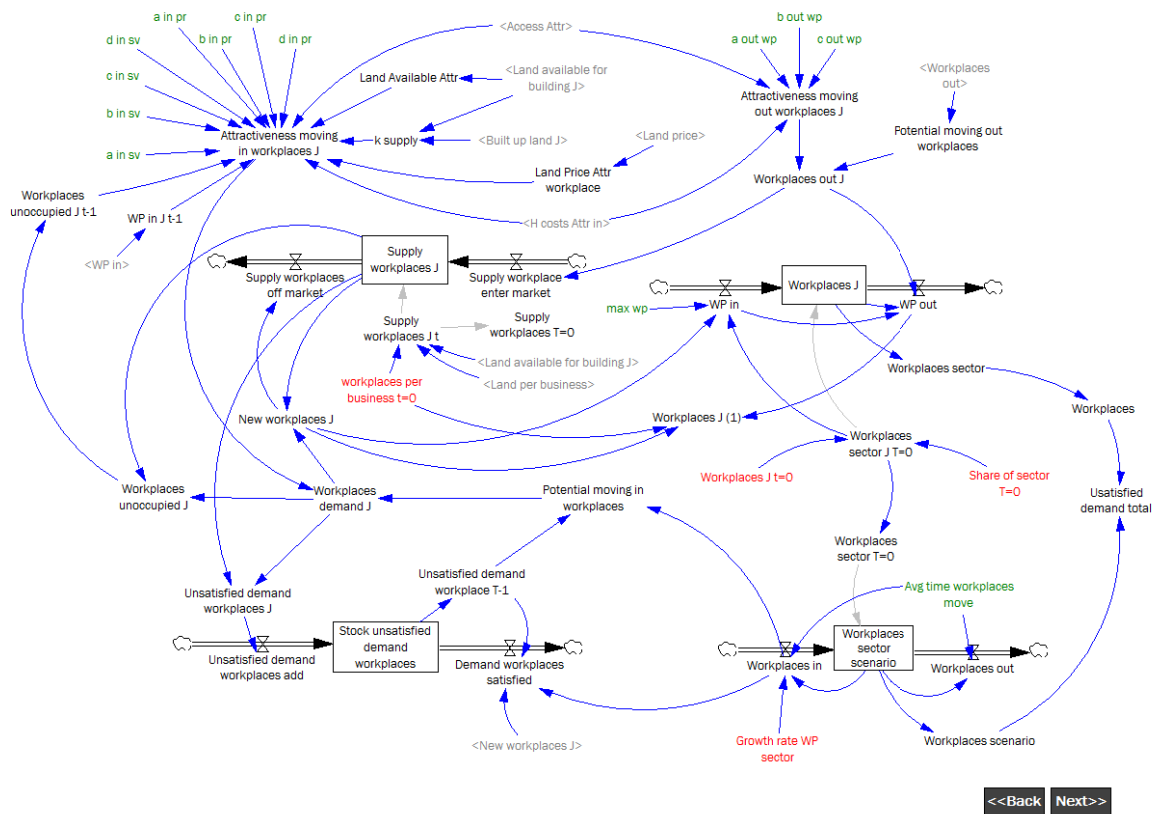


Figura 4.17 Estructura del Modelo de Localización de Puestos de Empleo

4.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso de calibración consiste en ajustar los valores que MARS utiliza como variables externas. En primer lugar, MARS considera el viaje casa-trabajo como un desplazamiento y lo calcula en función del número de puestos de trabajo de cada zona. De esta manera, el primer dato a calibrar es la tasa de viajes por persona con motivo trabajo.

Otros aspectos de la calibración consisten en los parámetros de fricción de los cuatro modos de transporte considerados dentro del modelo, sus costes de tiempo y de operación (en el caso de modos motorizados), disponibilidad de coche, así como los factores de hora punta por modo, tal como se vio en el numeral 4.3.2

4.4.1 Generación de Viajes

Según la ecuación (4.2), la tasa de generación de viajes que utiliza MARS depende del número de residentes empleados de la zona i . De esta manera al disponer de los datos de viajes realizados con motivo trabajo y de las personas empleadas por zona (CRTM, 2004); por el método de los mínimos cuadrados, se minimiza la suma de la diferencia de los errores al cuadrado y se obtiene un valor para r . Esta constante estima los viajes/día por persona que tendrá en cuenta MARS para generar los viajes. El resultado en este caso fue $r=1.02$.

En la Figura 4.18 se muestra la dispersión de los datos y su línea de tendencia.

Al comparar para cada zona los viajes reales observados por la encuesta de movilidad del 2004 con los viajes generados por el modelo (rE_i), se observa que se obtiene un resultado bastante aceptable, donde el gradiente de 0.97 es una cifra satisfactoria y el coeficiente de correlación R^2 , también es bastante bueno (84%).

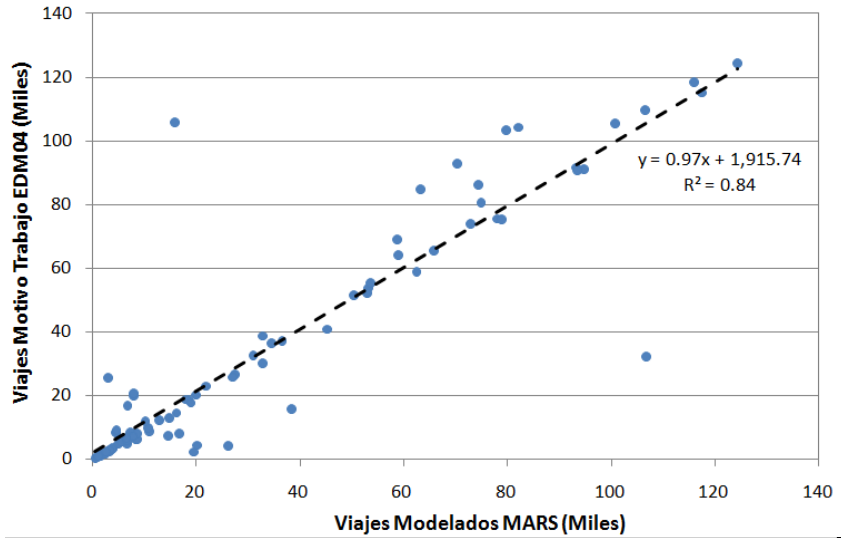


Figura 4.18 Calibración de la Tasa de Viajes r

Esta tasa de generación de viajes r , es utilizada por MARS para generar los viajes realizados por motivo casa-trabajo-casa en cada una de sus iteraciones. Para los otros viajes, se utiliza el tiempo restante que le quedaría a cada usuario después de que éste haya realizado sus recorridos de movilidad obligada.

4.4.2 Atractividad

Para los viajes con motivo casa-trabajo-casa, la atractividad consiste en el número de puestos de empleo que tenga cada zona. El modelo con el que se estima la atractividad es una expresión lineal (ecuación (4.36)) y para obtener los parámetros α y β , se realizó una regresión lineal tal como se muestra en la Figura 4.19.

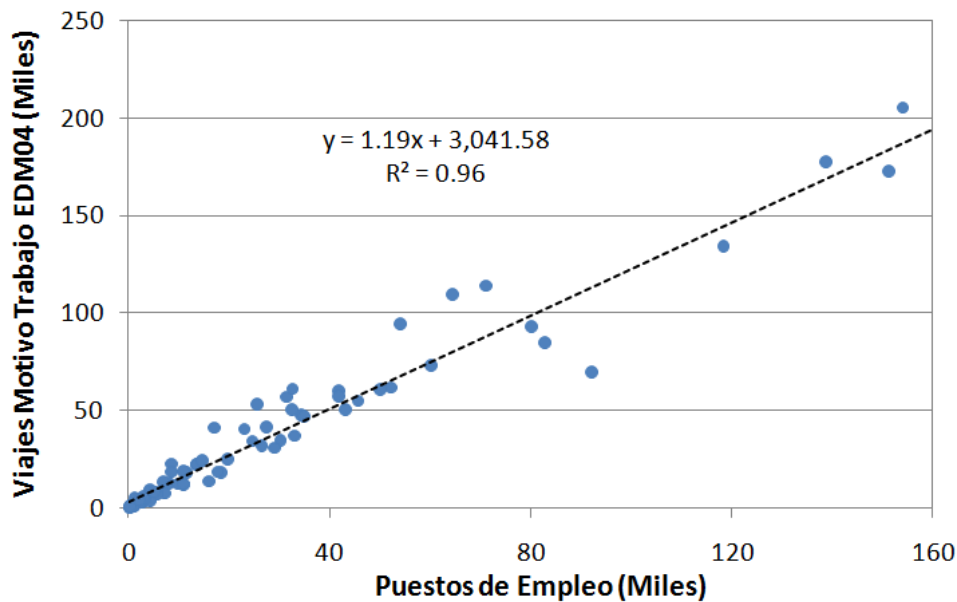


Figura 4.19 Calibración Atractividad

$$A_j = \alpha \cdot PE_j + \beta \tag{4.36}$$

Donde,

- A_j = Atractividad de la zona j
- PE_j = Cantidad de puestos de empleo en la zona j
- α, β = Constantes

4.4.3 Distribución de Viajes

La distribución de viajes en el modelo la hace según la ecuación (4.6) vista anteriormente. Esta ecuación reparte los viajes por zonas y por modos simultáneamente. Sin embargo, esta distribución debe calibrarse para que los patrones de viaje del modelo sean lo más parecidos a los observados en la encuesta de movilidad (CRTM, 2004). De esta manera, se introdujeron los factores k y α , con el fin de afinar la distribución modal y la distancia media recorrida, respectivamente, por cada modo de transporte. Los factores a calibrar se muestran en la ecuación (4.37).

$$T_{ij}^m = P_i \left[\frac{\frac{m^k \cdot A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)^{m\alpha}}}{\sum_{mj} \frac{m^k \cdot A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)^{m\alpha}}} \right] \tag{4.37}$$

Donde m^k y $m\alpha$, son los factores de distribución modal y zonal, por modo, respectivamente.

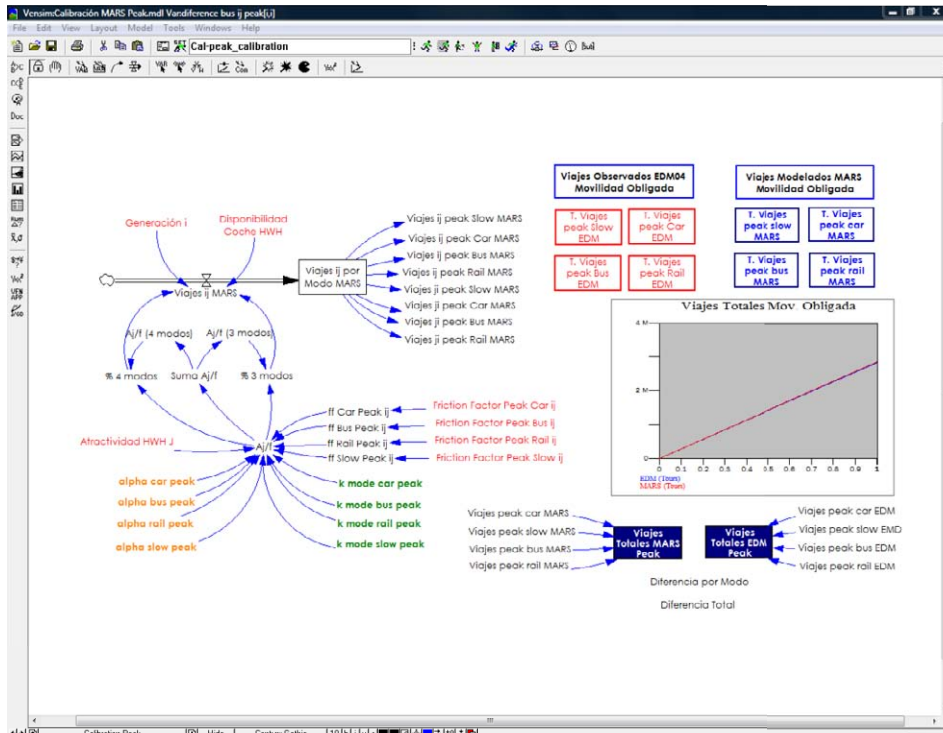


Figura 4.20 Modelo de Calibración MARS en Vensim (periodo *peak*)

Calibrar esta ecuación es una tarea ardua debido a la gran variación que se presenta en la sumatoria del denominador al hacer cualquier cambio, por pequeño que sea. Esto hace que la fórmula sea bastante sensible a cualquier cambio, especialmente a los valores de α . Por esta razón, se construyeron dos pequeños modelos adicionales en Vensim® con el fin de calibrar los parámetros α y k en los periodos *peak* y *off peak*, respectivamente. En la Figura 4.20 y Figura 4.21 se pueden ver esos modelos.

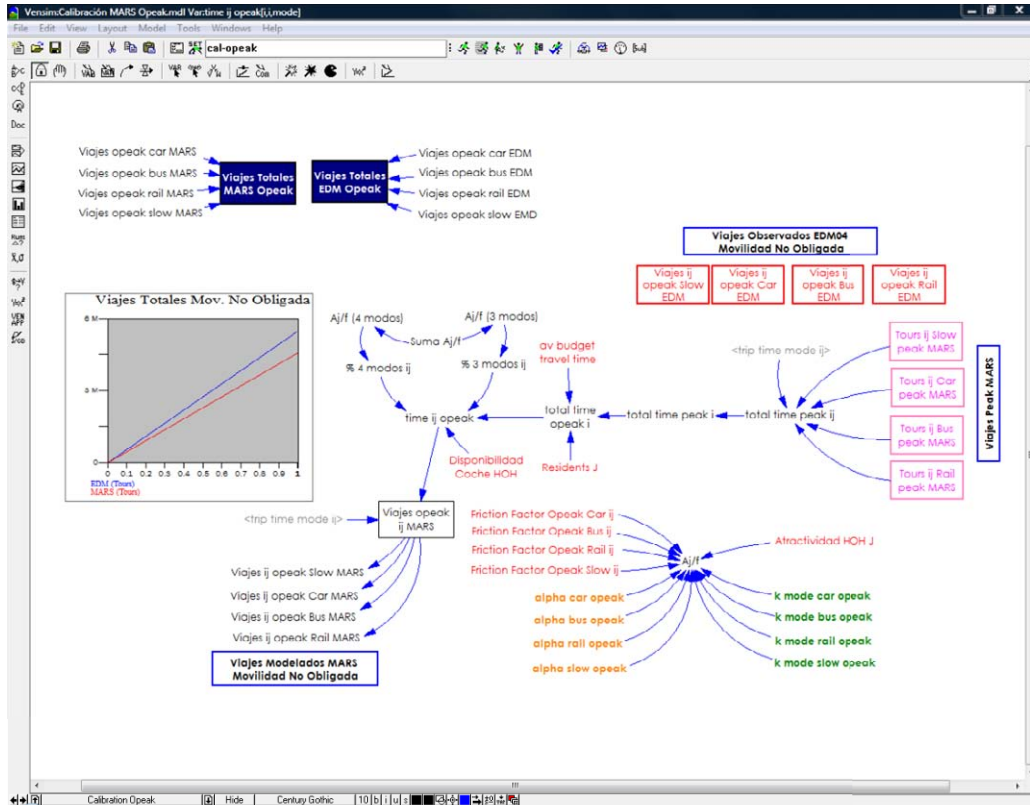


Figura 4.21 Modelo de Calibración MARS en Vensim (periodo off peak)

La calibración del modelo de transporte se realizó comparando los resultados del modelo en cada modo de transporte con los datos disponibles en la encuesta de movilidad EDM'04, tratando de minimizar las diferencias entre viajes modelados y observados para cada par OD, variando los parámetros α y k . Después de utilizar los modelos construidos para la calibración, en la Tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos para los factores α y k .

Tabla 4.7 Factores de Calibración Viajes Casa-Trabajo

Modo	α	k
Slow Mode	1.030	0.99
Bus	1.124	0.99
Rail	1.093	0.96
Coche	1.071	0.99

En la Figura 4.22 se muestran los resultados de la calibración para el total de viajes. El número de viajes motivo trabajo es calculado por el modelo (para el año base) utilizando la tasa de generación r y los puestos de empleo. Luego se comparan con los viajes observados

(motivo trabajo) según la encuesta domiciliaria EDM'04. En general se muestran unos resultados bastante satisfactorios, con un gradiente cercano a 0.70 y un coeficiente de correlación R^2 de 78%.

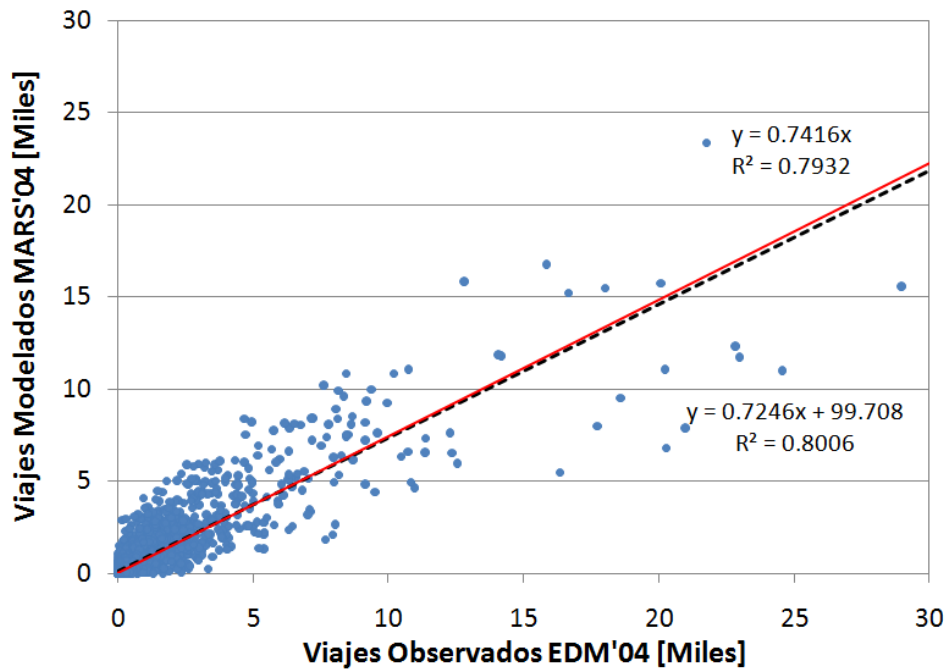


Figura 4.22 Comparación Viajes EDM'04 contra Viajes MARS – Viajes Totales

En la Figura 4.23 se muestra el resultado de la calibración de la dispersión de los viajes totales, entre los viajes observados y los modelados por MARS. En general, el modelo reproduce con bastante similitud el comportamiento de los usuarios que viajan por motivo trabajo, así como la duración de los mismos.

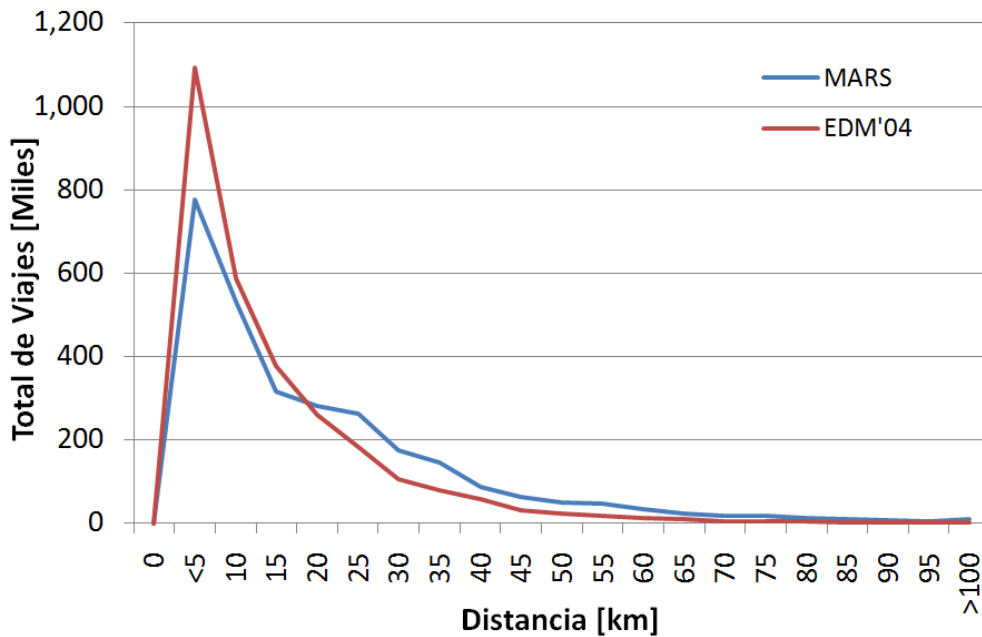


Figura 4.23 Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Viajes Totales

En la Tabla 4.8, se muestran los resultados finales de la estimación de viajes por el modelo con los valores de calibración (α y k) de la Tabla 4.7.

Tabla 4.8 Comparación de Viajes *Commuting*

Modo	EDM'04	MARS	Diferencia [%]
Slow Mode	352,458	352,143	0.09
Bus	446,827	447,448	0.14
Rail	749,965	750,851	0.12
Coche	1,307,144	1,308,665	0.12

Se observa que las diferencias totales son bastante aceptables, sin embargo, al hacer la comparación de los viajes por cada modo, se empiezan a apreciar diferencias mayores. Esto ocurre, principalmente por el gran impacto que tiene el factor α en la distribución de los viajes y en el comportamiento de los viajes en las zonas internas, ya que por defecto se trabajó con el supuesto de que todos los viajes internos tienen una longitud media de 500 m.

A continuación se presentarán los resultados de la comparación de los viajes estimados en el modelo MARS con los obtenidos en la encuesta de movilidad EDM'04, por cada modo de transporte utilizado en el modelo.

En la Figura 4.24 se muestra de la dispersión de los viajes *s/ow*. Los resultados son aceptables.

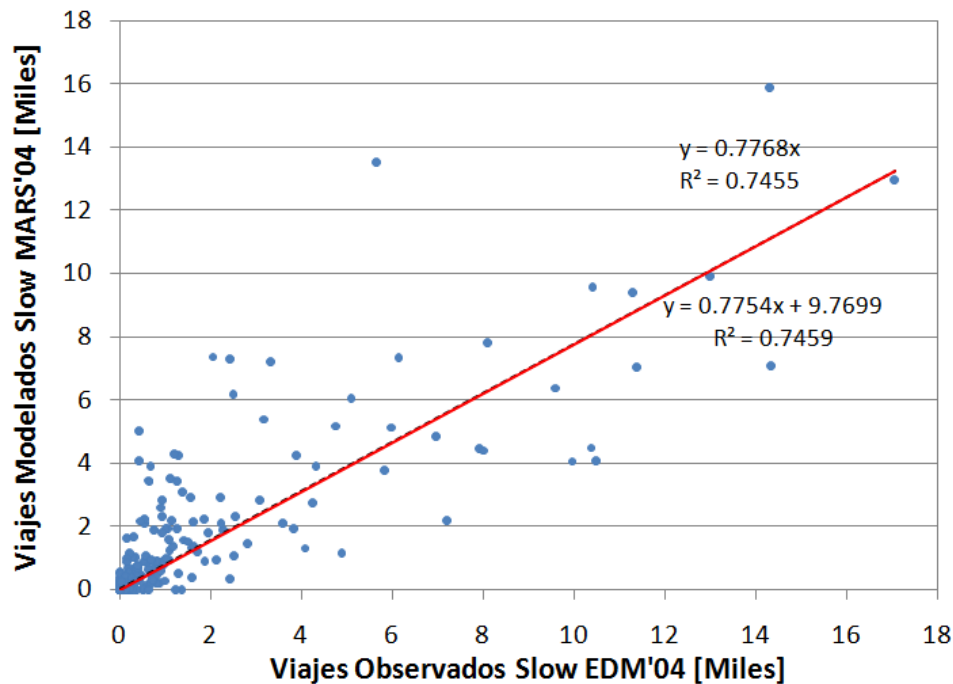


Figura 4.24 Comparación Viajes EDM'04 contra Viajes MARS – *Slow Mode*

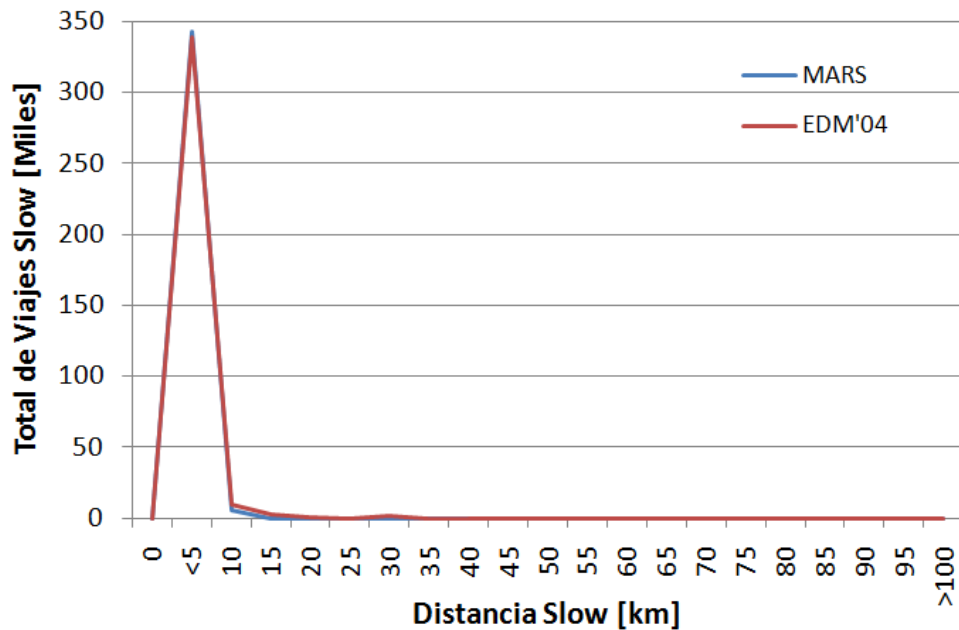


Figura 4.25 Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – *Slow Mode*

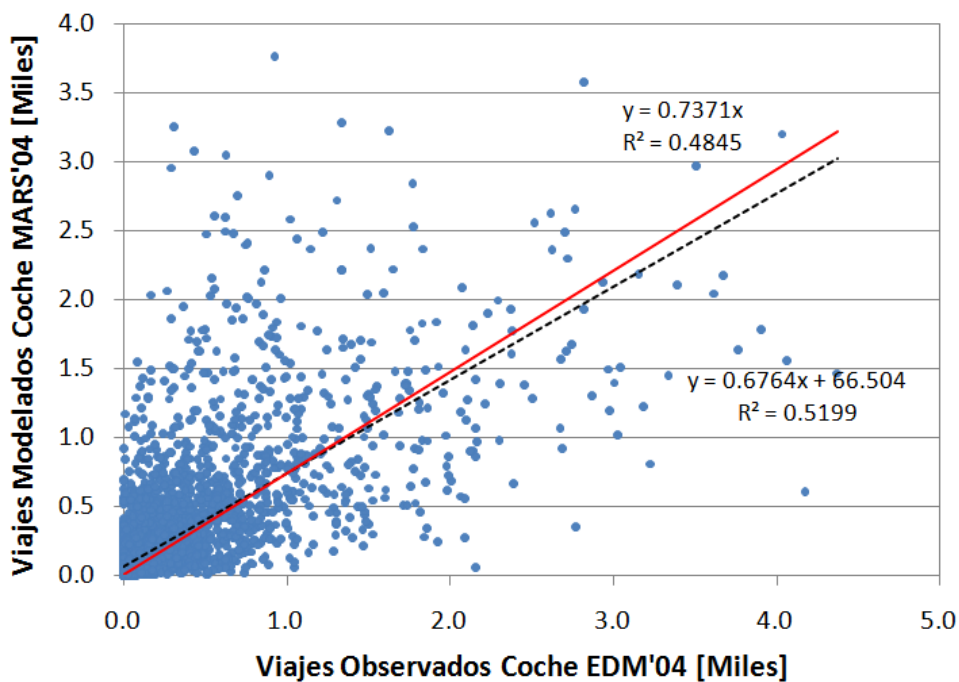


Figura 4.26 Comparación Viajes EDM'04 contra Viajes MARS – Coche

En la Figura 4.27, se observa que el modelo subestima los viajes realizados en coche cuyo recorrido es menor de 20 km aproximadamente y sobreestima los viajes que hacen mayores distancias. Esto puede ser consecuencia del cálculo de la función de impedancia, donde se le estaría dando más peso a otros factores como los costes de operación, por ejemplo. Sin

embargo, hay que realizar una investigación más detallada para averiguar las causas de este comportamiento.

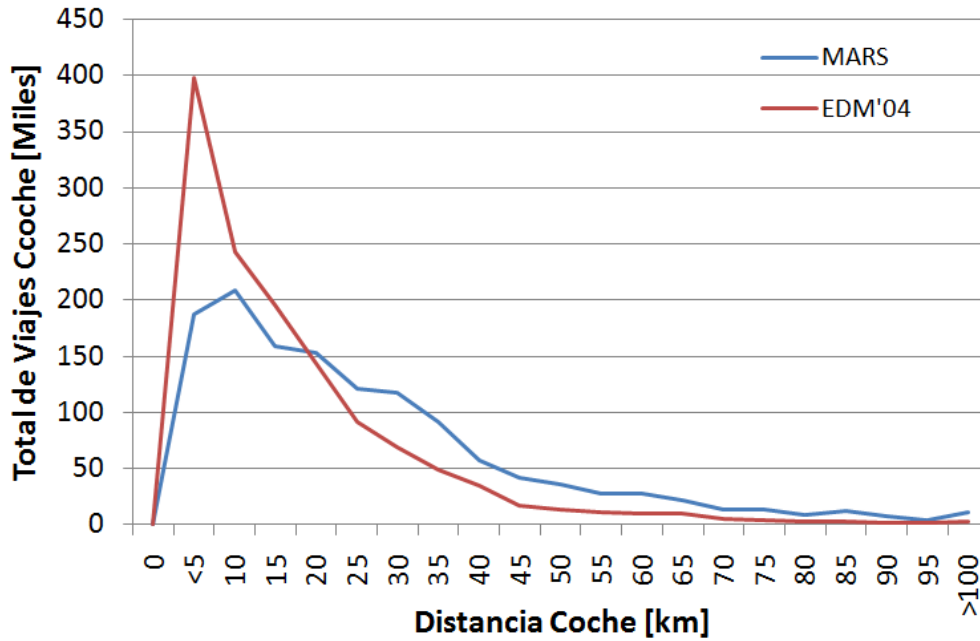


Figura 4.27 Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Coche

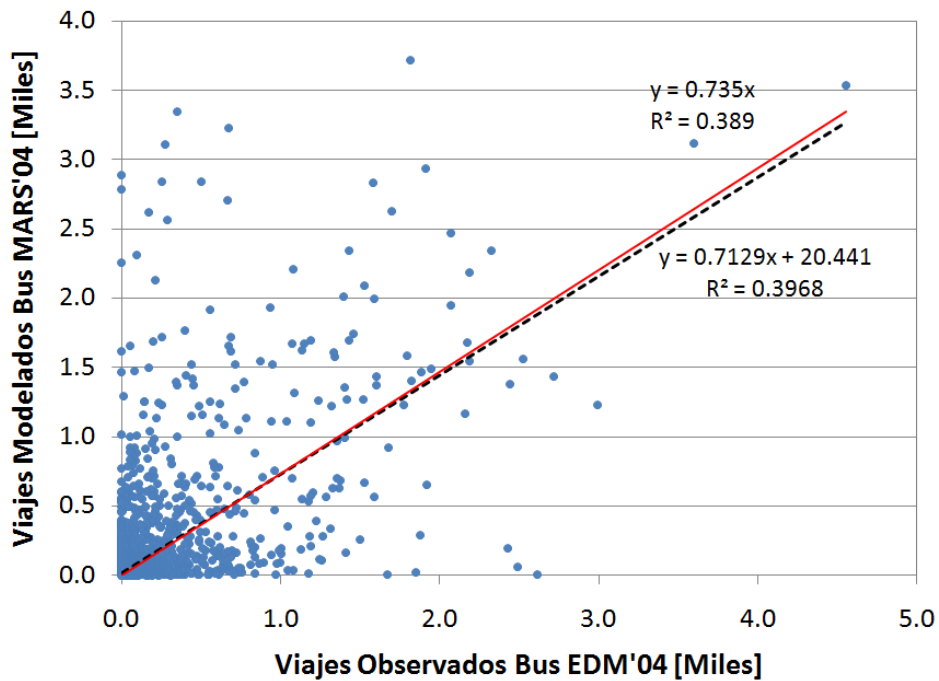


Figura 4.28 Comparación Viajes EDM'04 contra Viajes MARS – Bus

En este caso (Figura 4.29), al igual que en el coche, en el modo bus ocurre el mismo fenómeno: se están subestimando los viajes de menos de 10 km de recorrido, frente a los datos observados.

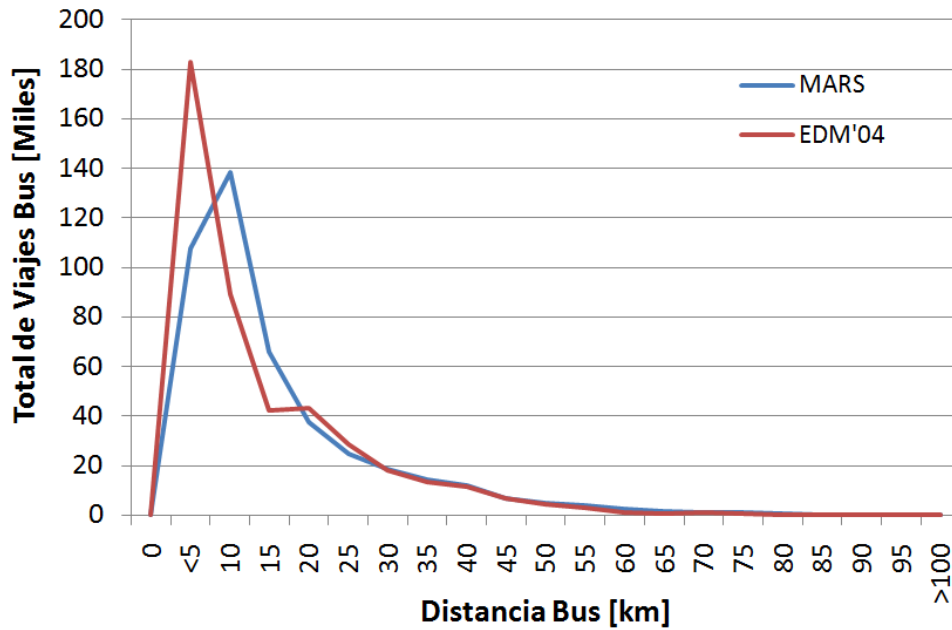


Figura 4.29 Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Bus

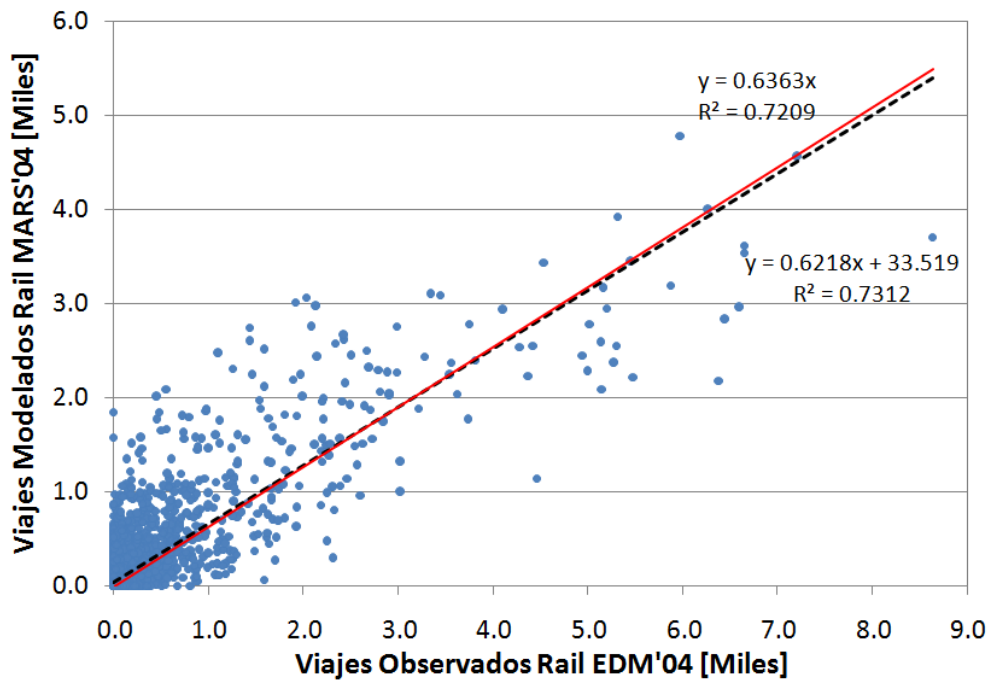


Figura 4.30 Comparación Viajes EDM'04 contra Viajes MARS – Rail

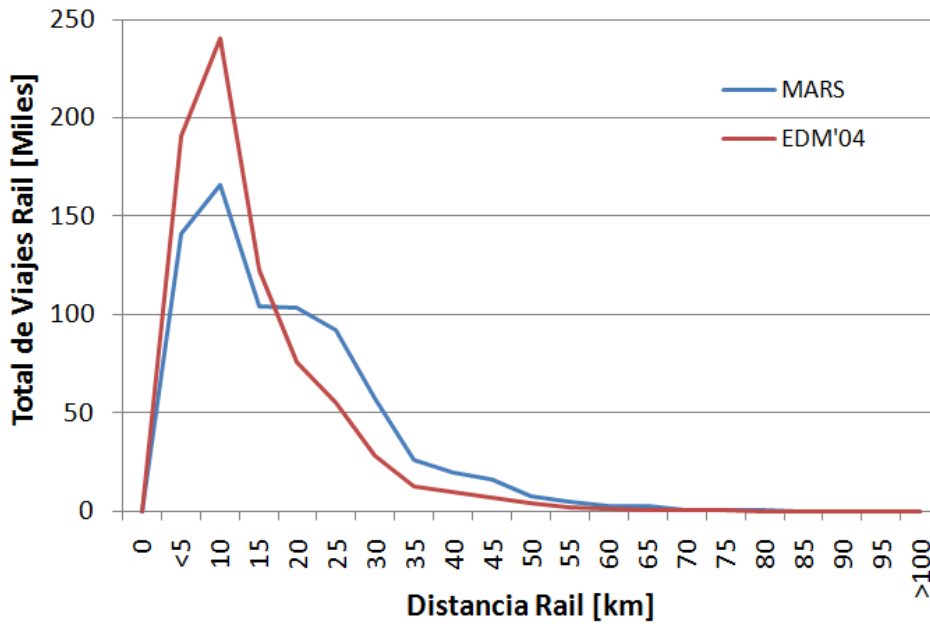


Figura 4.31 Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Rail

En general se muestran resultados aceptables, aunque en algunos modos el modelo es más acertado que en otros; como se mencionó por la alta sensibilidad de la fórmula de distribución.

Una vez realizada la calibración de los viajes de movilidad obligada y estimados sus factores k y α , el paso siguiente es realizar la calibración del resto de viajes, es decir, los que el modelo MARS considera *off peak*. La calibración se hace de la misma manera, es decir, se obtienen otros parámetros k y α para este tipo de viajes. En la Tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.9 Factores de Calibración Viajes Casa-Otros

Modo	α	k
Slow Mode	2.005	0.90
Bus	1.480	0.95
Rail	1.568	0.90
Coche	1.005	0.96

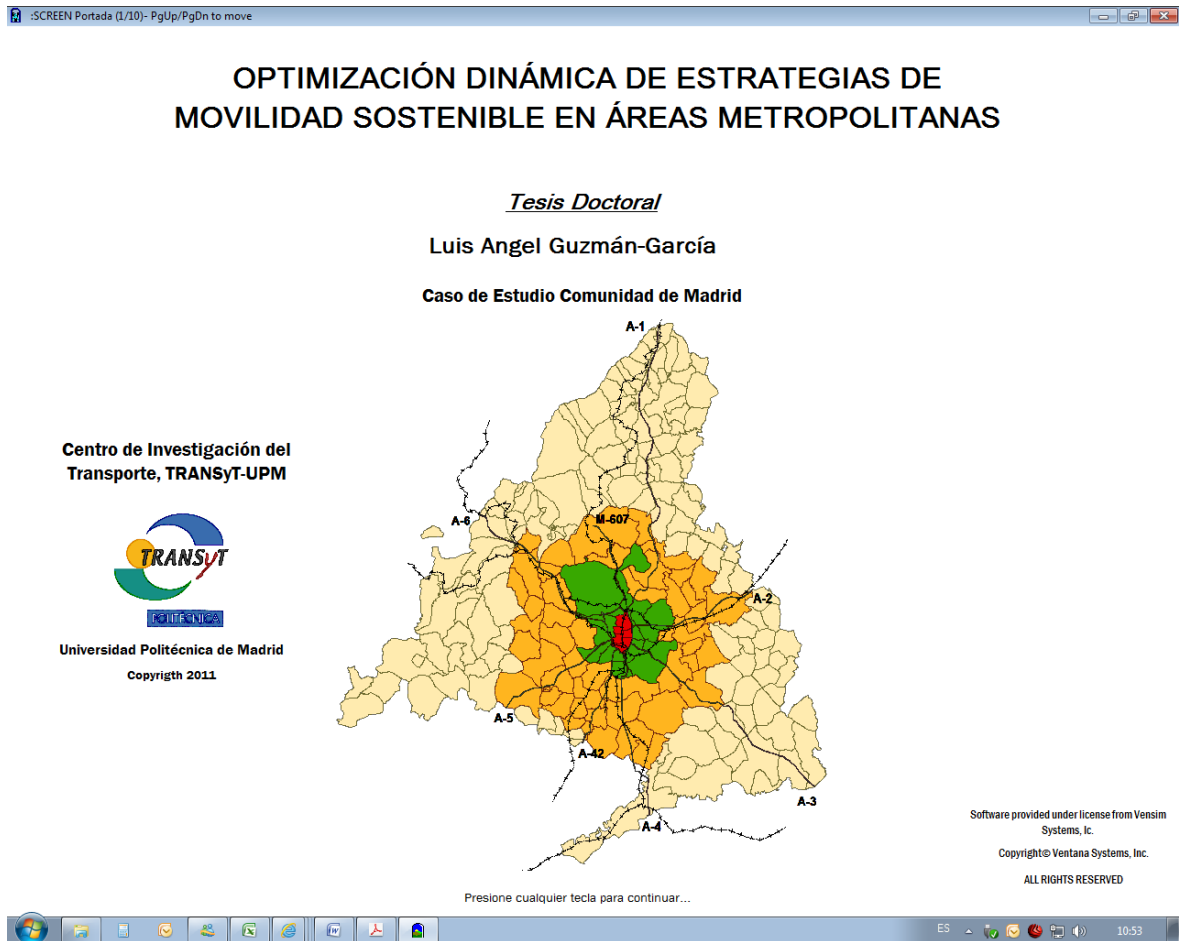
Los resultados para este tipo de viajes, son menos precisos que los del punto anterior, debido a la configuración propia del modelo. Para este tipo de viajes, MARS los calcula teniendo en cuenta el tiempo restante (del presupuesto medio de tiempo de viaje) que le queda a cada persona después de haber realizado sus viajes de *commuting*.

4.5 SIMULACIÓN DEL MODELO

Adicionalmente a la descripción y calibración del modelo, en el CD anexo viene un fichero llamado “venred32.exe”. También puede encontrarse gratis en internet en la dirección: <http://www.vensim.com/freedownload.html>. Este fichero instala en el ordenador el

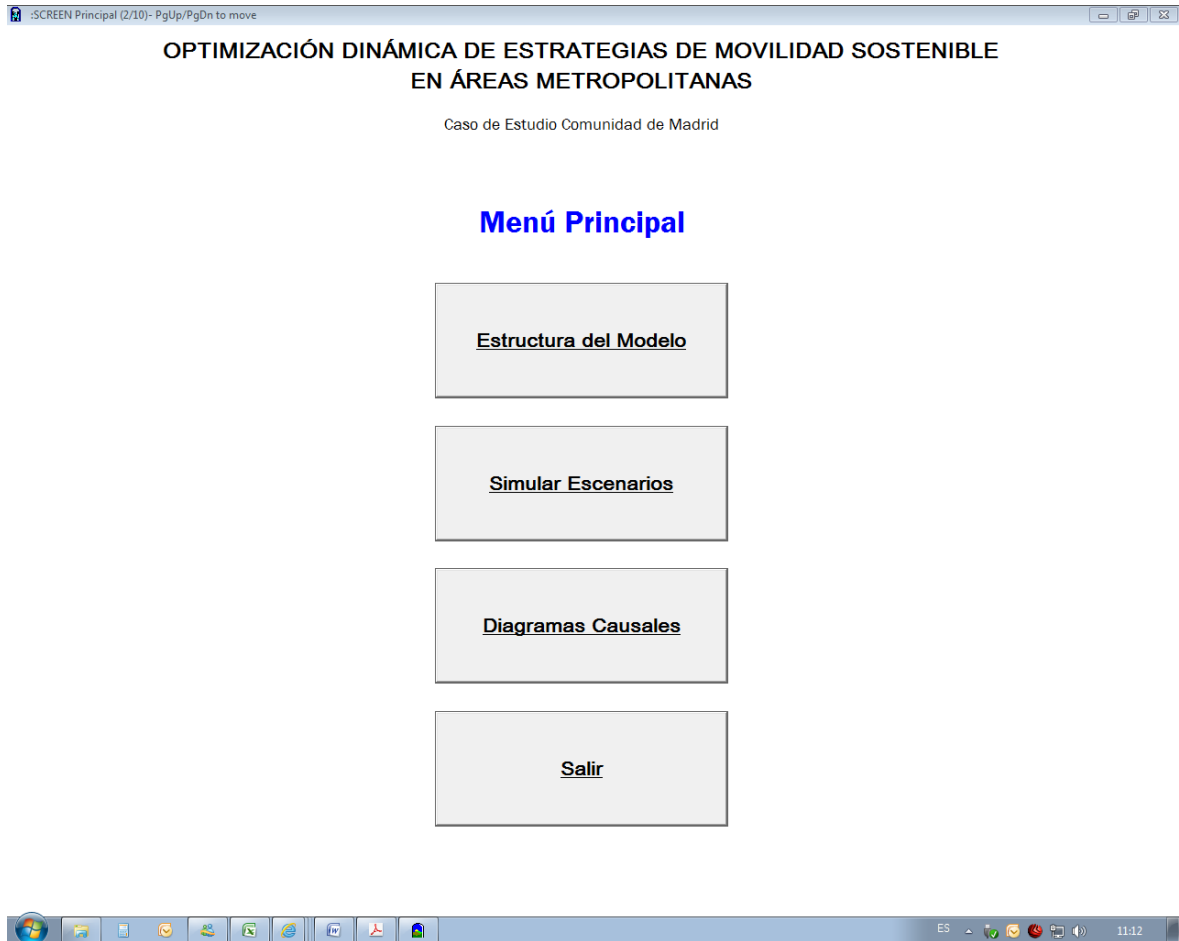
software *Vensim Reader* lo que permitirá al usuario poder hacer diferentes simulaciones con la metodología desarrollada en esta Tesis Doctoral.

A continuación se explicará brevemente la forma en que se puede utilizar esta herramienta, teniendo como variables de la modelización las mismas utilizadas en el caso de estudio. Una vez instalado el *Vensim Reader*, se debe ejecutar el archivo llamado “Optdynam.vpa”, que permite abrir la aplicación. Una vez hecho esto aparecerá la siguiente pantalla de introducción:



Después aparecerá el menú principal, el cual está compuesto por los siguientes elementos:

1. Estructura del modelo
2. Simulación del modelo
3. Diagramas causales
4. Salida



Entonces, al seleccionar la primera opción (estructura del modelo), se está en disponibilidad de ver cualquier submodelo perteneciente a las siguientes categorías:

1. Modelo de transporte
2. Modelo de usos del suelo
3. Indicadores varios
4. Modelos de evaluación CBA
5. Modelos de evaluación MCA

Los pasos a seguir se muestran en la figura siguiente, la cual es un ejemplo de la forma en que se pueden estudiar las relaciones y componentes del modelo de transporte.

Optimización Dinámica de Estrategias de Movilidad Sostenible en Áreas Metropolitanas

En la segunda opción del menú principal se permite simular el modelo con las mismas medidas utilizadas en el caso de estudio del Capítulo 7, aunque con la configuración que el

usuario desee, es decir, variando los valores de las medidas y cambiando los periodos de inicio y final de las mismas, tal como se puede ver a continuación:



En este caso se debe poner un nombre al escenario a simular (distinto de 'base'), y a continuación se escogen los valores para cada tipo de medida:

1. Año inicial y final en que se desea que empiece y termine la aplicación de dicha medida (los periodos de tiempo se miden de 0 a 30, siendo el año 2004=0 y 2034 el año 30).
2. Valor inicial con que se implementa la medida (en el año de inicio).
3. Valor final de la medida (en el año final).

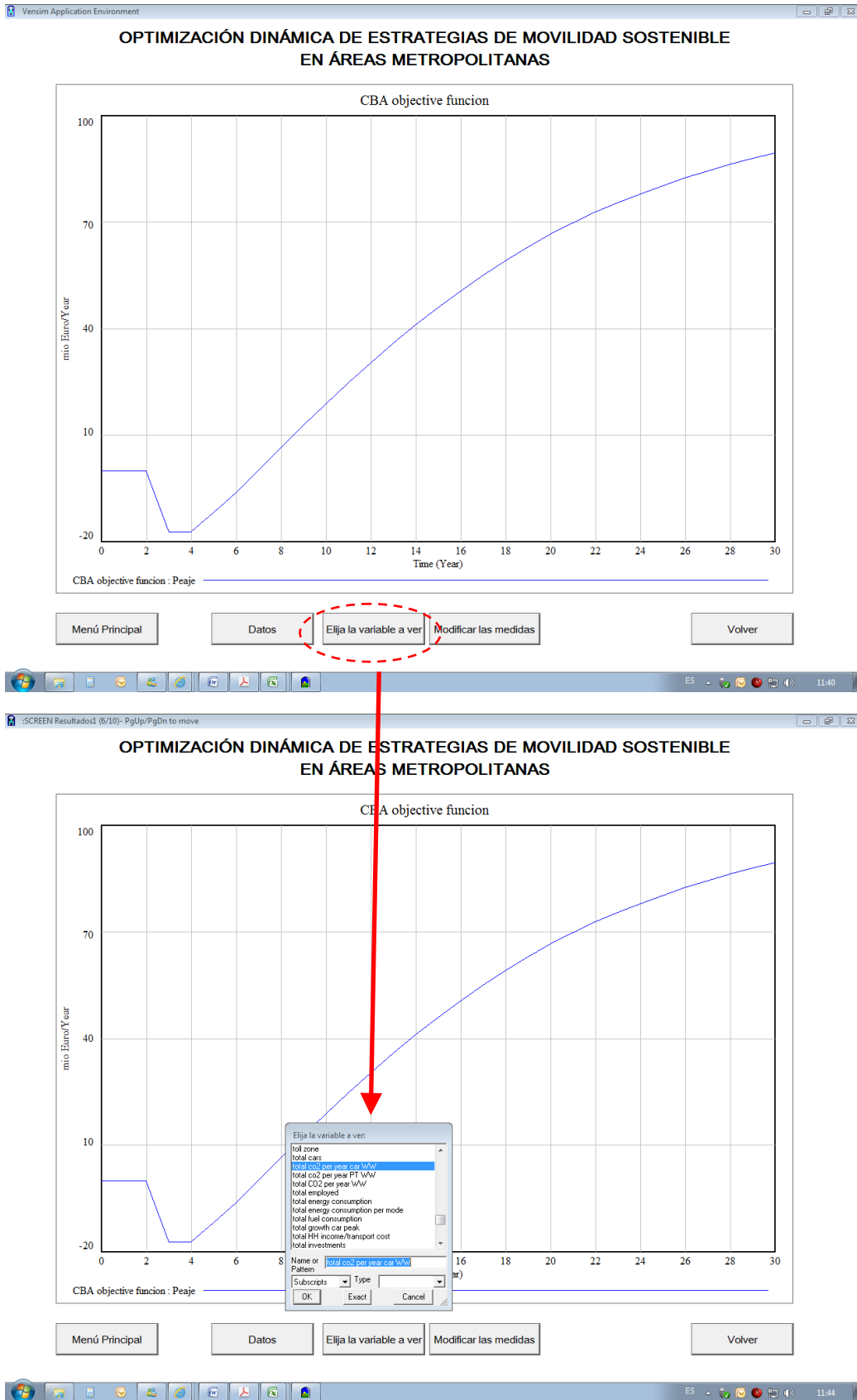
Pinchar en “**Simular**”, para empezar el proceso de simulación.

En este punto se deben tener en cuenta dos consideraciones importantes:

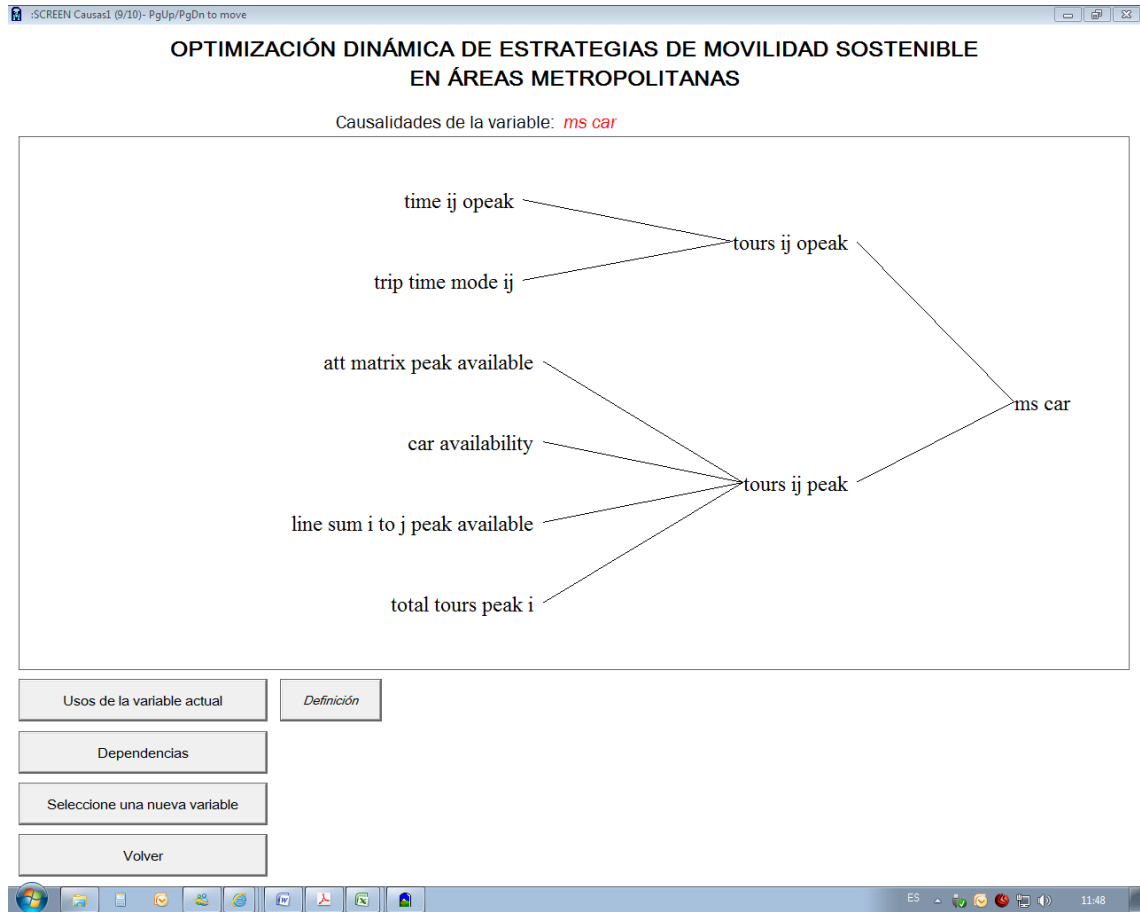
- En el caso de las medidas tarifarias (peaje y parking), el valor inicial debe ponerse en euros y el valor final como un porcentaje de variación de dicho valor inicial. Nótese que es posible usar una tarifa que cambie con el tiempo.
- En el caso de la oferta de transporte público, tanto el valor inicial como final, son los cambios en porcentaje con respecto al escenario base.

Una vez termina el proceso de simulación, aparece por defecto el valor de la función objetivo CBA, tal como se puede ver a continuación a manera de ejemplo. Usando los botones de la

parte inferior, se puede seleccionar la variable que se desee analizar, ya sea en forma de tabla (botón datos) o gráfica.



Finalmente, la tercera opción disponible del menú principal permite analizar las causalidades, usos y dependencias de la variable seleccionada, tal como se puede ver a continuación.



En este caso, se muestran las causalidades de la distribución modal del coche (*ms car*). El botón “definición” permite ver la composición de la ecuación de la variable seleccionada.

ANEXO 5.

RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO

TABLA DE CONTENIDO

5.1 INTRODUCCIÓN	93
5.2 EVALUACIÓN COSTE-BENEFICIO.....	93
5.2.1 RESULTADOS DE MEDIDAS AISLADAS	93
5.2.2 RESULTADOS DE DOS MEDIDAS COMBINADAS	94
5.2.3 RESULTADOS DE VARIAS MEDIDAS COMBINADAS.....	95
5.3 EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	100
5.3.1 RESULTADOS DE MEDIDAS AISLADAS	100
5.3.2 RESULTADOS DE DOS MEDIDAS COMBINADAS	102
5.3.3 RESULTADOS DE VARIAS MEDIDAS COMBINADAS.....	102
5.4 COMPARACIÓN DE EVALUACIONES Y ESCENARIOS	103
5.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	113
5.6 DISTRIBUCIÓN DE BENEFICIOS.....	115

5.1 INTRODUCCIÓN

En este anexo se presentan resultados adicionales de los escenarios probados, con el fin de complementar la información descrita en el Capítulo 7. A continuación se presentan datos adicionales de cada escenario analizado, con el fin que sirvan de ayuda al lector y así poder disponer de una visión más amplia del alcance y posibilidades de análisis de la metodología aquí desarrollada.

5.2 EVALUACIÓN COSTE-BENEFICIO

En esta sección se mostrará información adicional y más detallada acerca de los resultados óptimos obtenidos bajo este tipo de evaluación.

5.2.1 Resultados de Medidas Aisladas

En el primer escenario [P], se ha implementado una medida destinada a descongestionar el centro y a favorecer el transporte público por encima del automóvil, en los viajes cuyo destino es la almendra de Madrid, ya que es en este sentido en donde la red de transporte público es más competitiva. En este caso, la tarifa óptima de peaje hallada ha sido de **1.45 €** implementado solo en las horas punta, donde se supone que se cubre la totalidad, o al menos la mayor parte, de la movilidad obligada. Para la hora valle, se ha hallado que la tarifa debe ser **ceró**.

Para el segundo escenario [A], se ha propuesto variar de la tarifa de aparcamiento existente (2.5 €) en el centro de Madrid. El resultado óptimo obtenido dice que la tarifa original de parking debe ser disminuida hasta **1.65 €**.

En el escenario [B], se ha encontrado que el nivel óptimo de la frecuencia del modo *bus* debe ser al final del año de evaluación, **100%** más que en el año de implementación de la medida (2007). La reducción de los tiempos de espera en este modo tiene un gran impacto sobre el valor de la función objetivo.

Finalmente, en el escenario [T] el valor óptimo dice que se debe reducir la oferta de trenes en la Comunidad de Madrid en **15%** al final del año de evaluación. Este resultado se debe básicamente al alto coste que representa la operación de este modo (ver Figura 7.11 del Capítulo 7).

Según la forma de la curva de los gráficos mostrados (Figura 5.1), se puede ver que la tarifa de parking influye mucho más sobre el beneficio social neto que una tarifa de peaje y tiene una sensibilidad mucho mayor, es decir, la variación de dicha tarifa produce mayores cambios en el bienestar general, en estos dos casos. Sin embargo, el aumento progresivo de las frecuencias de transporte público (modo *bus*) definitivamente tiene un impacto mayor que cualquier tipo de escenario con tarifas que se haya probado. Por el contrario, el valor óptimo hallado para el modo *rail*, tiene un impacto casi sin importancia sobre todo el sistema y parece ser que solamente busca disminuir costes de operación.

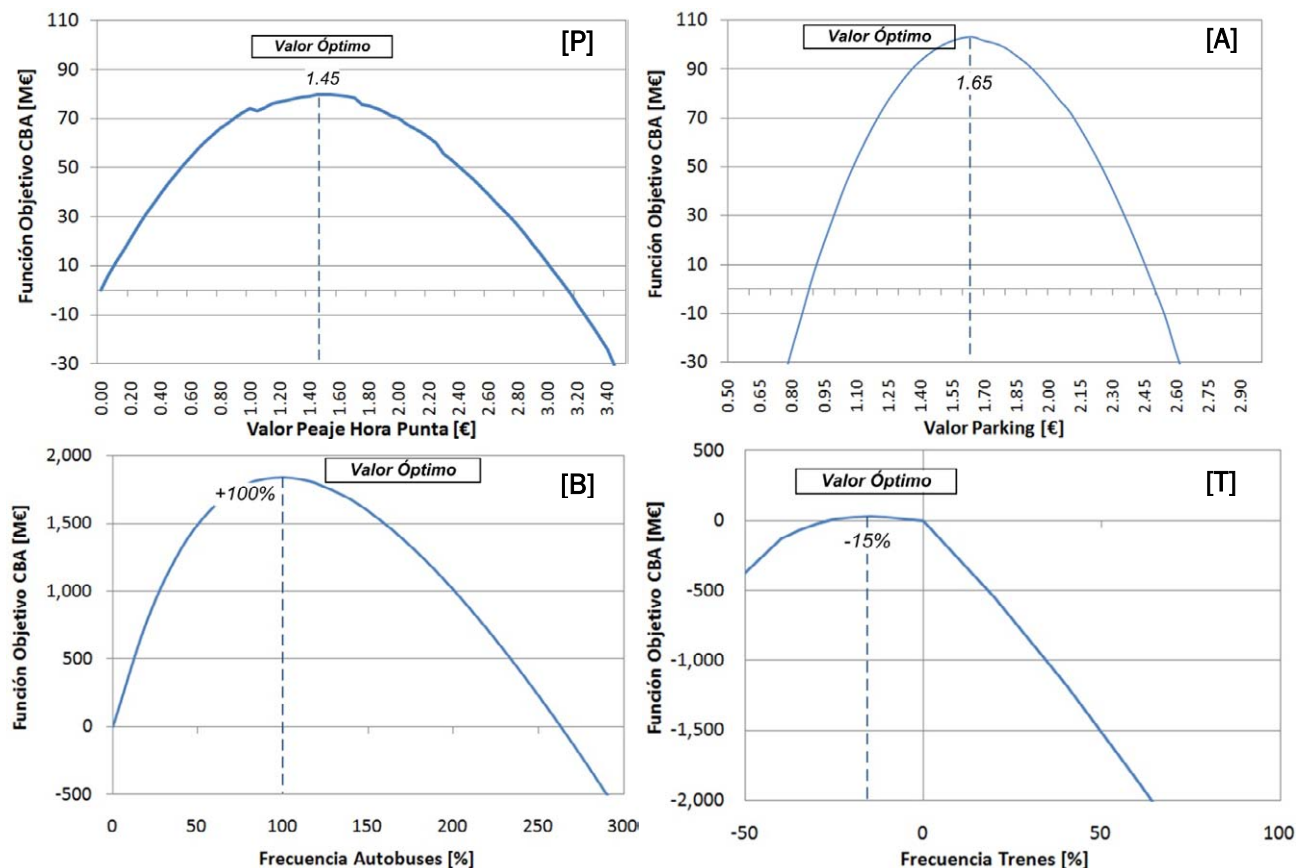


Figura 5.1 Valores Óptimos Escenarios con Medidas Aisladas

5.2.2 Resultados de Dos Medidas Combinadas

Con el escenario [P+A] se pretende lograr un balance entre dos tasas de similares características (peaje y aparcamientos) que maximice la función objetivo, de tal manera que se pueda llegar a resultados que permitan esclarecer la eficacia de dichas medidas.

La Figura 5.2 muestra la superficie en donde funciona el algoritmo de optimización (tal como se desarrolla en el ejemplo del Anexo 1). En primer lugar, un conjunto inicial de valores es escogido, para este caso, el punto de inicio será $p_0 = (0, 2.5)$. Luego, el algoritmo busca sobre diferentes direcciones conjugadas, linealmente independientes entre sí, nuevos conjuntos de puntos p_i , hasta encontrar el óptimo global. Una vez el proceso de optimización converge, en un tiempo relativamente corto y después de 109 simulaciones, se obtiene como resultado óptimo el punto **(3.40, 0.70)** [peaje, parking]. Al igual que el escenario [P], la tarifa de peaje para la hora valle es cero.

Estos resultados óptimos obtenidos sugieren, que la reducción de la tasa de aparcamiento, reduciría los ingresos disponibles y diluye el efecto disuasorio esperado del peaje que es incentivar el uso del TP en el centro de Madrid.

Con este ejercicio¹ se pretende descubrir la posibilidad de un esquema que integre estas dos medidas de forma óptima para analizar sus repercusiones sobre la movilidad y los usuarios

¹ En sentido estricto, el escenario E1, sería un escenario similar al actual, ya que el E1 fue simulado con una tarifa por parking fija de 2.50 €. La única diferencia es que las tarifas en E1 no están optimizadas de acuerdo a la función objetivo.

del sistema, con el fin de obtener un mayor excedente social; ingresos extras que puedan estar disponibles para otros temas y aumentar la aceptación pública.

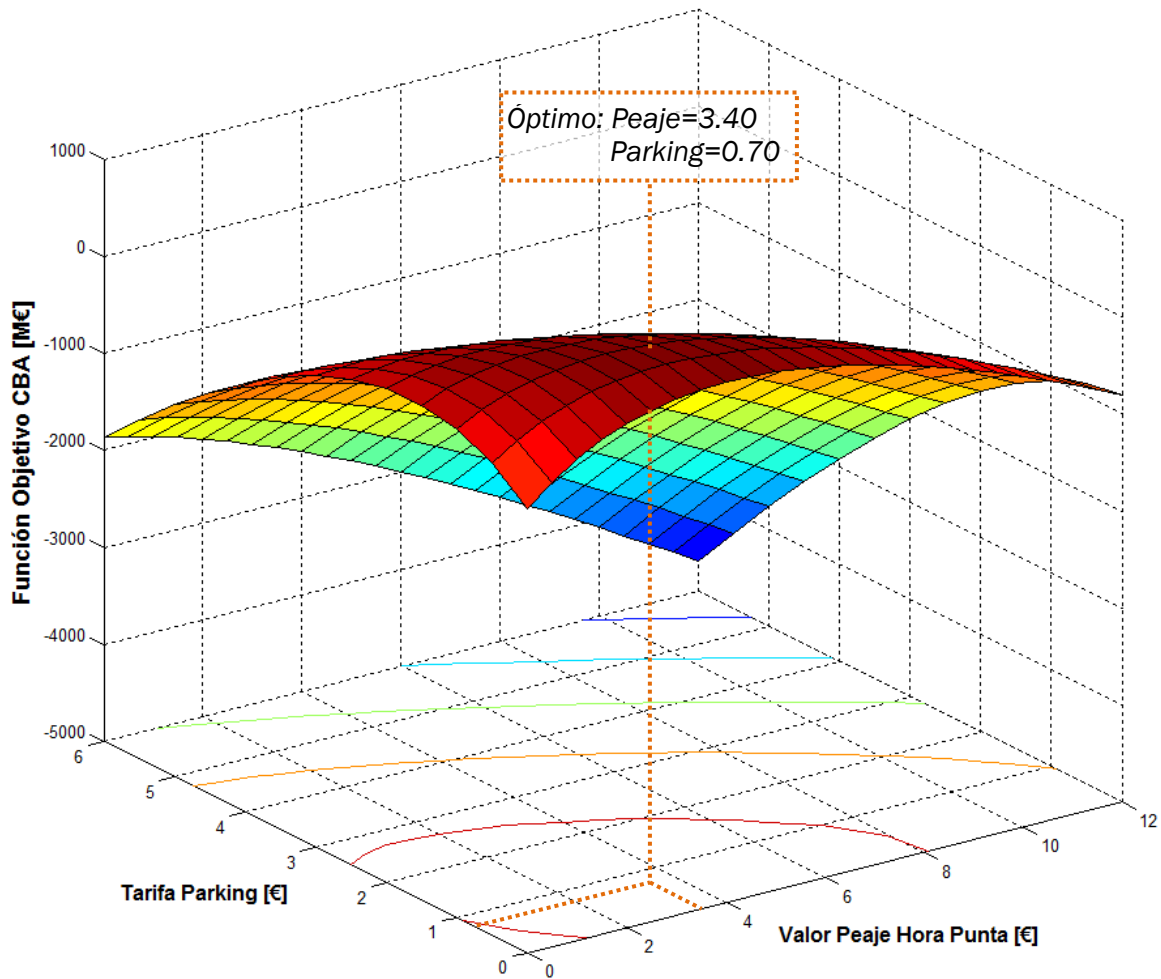


Figura 5.2 Combinación Óptima Peaje y Aparcamiento – CBA

5.2.3 Resultados de Varias Medidas Combinadas

Finalmente, una de las grandes ventajas de la metodología desarrollada es que permite combinar y optimizar **varias medidas** de diferente tipo a la vez. También es posible aplicarlas en diferentes periodos de tiempo. A continuación se presentan cuatro medidas diferentes con el fin de evaluar su impacto combinado (escenario [P+A+TP]).

Como se ha visto en la descripción de escenarios del Capítulo 7, en el escenario [P+A+TP], se han combinado cuatro medidas de transporte: un peaje urbano y la variación de la tarifa por aparcar, y la modificación de la oferta de los servicios de autobuses (*bus*) y modos ferroviarios (*rail*).

Una vez simulado este escenario junto con el algoritmo de optimización, después de 291 simulaciones, el algoritmo converge obteniendo los siguientes resultados: el valor del peaje en hora punta se estimó en **2.95 €** (en hora valle de nuevo la tarifa es cero), la tasa por aparcar en **0.85 €** y la oferta de transporte público debe variar en **+100%** para los autobuses (igual que el escenario [B]) y en **-25%** para los modos ferroviarios. Estas tarifas maximizan el beneficio social.

Por otro lado, los resultados óptimos del escenario [P+TP], después de 173 simulaciones, son los siguientes: la tarifa óptima de peaje se estimó en **1.50 €** (en hora punta, la hora valle es cero), la oferta de transporte público (autobuses) debe aumentarse **130%** al final del periodo de evaluación (según la aplicación gradual descrita en la ecuación (7.1) del Capítulo 7) y finalmente, la oferta de servicios en modos ferroviarios debería reducirse en **30%** al final del periodo de evaluación.

Se ha probado este último escenario debido a que en los resultados anteriores, los escenarios que involucraban la optimización de tarifas de aparcamiento, su resultado óptimo siempre iba en la dirección de disminuir dicha tarifa. Por esta razón, en este escenario se busca evaluar y analizar los impactos en el caso que la tarifa de aparcamiento no sufra modificaciones.

A manera de ejemplo, en la Figura 5.3 se muestra el resultado final de la variación de la oferta óptima del transporte público para los escenarios [P+TP] y [P+A+TP]. En el gráfico se observa la forma gradual en que deberían variar los servicios de TP para llegar al resultado óptimo al final del periodo de evaluación. También, de forma paralela se muestran los costes (y ganancias) asociados a la prestación de dichos servicios (VAN del año 2004).

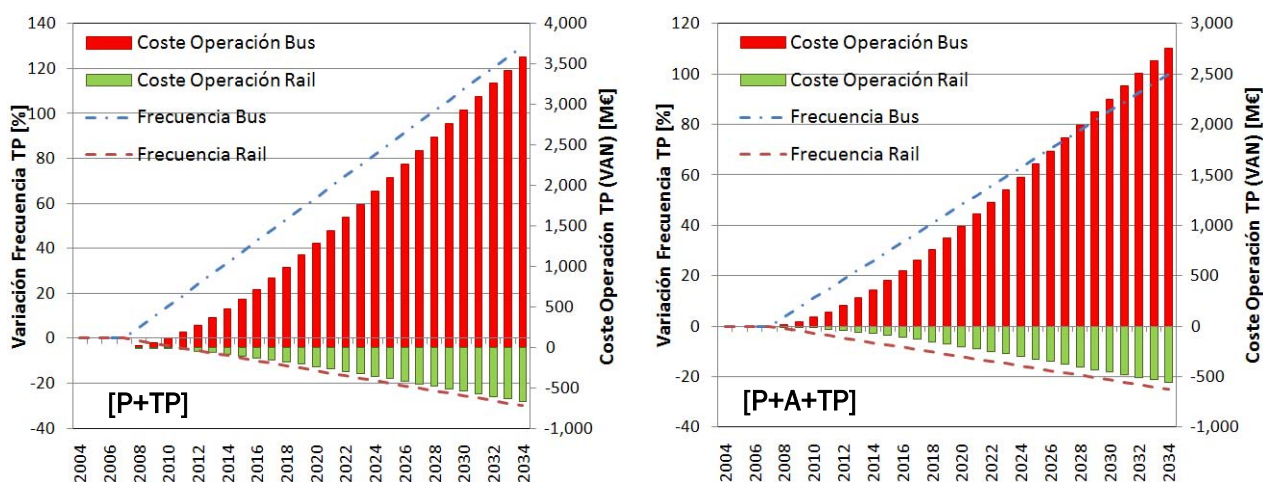


Figura 5.3 Aplicación Gradual de Medidas y Costes de Operación en TP

Finalmente, en las tablas 5.1 a 5.7, se muestran los resultados desagregados por periodo del día y por agente del sistema de cada uno de los indicadores que componen la función objetivo CBA. De esta manera se puede analizar de forma detallada los impactos que cada medida tiene sobre el bienestar de la sociedad.

Tabla 5.1 Beneficios del Cobro de Peaje en Madrid [P] Respecto al Escenario Base [M€]

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	239.85	15.82	-1,138.57		- 882.90
	HV	25.71	0.50	0.00		26.21
Transporte Público	Pasajeros HP	79.27				79.27
	HV	4.79				4.79
Administración	Impuestos Combustible				-5.39	-5.39
	Mantenimiento Vial				-2.84	-2.84
Operadores	Ingresos Parking				-189.52	-189.52
	Ingresos Peaje				1,082.48	1,082.48
	Ingresos Tarifas TP				26.40	26.40
	Costes Operación				0.00	0.00
Externalidades	Accidentes				-60.00	- 60.00
	CO ₂				1.49	1.49
	Polución				-0.11	-0.11
Total		349.62	16.32	-1,138.57	852.51	79.88

Tabla 5.2 Beneficios del Cobro por Aparcamiento en Madrid [A] Respecto al Escenario Base [M€]

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	-277.40	-18.34	862.67		566.93
	HV	-26.09	-1.04	1,600.03		1,572.9
Transporte Público	Pasajeros HP	-87.99				-87.99
	HV	-13.99				-13.99
Administración	Impuestos Combustible			0.00	-45.01	-45.01
	Mantenimiento Vial			0.00	13.71	13.71
	Ingresos Parking			0.00	-1,983.53	-1,983.53
Operadores	Ingresos Peaje			0.00	0.00	0.0
	Ingresos Tarifas TP			0.00	-43.71	-43.71
	Costes Operación			0.00	0.00	0.0
Externalidades	Accidentes			114.10		114.1
	CO ₂			6.84		6.84
	Polución			2.91		2.91
Total		-405.47	-19.38	123.85	-2,058.54	103.16

Tabla 5.3 Beneficios del Escenario [B] Respecto al Escenario Base [M€] – CBA

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	1,117.62	75.84	0.00		1,193.46
	HV	111.78	0.96	0.00		112.74
Transporte Público	Pasajeros HP	1,146.11				1,146.11
	HV	1,330.40				1,330.40
Administración	Impuestos Combustible			0.00	-170.91	-170.91
	Mantenimiento Vial			0.00	21.20	21.2
Operadores	Ingresos Parking			0.00	-50.31	-50.31
	Ingresos Peaje			0.00	0.00	0.0
	Ingresos Tarifas TP			0.00	1,120.62	1,120.62
	Costes Operación			0.00	-2,757.93	-2,757.93
Externalidades	Accidentes			-82.12		-82.12
	CO ₂			-7.09		-7.09
	Polución			-13.18		-13.18
Total		3,705.91	76.8	-102.39	-1,837.33	1,842.99

Tabla 5.4 Beneficios del Escenario [T] Respecto al Escenario Base [M€] – CBA

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	-30.27	-2.18	0.00		-32.45
	HV	-1.81	0.02	0.00		-1.79
Transporte Público	Pasajeros HP	-92.09				-92.09
	HV	-119.77				-119.77
Administración	Impuestos Combustible			0.00	-1.61	-1.61
	Mantenimiento Vial			0.00	0.68	0.68
Operadores	Ingresos Parking			0.00	-0.67	-0.67
	Ingresos Peaje			0.00	0.00	0.0
	Ingresos Tarifas TP			0.00	-62.27	-62.27
	Costes Operación			0.00	332.28	332.28
Externalidades	Accidentes			7.31		7.31
	CO ₂			0.21		0.21
	Polución			0.10		0.1
Total		-243.94	-2.16	7.62	268.41	29.93

Tabla 5.5 Beneficios del Cobro Combinado [P+A] Respecto al Escenario Base [M€] – CBA

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	25.46	1.72	-923.45		-896.27
	HV	4.78	-1.40	3,586.56		3,589.94
Transporte Público	Pasajeros HP	14.66				14.66
	HV	-21.53				-21.53
Administración	Impuestos Combustible			0.00	-125.31	-125.31
	Mantenimiento Vial			0.00	25.23	25.23
Operadores	Ingresos Parking			0.00	-4,765.15	-4,765.15
	Ingresos Peaje			0.00	2,509.80	2,509.8
	Ingresos Tarifas TP			0.00	-32.50	-32.5
	Costes Operación			0.00	0.00	0.0
Externalidades	Accidentes			108.38		108.38
	CO ₂			20.94		20.94
	Polución			6.99		6.99
Total		23.37	0.32	136.31	-2,387.93	435.18

Tabla 5.6 Beneficios del Escenario [P+TP] Respecto al Escenario Base [M€] – CBA

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	1,414.18	94.33	-1,157.44		351.07
	HV	144.64	1.37	0.00		146.01
Transporte Público	Pasajeros HP	1,235.41				1,235.41
	HV	1,374.46				1,374.46
Administración	Impuestos Combustible			0.00	-186.36	-186.36
	Mantenimiento Vial			0.00	20.05	20.05
Operadores	Ingresos Parking			0.00	-246.30	-246.3
	Ingresos Peaje			0.00	1,079.03	1,079.03
	Ingresos Tarifas TP			0.00	1,239.05	1,239.05
	Costes Operación			0.00	-2,917.35	-2,917.35
Externalidades	Accidentes			-146.59		-146.59
	CO ₂			-15.74		-15.74
	Polución			-19.25		-19.25
Total		4,168.69	95.7	-181.58	-1,011.88	1,913.49

Tabla 5.7 Beneficios del Escenario [P+A+TP] Respecto al Escenario Base [M€] – CBA

Agente	Categoría	Ahorros de Tiempo	Costes de Operación	Otros Costes	Gastos/Ingresos	Total
Transporte Privado	Coches HP	1,086.62	73.63	-726.37		433.88
	HV	110.85	-0.35	3,270.04		3,380.54
Transporte Público	Pasajeros HP	1,001.39				1,001.39
	HV	1,114.60				1,114.60
Administración	Impuestos Combustible			0.00	-282.16	-282.16
	Mantenimiento Vial			0.00	44.42	44.42
Operadores	Ingresos Parking			0.00	-4,335.60	-4,335.6
	Ingresos Peaje			0.00	2,156.10	2,156.1
	Ingresos Tarifas TP			0.00	991.26	991.26
	Costes Operación			0.00	-2,199.37	-2,199.37
Externalidades	Accidentes			28.54		28.54
	CO ₂			11.32		11.32
	Polución			-6.85		-6.85
Total		3,313.46	73.28	33.01	-3,625.35	2,338.07

5.3 EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Al igual que en la sección 5.2, a continuación se describen los resultados para la evaluación multicriterio. Bajo esta metodología, al obtener resultados diferentes de cero para el valor del peaje en la hora valle (HV), se tienen escenarios de optimización de más de una variable. En algunos casos como en el escenario [P+A+TP], se tienen problemas de optimización de 5 variables.

5.3.1 Resultados de Medidas Aisladas

En el caso del escenario [P], al analizar los resultados, se obtiene que la tarifa de peaje debe ser aplicada con valores diferenciales según el periodo del día, es decir, en hora punta y hora valle. Así, para este escenario, las tarifas de peaje se han estimado en **12 y 9 €** para la hora punta y valle, respectivamente; tal como se puede ver en la superficie de optimización de la Figura 5.4.

El valor de cada uno de los indicadores normalizados que conforman la función objetivo MCA, es mostrado en la Tabla 5.8, recordando que el mejor valor posible es 100 y el peor 0, según los rangos definidos y según su evolución con respecto al año base (2004).

Por otro lado, con respecto al escenario [A], el valor óptimo de la tarifa de aparcamiento deberá pasar de 2.50 € a **9.00 €** en el año de implantación de dicha medida y permanecerá constante a lo largo de todo el periodo de evaluación.

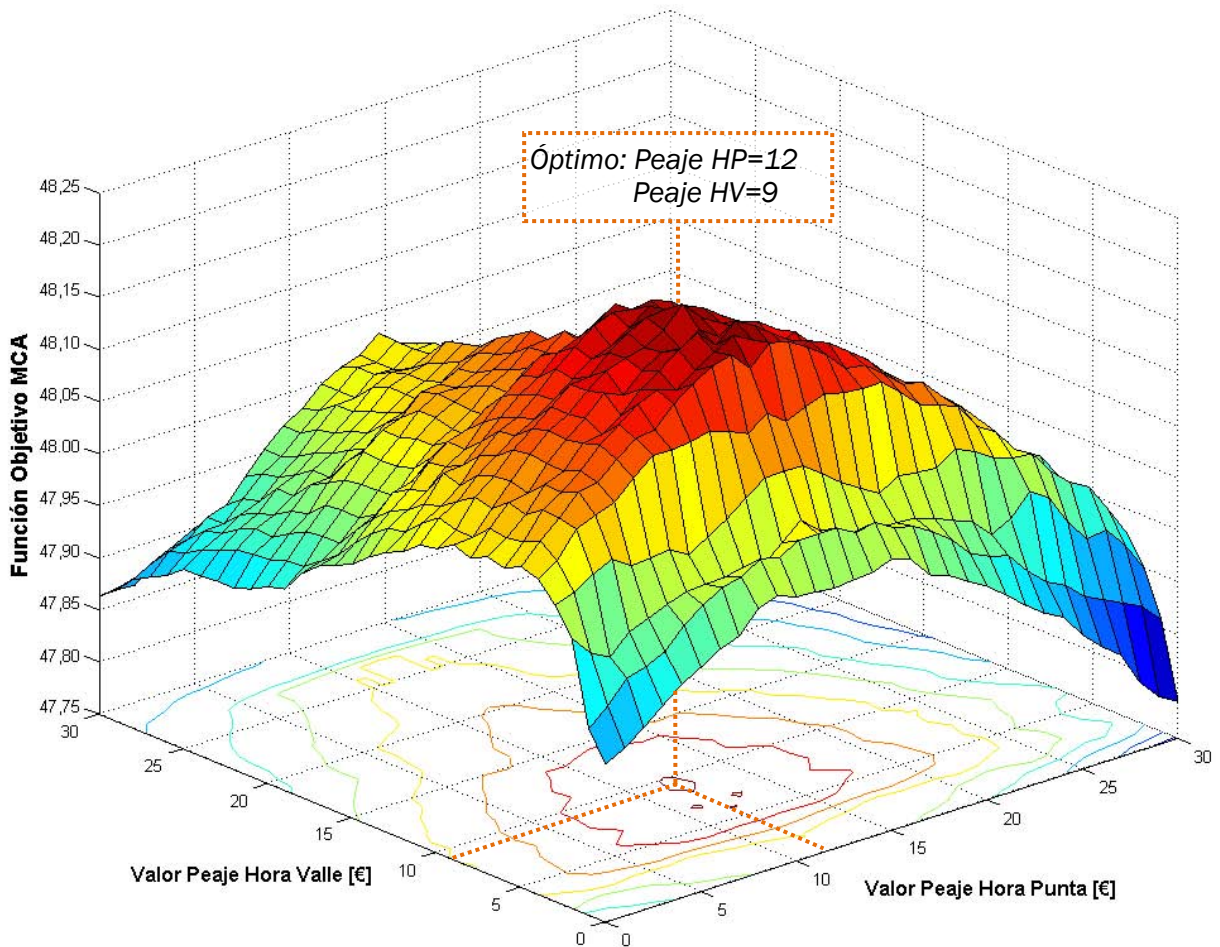


Figura 5.4 Combinación Óptima Peaje MCA

Estos resultados ([P] y [A]) siguen la misma línea de algunos autores (Marsden, 2006), donde se habla acerca de que las medidas de este tipo raramente se implementan aisladamente y que al contrario del pensamiento general, no hay evidencia sólida que diga que la implementación de este tipo de tarifas va en contra de la atractividad y vitalidad de las zonas afectadas. Esto se corrobora con estos resultados, ya que no se observa una dispersión de empleos o población mayor que en el escenario base, debido a la implementación de estas políticas (ver Figura 5.23 y Figura 5.24).

Por el contrario, políticas de este tipo cobrarán cada vez más importancia a medida que el nivel de motorización siga en aumento. Incluso en zonas donde se implementen cobros por congestión, las políticas de cobro por aparcamiento seguirán siendo necesarias. En esta misma línea, resultados empíricos y simulaciones han demostrado que estrategias de *pricing* en destino, como el cobro por aparcamiento, tienen impactos importantes sobre la disminución en los tiempos de viaje y costes sociales, aunque la accesibilidad de algunas zonas puede verse reducida, tal como se puede ver en Gallo et al. (Gallo et al., 2006).

Según el diseño del sistema planteado (cobertura geográfica), el razonamiento anterior se ve reflejado en los resultados obtenidos, con especial énfasis en los tiempos de viaje, ya que se presentan mejoras muy importantes en la velocidad de recorrido, ya sea en coche o en transporte público (ver Figura 5.7 y Figura 5.8).

En estos escenarios con una sola medida en funcionamiento, es necesario tener cuidado con la interpretación de los resultados y su extrapolación a otros medios, ya que algunos autores como Santos y Rojey (2004) y Mattsson y Eliasson (2006), dicen que los efectos distributivos de tarifas de este tipo, deben evaluarse según el tipo de ciudad y el esquema específico que se quiera desarrollar, teniendo en cuenta los diferentes grupos de población (residentes y empleados), el modo de transporte utilizado y la forma en que se distribuyen los ingresos. Desafortunadamente, en este caso no se han tenido en cuenta diferentes grupos de población por zona, así que el análisis redistributivo de beneficios debido a estas tarifas, puede ser un objetivo a desarrollar en futuras investigaciones. Lo que sí contempla la metodología es un análisis espacial por zonas según los resultados de la función objetivo o de sus indicadores.

5.3.2 Resultados de Dos Medidas Combinadas

Analizando el escenario [P+A]; al igual que en [P], los resultados sugieren que será necesario implementar la tarifa de peaje en hora valle. No es posible conseguir una superficie de optimización ya que hay tres parámetros a optimizar: peaje en hora punta, peaje en hora valle y tarifa de parking.

Bajo este enfoque, el resultado óptimo obtenido dice que lo mejor para la sostenibilidad en general es aumentar el cobro por aparcar hasta los **6 €** e implementar una tarifa de peaje en HP de **15 €** y en HV de **8 €** para quien desee ingresar en coche al centro de Madrid. La implementación de estas tarifas, hará que la función objetivo mejore en 3.5% con respecto al escenario base, al final del año de evaluación.

Estudios previos relacionados con la equidad bajo peajes urbanos (Giuliano, 1994; Langmyhr, 1997; Fridstrøm et al., 2000), han indicado que a pesar de que los usuarios del coche tienden a tener mayores ingresos que la media, los grupos de menores ingresos pueden estar en desventaja, ya que tendrían más dificultades en asumir estas nuevas tarifas. Para quienes no tienen alternativa diferente a asumir estas tasas, el impacto podría ser significativo. Utilizando una lógica similar, se podría decir que los grupos de ingresos bajos, obtendrían mayores beneficios que los del grupo de ingresos más altos al eliminar las tasas. Sin embargo, según el indicador de equidad en los costes de transporte, esta lógica no se cumpliría en este caso, ya que parece ser que quienes tienen como destino principal el centro de Madrid y el modo preferido de hacer este viaje es en coche, tienen mayores ingresos, razón por la cual al subir estas tarifas, este indicador mejora. Quienes no pueden asumir el coste, utilizarían el transporte público, que también se vería beneficiado indirectamente por la disminución de la congestión en los viajes radiales, mejorando su competitividad.

Los resultados de los indicadores MCA para este escenario se pueden ver en la Tabla 5.8. El resultado final se debe principalmente a los indicadores ambiental y de equidad social, donde se obtienen buenos resultados (en comparación con los escenarios anteriores) en la reducción de los tiempos de viaje, de uso del coche y de emisiones por viajero-km. Con respecto a la equidad, los resultados dicen que bajo esta combinación, los costes de transportes quedan mejor distribuidos según el ingreso medio de cada zona que en el escenario [P].

5.3.3 Resultados de Varias Medidas Combinadas

Los resultados de los escenarios [P+TP] y [P+A+TP] van en la misma dirección que bajo la metodología CBA, aunque con magnitudes diferentes.

Los resultados óptimos obtenidos para el escenario [P+A+TP] son: una tasa de peaje de **15 €** para HP y **4 €** en HV, una tasa de **7 €** por aparcar y el aumento, considerable, de las

frecuencias de transporte público para el año 2034 (+250% para los autobuses y +300% para los modos ferroviarios).

En el mismo sentido, en el escenario [P+TP], la tarifa de peaje quedaría en **14.5 €** en HP y **6.5 €** en HV y la oferta de transporte público aumentaría en **+250%** y **+290%** para *bus* y *rail*, respectivamente. Un claro y real inconveniente en estos resultados es el alto coste que se debería asumir para aumentar la oferta de servicios hasta estos niveles óptimos, en particular en los tiempos que corren. Además, el modelo tampoco tiene en cuenta la capacidad, ni el nivel de saturación de las líneas de los servicios de transporte público. Sin embargo, aparte del coste que representaría esto, la mejor interpretación de estos valores es que la sostenibilidad de un sistema de transporte, en este caso el de la Comunidad de Madrid, depende de que éste se base en el transporte público.

En la Tabla 5.8 se muestra un resumen global del resultado de los indicadores de la función de sostenibilidad para todos los escenarios estudiados.

Tabla 5.8 Indicadores por Escenario de la Función Multicriterio

Indicador	Base	[P]	[A]	[B]	[P+A]	[P+TP]	[P+A+TP]
Ahorros de Tiempo	44.25	45.18	45.20	52.49	45.58	54.97	55.27
Cambio Modal	7.57	14.57	16.03	31.97	18.36	49.40	53.66
Costes Operación de Coche	25.82	25.28	24.51	28.42	24.72	28.02	27.40
Indicador Eficiencia del Sistema	26.47	30.17	30.83	42.01	32.11	51.33	53.43
Cambio Climático	64.11	65.63	65.47	71.99	66.11	66.74	67.21
Polución del Aire	44.34	45.52	45.41	48.40	45.89	40.55	40.99
Consumo de Suelo	98.40	98.73	95.76	99.26	96.84	99.20	97.48
Indicador Impacto Ambiental	64.01	65.19	64.51	69.25	65.17	64.12	64.16
Equidad en Costes de Transporte	71.51	72.56	77.35	76.49	74.64	78.59	81.74
Seguridad Vial	22.68	17.73	16.85	20.25	15.47	14.70	12.66
Accesibilidad	44.84	45.29	43.53	48.83	44.12	47.29	46.33
Indicador Equidad Social	47.13	45.98	46.92	49.32	45.63	47.76	47.94
Función Objetivo MCA	47.14	48.21	48.50	54.26	48.64	54.58	55.27

Adicionalmente, aunque se han visto los resultados generales de cada escenario, por cada tipo de evaluación, es necesario profundizar más en los resultados y analizar otros indicadores que serán de gran utilidad y complemento a los resultados analizados anteriormente. Así, a continuación se estudiarán las implicaciones que la implementación de estas medidas tiene sobre los patrones de movilidad, distribución modal y externalidades, entre otros elementos que complementan los resultados del Capítulo 7. Los indicadores analizados serán mostrados en valores relativos de variación con respecto al año de inicio de las simulaciones.

5.4 COMPARACIÓN DE EVALUACIONES Y ESCENARIOS

En esta sección se mostrarán resultados adicionales y complementarios al Capítulo 7. Además, se hará una comparación de indicadores según el tipo de evaluación realizado, con el fin de estudiar sus diferencias e impactos.

Para empezar, en cuando a la demanda de transporte, los vehículos por km según el periodo del día se muestran en la Figura 5.5. En el periodo de hora punta (HP), es notable el efecto

que tiene el aumento de la oferta de TP en los resultados, tanto en la evaluación CBA como en la MCA. Sin embargo, teniendo en consideración que la evaluación MCA prevé aumentar mucho más la oferta de TP, se observa que el resultado entre los dos métodos es similar, por lo menos durante la HP, siendo ésta última alternativa mucho más costosa de implantar. Por otro lado, las medidas de *pricing*, ya sea aisladas o combinadas, parece ser que no influyen mucho en este indicador. Esto se debe a que las restricciones de acceso al centro, son cubiertas por los usuarios haciendo viajes a otros destinos más largos.

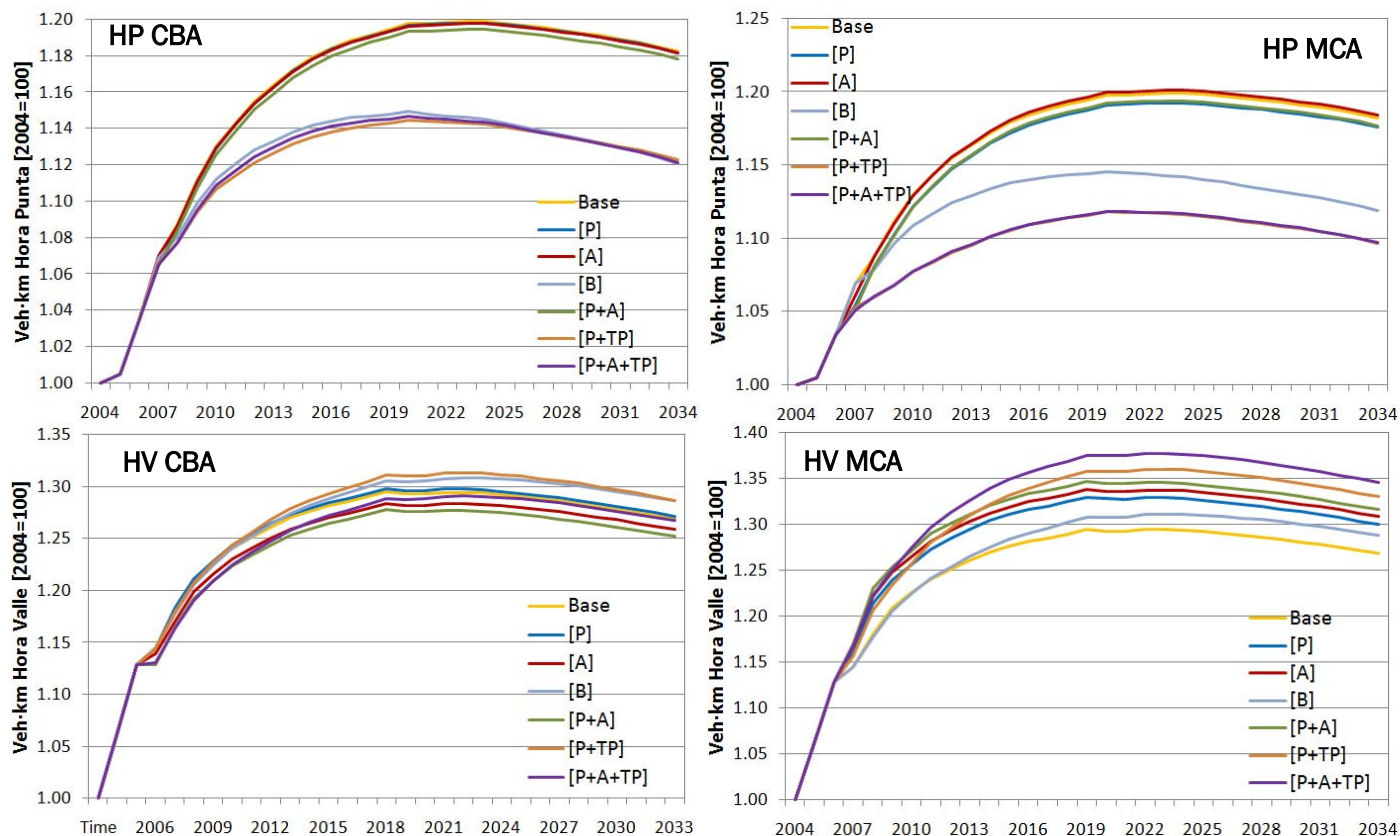


Figura 5.5 Demanda Coche (veh-km)

En cuando al periodo en la hora valle (HV), se presenta una mayor uniformidad en los resultados. El escenario con mayor demanda en este periodo es el [P+TP] (CBA) y [P+A+TP] (MCA). Esto es porque estos escenarios disponen de tasas por ingresar y aparcar en el centro, lo que hace que durante la hora valle, los usuarios hagan más viajes en las coronas externas de la región, justamente donde el TP es mucho menos competitivo que el coche y las distancias de recorrido son más largas. En este caso, la distancia media de viaje en coche aumenta mucho más que en los otros escenarios (ver Figura 5.15).

En términos generales, durante la hora valle se presentan comportamientos similares con variaciones en los escenarios entre 4 y 6% aproximadamente. Como era de esperarse, la movilidad obligada, que es la que se espera se mueva en los periodos punta, es mucho más sensible a las medidas implementadas y sobre todo, parece ser que si se dan las condiciones adecuadas, estaría en disponibilidad de hacer un cambio modal importante hacia el TP.

En la Figura 5.6 se puede ver la evolución en el uso del coche por cada escenario. Estos datos van en concordancia con los de veh-km, ya que en los escenarios donde hay aumento en la oferta de TP, el uso del coche es menor, aunque solo durante la hora valle. Lo interesante de estas políticas de aumento de la oferta de TP es que logran quebrar la

tendencia del crecimiento constante del uso del coche a lo largo del tiempo, consiguiendo un descenso en su uso, que aunque poco, puede ser visto como un comienzo para un cambio en los hábitos de los usuarios del sistema de transporte.

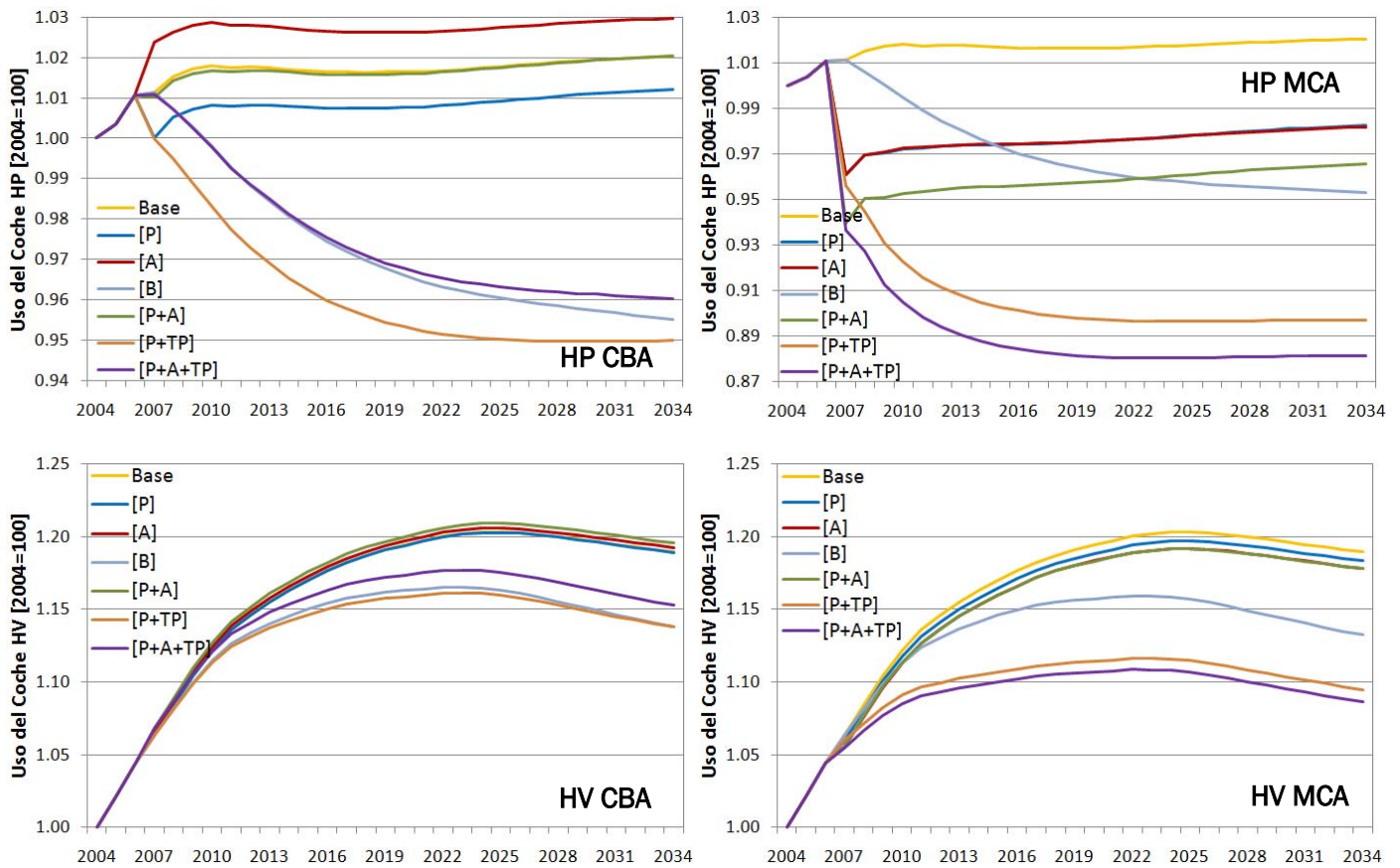


Figura 5.6 Uso del Coche

Este descenso en el uso del coche entre 5 y 20% (y con tendencia decreciente) durante la hora punta, puede ser un punto de inicio para enfocar el sistema de transporte hacia la utilización de modos más sostenibles. Las tendencias se muestran similares en los dos tipos de evaluaciones utilizadas. Es importante notar que en escenarios de solamente políticas de *pricing*, al contrario de lo que puede pensarse, el uso del coche aumenta de forma general. Esto, como se ha explicado, tiene múltiples razones: el aumento de las distancias de recorrido y la sustitución de destinos, a lugares donde el TP no llega o no es atractivo.

Por otro lado, en la hora valle, el escenario [P+TP] (CBA) y el [P+A+TP] (MCA) aparecen como los escenarios en donde menos se usa el coche, o en donde menos aumenta su uso durante este periodo del día. Nuevamente los resultados obtenidos bajo la evaluación CBA o MCA tienden a ser similares, aunque el uso del coche es ligeramente menor en la MCA, debido a la oferta de TP y a las mayores tarifas de *pricing*.

En cuanto a las velocidades de recorrido, en la Figura 5.7 se muestra la velocidad media de viaje en coche para cada escenario según el periodo del día. En este caso se puede observar que este indicador es más sensible a las medidas en la hora punta, mientras que en la hora valle, su variación es alrededor del $\pm 6\%$. Nuevamente, los escenarios que combinan diferentes tipos de medidas son quienes presentan mejores resultados a lo largo de todo el periodo de evaluación. En este caso, el aumento gradual de oferta de transporte público, hace que la velocidad media del coche aumente ligeramente, debido a la disminución de la

congestión por el cambio modal. Sin embargo, esta conclusión debe tomarse con cuidado, ya que el aumento de la oferta de TP, independientemente de los costes asociados a su operación, no puede ser infinito. De ser así, esto significa que la red de transporte podría quedar saturada por el incremento del TP en cualquier momento. Desafortunadamente, el modelo no recoge la saturación del TP en la red (cuestión a mejorar); razón por la cual, los resultados obtenidos bajo la evaluación MCA, que dicen que se debe aumentar en proporciones considerables la oferta, se deben tomar con cuidado debido a su contribución a la congestión, en particular los servicios de autobuses.

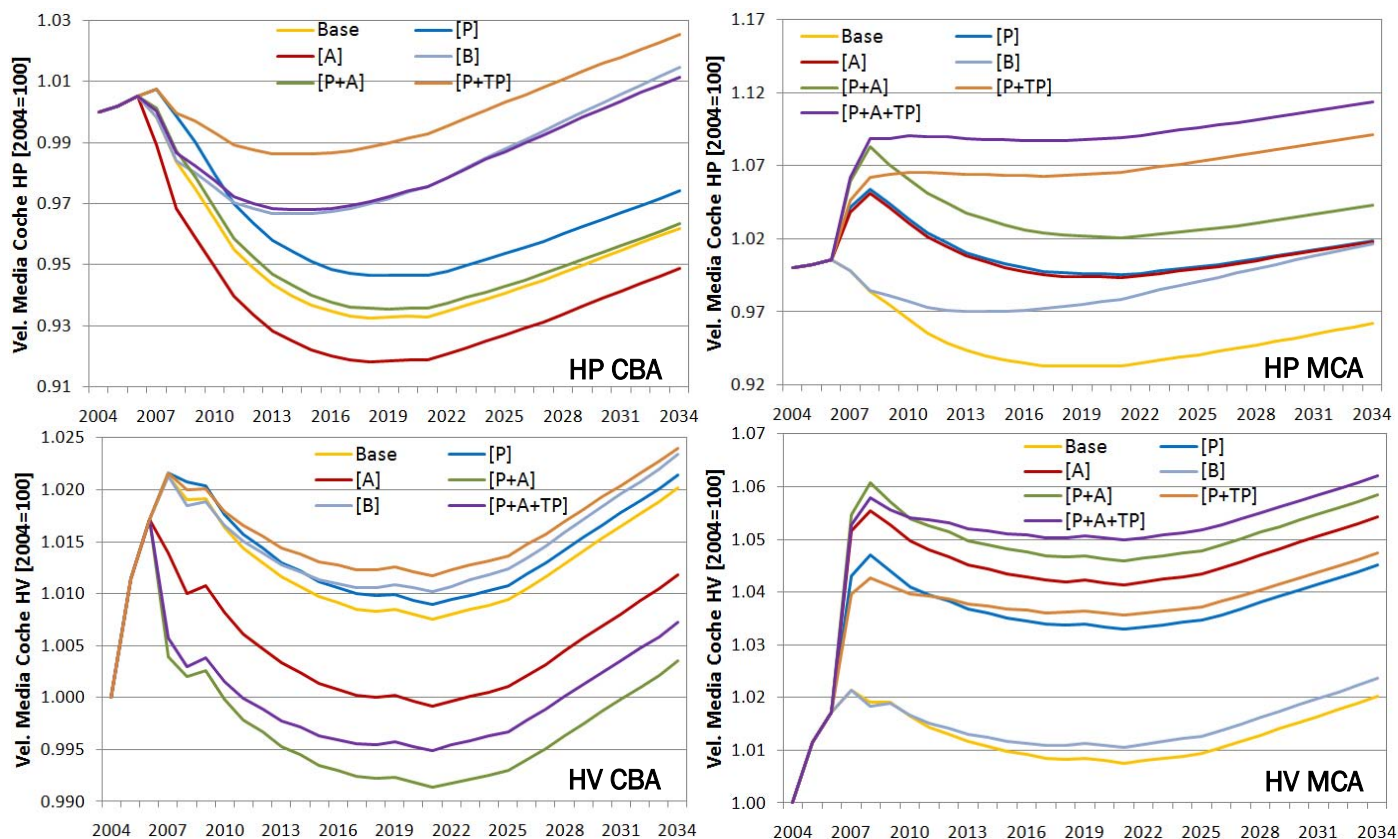


Figura 5.7 Velocidad Media del Coche

En el mismo sentido, en la Figura 5.8 se muestra la velocidad del modo *bus*. Solo se muestra este modo porque el otro modo analizado (*rail*), al tener vías exclusivas no se ve afectado por la congestión. Estos resultados muestran que las políticas de *pricing* en poco afectan la velocidad de recorrido en TP.

El aumento gradual de la oferta de autobuses (Figura 5.3) influye directamente sobre la velocidad de recorrido de cada par OD, gracias al aumento de frecuencias de paso y a la reducción de la congestión, haciendo mucho más atractivo para el usuario este modo de transporte, debido al valor subjetivo que se le da al tiempo de espera dentro de la impedancia de cada modo (Anexo 4, configuración del modelo de transporte).

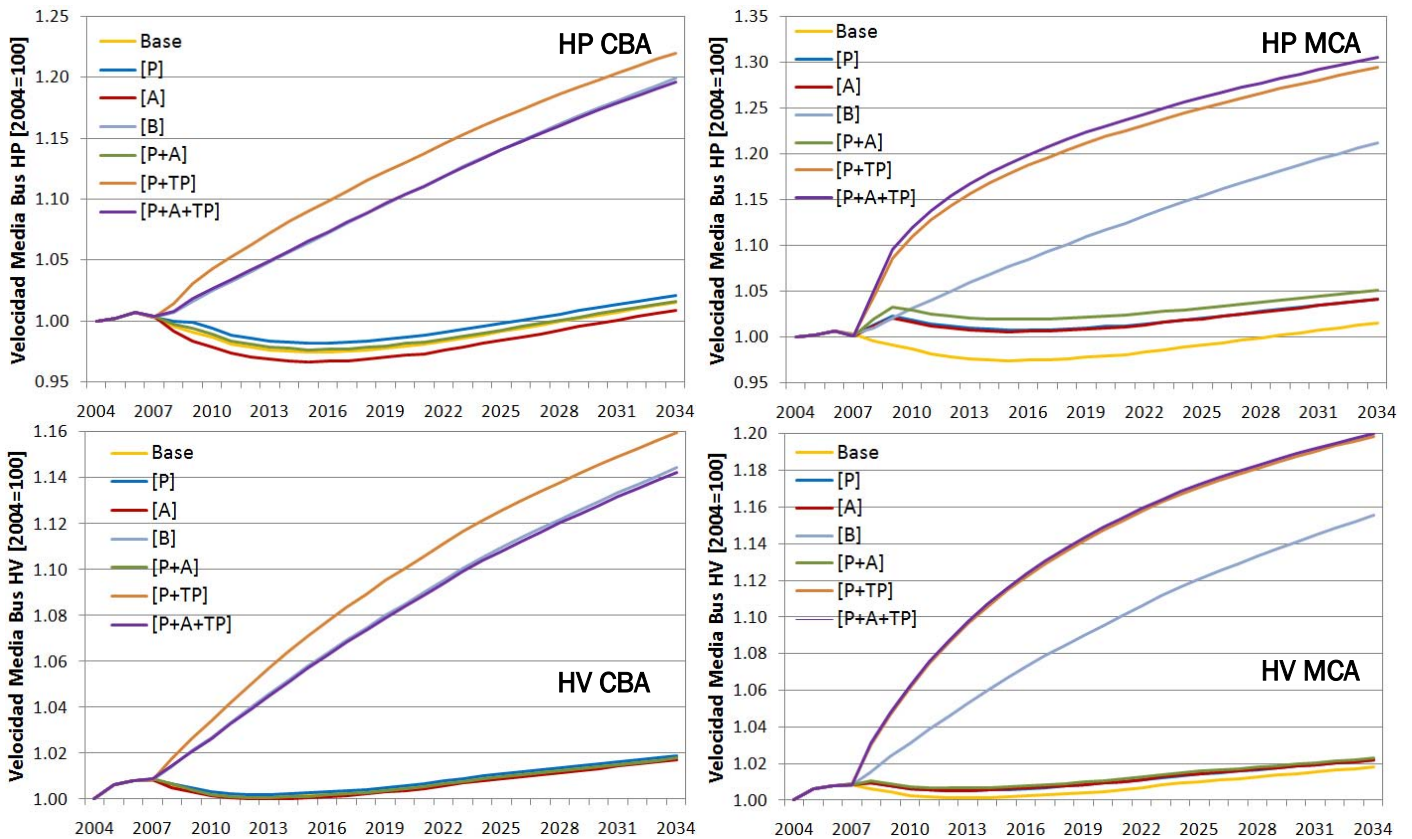


Figura 5.8 Velocidad Media del TP

Hay dos elementos clave en los resultados anteriores: primero, la velocidad de recorrido, independientemente del modo, es afectada directamente por las medidas tarifarias (entre más altas las tarifas, mayor es el aumento de la velocidad). Segundo, los periodos en hora valle absorberán gran parte de la demanda generada en la hora punta (en coche), es decir, al tarifificar en el caso del peaje solo durante la hora punta, muchos viajes se moverán de hora.

Para terminar el análisis de los efectos sobre la movilidad, en la Figura 5.9 se muestra la cantidad de viajes realizados al centro a lo largo del periodo de evaluación, por modo prioritario. Bajo la evaluación MCA se observa que se generan muchos menos viajes en coche al centro que bajo el CBA. Esto se debe a que los escenarios óptimos CBA eliminan los cobros adicionales a los usuarios del coche en hora valle, debido al coste que esto implicaría para los usuarios; entonces, al eliminar las tasas o al reducir las, el atractivo de usar el coche será mucho mayor. Sin embargo, esta reducción no será suficiente, en lo que a aumentar la atraktividad del centro se refiere, ya que los resultados muestran una tendencia descendente cada vez mayor de la cantidad de viajes que se dirigen al centro de la ciudad.

En cuanto a los viajes de TP, el descenso en el tiempo es mucho más pronunciado, sin importar el tipo de medida que se tome. Sin embargo, es claro que al aumentar la calidad del servicio, este descenso no será tan grande como en otros escenarios.

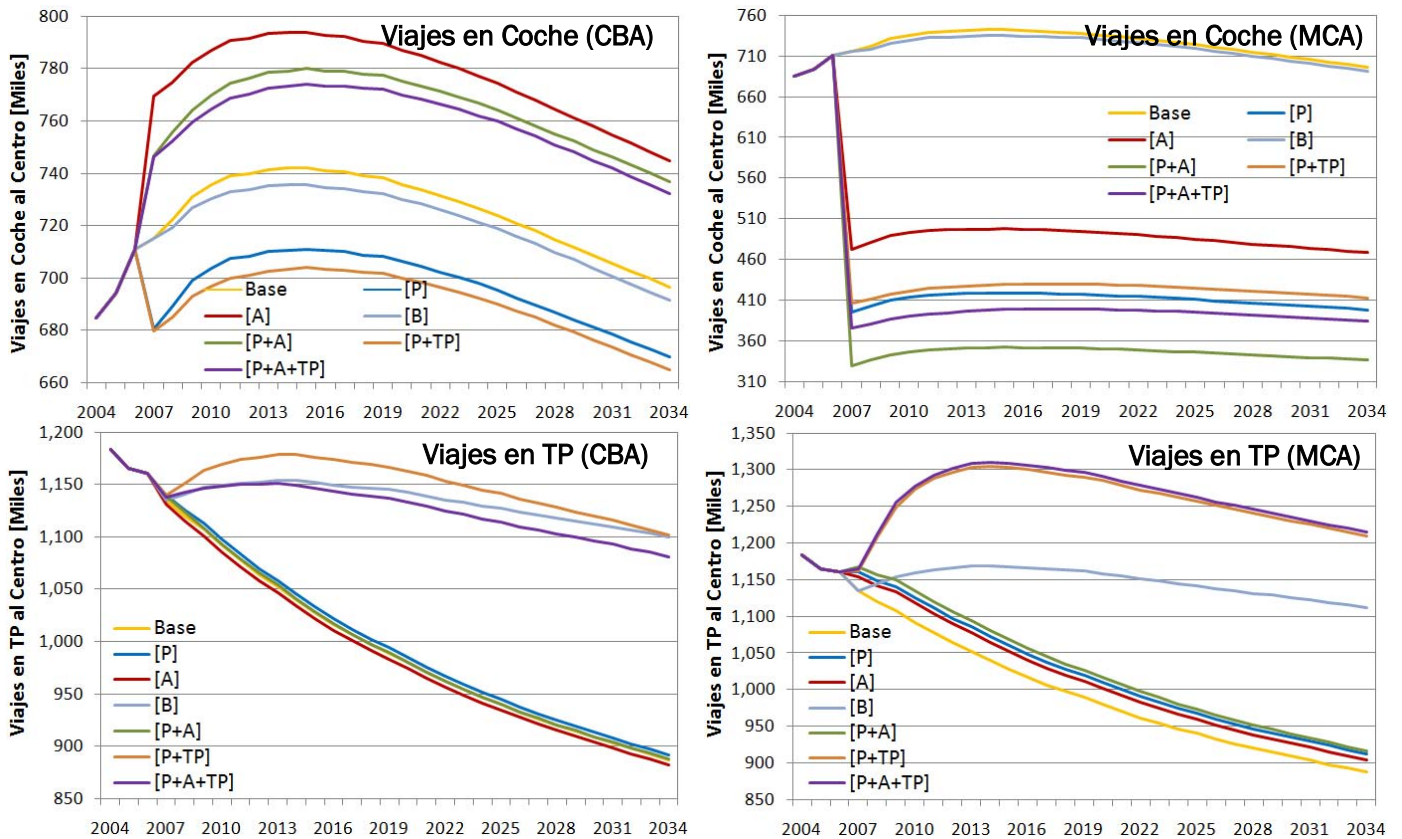


Figura 5.9 Viajes al Centro por Modo

De forma complementaria, en la Figura 5.10 se pueden ver los viajes realizados entre las diferentes coronas de Madrid, excepto el centro. A diferencia de las tendencias mostradas por los gráficos anteriores, los viajes en coche presentan un crecimiento notable, en comparación con el año de inicio de la evaluación.

Los escenarios donde no se reduce la tasa por aparcar y se implementan cobros adicionales, son quienes presentan mayores aumentos de este tipo de viajes en coche. Estos resultados evidencian el cambio de destino (del centro a la periferia) que algunos usuarios del coche escogerán.

En cuanto al transporte público, parece ser que sin importar el destino o el ámbito geográfico, si no se toman las medidas adecuadas, este modo de transporte perderá participación a favor del coche. En este caso, una mejora de la calidad del servicio hace que su participación dentro de la distribución modal aumente ligeramente. Es importante considerar que una política coherente de transporte público no puede consistir solamente en aumentar servicios a lo largo de 30 años, será necesario planificar la ampliación de las redes y mejorar la accesibilidad. De este modo, y viendo los resultados obtenidos solamente con aumentos de frecuencias, no puede esperarse conseguir un transporte público de altas prestaciones y competitivo frente al coche.

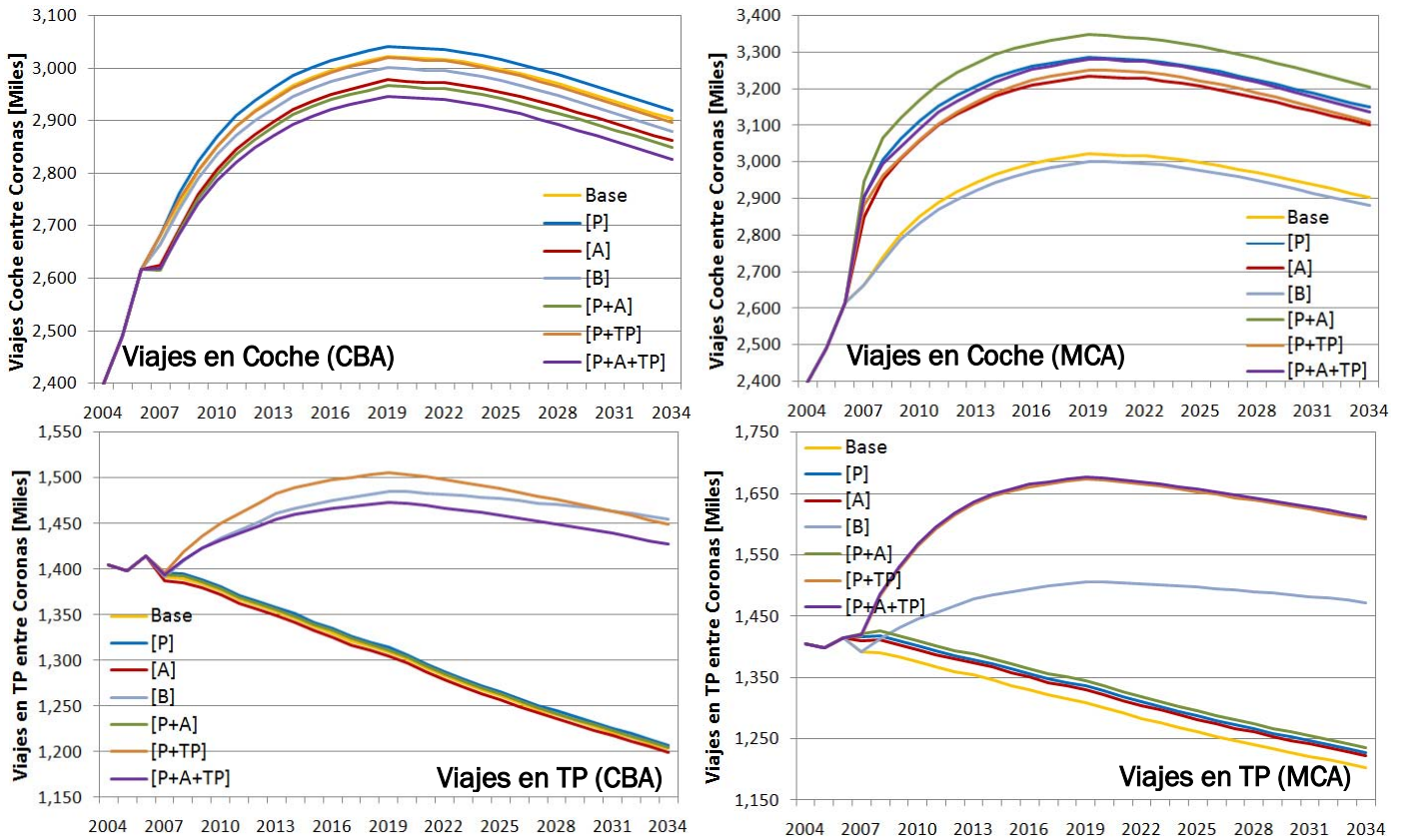
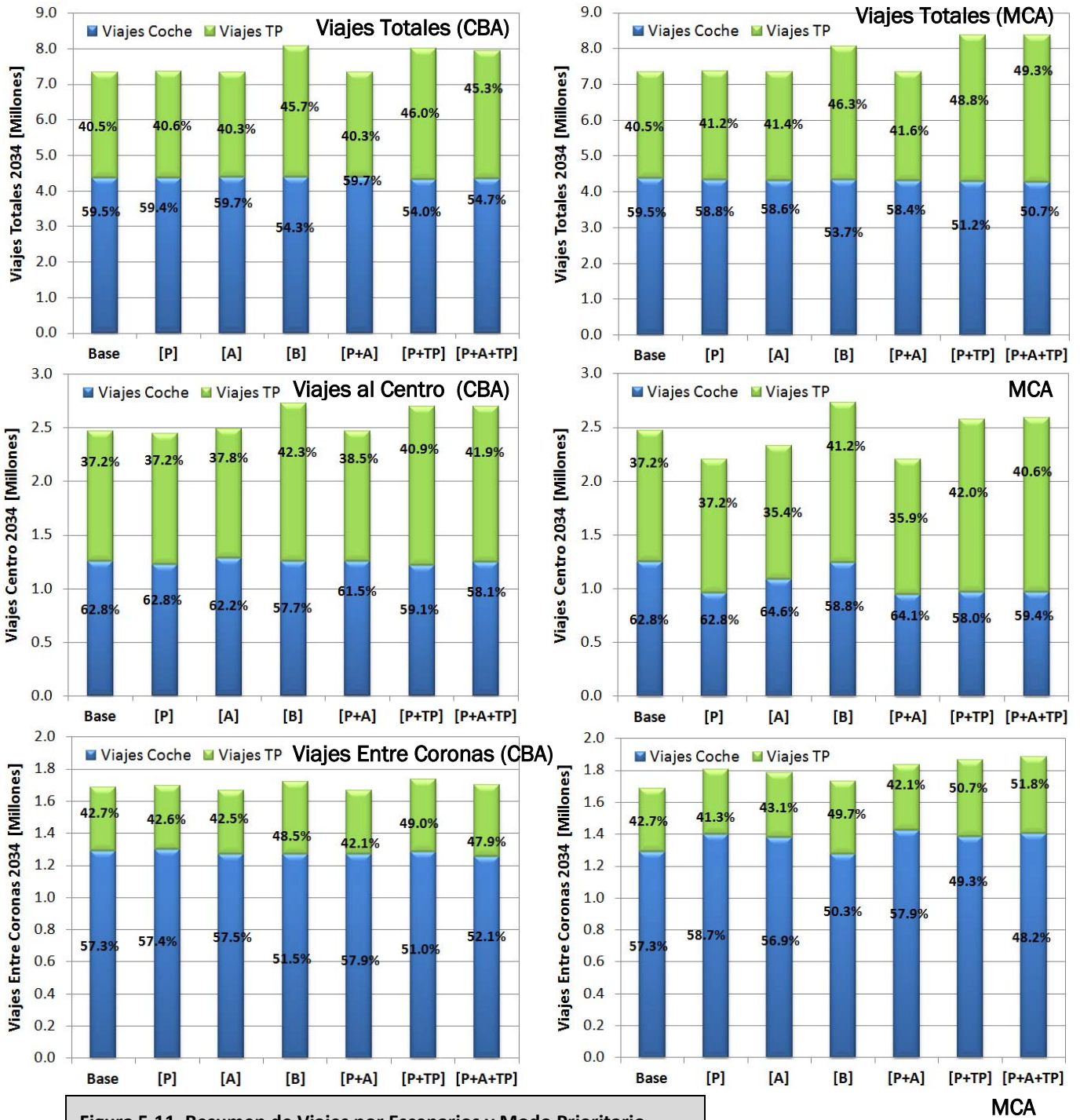


Figura 5.10 Viajes Entre Coronas por Modo

A continuación se presentan resultados agregados obtenidos de cada uno de los escenarios modelizados. La información presentada muestra los viajes totales generados por cada escenario en el periodo final de evaluación, la distribución modal (modo prioritario) y la movilidad entre el centro y las coronas externas, así como los viajes internos entre coronas. Todo esto bajo las dos evaluaciones desarrolladas.

En la Figura 5.11 se presentan los siguientes resultados:

- Los gráficos de la parte superior muestran el número total, por tipo de evaluación, de viajes motorizados realizados en cada escenario, al final del periodo de evaluación.
- Los gráficos del medio representan la totalidad de los viajes realizados desde y hacia el centro por modo y por tipo de evaluación.
- Finalmente, los gráficos de la parte inferior representan los viajes cuyo origen y destino están fuera del centro (almendra) de Madrid (viajes entre coronas).



Si siguiendo con el análisis de otros indicadores, en la Figura 5.12, se muestra el comportamiento de las emisiones totales de gases de efecto invernadero por pasajero-km, por cada escenario óptimo hallado y por cada una de los dos tipos de evaluación utilizadas.

Se observa en este caso, que al igual que en los resultados globales, los escenarios donde se involucran medidas de TP son los que presentan los mejores resultados, aunque en la evaluación MCA se presenta un mejoramiento acelerado de este indicador y después tiende a empeorar. Esto se debe principalmente al mayor aumento de la oferta de servicios en proporción al crecimiento de pasajeros-km, lo que hace que el TP produzca más emisiones de

este tipo. En estos escenarios las emisiones producidas por los coches tienden a disminuir con respecto al año base.

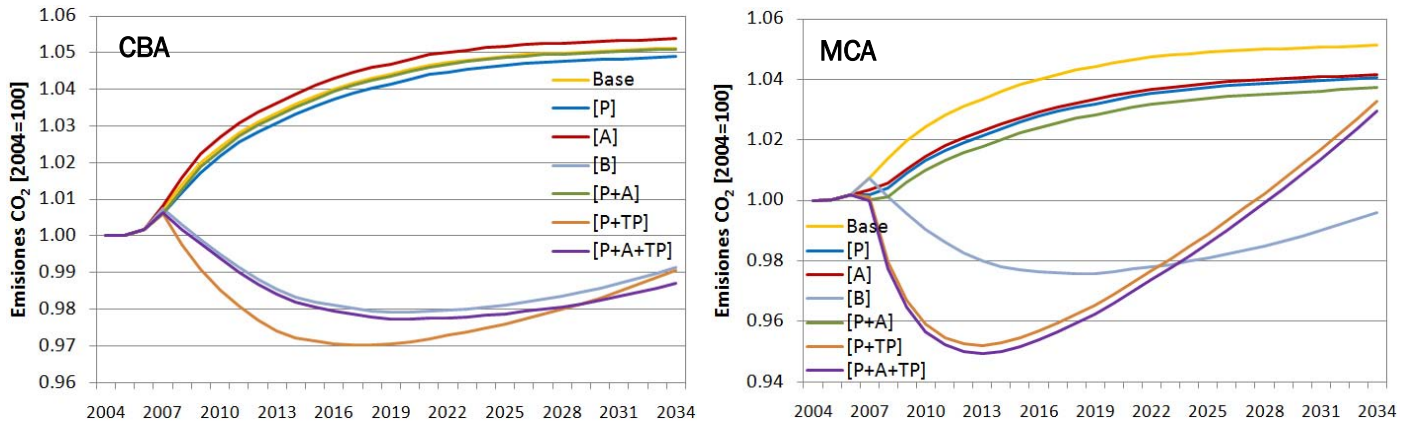


Figura 5.12 Emisiones de CO₂

Por otro lado, el escenario con mayores emisiones en la evaluación CBA es el [A], ya que en este caso es donde más se utiliza el coche. Otro elemento a tener en cuenta en el aumento de las emisiones es que la composición de la flota vehicular se mantuvo básicamente conformada por vehículos que utilizan carburantes fósiles, tal como se muestra en la Figura 7.7 del Capítulo 7 y tampoco se tuvo en cuenta la eficiencia de la mejora de la tecnología en el TP (cuestiones a mejorar). Un elemento interesante puede ser cambiar las proyecciones de dicha flota e introducir vehículos limpios (híbridos y eléctricos) en proporciones importantes para poder analizar su impacto sobre las emisiones a largo plazo.

Siguiendo con las emisiones, en la Figura 5.13 se observa el resultado para las emisiones de contaminantes locales (NOx y material particulado). Al igual que en la emisiones de CO₂, los mejores escenarios son los que incluyen medidas de TP, debido a las mismas razones explicadas anteriormente, aunque en este caso, no se presentan reducciones sino aumentos menores que en los otros escenarios. Sin embargo, el aumento de este tipo de contaminantes es mucho más importante ya que su crecimiento puede llegar casi al 50% con respecto al año base.

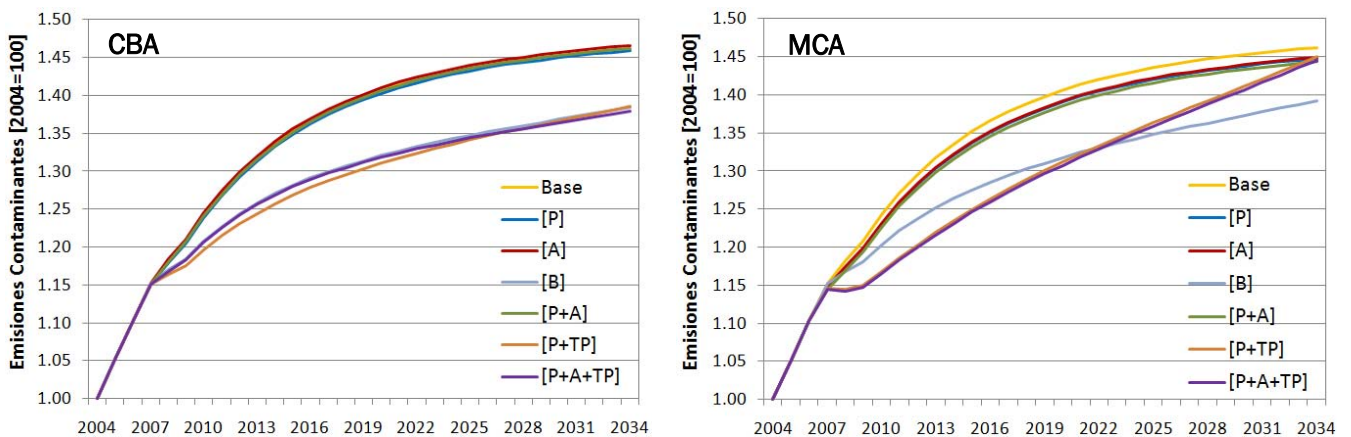


Figura 5.13 Emisión de Contaminantes

En lo referente al aspecto social, la distribución de los costes de transporte según el nivel de ingresos (Figura 5.14) muestra cómo el coeficiente GINI calculado mejora en todos los casos al final del periodo de evaluación en la evaluación MCA, en comparación con el escenario base; recordando que entre más cerca esté el resultado a cero, mejor estarán distribuidos los costes de transportarse de cada familia según su nivel medio de ingresos.

En la evaluación CBA, este indicador tiende a empeorar. Teniendo en cuenta que las tarifas óptimas MCA son mucho más altas que las CBA, estos resultados evidencian que la implementación de tarifas altas (dentro de un rango aceptable) sobre los patrones de movilidad periferia-centro en coche, mejora la equidad, cobrando más a quienes más tienen.

De este resultado se puede deducir que en general, al subir las tarifas para usar el coche en el centro, la parte de la población más sensible a ellas cambiará de modo de transporte y la de mayores ingresos, continuará usando el coche, pero pagando mucho más (casi 8 veces más).

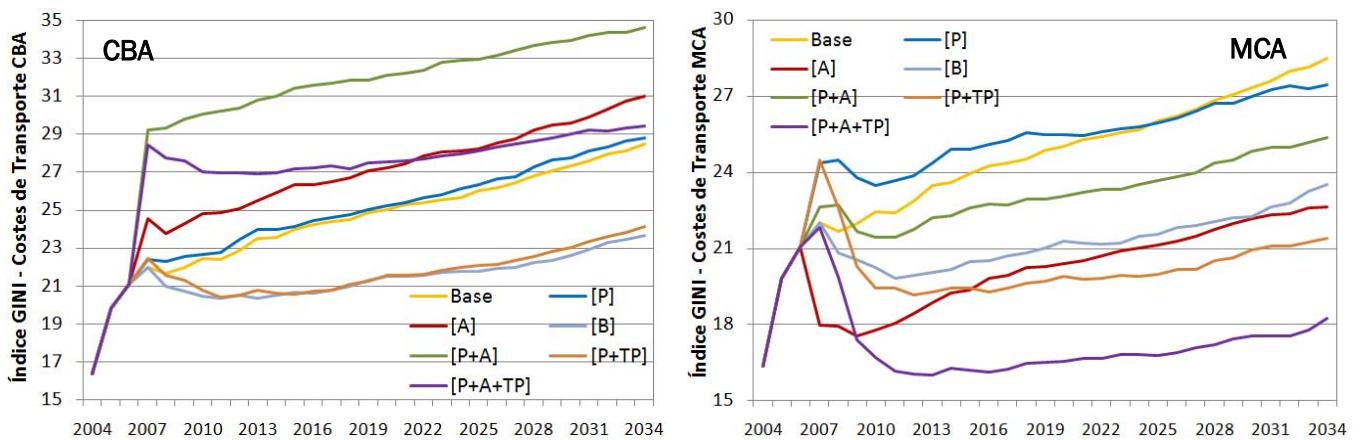


Figura 5.14 Variación del Índice GINI – Costes de Transporte

Continuando en el aspecto social, un indicador del consumo del suelo y de la dispersión de actividades en una zona urbana es la longitud media de los viajes realizados. En la Figura 5.15 se muestra este indicador para los viajes realizados en coche.

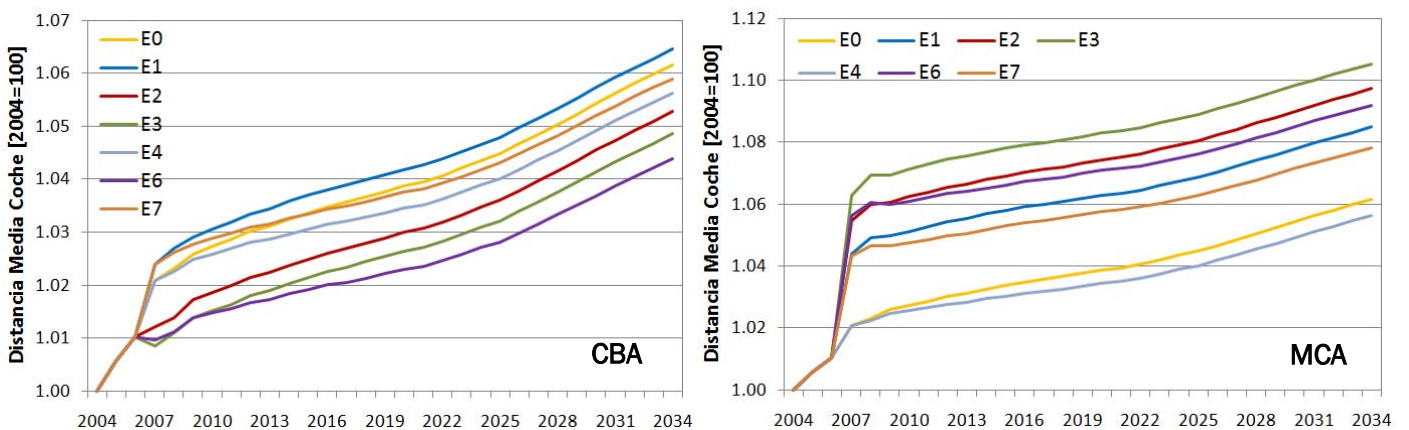


Figura 5.15 Distancia Media de Viaje en Coche

Se observa que independientemente de la evaluación usada, las distancias no aumentan mucho a lo largo del periodo de evaluación (cerca de 11%, en el peor de los casos), pero si muestran una tendencia ascendente en todos los escenarios. Este aumento se hace más evidente en escenarios que restringen el uso del coche en los centros de actividad, logrando con esto una paulatina sustitución de destinos con el consiguiente aumento de las distancias recorridas.

Los resultados de la Figura 5.15 muestran que la estrategia más adecuada para limitar el aumento de este indicador sería la de encontrar la combinación adecuada entre restricciones y estímulos; por ejemplo, comparando los escenarios donde hay medidas de TP; el [P+A+TP] da un mejor resultado ya que rebaja la tasa de aparcamiento en el centro, la cual es un elemento influyente sobre el usuario que decide viajar al y entre el centro en coche, donde las distancias son más cortas. Por el otro lado, el escenario [P+TP] mantiene la tasa de parking inicial y adicionalmente impone un pago por ingresar al centro, genera un cambio modal positivo.

En esta misma línea de resultados, en la Figura 5.16 se muestra el indicador de la distancia media recorrida en el modo *bus*. En este indicador, a diferencia del anterior, las medidas tomadas influyen de forma más evidente sobre este parámetro. Y también a diferencia del coche, se observa que una política que solamente tenga en cuenta medidas de *pricing*, hace que las distancias recorridas sean mayores. Al haber una mayor oferta conjunta de TP, en especial en los viajes radiales y en el centro, este modo se vuelve mucho más atractivo en este tipo de viajes que son más cortos.

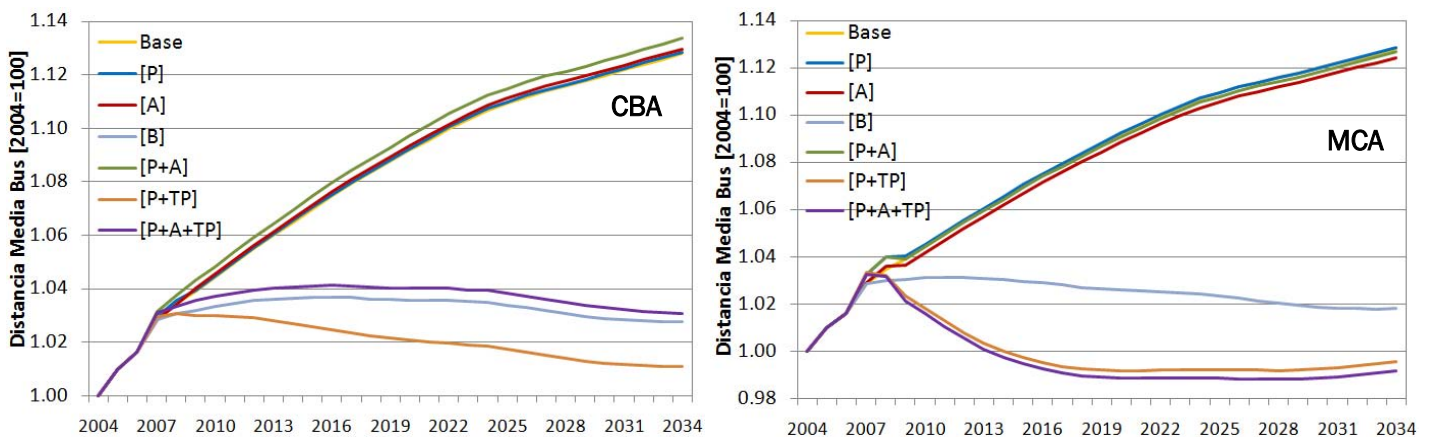


Figura 5.16 Distancia Media de Viaje en TP

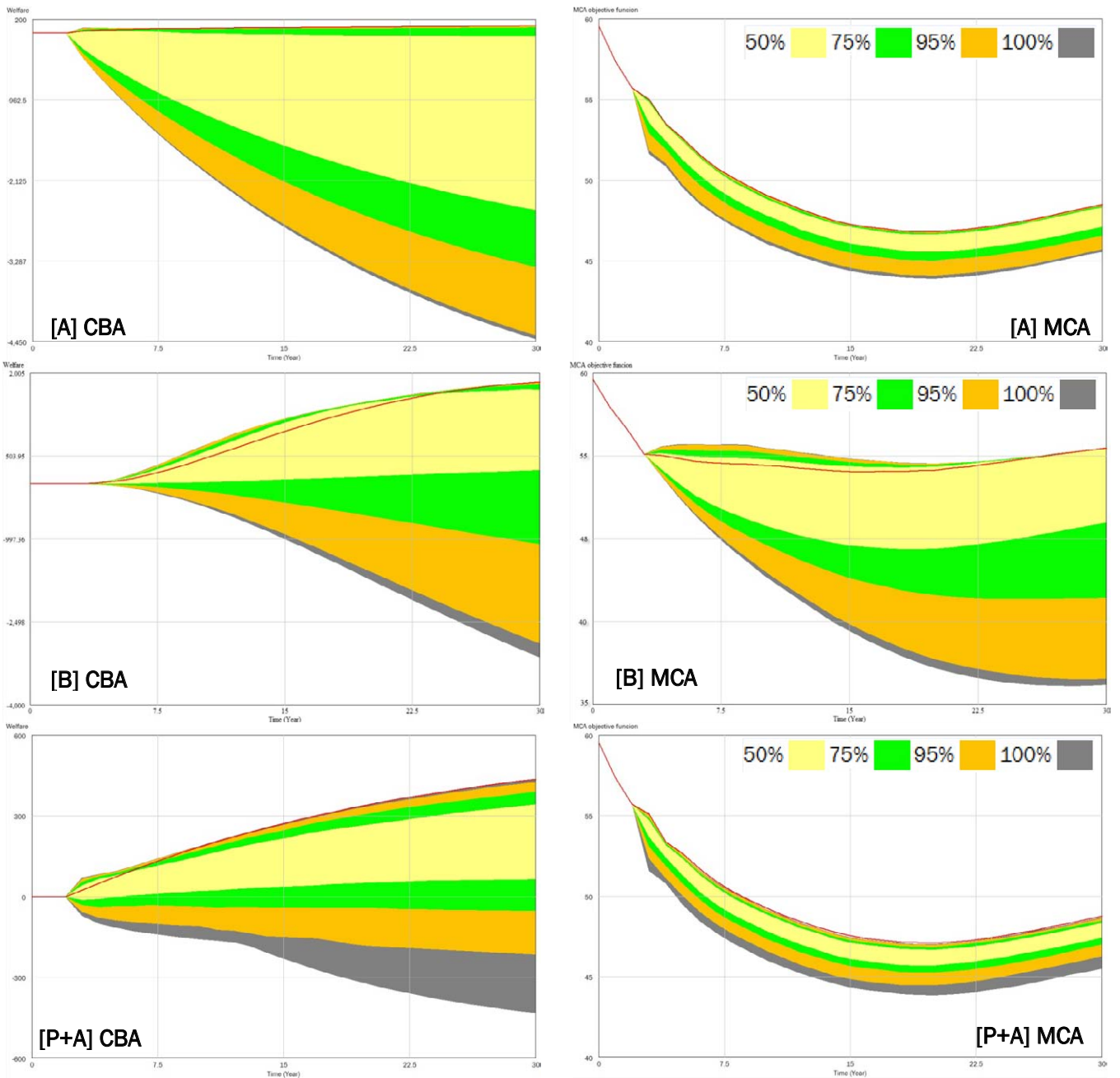
Los viajes transversales, generalmente son viajes más largos y en donde la red de transporte público es mucho menos competitiva que el coche. En este entorno, el aumento de la oferta no influye mucho sobre la decisión de cambiar de modo de transporte, aunque en las zonas cuya única alternativa al coche es el modo *bus*, este presenta crecimientos importantes.

5.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Adicionalmente a los análisis mostrados en la sección 7.3.7 del Capítulo 7, en la Figura 5.17 se muestran las incertidumbres para cada uno de los restantes escenarios bajo los dos tipos de evaluación utilizados. En los escenarios MCA se observa una menor sensibilidad respecto a los valores óptimos hallados, notando que los percentiles tienden a permanecer más o menos constantes solamente cuando intervienen medidas de *pricing*, mientras que cuando se combinan otro tipo de medidas, los percentiles tienden a mostrar variaciones a lo largo del

tiempo. Esto se debe a que la interacción dentro del modelo de las variables que se ven afectadas por la imposición de costes adicionales o aumento de frecuencias de TP, es mucho más compleja dando origen a combinaciones que crean comportamientos diferentes.

Analizando los límites de los resultados obtenidos, al variar las tarifas sin tener herramientas suficientes que proporcionen ayudas y criterios coherentes de decisión, existe una gran probabilidad que se presenten resultados negativos. En estos casos sería recomendable hacer un estudio más detallado de la incertidumbre de cada medida, ya que hay una gran variedad de posibles resultados, no todos buenos. Esto significa que no cualquier combinación, entre tantas disponibles, puede llevar a mejores desempeños de la función objetivo MCA, lo que hace que el método de optimización sea de gran utilidad.



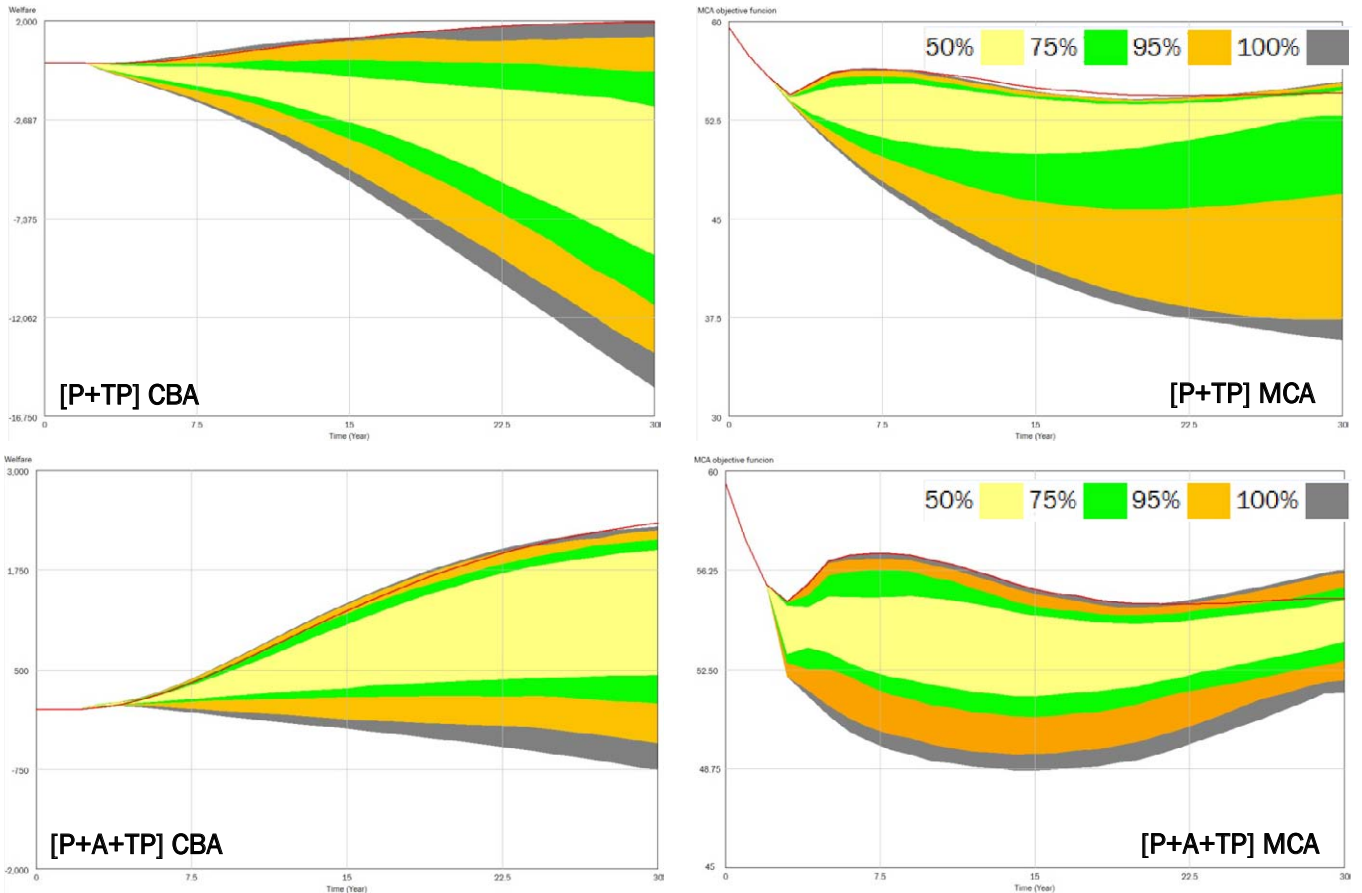


Figura 5.17 Sensibilidad Otros Escenarios

Como se había mencionado, es fácil ver como la función CBA es altamente sensible a la variación de la tarifa de aparcamiento ([A]). En este caso, al utilizar un rango de valores entre 0 y 10 €, se obtiene un rango del VAN entre 100 y -4.500 M€, entendiéndose el gran potencial que tendría esta medida para regular el sistema de transporte de Madrid. Esto significa que una tarifa alta no necesariamente se traduce en mayores ingresos, ya que los usuarios del coche son altamente sensibles a ella.

En este mismo caso, pero bajo la función MCA, se tiene un resultado parecido aunque con variaciones menores. La función MCA es mucho más sensible a la tarifa de cobro por aparcar que a la del peaje urbano, principalmente porque cubre a un número mayor de usuarios y es aplicada en una zona donde el transporte público es una opción atractiva y las distancias de viaje son cortas.

5.6 DISTRIBUCIÓN DE BENEFICIOS

Como se ha visto anteriormente, la metodología permite hacer un análisis por zonas, que aunque como se sabe, es agregado, puede dar lugar a ideas acerca de cómo las diferentes políticas de transporte afectan la zona de estudio según su localización geográfica.

De esta forma, en la Figura 5.18 se muestran los resultados del ingreso mensual medio bruto por hogar para cada zona del estudio, tomados como referencia. Como se puede ver, la población más rica de Madrid se concentra en la parte noroeste de la Comunidad alrededor del corredor de la autovía A-6.

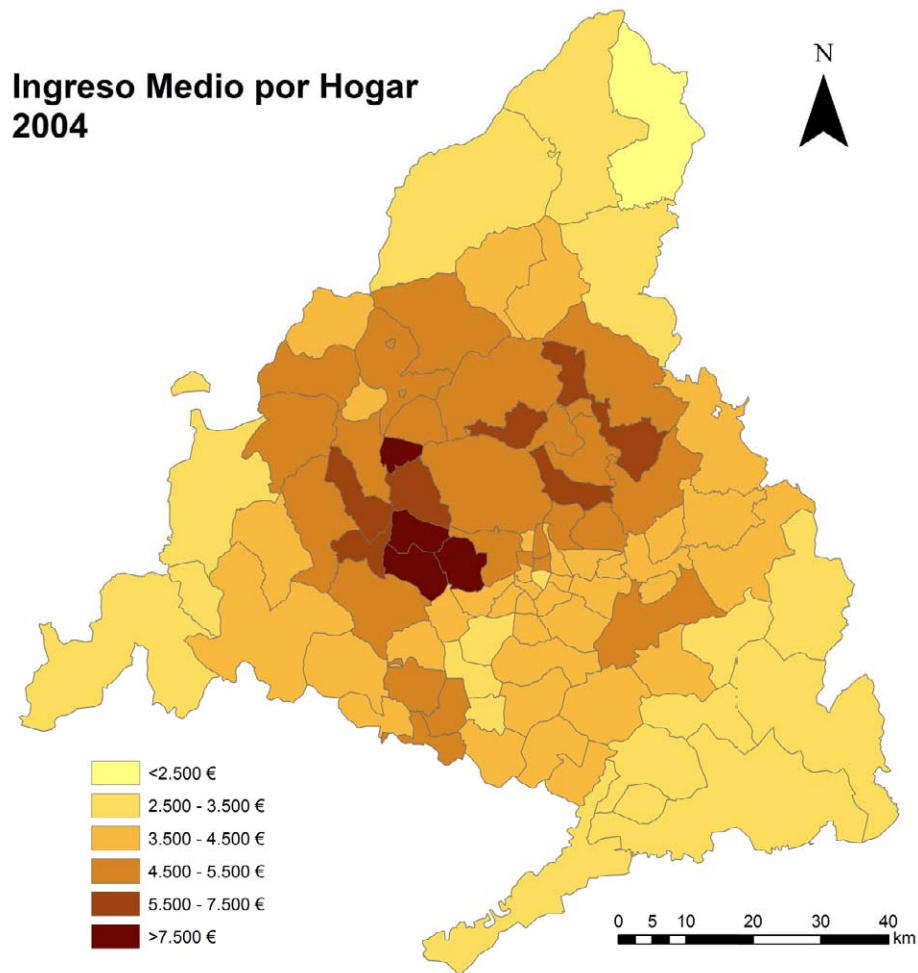
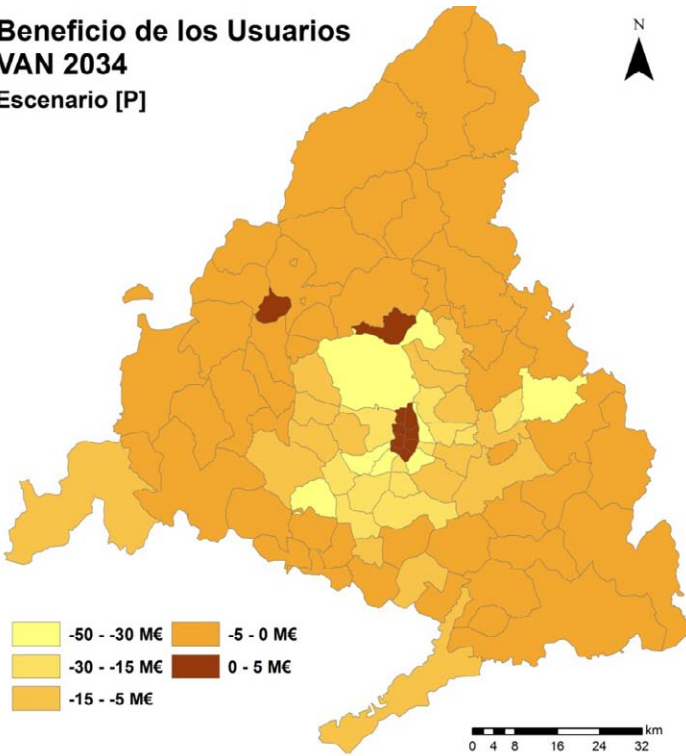


Figura 5.18 Ingreso Medio por Hogar y por Zona

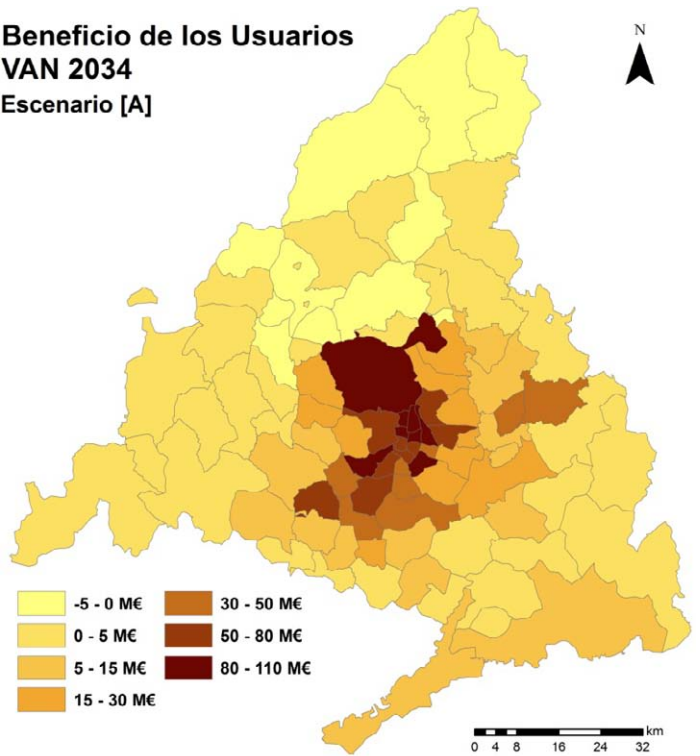
Partiendo de esta información, se pueden relacionar de forma preliminar, las zonas más beneficiadas por cada escenario, así como su nivel de equidad.

De esta manera, en la Figura 5.19 se presentan los resultados por zona de los beneficios obtenidos por los **usuarios** del sistema de transporte debido a la implementación de las diferentes medidas.

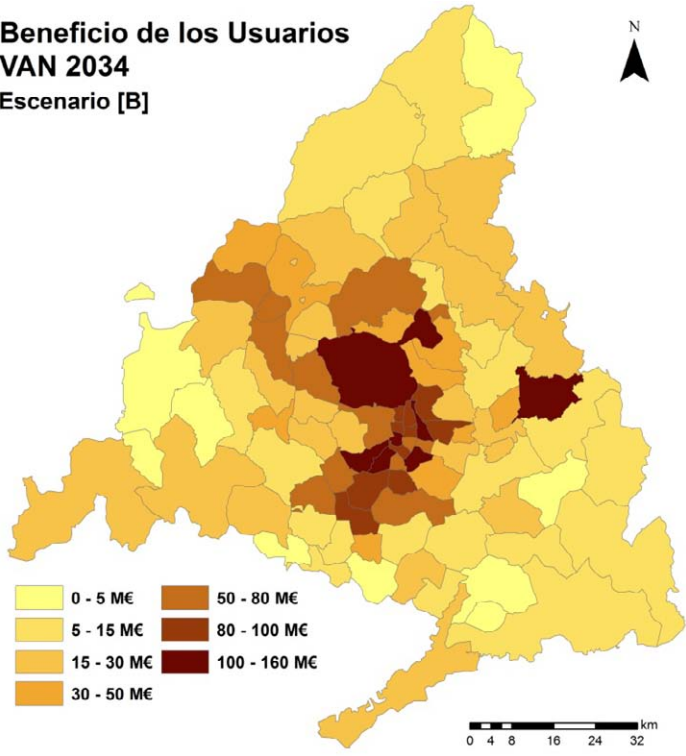
**Beneficio de los Usuarios
VAN 2034
Escenario [P]**



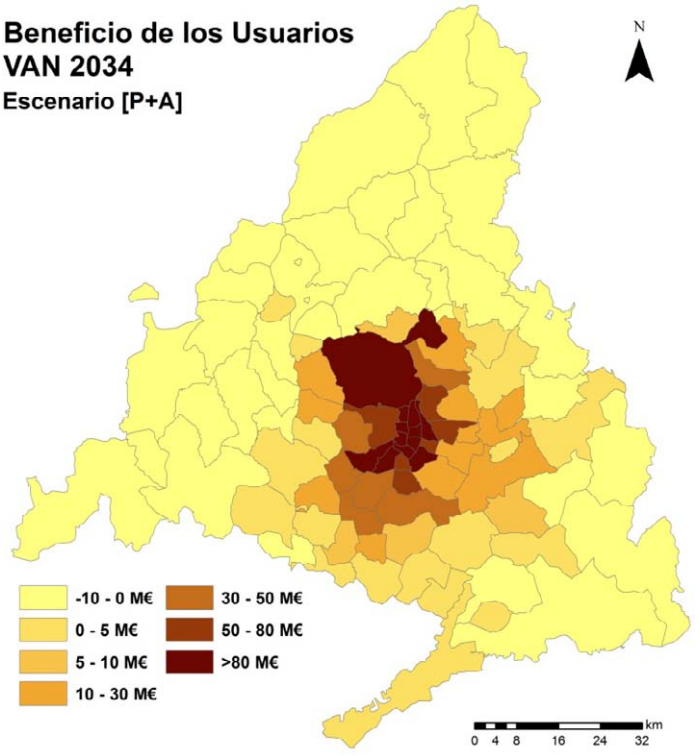
**Beneficio de los Usuarios
VAN 2034
Escenario [A]**



**Beneficio de los Usuarios
VAN 2034
Escenario [B]**



**Beneficio de los Usuarios
VAN 2034
Escenario [P+A]**



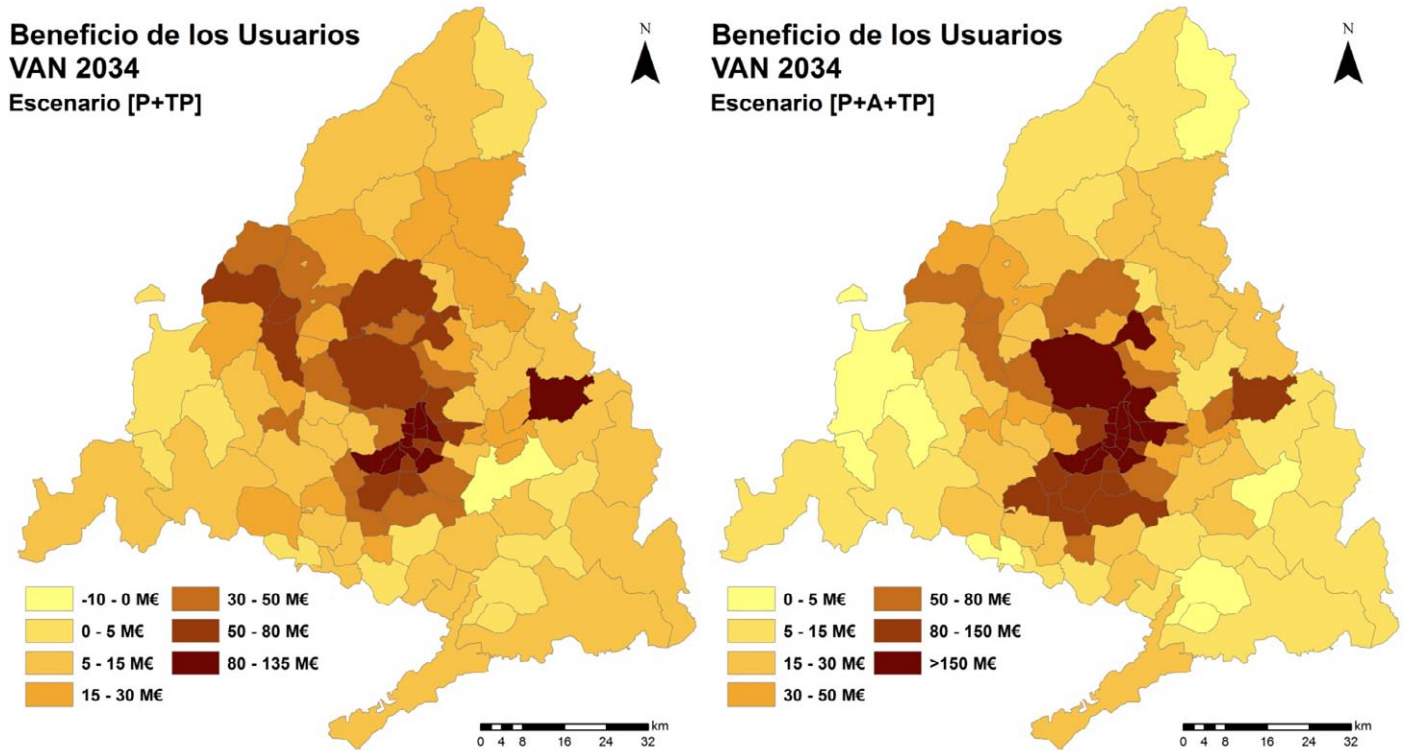
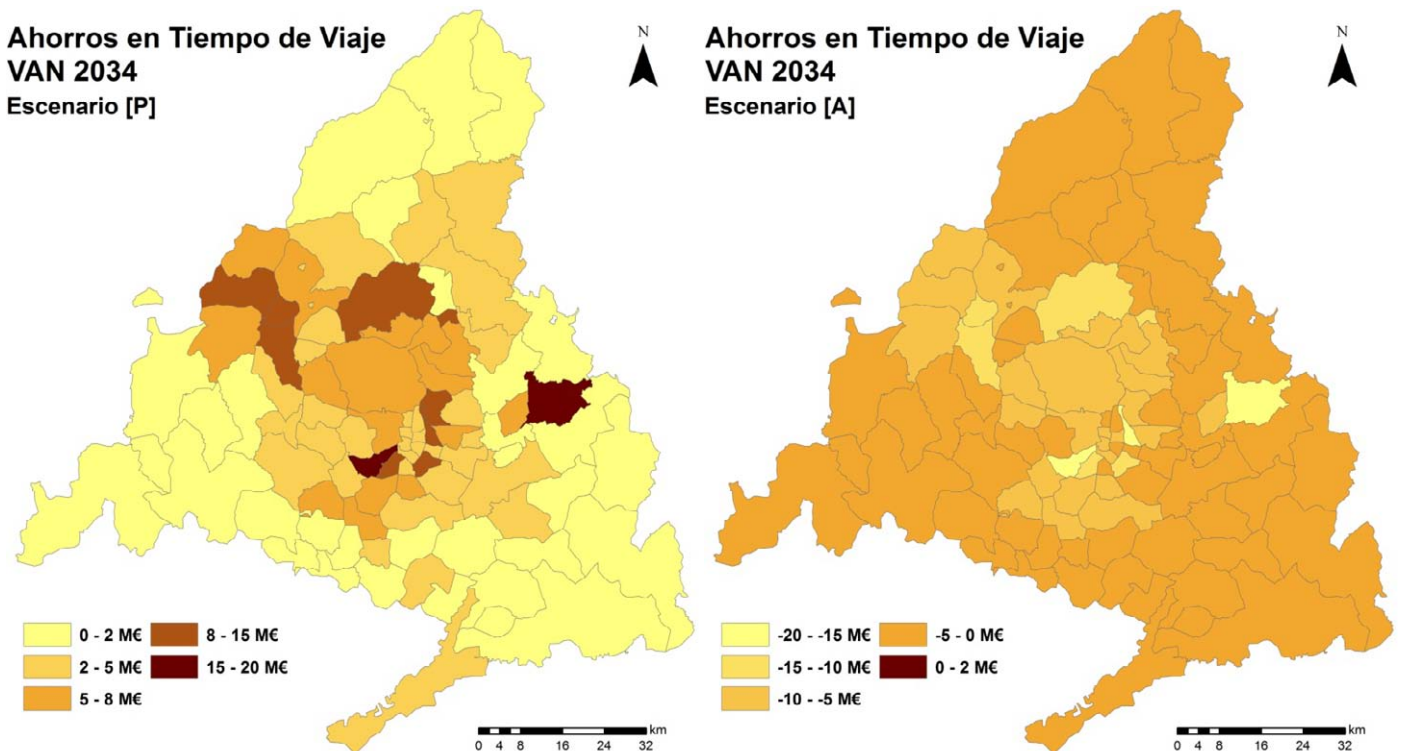


Figura 5.19 Beneficio Usuarios por Zona y Escenario

En la Figura 5.20 se muestra el valor actual neto de los ahorros totales en tiempo de viaje por cada zona y por escenario.



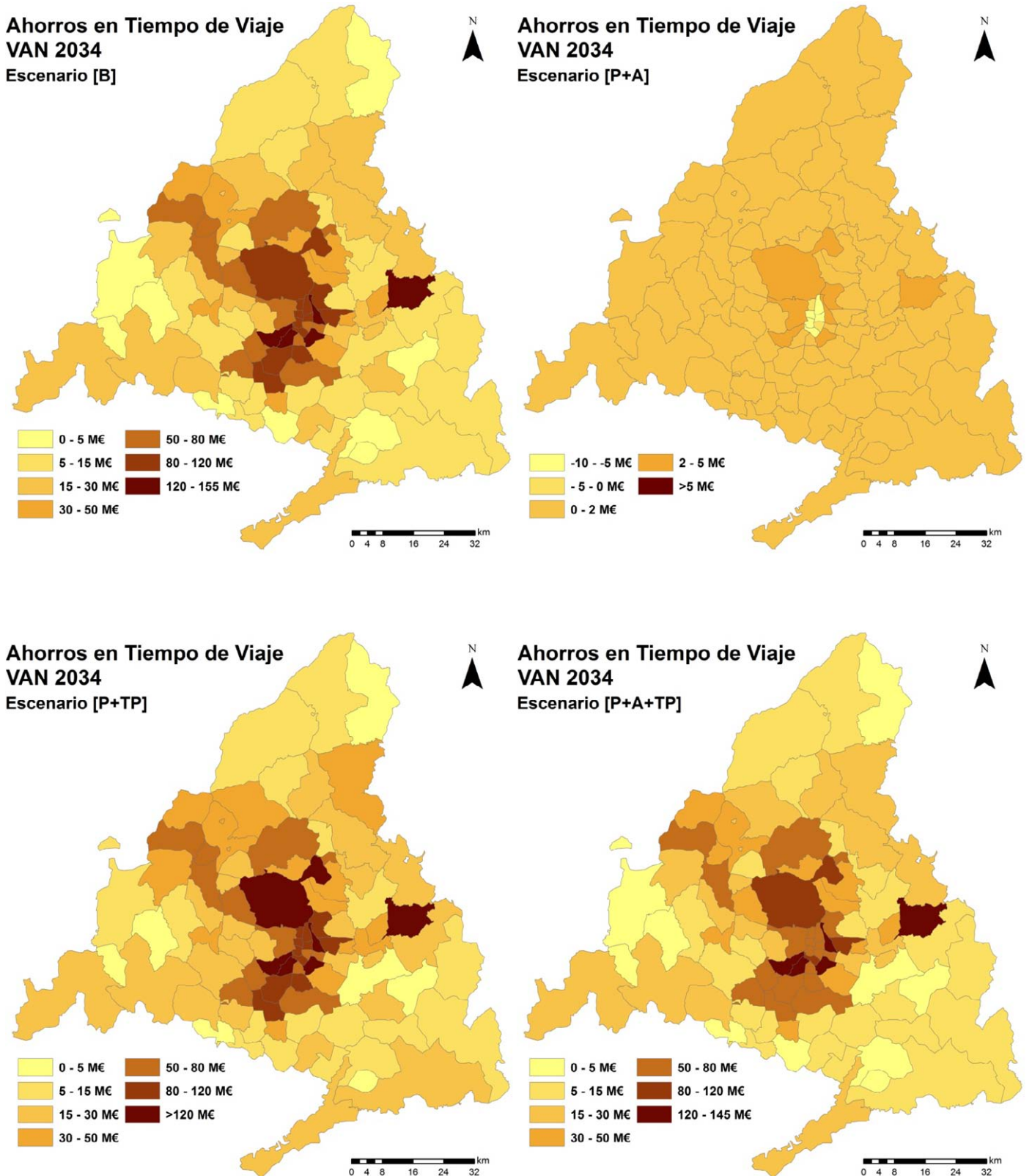
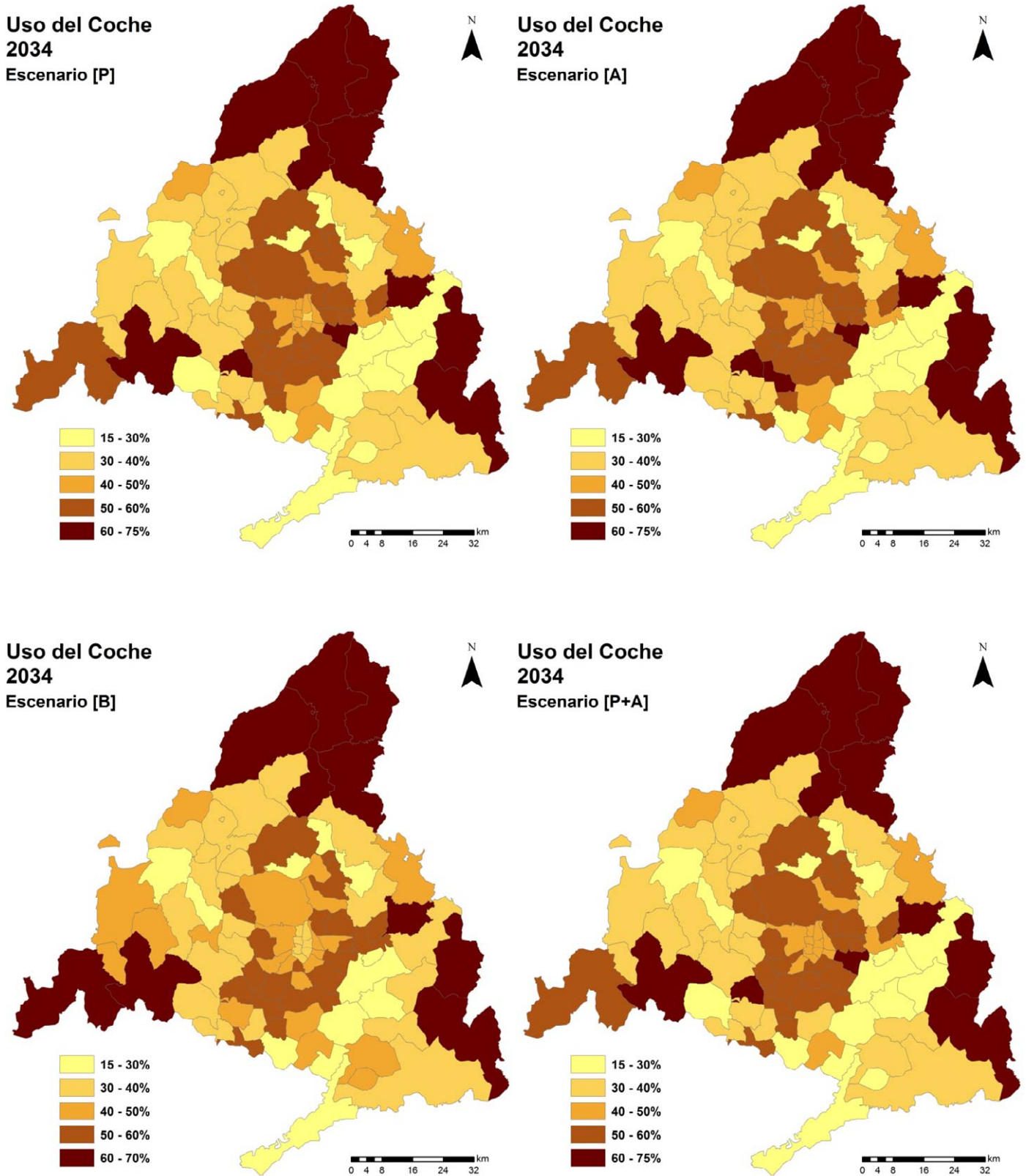


Figura 5.20 Ahorros de Tiempo por Zona y Escenario

De forma complementaria, en la Figura 5.21 y Figura 5.22 se muestra la **distribución modal** (modo prioritario) por cada zona y escenario. Adicionalmente se presenta la distribución modal en el año base.



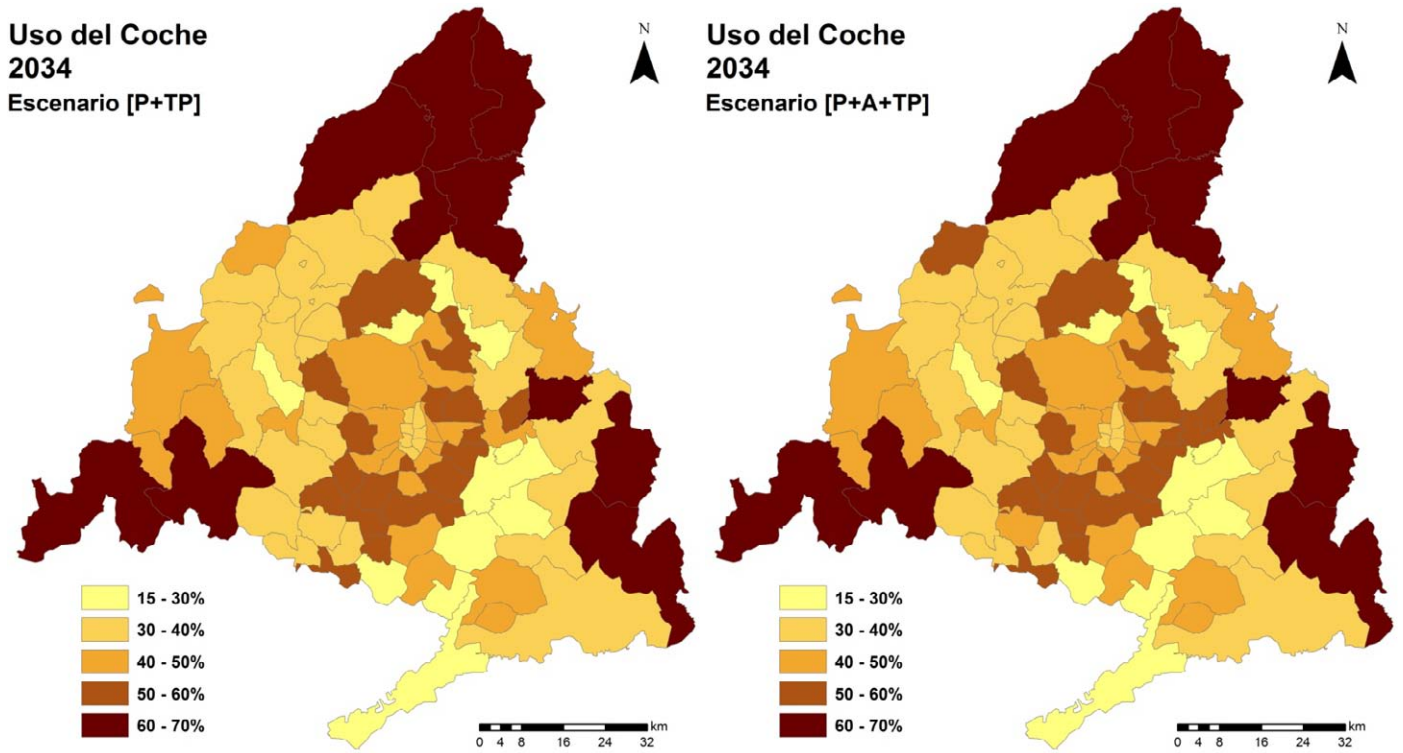
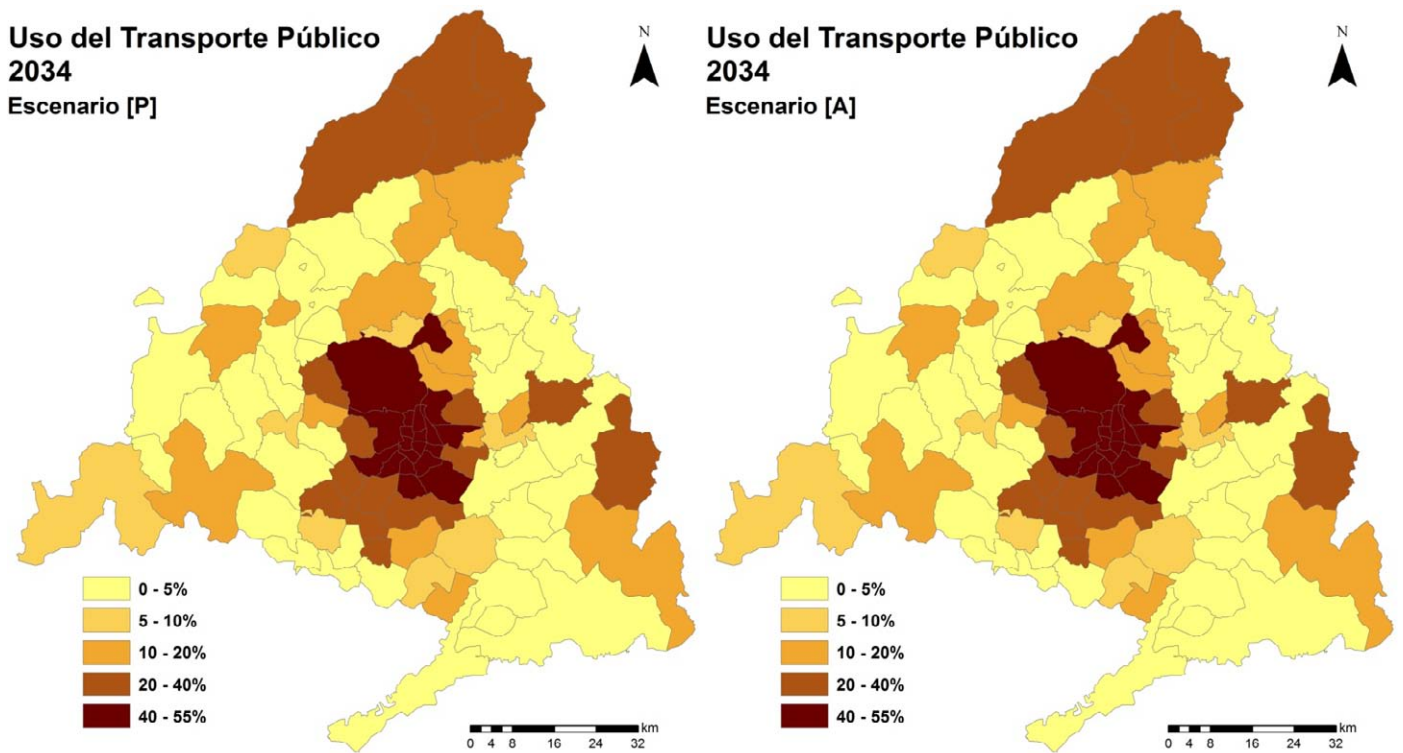
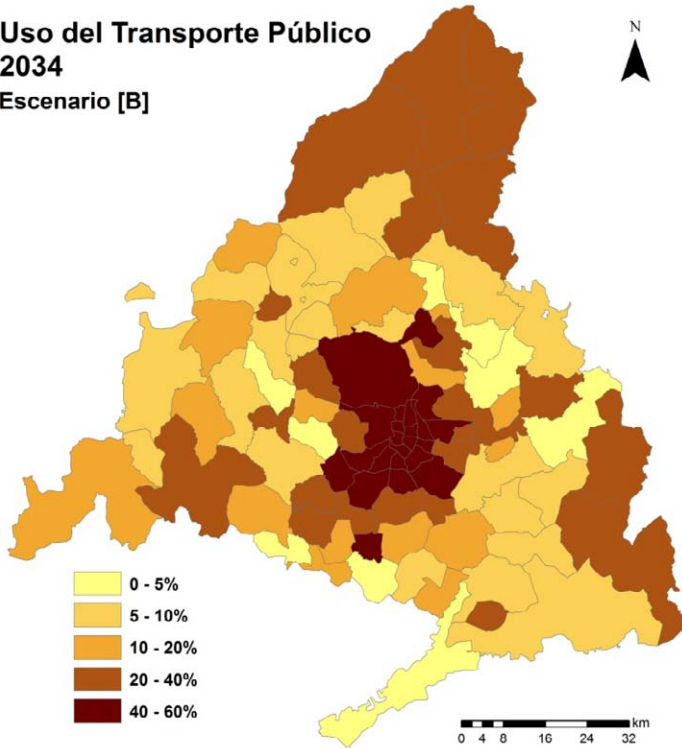


Figura 5.21 Uso del Coche por Escenario

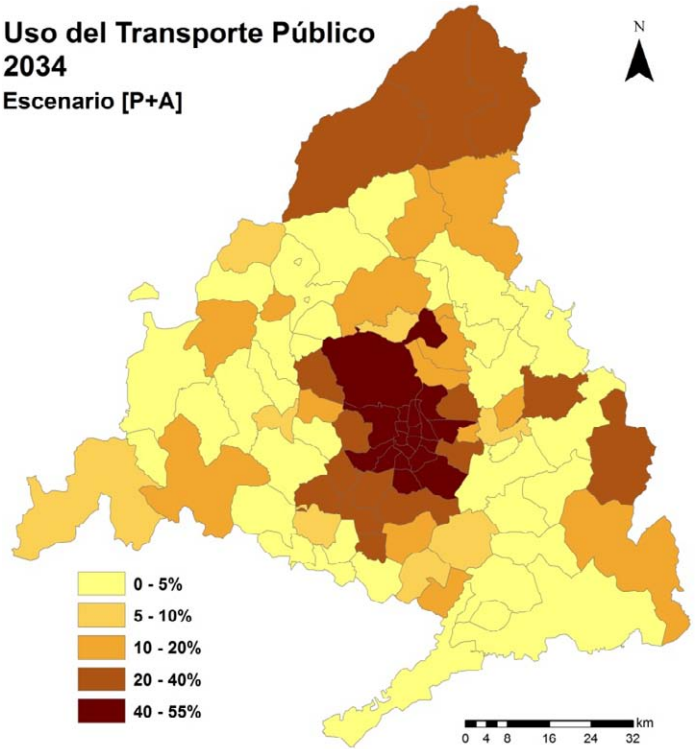
Como se mencionaba, en la Figura 5.22 se muestra el uso del transporte público por origen.



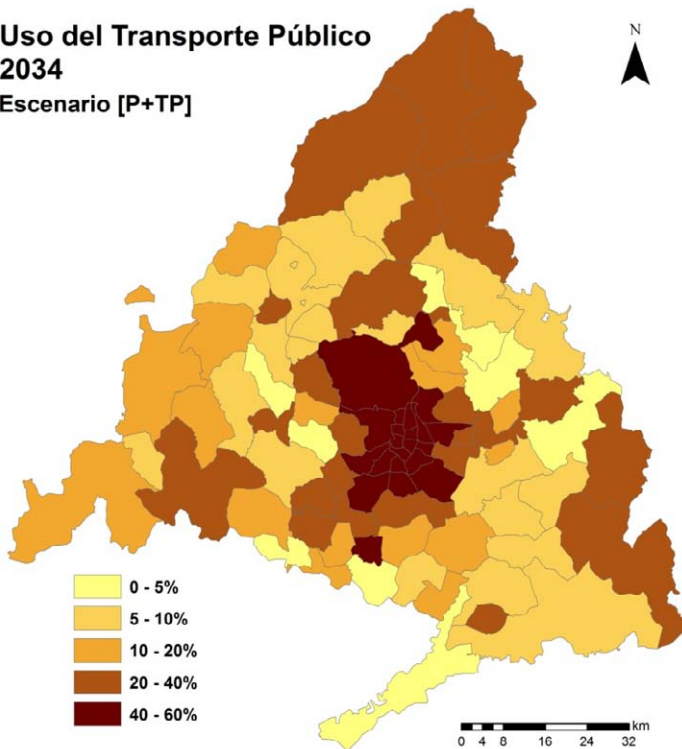
**Uso del Transporte Público
2034
Escenario [B]**



**Uso del Transporte Público
2034
Escenario [P+A]**



**Uso del Transporte Público
2034
Escenario [P+TP]**



**Uso del Transporte Público
2034
Escenario [P+A+TP]**

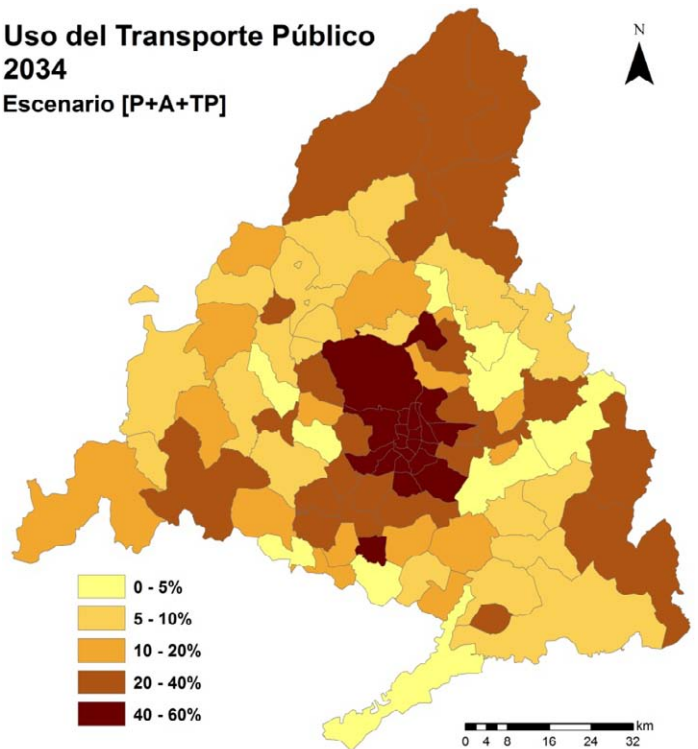
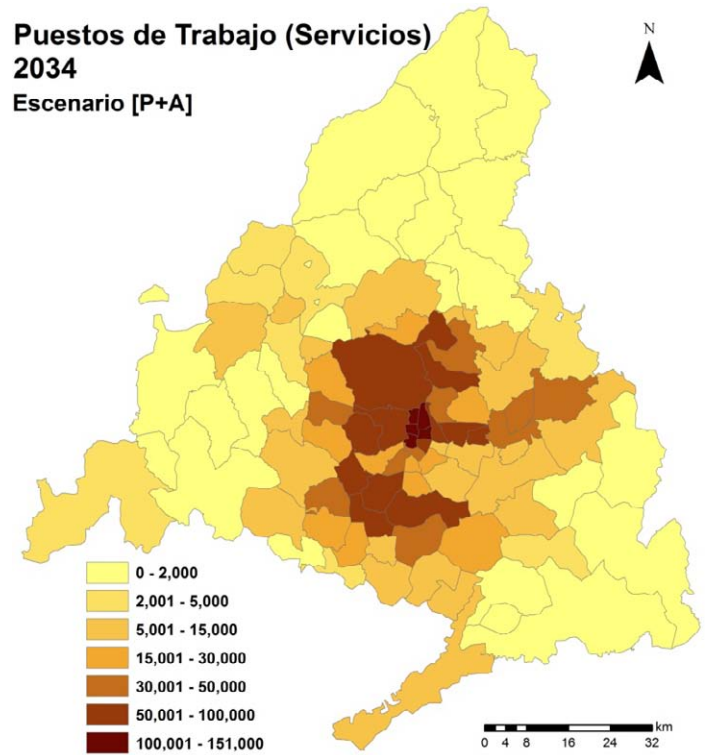
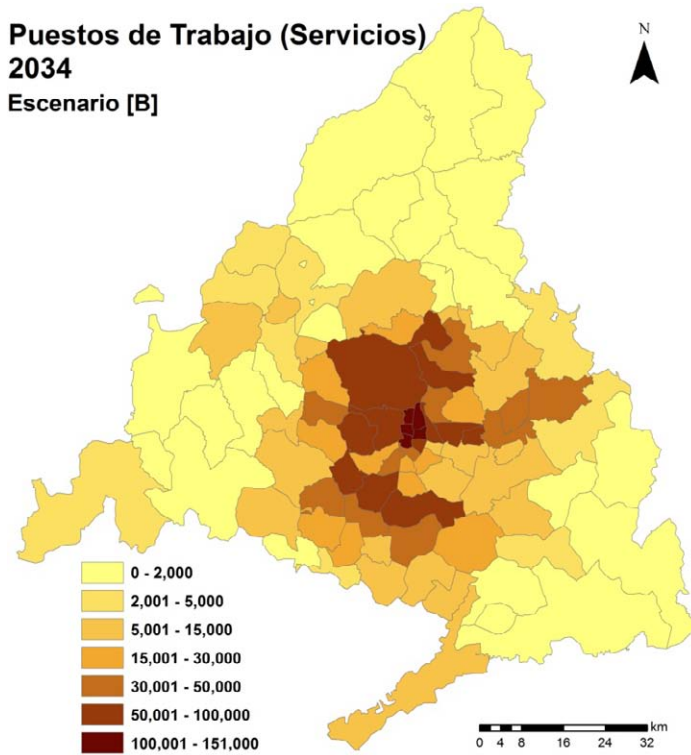
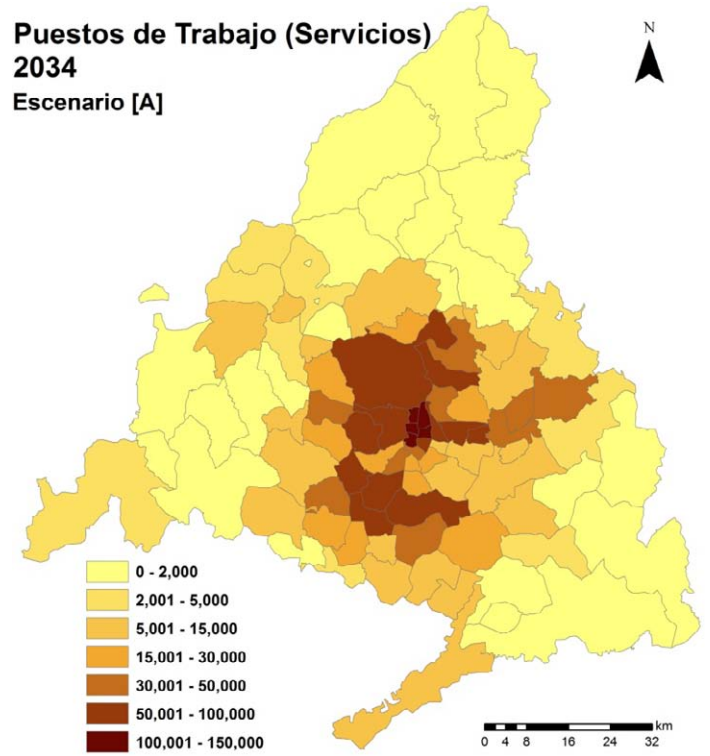
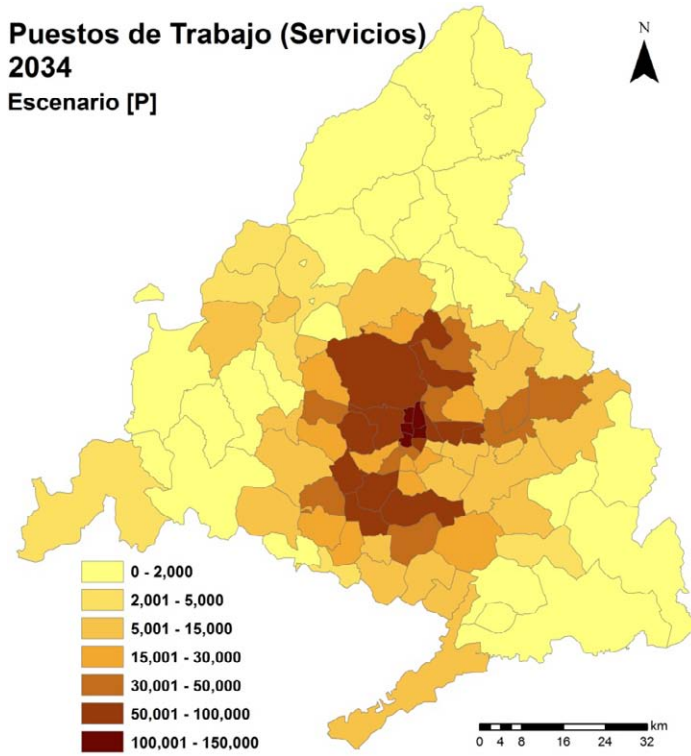


Figura 5.22 Uso del Transporte Público por Escenario

Para finalizar, en la Figura 5.23 se muestra la distribución de los puestos de trabajo (sector servicios) por zona y por escenario.



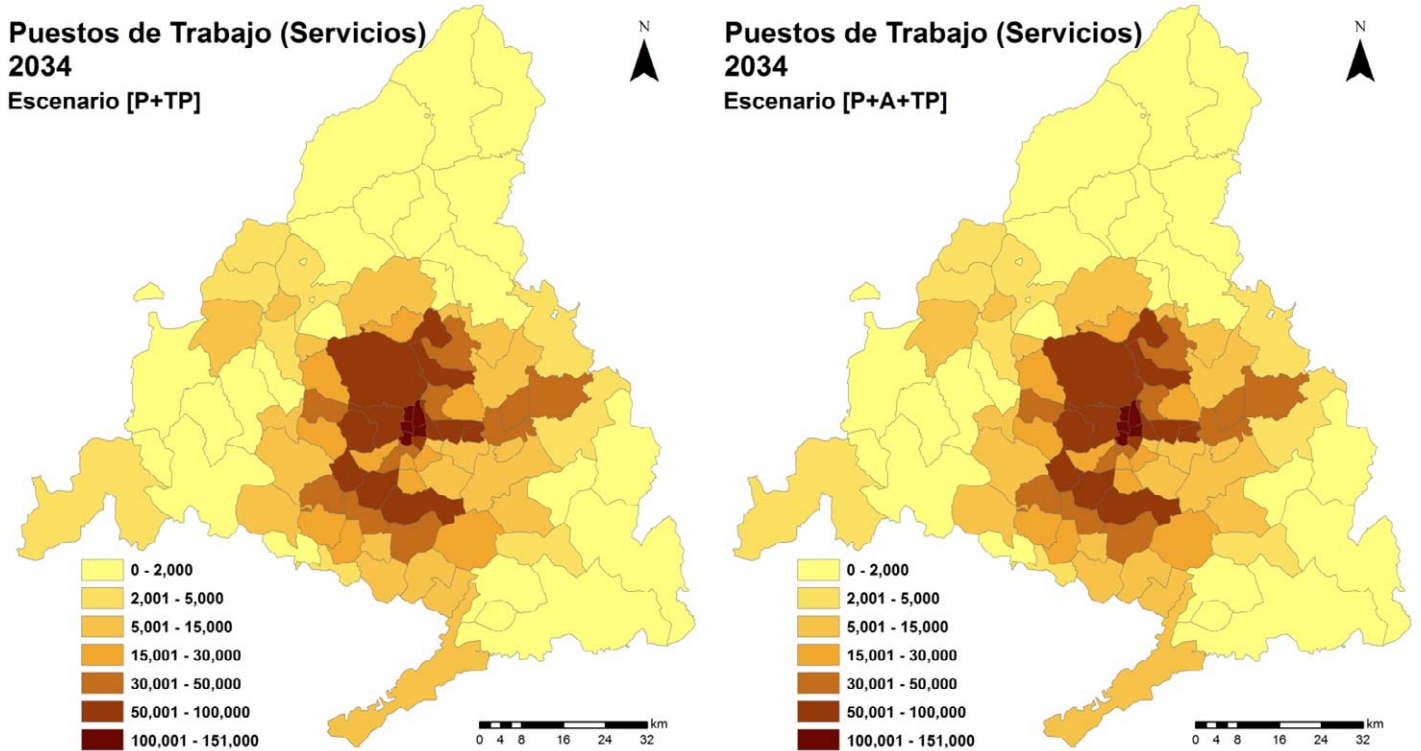
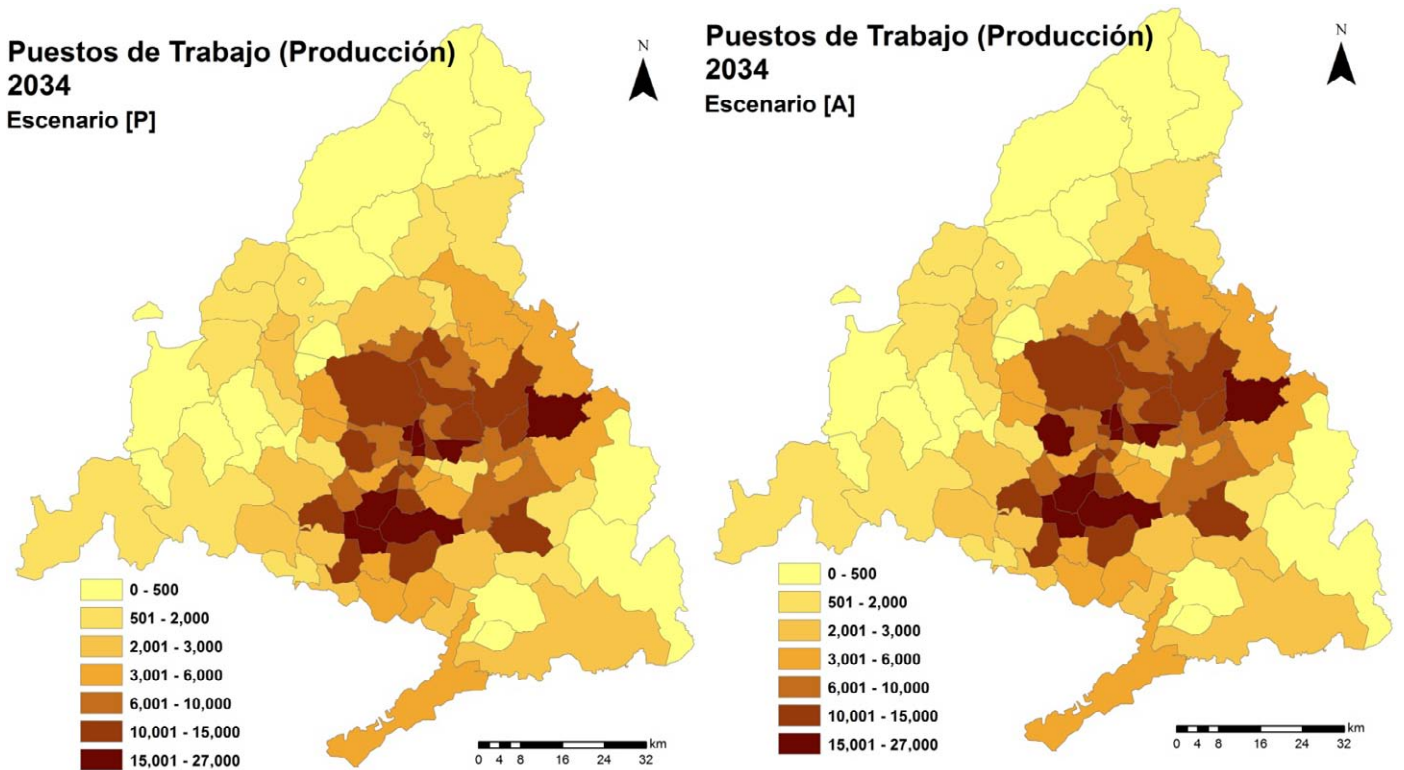


Figura 5.23 Puestos de Trabajo (Servicios) por Zona y por Escenario

Y en la Figura 5.24 se puede ver la distribución de los puestos de trabajo del sector de la producción (industria) también por zona y escenario.



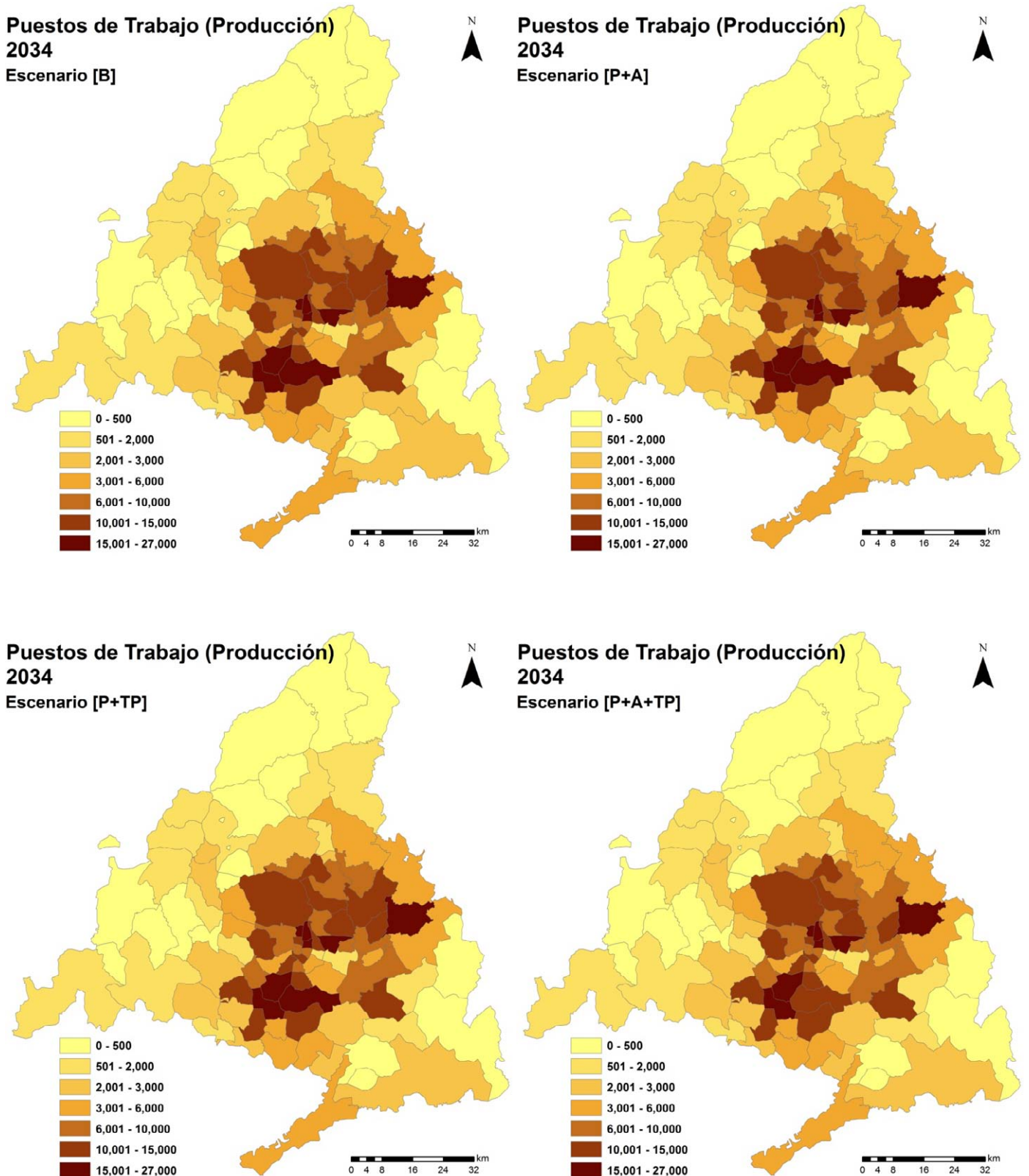


Figura 5.24 Puestos de Trabajo (Producción) por Zona y por Escenario