



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Tesis Doctoral

**MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA EFICACIA ESPACIAL
DE LAS REDES DE TRANSPORTE COLECTIVO
DE INFRAESTRUCTURA FIJA,
ENSAYO DE INDICADORES DE OFERTA**

Realizada por:

Jose Maria Subero Munilla

Director de tesis:

Manuel Herce Vallejo

Barcelona 2009

Indice General

13	CAPÍTULO 1
	OBJETO Y ESTRUCTURA DE LOS TRABAJOS
13	1.1.- Introducción
15	1.2.- Objeto general de los trabajos
18	1.3.- Objetos específicos de investigación de los trabajos
20	1.4.- Objetos metodológicos de los trabajos
21	1.5.- Estructura de los trabajos
25	CAPÍTULO 2
	MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DE LA EFICACIA ESPACIAL DE LAS REDES DE INFRAESTRUCTURAS, ESTADO DEL ARTE
25	2.1.- Introducción
26	2.2.- El estudio comparado como herramienta de análisis de las redes de transporte ferroviario
26	2.2.1.- <i>Introducción</i>
27	2.2.2.- <i>Algunos ejemplos sobre el estudio comparado de ciudades y sus infraestructuras del transporte</i>
33	2.2.3.- <i>Conclusiones extraídas del análisis de los estudios comparados expuestos</i>
33	2.3.- La definición de Indicadores asociados a las redes de infraestructuras como elementos para la comprensión de las mismas
33	2.3.1.- <i>Introducción</i>
34	2.3.2.- <i>Exposición de los Indicadores habitualmente utilizados</i>
49	2.3.3.- <i>Enfoques existentes en el estudio de los Indicadores: demanda-oferta</i>
56	2.3.4.- <i>Conclusiones de interés para el desarrollo de los trabajos extraídas del estudio de los Indicadores asociados a las redes de infraestructuras</i>
57	2.4.- La construcción metodológica en la elaboración de modelos de estudio de las redes de infraestructuras del transporte
57	2.4.1.- <i>Introducción</i>
58	2.4.2.- <i>Análisis de diversas consideraciones relacionadas con la construcción metodológica</i>
64	2.4.3.- <i>Conclusiones de interés para el desarrollo de los trabajos extraídas del estudio de las metodologías de modelización</i>
65	2.5.- Resumen de objetivos y planteamientos
71	CAPÍTULO 3
	ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA LA MODELIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN
71	3.1.- Introducción
72	3.2.- Características asociadas a las redes de infraestructuras ferroviarias consideradas en el desarrollo de los trabajos
72	3.2.1.- <i>Accesibilidad</i>
73	3.2.2.- <i>Cobertura</i>
73	3.2.3.- <i>Fractalidad</i>
74	3.2.4.- <i>Densidad</i>
74	3.2.5.- <i>Otros Indicadores analizados</i>
75	3.3.- Principales momentos de decisión dentro de la elaboración de la metodología de modelización
75	3.3.1.- <i>Elección de los ámbitos de estudio</i>
75	3.3.2.- <i>Definición del área metropolitana</i>
76	3.3.3.- <i>Definición de la red de transporte colectivo de infraestructura fija</i>
76	3.3.4.- <i>Definición de la interacción entre la red de transporte y el ámbito físico del área metropolitana</i>

77	3.3.5.- <i>Determinación de los parámetros de cálculo</i>
77	3.3.6.- <i>Desarrollo de la formulación</i>
77	3.3.7.- <i>Consideraciones adicionales del desarrollo metodológico</i>
81	CAPÍTULO 4
	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES DE OFERTA PLANTEADOS: OBJETIVO, ALCANCE Y DIFICULTADES METODOLÓGICAS
81	4.1.- <i>Introducción</i>
81	4.2.- <i>Criterios fundamentales para la definición de los indicadores</i>
82	4.3.- <i>Indicador de accesibilidad</i>
82	4.3.1.- <i>Exposición de motivos</i>
82	4.3.2.- <i>Definición de accesibilidad</i>
83	4.3.3.- <i>Parámetros a considerar</i>
83	4.3.4.- <i>Formulación del Indicador de Accesibilidad</i>
84	4.3.5.- <i>Dificultades en el cálculo de los parámetros</i>
86	4.3.6.- <i>Criticas al Indicador de Accesibilidad</i>
86	4.4.- <i>Indicador de Cobertura</i>
86	4.4.1.- <i>Exposición de motivos</i>
86	4.4.2.- <i>Definición de cobertura</i>
87	4.4.3.- <i>Formulación del Indicador de Cobertura y parámetros a considerar</i>
88	4.4.4.- <i>Dificultades en el cálculo de los parámetros</i>
88	4.4.5.- <i>Criticas al Indicador de Cobertura</i>
89	4.5.- <i>Indicador de Fractalidad</i>
89	4.5.1.- <i>Exposición de motivos</i>
89	4.5.2.- <i>Definición de fractalidad</i>
89	4.5.3.- <i>Formulación del Indicador de Fractalidad y parámetros a considerar</i>
90	4.5.4.- <i>Dificultades en el cálculo de los parámetros</i>
90	4.5.5.- <i>Criticas al Indicador de Fractalidad</i>
91	4.6.- <i>Indicador de Densidad</i>
91	4.6.1.- <i>Exposición de motivos</i>
91	4.6.2.- <i>Definición de Densidad</i>
91	4.6.3.- <i>Formulación del Indicador de Densidad y parámetros a considerar</i>
91	4.6.4.- <i>Dificultades en el cálculo de los parámetros</i>
92	4.6.5.- <i>Criticas al Indicador de Densidad</i>
92	4.7.- <i>Síntesis de Indicadores</i>
93	CAPÍTULO 5
	DESARROLLO METODOLÓGICO DE LOS TRABAJOS
93	5.1.- <i>Introducción</i>
93	5.2.- <i>Elección de las diferentes ciudades de estudio, obtención de los planos de las áreas metropolitanas y modelización de las áreas de estudio</i>
93	5.2.1.- <i>Elección de las ciudades de estudio</i>
95	5.2.2.- <i>Definición de área metropolitana</i>
96	5.2.3.- <i>Representación del área metropolitana</i>
98	5.3.- <i>Realización de los grafos de las redes de metro y de cercanías</i>
99	5.4.- <i>Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Cobertura de la red</i>
99	5.4.1.- <i>Introducción</i>
99	5.4.2.- <i>Obtención del área de cobertura de las diferentes estaciones de la red</i>
101	5.4.3.- <i>Obtención de las frecuencias de paso de los servicios</i>
102	5.5.- <i>Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Accesibilidad de la red</i>
102	5.5.1.- <i>Introducción</i>

102	5.5.2.- Obtención del tiempo de acceso a cada parada de la red (t_a)
104	5.5.3.- Obtención del tiempo de espera (t_e)
104	5.5.4.- Obtención del tiempo de viaje (t_v)
105	5.5.5.- Obtención del tiempo de transbordo (t_t)
106	5.5.6.- Obtención del tiempo de salida hasta el destino (t_s)
107	5.5.7.- Aplicación del método de cálculo a la red
114	5.6.- Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Fractalidad
114	5.6.1.- Introducción
115	5.6.2.- Determinación de la superficie de estudio en la que se inscriben las estaciones
115	5.6.3.- Determinación de las paradas a estudiar
115	5.6.4.- Introducción de los parámetros en la formulación
117	5.6.5.- Dificultades asociadas al manejo de logaritmos
117	5.7.- Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Densidad
118	5.8.- Formulación propuesta para los Indicadores de Accesibilidad, Cobertura, Fractalidad y Densidad tras la incorporación de las sucesivas simplificaciones introducidas con el objeto de conseguir una metodología adecuada a los fines de los trabajos
118	5.8.1.- Introducción
118	5.8.2.- Indicador de Cobertura
119	5.8.3.- Indicador de Accesibilidad
120	5.8.4.- Indicador de Fractalidad
120	5.8.5.- Indicador de Densidad
123	CAPÍTULO 6
	APLICACIÓN DE LOS INDICADORES PLANTEADOS A LAS CINCO CIUDADES ELEGIDAS
123	6.1.- Introducción
123	6.2.- Barcelona
123	6.2.1.- Definición del Área Metropolitana
124	6.2.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
127	6.2.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
127	6.2.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Barcelona
128	6.3.- Londres
128	6.3.1.- Definición del Área Metropolitana
129	6.3.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
133	6.3.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
134	6.3.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Londres
135	6.4.- Madrid
135	6.4.1.- Definición del Área Metropolitana
135	6.4.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
139	6.4.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
140	6.4.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Madrid
141	6.4.5.- Resultados del área metropolitana de Madrid, desarrollados para la red de transporte colectivo de infraestructura guiada completa
141	6.5.- Milán
141	6.5.1.- Definición del Área Metropolitana
142	6.5.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
145	6.5.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija
146	6.5.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Milán
147	6.6.- París

147	6.6.1.- <i>Definición del Área Metropolitana</i>
148	6.6.2.- <i>Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija</i>
152	6.6.3.- <i>Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija</i>
152	6.6.4.- <i>Presentación de Resultados del área metropolitana de París</i>
153	6.7.- <i>Otros resultados</i>
157	CAPÍTULO 7
	ENSAYOS REALIZADOS SOBRE LOS INDICADORES DE OFERTA
157	7.1.- <i>Introducción</i>
158	7.2.- <i>Exposición de resultados</i>
159	7.3.- <i>Relación entre los tiempos de viaje del operador y los tiempos de viaje de elaboración propia</i>
159	7.3.1.- <i>Introducción</i>
159	7.3.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
161	7.3.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abierta</i>
161	7.4.- <i>Indicadores reducidos e indicadores completos</i>
161	7.4.1.- <i>Introducción</i>
161	7.4.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
163	7.4.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
163	7.5.- <i>Delimitación del ámbito de trabajo, especialidades del caso de Barcelona</i>
163	7.5.1.- <i>Introducción</i>
163	7.5.2.- <i>Proceso seguido en la delimitación</i>
165	7.5.3.- <i>Especificidad del caso de Barcelona</i>
167	7.5.4.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
167	7.6.- <i>Correlación entre los indicadores similares obtenidos</i>
167	7.6.1.- <i>Introducción</i>
168	7.6.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
170	7.6.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
171	7.7.- <i>Relación entre los indicadores calculados</i>
171	7.7.1.- <i>Introducción</i>
171	7.7.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
174	7.7.3.- <i>Consideraciones asociadas al caso especial de Barcelona</i>
175	7.7.4.- <i>Primeras conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
175	7.8.- <i>Interpretación teórica de la relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad y conclusiones que se extraen de dicha relación</i>
175	7.8.1.- <i>Introducción</i>
176	7.8.2.- <i>Interpretación de la relación encontrada entre los Indicadores de Fractalidad y Densidad</i>
176	7.9.- <i>Interpretación de la relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad y conclusiones que se extraen de dicha relación</i>
176	7.9.1.- <i>Introducción</i>
176	7.9.2.- <i>Interpretación de la relación encontrada</i>
179	7.9.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
180	7.10.- <i>Nuevas consideraciones sobre la interrelación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Fractalidad</i>
180	7.10.1.- <i>Introducción</i>
181	7.10.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
183	7.10.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
183	7.11.- <i>Relaciones entre los indicadores de oferta y la carga real transportada por las redes</i>
183	7.11.1.- <i>Introducción</i>
183	7.11.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
185	7.11.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>

186	7.12.- Relación entre los indicadores de oferta y la inversión relativa en modos de transporte colectivo guiado
186	7.12.1.- <i>Introducción</i>
186	7.12.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
192	7.12.2.3.- <i>Integración de las conclusiones extraídas del análisis de los distintos indicadores de oferta a través del Indicador de Inversión Relativa y valoración final</i>
192	7.13.- Estudio de la ciudad dispersa a través de los indicadores de oferta desarrollados
192	7.13.1.- <i>Introducción</i>
193	7.13.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
196	7.13.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo</i>
197	7.14.- Ampliación conceptual de la Fractalidad I
197	7.14.1.- <i>Introducción</i>
197	7.14.2.- <i>Disposición de la red según distintos niveles de utilización</i>
202	7.14.3.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo</i>
202	7.15.- Ampliación conceptual de la Fractalidad II
202	7.15.1.- <i>Introducción</i>
202	7.15.2.- <i>Proceso seguido en la elaboración del ensayo</i>
205	7.15.3.- <i>Resultados deducidos del ensayo</i>
207	7.15.4.- <i>Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas</i>
207	7.16.- Resumen de ensayos efectuados
209	CAPÍTULO 8
	APLICACIÓN NUMÉRICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A UN CASO PRÁCTICO
209	8.1.- <i>Introducción</i>
209	8.2.- <i>Definición de la hipotética situación de partida de la ciudad de estudio</i>
211	8.3.- <i>Aplicación de la metodología a la mejora de la carga media de viajeros transportada por la red de transporte público colectivo sobre infraestructura fija</i>
212	8.4.- <i>Aplicación de la metodología al control del grado de dispersión de un área metropolitana</i>
214	8.5.- <i>Aplicación de la metodología a la determinación de los efectos de la implantación de un plan de inversiones en infraestructuras</i>
215	8.6.- <i>Consideraciones finales de la aplicación numérica de la metodología</i>
217	CAPÍTULO 9
	CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL DESARROLLO DE LOS TRABAJOS
217	9.1.- <i>Introducción</i>
218	9.2.- <i>Exposición de las conclusiones asociadas a la concepción de la metodología de modelización</i>
218	9.2.1.- <i>Introducción</i>
218	9.2.2.- <i>Planteamiento del problema de la modelización de los ámbitos de estudio</i>
218	9.2.3.- <i>Elementos críticos en la modelización de los ámbitos y soluciones adoptadas para el desarrollo de la metodología</i>
222	9.2.4.- <i>Resumen de conclusiones sobre el desarrollo de la metodología de trabajo</i>
223	9.3.- <i>Exposición de las conclusiones asociadas a las características de las redes, estudiadas a través de los Indicadores de Oferta desarrollados, y a sus relaciones con la planificación, el territorio y el transporte</i>
223	9.3.1.- <i>Introducción</i>
224	9.3.2.- <i>Primeras conclusiones obtenidas, relaciones encontradas entre los propios Indicadores de Oferta definidos</i>
225	9.3.3.- <i>Relación de los Indicadores de Oferta con el territorio de las áreas metropolitanas</i>
226	9.3.4.- <i>Relación de los Indicadores de Oferta con los parámetros que regulan el funcionamiento del transporte dentro de las redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija</i>
228	9.3.5.- <i>Aplicación de las conclusiones obtenidas a la planificación del territorio y de los servicios de transporte</i>

229	9.4.- Desarrollo conceptual de los elementos de la teoría fractal dentro del territorio cubierto por las redes de transporte colectivo guiado
229	9.4.1.- <i>Introducción</i>
230	9.4.2.- <i>Descripción de la fractalidad dentro de las diferentes partes del trayecto recorridas por los usuarios del transporte colectivo sobre infraestructura fija</i>
230	9.4.3.- <i>Determinación de los diferentes grados de fractalidad de las redes de transporte colectivo guiado</i>
231	9.5.- Consideraciones finales
235	INDICE DE ANEJOS
239	ANEJO 1 PLANOS
263	ANEJO 2 RESULTADOS PARCIALES
291	ANEJO 3 RESUMEN DE REGRESIONES Y FORMULACIONES OBTENIDAS
331	ANEJO 4 MATRICES DE TIEMPOS DE VIAJE DEL ÁREA METROPOLITANA DE MADRID
345	BIBLIOGRAFÍA
345	B.1.- Bibliografía básica de referencia
345	B.2.- Bibliografía consultada
352	B.3.- Páginas web consultadas
355	INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

capítulo 1

OBJETO Y ESTRUCTURA DE LOS TRABAJOS

1.1.- Introducción

La evolución histórica en las formas de vida de las diferentes sociedades ha estado íntimamente ligada a la aparición de nuevos modos de relación entre las mismas. Así, estos fenómenos relativos a la generación de asentamientos o a la organización de las civilizaciones han sido estudiados en numerosas ocasiones y con diversos enfoques. Dentro de los estudios sobre la distribución de los asentamientos, se podría mencionar el trabajo de Christaller¹ (1.933), núcleo de la Teoría de los Lugares Centrales, que ayudó a comprender la lógica de los asentamientos alemanes en un momento concreto del tiempo.

Sin embargo, si bien esta teoría profundizó en el conocimiento de las formas de asentarse de las poblaciones en un escenario concreto de la historia, se hizo necesaria la introducción de la concepción dinámica de las ciudades. De esta forma, investigaciones como las de Raffestin² (1.988), sobre la organización de las civilizaciones según los invariantes territoriales, y las posteriores aportaciones de Magrinya³ (2.002), sobre las etapas de la civilización racional según el distinto predominio de las redes de transporte y de las telecomunicaciones, ya enfocan su análisis sobre aspectos relacionados con la evolución histórica de los paradigmas que configuran las relaciones sociales y, por extensión, en la forma en la que estas se materializan en el territorio.

Grandes tipos de civilización	Tipo de red predominante	Malla	Nodo	Red de circulación	Red de conexión
Civilización tradicionalista	Hidráulica Diligencia Correo tradicional				
Civilización racional 1era etapa	Vapor Ferrocarril Telégrafo Saneamiento Agua				
Civilización racional 2a etapa 1a fase	Electricidad Tranvía				
Civilización racional 2a etapa 2a fase	Automóvil Teléfono				
Civilización racional 3a etapa	Comunicación electrónica Transportes a gran velocidad				
Civilización racional 4a etapa	Informática interactiva Avión				

Figura 1.1, civilización racional según predominio de las redes (f. Magrinya³)

Apoyando los anteriores estudios, que ya hablan de redes y de su importancia en la configuración morfológica del territorio, se encuentran otros ejemplos de autores que enfocan directamente a las redes como definidoras de la organización espacial del territorio. Entre ellos, se pueden comentar los trabajos de Offner⁴ (1.999) sobre generación de redes o los estudios de Dupuy⁵ (1.995) dedicados,

entre otros, a investigar los territorios del automóvil y los ciclos que retroalimentan generación de infraestructura y aumento de demanda.

De esta forma, los anteriores trabajos muestran como existe un territorio de las redes, en el cual la conexión a la red adquiere una importancia fundamental y las líneas de movilidad más relevantes del territorio se configuran como auténticas generadoras de potencialidades económicas y sociales. Así, debido a la importancia que se desprende de la exposición de estos ejemplos y al potencial de estudio existente, **el territorio de las redes se configura como el ámbito de análisis** de los trabajos que se desarrollan.

Cubriendo el campo de las redes un amplio conjunto de elementos, el objeto central de los trabajos consistirá en la medida de la utilidad de los Indicadores utilizados para estudiar la eficacia espacial de las propias redes. Así, concretamente, los trabajos se focalizarán en la medida de la utilidad de las redes de infraestructuras ferroviarias asociadas al transporte metropolitano. La elección del objeto de estudio se establece teniendo en cuenta la escasa literatura que analiza la morfología de las redes de transporte ferroviario, elemento este que será comentado en posteriores capítulos.

Pero, además de lo arriba expuesto con referencia a la existencia de un territorio de las redes, es necesario entender que las redes tienen unas características que les confieren una serie de utilidades, así se puede decir que las redes manifiestan:

- Utilidad social, en cuanto que ofrecen una cobertura a la población y les permiten realizar sus desplazamientos.
- Utilidad territorial, en cuanto que cohesionan y conectan el conjunto de asentamientos de un territorio a través de su propia morfología.
- Utilidad económica, en cuanto que son un vector importante para poner en valor determinados territorios gracias a la accesibilidad que les proporcionan.

Todos estos elementos, que teóricamente se encuentran estudiados de una forma que empieza a tener una cierta importancia, no se encuentran plenamente desarrollados a los efectos de establecer correspondencias concretas entre características de las redes y consecuencias de estas características. Por ello, las metodologías de estudio de las características de las redes se desarrollarán específicamente en el capítulo segundo de los trabajos. Sin embargo, como adelanto, no se debe perder de vista el carácter de la investigación desarrollada hasta el momento. De esta forma, el establecimiento de metodologías basadas en la demanda, la asistematicidad y la fragmentación son elementos comunes y, cuando menos, de dudosa utilidad de muchos de los estudios realizados hasta el momento:

- Metodologías basadas en la demanda, en las que la captación de la demanda preexistente, como fin principal, genera modelos que se retroalimentan e impiden un desarrollo práctico distinto al original. De esta manera, se impide un desarrollo en el que la oferta de redes de características adecuadas permita crear criterios de planificación coherentes con políticas de ocupación sostenible del territorio o de fomento del transporte público.
- Asistematicidad, por la falta del empleo de metodologías refrendadas por la práctica. Las investigaciones realizadas no han conseguido plasmar métodos de estudio válidos para diferentes ámbitos, o cuando menos no han sido capaces de implantar generalizadamente las metodologías desarrolladas en cada uno de esos diferentes ámbitos urbanos de estudio.
- Fragmentación, por el carácter parcial de las investigaciones. Los estudios desarrollados se centran en mayor medida en aspectos específicos, como los referidos a la infraestructura, al transporte, a los usos del suelo, etc. Este carácter fragmentario de los estudios lleva a perder de vista la relación que existe, en general, entre las diferentes disciplinas relacionadas con el territorio y, en concreto, entre las características de las redes de infraestructuras asociadas al transporte y sus consecuencias sobre el territorio. Simplificadamente, se puede decir que se ha profundizado en el proyecto sin pasar antes por el estudio del plan.

Ante estas características de los estudios realizados sobre las redes de transporte, estos trabajos pretenden incorporar nuevos paradigmas que aporten diferentes lecturas en el camino hacia el entendimiento del territorio de las redes. Así, para poder avanzar en este proceso, se van a incorporar los siguientes criterios de partida:

- **Frente a la lógica de la demanda, se va a incorporar el criterio de la oferta** como definidor de las características asociadas a las redes.

- **Frente a la asistematicidad, se va a definir una metodología de cálculo** que sea lo más clara, fiable y extrapolable posible.
- **Frente a la fragmentación, se van a estudiar las redes como elementos únicos**, a través de la definición de Indicadores globales para todo su tamaño.

La falta de procedimientos sistemáticos y reproducidos sobre diferentes ámbitos, el abuso de las metodologías que priman la gestión de la demanda sobre la implantación de una oferta de redes coherente y la falta de indicadores reconocidos por la generalidad de la comunidad investigadora son parte de los elementos que pretenden ser puestos de manifiesto en el segundo capítulo, el cual se dedica a mostrar algunos de los indicadores asociados a las redes y algunas de las metodologías utilizadas en la generación de modelos de estudio de las mismas.

Todo ello conducirá a la **necesidad de identificar indicadores específicos para el estudio de las redes**. Estos indicadores deberán basarse en la propia identidad morfológica de las redes, la cual es la que les confiere determinadas propiedades que tienen que ver con la capacidad de las mismas para captar demanda y que serán expuestas a lo largo de los trabajos desarrollados.

Así, con todos los elementos expuestos, la finalidad principal de este capítulo es la de exponer los objetivos que se pretenden conseguir a lo largo de los trabajos y las directrices fundamentales que se van a seguir en el desarrollo de los mismos:

- La definición de objetivos se convierte en el elemento central de esta primera parte de los trabajos, centrada en la descripción de la realidad existente en el campo del análisis de las redes de infraestructuras. Así, los objetivos fijados se convertirán en el fin último perseguido y, por tanto, en el núcleo definitorio de todos los esfuerzos que se van a realizar a lo largo de este texto.
- Si los objetivos son el fin, las directrices o principios rectores que conducen a esos fines serán el procedimiento de búsqueda de los mismos. Por ello, resulta importante determinar por donde va a transcurrir el recorrido metodológico de los trabajos, ya que el propio desarrollo metodológico se constituye como el principal valedor para la consecución de los objetivos deseados.

De esta forma, en este primer capítulo se hará hincapié en los elementos centrales de los trabajos, dejando para el capítulo segundo, dedicado a la exposición de la historia del arte, la descripción detallada del porqué de las decisiones conceptuales tomadas.

1.2.- Objeto general de los trabajos

A raíz del desarrollo de este capítulo, los trabajos van a tener unos objetivos concretos. De esta forma, la determinación de los mismos marca el punto inicial, puesto que a raíz de su definición se pueden centrar los elementos a manejar, los procedimientos a implementar y las búsquedas a realizar. Además, la delimitación de los objetivos marca un punto final, ya que también se pueden desechar ciertas líneas de investigación posibles.

La definición de objetivos ya viene apuntada por el título que se ha dado a la Tesis: "*Métodos de análisis de la eficacia espacial de las redes de transporte colectivo de infraestructura fija: Ensayo de Indicadores de Oferta*". A través del análisis de los diferentes componentes de este título, y de su conjugación con la bibliografía comentada con detalle en el capítulo segundo, se pueden identificar los objetivos fundamentales de los trabajos.

En primer lugar hay que prestar atención sobre el hecho de que se están intentando identificar **métodos de análisis**. A lo largo del conjunto de la exposición hecha en el capítulo segundo se muestra precisamente esto, métodos de análisis sobre diferentes objetos. Sin embargo, no todos estos métodos de análisis tienen el sustrato común de intentar averiguar los fundamentos de determinados comportamientos verificables físicamente en el mundo real. De esta forma, a través del entendimiento de la existencia de un territorio de las redes, se buscarán métodos de análisis que permitan investigar las características morfológicas de dichas redes y sus consecuencias sobre fenómenos físicos contrastables. Comentado esto, el planteamiento inicial difiere en poco de los principios que han guiado al resto de autores referenciados, en cuanto a la necesidad de buscar métodos de análisis sobre diferentes elementos y fenómenos.

Identificado el elemento a desarrollar, que sería la investigación y construcción de métodos de análisis, el sujeto sobre el que se implementa el estudio serían las **redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija**. El motivo de la elección de este sujeto de estudio está determinado por la capacidad transformadora y la utilidad de las redes de infraestructuras. Este hecho se muestra a lo largo del capítulo segundo, con ejemplos como los de Gatti, Cavuoti y Dell'Olio⁶ (2.002), en su descripción de las variaciones de los hinterlands de Bari asociadas a las modificaciones de la accesibilidad o los de López Pita⁷ (2.001), en sus trabajos sobre las formas de comunicación y de relación social que provocan las nuevas infraestructuras como los trenes de alta velocidad.

En segundo lugar, a este entendimiento de la utilidad de las infraestructuras por si mismas, hay que superponer el enfoque con que se configuran los trabajos, identificando la acumulación histórica de infraestructuras como el elemento conformador de las redes actuales. Bajo esta óptica, el tratamiento de las redes de infraestructuras como elementos fractales, puesto de manifiesto por autores como Genre-Grandpierre⁸ (1.999) o Dupuy (1.991)⁹, ofrece nuevos campos de estudio para los métodos de análisis que se pretenden investigar.

Finalmente, el hecho de centrar la atención sobre las redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija viene determinado por dos razones fundamentales. La primera, es la menor atención que a ellas han demostrado los diferentes autores en comparación con las infraestructuras viarias. La segunda, es el carácter vertebrador del territorio que les otorgan el hecho de que el único punto de interconexión entre la red y el territorio se da a través de las estaciones o paradas. Este segundo elemento es, sin duda, uno de los principales valedores de estos sistemas de transporte como referencia para la planificación de la movilidad en las grandes áreas metropolitanas.

En tercer lugar, dentro del título de los trabajos se incluye el término **eficacia especial**. Con su inclusión se pretende hacer mención a los dos aspectos que se han considerado los objetos fundamentales del análisis. De esta forma, por un lado, el término eficacia se emplea por la búsqueda que se acomete de las características de las redes de infraestructuras férreas que ocasionan ciertos efectos físicos, por ejemplo, sobre el territorio o el transporte.

Así, se pueden mencionar ciertos trabajos que han servido de guía y que han conseguido ligar las redes de infraestructuras con los efectos que inducen, por ejemplo, Herce¹⁰ (1.992), identifica una de las características de las variantes de carreteras, y es que generan diferencias en las plusvalías del suelo de su entorno. Igualmente, Aragón¹¹ (1.975) consigue predecir los efectos de una nueva vía de alta capacidad, que puede servir a los municipios por los que discurre, bien para generar procesos migratorios en los mismos o bien para potenciar su desarrollo, simplemente por la propia traza geométrica de la vía en estudio.

Los anteriores ejemplos, aunque no estén estrictamente asociados a las redes, si que ponen de manifiesto como hay determinados elementos consustanciales a las infraestructuras que generan efectos. Así, la definición de características asociadas a las redes y la comprobación de si las redes, definidas a través de sus características, provocan determinados efectos constantes, será la prueba de la eficacia de dichas redes para generar esa serie de efectos previsibles.

Por otro lado, a la búsqueda de la eficacia de la red se le añade un adjetivo calificativo, que es espacial. Este adjetivo enfoca de forma más concreta sobre qué efectos se van a investigar, que son aquellos que provocan las redes de ferrocarril gracias a su propia configuración morfológica. Así, se ha comprobado a lo largo de la literatura la importancia de la morfología de los elementos en diversos ámbitos, por ejemplo, Christaller¹ (1.933), en su descripción de la Teoría de los lugares centrales, emite ciertas hipótesis meramente geométricas y asociadas a condiciones de contorno para plantear las lógicas de los asentamientos. Igualmente, en los numerosos modelos de cálculo asociados a los métodos de demanda, la geometría de las redes se asocia a condiciones de contorno sobre las que se modeliza el sistema de transporte.

Sin embargo, tal y como se ha mostrado en el párrafo anterior, esta importancia de la forma de la red se suele asociar a condiciones de contorno inmóviles a lo largo del tiempo y carentes de efectos asociados. Desde este trabajo se pretende dar la vuelta a ese enfoque y poner la morfología, o lo que es lo mismo, la eficacia espacial, en el centro del análisis. De esta forma, a través de la lectura dada por el territorio de las redes, se van a observar las redes de infraestructuras férreas como elementos predefinidores de una serie de fenómenos, que ocurren a su alrededor precisamente por su propia configuración espacial.

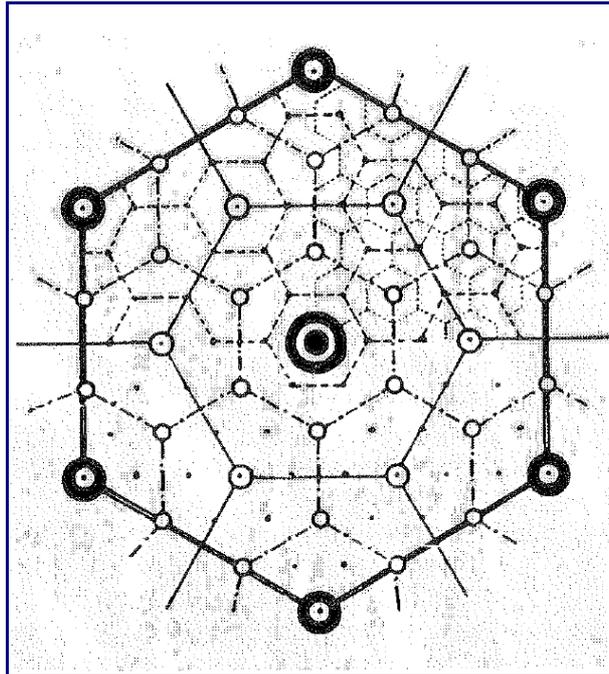


Figura 1.2, modelo jerárquico de organización de asentamientos (f. Christaller¹)

Cabe establecer, que los acercamientos que se han hecho al estudio de la morfología de las redes de ferrocarril han sido relativamente tímidos. Sin embargo, existen una serie de publicaciones como las presentadas por Julià¹² (2.006) o Nicolas Loscos¹³ (2.002) que si permiten captar datos para introducirlos dentro del estudio que se ha realizado.

Si con estos elementos hasta ahora descritos se da contestación a qué se quiere hacer, quién es el sujeto del análisis y cuál es el objeto concreto del análisis, el resto del título de la Tesis muestra cómo se va a realizar el análisis. De esta forma, se introduce un primer término que identifica que el análisis se va a producir mediante **ensayo**. Así, el ensayo es un método de estudio común dentro de la literatura existente, por ejemplo, Persia¹⁴ (2.001) ensaya su metodología sobre 24 ciudades y en cuatro momentos del tiempo y Parcerisa y Rubert de Ventos¹⁵ (2.002) reproducen su procedimiento en 28 ciudades diferentes. Esta manera de evaluar las investigaciones parece suficientemente válida y contrastada como para ser adoptada por el análisis. Por ello, el estudio comparado, asociado al ensayo de las metodologías se configura como el procedimiento adecuado para obtener los objetivos perseguidos.

Finalmente cabe establecer la herramienta que va a servir para conjugar todos los elementos anteriormente expuestos, esta será los **Indicadores de Oferta**. A lo largo del segundo capítulo se abunda en la exposición de los Indicadores de Oferta y se consigue poner en valor las virtudes de unos y advertir las carencias de otros. Además, debido a la importancia en la elección de los mismos, a lo largo de ese capítulo se exponen ampliamente los ejes fundamentales para su elección. Sin embargo, parece adecuado adelantar la importancia que los diferentes autores dan a los indicadores y mencionar como numerosos conceptos han sido estudiados y reinterpretados a lo largo de la literatura. Por ello, desde estos trabajos, se va a hacer especial hincapié en las características de las redes definidas por su **accesibilidad, cobertura, fractalidad y densidad**, siendo estos los principales conceptos de análisis a desarrollar dentro de los trabajos.

Este objetivo central, definido a partir del propio título dado a los trabajos, pretende ser muy concreto, pero su trascripción desde la idea inicial expuesta hasta un conjunto de procedimientos y resultados podría llevar por caminos diferentes. Debido a ello, para concretar la investigación y centrar los ámbitos de estudio, se desarrollan a lo largo de este capítulo una serie de objetivos parciales y directrices con los que se obtendrá una guía de desarrollo del objetivo general perseguido. Esta subdivisión del objetivo central en otros menores que, unidos a través de directrices de actuación, conduzcan hasta el desenlace de los trabajos, se va a producir a través de

la incorporación de aquellos aspectos deducidos por otros autores que añadan elementos relevantes a los objetivos perseguidos.



Figura 1.3, isla de Enmedio, Huelva. Forma fractal natural

(f. Garrido, García¹⁶)

Además de la propia necesidad de concretar objetivos, la definición de los mismos tiene otra consecuencia básica, que es la focalización de los esfuerzos sobre aquellos elementos que son el centro del problema que se quiere estudiar. De esta forma se eliminan finalidades secundarias, que aún no teniendo porqué ser menos interesantes que las aquí investigadas, no van a formar parte del análisis que se pretende efectuar y que, por esta razón, no serán tenidos en consideración dentro de los trabajos.

Finalmente, los objetivos buscados se van a dividir en **dos campos de trabajo fundamentales**, el dedicado a la obtención de metodologías de modelización y el incluido dentro de la búsqueda de las características que definen la morfología de las redes de infraestructuras ferroviarias. Por tanto, existirá una parte de los trabajos centrada en los aspectos procedimentales y otra parte centrada en los aspectos de investigación propiamente dichos. Debido a ello, tanto este capítulo, como el conjunto del análisis en si mismo va a estar dividido constantemente en estos dos grandes bloques de trabajo.

1.3.- Objetos específicos de investigación de los trabajos

Una vez que se ha definido el objetivo global o general de los trabajos, es necesario centrarse en la definición de una serie de objetivos concretos que guíen hacia la consecución de este fin último. Así, si a través de la explicación de los elementos que el propio título de la Tesis lleva asociados se ha conseguido esclarecer el camino por el que van a transcurrir los trabajos, no es menos cierto que es necesario delimitar de una manera más concreta este camino a seguir.

De esta manera, es necesario concretar cuales son los **efectos provocados por las características asociadas a la disposición espacial de las redes**. Así, a través del estudio de los trabajos existentes sobre redes de infraestructuras, se ha podido constatar como son múltiples los efectos económicos, sociales o territoriales que estas generan. Sin embargo, en el reducido espacio que ocupan estos trabajos, no es posible abordar todas las relaciones existentes entre las características morfológicas de las redes y los efectos inducidos por estas.

Por todo lo explicado, en este apartado se van a exponer los tres efectos que las redes de infraestructuras férreas provocan y que se pretenden estudiar a lo largo de los trabajos. De esta forma, las correlaciones entre los Indicadores asociados a las características morfológicas de las redes y los campos aquí expuestos se constituyen como los objetivos finales y concretos a analizar por los trabajos:

1) Las redes de infraestructuras del transporte son elementos físicos que, al igual que las diferentes actividades humanas, se asientan sobre el territorio. Pero las redes de infraestructuras no sólo tienen en el territorio su soporte físico, sino que además su mera incorporación provoca una modificación en las características espaciales del mismo. Este elemento se pone de manifiesto en el capítulo segundo, a través de la argumentación sobre el carácter deformador de las redes de infraestructuras provocado por los gradientes de accesibilidad que estas provocan en el territorio. Igualmente, se mencionan diversos estudios que han relacionado las infraestructuras del transporte y las variaciones en los asentamientos y en su distribución espacial.

Estas modificaciones de las características del territorio producidas por las redes de infraestructuras se unen a la necesidad de valorar el territorio como un bien escaso y no intercambiable. De esta manera, la condición de escaso se traduce en la imposibilidad de continuar con su transformación de manera infinita y en la no disponibilidad del mismo cuando ya existe una actividad sobre él. Por otra parte, la condición de no intercambiable significa que las características de los territorios son diferentes entre sí, es decir, dos territorios nunca serán idénticos en todas sus propiedades.

Todo ello configura una realidad en la que las redes de infraestructuras deben tener la habilidad de potenciar los efectos positivos sobre el territorio, intentando minimizar aquellas externalidades que impliquen una destrucción de potencialidades o eliminación de valores positivos ofrecidos por el recurso natural que el territorio representa.

De esta forma, el estudio de las **características morfológicas de las redes y su correlación con los efectos provocados sobre el territorio** se configura como uno de los objetivos centrales de los trabajos. Este estudio se focalizará en el análisis de la influencia de las redes ferroviarias en el grado de dispersión o de compacidad de las áreas metropolitanas y en el estudio de la eficacia con la que son servidas por el transporte público las diferentes áreas urbanizadas.

2) La mejora de la gestión del transporte es un elemento importante dentro de la búsqueda de modelos de movilidad más sostenibles. La literatura, en general, pone el acento en la mejora de los sistemas del transporte sobre las redes de infraestructuras ya realizadas, en la optimización de los recorridos existentes dentro de las áreas metropolitanas y en la consecución de metodologías de cálculo que permitan incorporar en el propio cálculo mayores detalles de los parámetros intervinientes en el transporte.

Sin embargo, la comparación entre ámbitos puede arrojar pistas sobre la eficiencia de los servicios del transporte atendiendo a la configuración morfológica de las propias redes. De esta forma, poco se conoce sobre la influencia de la morfología de las redes en la propia calidad del servicio de transporte y en la capacidad de captación de pasajeros por parte del mismo.

Todo ello conduce a la necesidad de afrontar el estudio de las **características morfológicas de las redes ferroviarias que provocan efectos sobre la propia gestión del transporte**. Dentro de estos trabajos, este análisis se va a realizar atendiendo al estudio de diferentes aspectos como son, entre otros, los efectos que la distribución espacial de la red provoca sobre los tiempos de viaje, sobre la carga realmente transportada por los servicios del transporte o sobre la cobertura ofrecida por la red de transporte.

3) Finalmente, desde el trabajo se entiende que es un hecho manifiesto la importancia de la planificación de las redes de infraestructuras. A parte de su importante valor económico, los efectos que se han mencionado anteriormente son argumentos suficientes para buscar criterios que posibiliten la maximización de las potencialidades que aparecen tras la inversión en infraestructuras. Este hecho ya es advertido desde numerosos ámbitos de decisión, especialmente desde las políticas de la Unión Europea, mencionadas en el capítulo segundo, y cada vez con mayor hincapié individualmente desde los diferentes países, como los casos expuestos de Holanda o Reino Unido. Así, la correcta planificación de las infraestructuras es la única forma de evitar el mal consumo de recursos dentro de las economías.

De esta forma, dentro de las redes de infraestructuras, el entendimiento de la planificación es la consecuencia directa de la comprensión de las diferentes características que poseen las redes según se ejecuten de una u otra manera. Por tanto, el **establecimiento de criterios para la planificación de las redes de infraestructuras** se configura como un objetivo complementario al principal de los trabajos, ya que de la observación de efectos similares en redes de distintos ámbitos se podrán definir políticas encaminadas a la consecución de objetivos concretos.

La búsqueda de estos criterios de ayuda a la planificación va a precisar de nuevos elementos de ensayo. Así, a parte de basarse en la propia interpretación de los resultados obtenidos por los efectos provocados por las características de las redes de infraestructuras sobre el territorio y sobre el transporte, se van a establecer nuevos ensayos relacionados con la inversión realizada en infraestructuras del transporte y con nuevas consideraciones morfológicas de las redes ferroviarias.

Estos tres objetivos enunciados, aplicados a las redes de infraestructuras ferroviarias, van a ser los puntos clave que van a guiar el desarrollo de los trabajos. De esta forma, enmarcados los fines perseguidos, se puede comenzar a trabajar en la definición de una metodología que conduzca a los mismos de la forma más eficiente posible.

1.4.- Objetos metodológicos de los trabajos

La definición de objetivos asociados a la modelización es un aspecto relevante dentro de los trabajos, ya que la propia creación de una **metodología adecuada a los fines** se ha considerado una condición necesaria para poder afrontar la obtención de resultados con garantías. Esta afirmación se desarrolla pormenorizadamente a lo largo del capítulo segundo.

La interpretación adecuada de la utilidad real de las herramientas metodológicas, que se muestran a lo largo de la literatura estudiada, resulta relevante para definir los patrones que han de guiar la modelización que se afronta en los trabajos. De esta manera, el primer elemento destacable de todos los ejemplos estudiados es la utilidad demostrada por los estudios comparados como herramienta reveladora de patrones comunes en ámbitos diferentes. Esta forma de estudio se adapta de manera adecuada al objetivo general expuesto con anterioridad, especialmente en lo que se refiere a la necesidad de comparar ámbitos maduros para poder encontrar los efectos producidos por las redes de infraestructuras de transporte ferroviario.

Ahora bien, el hecho de utilizar como herramienta un estudio comparado no es sinónimo de consecución de resultados válidos. Así, para poder actuar con una mayor eficacia en el desarrollo metodológico, se han definido una serie de propiedades u objetivos metodológicos que debe poseer la herramienta de tratamiento de la información que se ha elaborado. En concreto, para la mejor adecuación de la metodología a los fines y para que el esfuerzo realizado en la elaboración de la propia metodología no sea desaprovechado, se han tenido en cuenta los siguientes tres objetivos:

1) La metodología de cálculo debe ofrecer confianza en la forma de manipular la información y, para ello, se hace necesario realizar un esfuerzo en la explicación de la misma. Debido a esto, se ha elaborado un capítulo completo dedicado a mostrar los elementos que se han tenido en consideración, las simplificaciones que se han realizado, las herramientas que se han empleado y aquellos aspectos dignos de ser comentados para obtener una mejor comprensión de los trabajos.

Este aspecto se ha considerado básico, puesto que si no se muestra y explica el porqué del procedimiento desarrollado, los resultados obtenidos a través de él pueden ser rebatidos aún siendo plenamente válidos. Esta necesidad de aportar confianza a lo hallado está basada en la falta de explicaciones que existe en algunos métodos, la cual impide contrastar las consideraciones conceptuales de las que surgen las formulaciones y modelizaciones que se muestran. Consecuentemente, no es intención de este trabajo el dar elementos por supuestos y, por tanto, se explicarán los pasos dados para así conseguir la mayor calidad en la información recibida por el lector del mismo.

2) El objetivo fundamental que subyace a los trabajos es la realización de estudios comparados entre redes de infraestructuras del transporte de distintas áreas metropolitanas. Debido a ello, la metodología que se ha de armar debe ser extrapolable a diferentes ámbitos. Este objetivo

metodológico planteado se entiende perfectamente dentro del objetivo fundamental de los trabajos y, aunque parece evidente, es muy necesario enunciarlo y tenerlo en cuenta.

De esta manera, las implicaciones reales de este objetivo se reflejan en muy diversos ámbitos de la metodología a desarrollar. Así, por ejemplo, la capacidad de la metodología de ser extrapolable va a afectar a la modelización de los ámbitos territoriales, a la modelización de las redes de infraestructuras de transporte colectivo guiado y a la creación de los algoritmos de cálculo de los diferentes parámetros intervinientes en la definición de los Indicadores. Como se puede observar, la capacidad de extrapolación es un objetivo que estará presente en la gran mayoría de decisiones que se concreten en el desarrollo metodológico.

Un elemento que subyace a este objetivo metodológico es la necesidad de contar con datos homogéneos entre áreas metropolitanas. Para que esto sea un hecho y, a parte de los datos de elaboración propia, se hace necesario el contar con una fuente de datos única. Después del repaso que se realiza del estado del arte, se ha optado por escoger los datos aportados por Julià¹² (2.006) en su texto sobre redes metropolitanas. La elección de este trabajo se debe, precisamente, a la extrapolabilidad de los ámbitos que maneja en relación con los que se pretenden estudiar en este trabajo.

3) Finalmente, de poco serviría crear una metodología que ofrezca confianza y que sea extrapolable entre ámbitos si no es capaz de obtener resultados ciertos. De esta forma, el tercer objetivo metodológico es la **necesidad de crear un procedimiento fiable**, es decir, el procedimiento debe devolver resultados que permitan el desarrollo de la investigación.

Así, la creación de una metodología adecuada es un fin en si mismo, pero también es un medio para poder estudiar el resto de objetivos de la investigación. Por tanto, los resultados que se extraigan del proceso de modelización deben ser valiosos para estudiar las características de las redes de infraestructuras férreas. De esta forma, con la aplicación del adjetivo valioso, se hace referencia a que se deben obtener los resultados necesarios para el estudio pero, además, se deben obtener con un grado de precisión ajustado a los objetivos de la investigación.

Estos tres objetivos, confianza, extrapolabilidad y fiabilidad, son la base conceptual de la metodología que se va a desarrollar. Por tanto, la habilidad en su consecución será un elemento fundamental para alcanzar el fin fundamental de los trabajos. Así, se puede concluir que **partiendo de un procedimiento adecuado, los resultados obtenidos tendrán un grado de aceptación y de solidez que de ninguna otra forma se podría alcanzar.**

1.5.- Estructura de los trabajos

Una vez se han definido los objetivos fundamentales de los trabajos, como epígrafe final de este capítulo, queda comentar brevemente la estructura en que se han articulado las investigaciones realizadas.

De esta forma, la estructura de desarrollo de los trabajos se puede dividir en tres bloques básicos:

- Un primer bloque, constituido por los capítulos 1, 2 y 3, en el que se establecen las consideraciones que fundamentan los trabajos y se exponen los objetivos de los mismos.
- Un segundo bloque, constituido por los capítulos 4, 5 y 6, en el que se desarrolla la metodología de trabajo y se exponen los indicadores a considerar.
- Un tercer bloque, constituido por los capítulos 7, 8 y 9, en el que se desarrollan las conclusiones obtenidas a lo largo de los ensayos realizados.

Con esta estructura, se considera que los trabajos se desarrollan de la forma más clara posible para el lector de los mismos, estableciéndose también formalmente la dualidad entre objetivos metodológicos y objetivos de investigación que se ha manifestado conceptualmente. Así, revisando de forma concreta cada capítulo redactado, se encuentran los siguientes contenidos:

1) En el primer capítulo, se establece el objeto de los trabajos, tanto de forma general como de forma detallada. Además, se introduce la estructura de los propios trabajos.

- 2) En el segundo capítulo, se repasa el estado de la bibliografía existente y, a través de su análisis, se establecen los elementos que pueden ser el apoyo del actual estudio y aquellos que se evitarán por no ser coherentes con los objetivos propuestos.
- 3) En el tercer capítulo, se incorporan los elementos concretos de análisis que formarán parte de los trabajos y que se desprenden del análisis conjunto de los capítulos primero y segundo.
- 4) En el cuarto capítulo, se definen los Indicadores de Oferta a desarrollar a lo largo de los trabajos.
- 5) En el quinto capítulo, se expone el desarrollo metodológico realizado, incluyendo los aspectos que han presentado problemas de modelización y las simplificaciones efectuadas.
- 6) En el sexto capítulo, se muestran los resultados de aplicar los diferentes Indicadores a los ámbitos de trabajo definidos.
- 7) En el séptimo capítulo, se van repasando, uno a uno, los sucesivos ensayos realizados sobre los Indicadores de Oferta definidos. Además, se muestran las conclusiones asociadas a cada ensayo y las posibles líneas de investigación abiertas.
- 8) En el octavo capítulo, se realiza un caso práctico que, a modo de ejemplo, muestra la aplicación real de los resultados obtenidos.
- 9) En el noveno capítulo, se realiza una síntesis de las conclusiones extraídas del conjunto de los trabajos realizados.
- 10) Anexos, en los mismos se incorporan una serie de resultados parciales, planos, regresiones y matrices obtenidos en el transcurso de los trabajos.
- 11) Bibliografía, en la misma se adjuntan los diferentes estudios que han sido manejados para sentar las bases conceptuales de los trabajos.

Con esta breve descripción de la estructura de los trabajos se establece una breve guía que sirve para identificar previamente a la lectura del texto los elementos que se van a tratar en cada capítulo.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 1

¹ CHRISTALLER, W. (1.933): *Los Lugares Centrales en Alemania Meridional*.

² RAFFESTIN, C. (1.988): "Repères pour une théorie de la territorialité humaine", en DUPUY, G.: *Réseaux territoriaux*. Ed. Paradigme, Caen.

³ HERCE VALLEJO, M.; MAGRINYÁ TORNER, F. (2.002): *La ingeniería en la evolución de la urbanística*. Ediciones UPC. Barcelona.

⁴ OFFNER, J.M. (1.999): "Are there such things as small networks?", en COUTARD, O.: *The Governance of Large Technical Systems*. Ed. Routledge, London.

⁵ DUPUY, G. (1.995): *Les territoires de l'automobile*. Anthropos, París, 1995 (216 pp. ISBN: 2-7178-2880-X).

⁶ GATTI, G.; CAVUOTI; DELL'OLIO, L. (2.002): *Modelos taxonómicos para el estudio de las relaciones entre condiciones de red y desarrollo del territorio*. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander.

⁷ LÓPEZ PITA, A. (2.001): *Ferrocarril y avión en el sistema de transporte europeo*. Ed. UPC, Temas de Transporte y Territorio 1, Barcelona.

⁸ GENRE-GRANDPIERRE, C. (1.999): *La desserte spatiale des réseaux de transport routier: une approche fractale*. Rev. Flux nº38, París.

⁹ DUPUY, G. (1.991): *Urbanisme de Réseaux, théories et méthodes*. Ed. A. Colin, París.

¹⁰ HERCE VALLEJO, M. (1.992): *Las formas del crecimiento urbano y las variantes de carretera*. Tesis Doctoral, UPC. Barcelona.

¹¹ ARAGÓN, F. (1.975): *Los modelos de potencial y selección de inversiones en carreteras*. Ed. MOP, Madrid.

¹² JULIÀ SORT, J. (2.006): *Redes Metropolitanas*. Agencia Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.

¹³ NICOLÁS LOSCOS, A. (2.002): *Estudi comparatiu de xarxes de transport metropolita*. Biblioteca UPC.

¹⁴ PERSIA, L. (2.001): "Tecniche innovative di Benchmarking per la pianificazione dei sistemi di trasporto pubblico urbano", en *Metodi e modelli peri il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán.

¹⁵ PARCERISA, J.; RUBERT DE VENTÓS, M. (2.002): *Galaxias metropolitanas*. Ediciones UPC.

¹⁶ GARRIDO, H.; GARCÍA RUIZ, J.M. (2.009): *Armonía Fractal de Doñana y las Marismas*, Lunweg Editores, ISBN:978-84-9785-555-6.

capítulo 2

MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DE LA EFICACIA ESPACIAL DE LAS REDES DE INFRAESTRUCTURAS, ESTADO DEL ARTE

2.1.- Introducción

Para que de los trabajos realizados se puedan obtener resultados correctos, se ha de pasar obligatoriamente por la **revisión y comprensión de lo ya escrito en la bibliografía existente**. La comprensión de las debilidades que la bibliografía presenta, así como la puesta en valor de las fortalezas que los estudios realizados suponen, debe llevar a obtener un análisis con unos postulados fundamentados y unos resultados coherentes y justificados respecto a lo ya analizado.

Debido a ello, a lo largo de este capítulo se irán desgranando una serie de argumentos descriptivos de los métodos de análisis existentes sobre la eficacia del transporte colectivo. Así, adelantando parte de las conclusiones que se obtendrán en este capítulo, se puede afirmar, tanto la preeminencia de los métodos de demanda en el estudio de las redes de transporte colectivo, como la necesidad de abordar el tema de las redes desde otros puntos de vista que puedan ofrecer nuevas revelaciones sobre las características de las infraestructuras.

De esta forma, se puede exponer como el nacimiento del estudio del transporte se abordó desde la preeminencia del vehículo privado como garante de la satisfacción de las necesidades de transporte. Así, las metodologías de demanda, basadas en la optimización de la velocidad comercial y en la fijación de cargas a través de submodelos de distribución modal, se hicieron con el predominio dentro del análisis de la movilidad. Debido a ello, a través de su desarrollo se perfeccionaron las metodologías de distribución modal y de búsqueda de correlaciones "económicas" como las basadas en el incremento del PIB o del número de vehículos por persona.

Ese modelo, basado en la satisfacción de la demanda, se prolongo hasta que los niveles de saturaciones de las redes de infraestructuras viarias hicieron necesario el plantearse nuevas métodos de análisis. Así, a partir de los años ochenta comienza a cambiar la filosofía del análisis, pero las metodologías de búsqueda siguen basadas en los modelos de distribución modal, desarrolladas en este caso a través de los más evolucionados modelos logit.

Estos análisis se refinan a través de las herramientas informáticas, por ejemplo con los modelos EMME/2 basados también en la aplicación del logit. Con ellos, se busca la alteración de las distribuciones modales y la alteración de las redes, en busca de influir en la elección modal de los viajeros a través de iteraciones sobre las redes. Sin embargo, la lógica operativa sigue siendo parecida a la preexistente y se busca la satisfacción de la demanda a través de correlaciones preestablecidas.

De esta manera se llega a este punto, en el que se empieza a entender que la adecuada oferta de infraestructuras es la que condiciona las actividades y que el mero seguimiento de la demanda conduce por el camino de la congestión y de la reinversión sobre itinerarios saturados. Así, recientemente, algunos investigadores comienzan a recoger algunos trabajos primigenios, como los dados por la Economía Urbana en los años setenta, en los que algunas de las características del territorio y de las redes, como la accesibilidad, eran las que se estudiaban por ser condición para el desarrollo, y que serán el punto de partida de los presentes trabajos.

A través de todo este proceso, se posibilita el entendimiento de que **las redes, a través de los cambios que sus propias características propician en el territorio, son las que generan las condiciones para que los asentamientos y las actividades se produzcan de una determinada forma**. Por ello, es necesario adentrarse en el estudio de las características de las redes, ya que, aún siendo un campo fundamental para la comprensión de las modificaciones producidas en asentamientos y actividades, no ha existido un desarrollo del mismo que logre unir la oferta que proporcionan las redes de infraestructuras y la demanda de movilidad.

Pasando a abordar la **estructura de este segundo capítulo**, y dado que el elemento fundamental por el que se pretende apostar dentro de los trabajos es el estudio comparado entre redes ferroviarias de ámbitos urbanos, primeramente, los aspectos que se van a abordar son los diferentes ensayos que ofrecen una visión similar a la expuesta; Es decir, se pretende mostrar como la bibliografía ha tratado hasta este momento el estudio comparado de las redes y cual ha sido el grado de desarrollo real que las propuestas teóricas han tenido dentro de casos concretos.

En segundo lugar, y antes de estudiar el cómo manejar toda la información que subyace a las redes de infraestructuras del transporte, al propio transporte y al territorio, se pondrá el acento sobre los aspectos más concretos del análisis de las redes ferroviarias. De esta manera, se barajarán los conceptos que definen las características de las redes a través de los Indicadores establecidos, haciendo mención a la forma de estudio y formación de estos Indicadores a través de la bibliografía existente. Además, los trabajos se detendrán, por su carácter prioritario, sobre conceptos como los de accesibilidad, entendida como la facilidad de los usuarios para cubrir la distancia entre dos puntos, cobertura, entendida como la utilidad que la red presenta para el usuario de la misma o fractalidad, entendida como la búsqueda de formas eficaces a la hora de planificar las redes de infraestructuras.

Finalmente, se prestará atención a las metodologías de modelización empleadas por los diferentes autores. De esta manera, no bastará con identificar qué es lo que se estudia, sino que además se pretende investigar cómo son estudiadas las diferentes redes de transporte, el grado de complicación o de simplificación en la concepción de las metodologías y la capacidad que han tenido las propias metodologías para insertarse dentro de casos concretos. Así, con las conclusiones que se extraigan, se identificarán los ejes principales que ha de tener la metodología que se pretende desarrollar desde estos trabajos.

En cualquier caso, la búsqueda de la bibliografía no será compulsiva ni sobreabundante, tendrá un sentido concreto para evitar la dispersión de los esfuerzos y, por ello, en primer lugar se recuerda sobre qué se quiere obtener el conocimiento. En este caso, lo que se quiere estudiar son las características de las redes ferroviarias y los efectos inducidos por estas sobre el propio transporte, el territorio y la planificación de las infraestructuras. La forma de abordar este estudio será a través del análisis comparado de redes ferroviarias maduras de grandes áreas metropolitanas en momentos fijos de su desarrollo y, todo ello, se va a ensayar a través de la definición de Indicadores de Oferta del Transporte.

Con todo lo indicado, se pasa directamente a describir algunos de los trabajos más interesantes o aclaradores sobre el tema objeto de estudio que se han encontrado dentro de la bibliografía existente, todo ello con el objetivo final de mostrar las dudas que puedan generar o las luces que puedan arrojar los distintos análisis previamente efectuados en la elaboración de estos trabajos.

2.2.- El estudio comparado como herramienta de análisis de las redes de transporte ferroviario

2.2.1.- Introducción

El estudio comparado es una herramienta básica para el análisis de muy diversas disciplinas. Así, la identificación de patologías o problemas comunes a diversos elementos de un mismo conjunto es un procedimiento de estudio utilizado, por ejemplo, en medicina, economía o biología entre otras especialidades. Por supuesto, este procedimiento también ha sido implementado dentro del estudio de las propiedades o efectos de las redes del transporte.

Sin embargo, debido a razones que escapan del ámbito de análisis de estos trabajos, esta técnica del estudio comparado ha sido mucho menos utilizada que el estudio sistemático de problemas aislados asociados a las infraestructuras del transporte. De este modo, es más sencillo encontrar, por ejemplo, estudios tendentes a pronosticar la demanda de transporte de un determinado corredor ferroviario, que análisis dedicados a comparar el porqué de las diferentes demandas de transporte dentro de corredores ferroviarios similares.

Quizá las doctrinas impartidas desde las escuelas de ingeniería, basadas en las matemáticas y el cálculo, que identifican cada problema con su solución, llevan a este tipo de planteamientos finalistas y que, muchas veces, no profundizan o se olvidan de la base subyacente a problemas similares. En este caso, se trataría de abordar los efectos causados y los problemas relativos a las redes de infraestructuras, que son precisamente similares porque poseen un sustrato común.

El Diccionario de la Real Academia de la Lengua¹ define **sustrato** como: "*Estrato que subyace a otro y sobre el cual puede influir*". Desde estos trabajos se pretenden identificar una parte de esos estratos que subyacen a la planificación territorial y a la gestión del transporte y que les influyen. La búsqueda de estos estratos se va a producir desde el ensayo de determinadas características intrínsecas de las redes, y por tanto, sólo podrán ser buscadas a través del estudio comparado entre redes de transporte.

Este planteamiento expuesto debe conducir a la observación de tendencias y a la obtención de criterios, derivados de la observación de las características de las redes y de su comparación con esos otros elementos que suelen ser los que centran el estudio de las redes de infraestructuras del transporte. Es decir, la comprensión de las características de las redes ha de servir para intuir comportamientos inducidos por las mismas; Por ejemplo, en cuanto a cargas de viajeros, tiempos de viaje o superficies consumidas por las propias redes.

Con todo lo dicho, se puede adivinar que la elección de esta metodología de estudio no busca la obtención del enésimo decimal o la precisión del segundo en el tiempo de viaje, pero si aspira a la determinación de criterios que ayuden a la planificación de las redes de transporte ferroviario y de las áreas metropolitanas asociadas a las mismas, y que, además, permitan que los estudios de problemas concretos asociados a las redes férreas se centren en ámbitos más detallados de actuación. Esto, es consecuencia de las diferentes condiciones de contorno locales existentes en cada ciudad, que dentro de una solución general siempre llevan a la necesidad del estudio de soluciones para su implantación local.

La estructura con la que se desarrollan los siguientes apartados es básicamente lineal, exponiendo los ejemplos encontrados y abordando sus bondades y deficiencias.

Desde la comprensión de la utilidad de la metodología presentada, se pasa a analizar algunos de los estudios comparados que se han encontrado repasando la bibliografía especializada, y que pueden servir de base para plantear el futuro desarrollo procedimental de los trabajos.

2.2.2.- Algunos ejemplos sobre el estudio comparado de ciudades y sus infraestructuras del transporte

El primer elemento a destacar dentro de los estudios comparados es que existe la posibilidad de realizarlos según **dos metodologías principales**:

- Analizando diferentes ámbitos en un mismo momento del tiempo.
- Analizando un mismo ámbito en diferentes momentos del tiempo.

Ambos métodos pueden considerarse válidos, sin embargo, es necesario explicitar que cada uno servirá para determinar una serie de resultados diferentes. Para comprender esto es necesario tener en cuenta el largo periodo de maduración que lleva la manifestación de todos los efectos que producen las redes de infraestructuras del transporte, así como que estas van variando sus especificidades técnicas a lo largo de los años. Por ello, si se aplica una metodología de análisis prolongado en el tiempo en un solo ámbito, habrá que tener en cuenta que los efectos manifestados son el resultado de las infraestructuras del transporte y de todos los cambios que en sus tipologías se han producido a lo largo del tiempo.

Así, por ejemplo, dentro de un estudio sobre redes de metro, estas no han sufrido profundas modificaciones en las tipologías utilizadas en los últimos treinta años, sin embargo la tipología de las redes viarias ha sufrido un cambio sustancial en el entorno de las ciudades españolas y mundiales a lo largo de ese periodo de tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior, parece más adecuado para el análisis de los efectos de las redes de transporte ferroviario utilizar el estudio comparado de diferentes ámbitos en un solo momento del tiempo, ya que de esta manera, se pueden eliminar las

inferencias que produce la introducción de nuevas tipologías, diferidas en el tiempo, en las características técnicas del resto de infraestructuras del transporte.

En cualquier caso, ambos sistemas pueden aportar conclusiones interesantes sobre las características de las redes de infraestructuras del transporte. Al respecto de este tipo de estudios, Persia² (2.001) ha realizado un trabajo en el que conjuga ambas metodologías de análisis, así, entra en la valoración de ámbitos diferentes y en el estudio de cada uno de los ámbitos en distintos momentos del tiempo. Esta evaluación se ha realizado a partir del desarrollo de las técnicas de *benchmarking* elaboradas por Karlof³ (1.995) y por Harrington⁴ (1.996) anteriormente.

Dentro de este estudio, Persia ya establece que *"el mejor método para efectuar la evaluación consiste en la confrontación de las prestaciones del sistema con las correspondientes de sistemas similares"*. Con esta filosofía de análisis, realiza un estudio comparado de la eficacia de las redes de transporte colectivo de 24 ciudades (Adelaida, Ámsterdam, Boston, Brisbane, Bruselas, Chicago, Copenhague, Denver, Detroit, Estocolmo, Hamburgo, Houston, Londres, Los Ángeles, Melbourne, Mónaco, Nueva York, París, Perth, Phoenix, San Francisco, Sydney, Tokio, Toronto y Washington), a través de cuatro observaciones temporales (1960, '70, '80 y '90), de las cuales las primeras tres observaciones están heredadas de las realizadas por Newman⁵ (1.989).

Del trabajo de Persia resulta interesante comprobar como establece tres categorías de variables dentro del conjunto de variables de estudio que define: variables de demanda, de oferta y de contorno. Dentro de cada una de estas tres categorías se encuentran las variables a continuación expuestas.

Variables de demanda:

- Cuota modal del transporte público.
- Número de desplazamientos por habitante del transporte público.
- Pasajeros-Kilómetro por habitante del transporte público.

Variables de oferta:

- Vehículos-Kilómetro por habitante del transporte público.
- Velocidad media del transporte público.
- Kilómetros de infraestructuras viarias.
- Número de aparcamientos por cada 1.000 empleados del distrito central de negocios.

Variables de contorno:

- Población total.
- Densidad de la población.
- Porcentaje de población residente en el distrito central de negocios.
- Porcentaje de población residente en la corona metropolitana.
- Densidad de empleos.
- Porcentaje de empleos en el distrito central de negocios.
- Porcentaje de empleos en la corona metropolitana.
- Número de vehículos por cada 1.000 habitantes.
- Distancia media recorrida en los trayectos en automóvil.

Todas estas variables son más o menos recurrentes en los estudios de los efectos de las infraestructuras del transporte, aspecto que más adelante se abordará con mayor detalle. Sin embargo, el elemento que se pretende resaltar con toda esta enumeración es la gran cantidad de variables a considerar en estos estudios comparados, ya que, a la enorme posibilidad de parametrización de diversos indicadores que se tiene, se une el hecho de estar trabajando en diferentes ámbitos y en el estudio de Persia, además, en diferentes escenarios temporales. Cabe recordar que todas estas variables son calculadas para 25 ciudades y para 4 momentos en el tiempo, lo que supone multiplicar por 100 el número de variables respecto al que manejaría, por ejemplo, un análisis aislado sobre un corredor de transporte.

Este hecho contrasta con alguna de las conclusiones expuestas finalmente por Persia, ya que en ellas se especifica el problema de la disponibilidad de datos y se dice que el método visto no tiene el carácter de conducir a resultados concretos, sino que tiene un carácter descriptivo del fenómeno de estudio, añadiendo que el desarrollo de un modelo de carácter determinístico podrá representar la futura evolución de la Tesis sobre la que el modelo se apoya y, finalizando, a través de la exposición de que la causa última de las indeterminaciones que se plantean es la de no poseer de suficientes observaciones a lo largo del tiempo.

Toda esta argumentación esgrimida entra dentro de la crítica inicial realizada, que ponía de manifiesto cómo el desarrollo temporal de los acontecimientos hace que se yuxtapongan los efectos de unas infraestructuras sobre otras y que se pierda una visión clara sobre qué efectos produce cada infraestructura. En cualquier caso, si que existen determinadas conclusiones en el trabajo de utilidad, entre ellas se puede destacar el hecho de que se percibe una diferenciación entre las ciudades europeas y las ciudades americanas en determinadas variables, además de la relevancia que manifiestan la compacidad de la ciudad y la oferta de transporte sobre la demanda del mismo.

Vista la **necesidad de centrarse en metodologías y objetivos concretos** que se desprende de la ausencia de conclusiones concretas del anterior trabajo, se pueden encontrar otros estudios comparados que, al tener unos planteamientos más centrados en objetivos preestablecidos, han conseguido obtener unos resultados mucho más interesantes dentro del ámbito de las infraestructuras.

Por ejemplo, Herce⁶ (1.992), en su Tesis Doctoral realiza un estudio comparado sobre infraestructuras viarias de varias ciudades, en concreto el estudio se aplica sobre 24 ciudades (Albacete, Figueras, Igualada, Vic, Santiago de Compostela, Castellón de La Plana, Guadalajara, Vitoria, Lleida, Caldes de Montbui, Palafrugell, Granollers, Lliçà de Vall, Paerts, L´Ametlla, La Garriga, Benidorm, Teruel, Logroño, Pamplona, Tarragona, Palma de Mallorca, Sitges y Vilanova i la Geltrú) y se refiere a la influencia de las variantes de carretera en el crecimiento urbano.

En este caso, además del análisis de varias ciudades, también existe el estudio en dos momentos diferentes en el tiempo de las ciudades escogidas. Sin embargo, en este análisis, esos momentos en el tiempo elegidos no son elementos aleatorios que puede coincidir que aporten información o no. Los momentos escogidos son muy concretos y representan el momento anterior a realizar una nueva infraestructura del transporte, en este caso una variante de carretera, y un momento posterior en el tiempo, en el que ya está materializada la infraestructura y se han producidos efectos sobre el territorio.

Se puede comprobar como el hecho de elegir un conjunto homogéneo de ciudades, ciudades españolas de tamaño mediano, y acotadas en un momento trascendental desde el punto de vista de la inversión en infraestructuras, permite un estudio mucho más productivo que en el anterior caso. Ya que en este análisis, **los elementos de contorno han sido fijados para poder focalizar el análisis en el elemento de interés**, que es la modificación de la urbanización gracias a las variantes de carreteras.

El resultado proveniente de utilizar una metodología centrada en los objetivos a conseguir fue la determinación de la influencia de las variantes de carreteras en el proceso urbanístico, identificando tres zonas de variación de la plusvalía urbanística:

- Una primera, entre la ciudad construida y la variante en la que el incremento de la plusvalía era la mayor de todas.
- Una segunda, al otro lado de la infraestructura viaria en la que la plusvalía urbanística también se incrementa pero en un valor menor al anterior.
- Finalmente, una tercera zona en el lado opuesto al de la creación de la variante, en el que el incremento de la plusvalía urbanística era negativo.

Con este ensayo expuesto se demuestra la importancia de focalizar correctamente el problema dentro de la metodología adoptada. De esta forma, desde el primer momento en el que se comienza a realizar la metodología se ha de estar seguro de los elementos que se quieren analizar, sino se puede llegar a realizar un análisis de infinidad de variables que, debido a la mala elección de las condiciones de contorno, no permita obtener resultados relevantes.

Además de los expuestos, existen más estudios comparados a lo largo de la bibliografía publicada. Por ejemplo, Monzón⁷ (2.006), dentro de algunos de los trabajos realizados por el Observatorio de la Movilidad Metropolitana en España, va recogiendo datos de diversas organizaciones del transporte para, finalmente, pasar a realizar un estudio comparado referido a 13 ciudades españolas (4 de tamaño superior al millón de habitantes, Madrid, Barcelona, Valencia y Sevilla, 5 entre el millón y el medio millón de habitantes, Zaragoza, Bilbao, Málaga, Bahía de Cádiz y Asturias, y 4 inferiores al medio millón de habitantes, A Coruña, Granada, Alicante y Pamplona).

En este nuevo caso existe un evidente espíritu recopilador de información, que también conduce a la introducción de determinados estadios temporales de seguimiento de los parámetros, buscándose variaciones de los mismos, por ejemplo entre los años 2.002 a 2.004 para la oferta de los diferentes modos de transporte (autobús, modos férreos...). En todas estas validaciones de los datos se extraen conclusiones de cierto interés práctico.

Sin embargo, dentro de los datos mostrados, desde el punto de vista de los estudios comparados, la conclusión más importante se da cuando se cruzan dos datos concretos. Estos serían el porcentaje de uso del transporte público y la proporción entre el tiempo que cuesta hacer un viaje en transporte público respecto del que cuesta hacer ese mismo viaje en transporte privado.

Velocidad coche / Velocidad del TP	1,75	1,50	1,25
Uso del TP	9,5%	18%	33%

Tabla 2.1, relación entre velocidades y uso del TP

(f. A. Monzón⁷)

Gracias a este estudio comparado de las ciudades españolas se ha podido llegar a identificar uno de los sustratos que soporta el uso del transporte público. Así, la relación de velocidades entre transporte público y transporte privado es una característica de las redes de transporte que condiciona la utilización del transporte público, por lo que actuando sobre la velocidad del transporte público, sobre la del transporte privado o sobre las dos, se puede modificar el reparto modal de utilización del transporte.

Estudios como este o el anterior son el ejemplo que se pretende seguir. Así, la búsqueda de los elementos subyacentes, o característicos, que determinan la ocupación del suelo o la utilización del transporte público son parte de los objetivos centrales de los trabajos de investigación que se realizan, ya que, solamente desde la **óptica de una oferta de infraestructuras del transporte** con las características adecuadas, se puede llegar a un compromiso para un más equilibrado reparto modal y una más eficiente planificación de las redes de transporte.

Vistos los ejemplos anteriores, que llegan a encontrar ese sustrato asociado a las infraestructuras del transporte y que, además, sirven como elemento de comparación a la hora de plantear determinados aspectos del análisis que se realizará en este trabajo, cabe comentar la existencia de otras publicaciones que centran su punto de vista en la morfología de las infraestructuras ferroviarias.

Siendo como son estos trabajos, una herramienta que pretende investigar las características de la distribución espacial de las redes ferroviarias y los efectos inducidos sobre otros elementos asociados al territorio y al transporte, parece necesario apuntar algunos de los estudios comparados que sobre las redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija se han realizado.

Como antecedente a los trabajos que se expondrán, se puede abundar en la idea de la escasez de literatura especializada sobre el tema. Así, si los estudios comparados son minoría respecto a los estudios puntuales, los estudios comparados sobre la forma de las redes también son minoría sobre los estudios comparados que se centran en aspectos relacionados con los parámetros de gestión de las redes.

Dentro de los estudios comparados asociados a las redes ferroviarias, cabría mencionar el trabajo de Nicolás Loscos⁸ (2.002) o el realizado por Julià⁹ (2.006), que recopila información sobre 11 ciudades (Londres, Nueva York, París, Berlín, Tokio, Los Ángeles, Madrid, Barcelona, Milán, Ciudad de México y Singapur). En este caso, en el trabajo existe una exposición más cualitativa que cuantitativa de las

redes de las infraestructuras del transporte. Dentro del documento se encuentra una aproximación gráfica de la morfología de las redes de transporte de las ciudades mencionadas, entendiendo como redes de transporte las de autopistas, metropolitano, ferrocarriles de cercanías, etc. Esta descripción amplia de las redes contribuye a dar una visión generalista del problema en estudio.

A lo dicho en el párrafo anterior, este trabajo añade determinados puntos de vista novedosos al agregar algunos apartados sobre la interconexión de las áreas metropolitanas con el exterior, a través de las estaciones de los ferrocarriles de alta velocidad y de los aeropuertos. Sin embargo, este enfoque no se encuentra dentro de las directrices que se plantean en el análisis que ahora se presenta, ya que, el conjunto de estas grandes redes de infraestructuras presentadas, poseen otras características y generan otros efectos que no están dentro de los objetivos de los trabajos.

Por otro lado, respecto a la información que aporta este estudio, cabe decir que es de gran ayuda para el desarrollo de los actuales trabajos, ya que presenta una gran cantidad de mediciones y de parámetros de las 11 citadas ciudades, convirtiéndose en una de las referencias fundamentales a la hora de abordar la extracción de indicadores a considerar. A su vez, el año de edición del mismo, el 2.006, también se presta a esta utilización de las variables que contiene, ya que su difusión está realizada en clara sintonía con las fechas de las mediciones que desde estos trabajos se han realizado.

A parte de la información numérica que el trabajo presenta, el enfoque de este estudio no llega a coincidir con el que se pretende dar desde este análisis, ya que el mismo se encuadra más en la evolución histórica de las redes que en la discriminación de las características morfológicas de esas redes y en las aplicaciones de las mismas sobre el territorio y el transporte. Por lo tanto, el desarrollo del propio estudio no va a ayudar tanto como las propias mediciones que contiene.

A este trabajo de Julià se le antepone otro estudio de Parcerisa y Rubert de Ventos¹⁰ (2.002) realizado bajo una óptica similar. En este caso, sobre un trabajo con una definición visual de una calidad realmente elevada, se superpone una literatura descriptiva de la situación de las redes y de su morfología que, por otro lado, no busca ese sustrato que en estos trabajos es el fin último que se persigue.

En este caso las ciudades estudiadas son 28 (Atenas, Barcelona, Berlín, Boston, Budapest, Buenos Aires, Caracas, Chicago, Copenhague, Filadelfia, Hamburgo, Lisboa, Londres, Madrid, México DF, Moscú, Munich, Nagoya, Osaka, París, San Petersburgo, Santiago de Chile, Seúl, Singapur, Tokio, Washington y Viena) y se hace un especial hincapié en el estudio de la red metropolitana de Barcelona. Sin embargo, el estudio comparado acaba diluyéndose para acercarse más al estudio de los aspectos locales de una red.

Dentro del estudio se encuentran algunos datos de las redes, que, sin embargo, no han sido considerados para la elaboración de los actuales trabajos, puesto que las mediciones aportadas por el análisis de Julià son más completas para los objetivos que aquí se pretenden estudiar. Por tanto, lo que inicialmente se configuraba como el proyecto que con mayor detalle parecía adentrarse dentro la lógica espacial de las redes, finalmente, se muestra un tanto inofensivo en las conclusiones que a este respecto extrae.

Dentro del estudio comparado de las redes, cabe hacer especial mención a las distintas **asociaciones existentes relacionadas con el transporte público**. Dentro de ellas, por la información que aporta, así como por el ámbito en el que ejerce su influencia, parece adecuado hablar de la Asociación de Autoridades Europeas del Transporte Metropolitano (EMTA)¹¹ y de su barómetro.

La asociación EMTA fue creada en abril de 1998 con el objetivo básico de intercambiar experiencias desde todos los puntos de vista que envuelven el transporte público: institucional, organizativo, financiero, técnico y medioambiental. Asimismo, la EMTA trabaja en estrecha cooperación con la Comisión Europea y con las instituciones internacionales del sector transporte (ECMT, UITP, CER, Car Free Cities, Eurocities, IMPACTS, etc.). Hoy en día la EMTA cuenta con 33 autoridades públicas de transporte asociadas, que con sus 70 millones de habitantes representan un 15% del total de la población de la UE25.

Este colectivo de ciudades europeas, en un número de 33 (Lisboa, Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Bilbao, Cádiz, París, Lyon, Milán, Turín, Bruselas, Ámsterdam, Stuttgart, Frankfurt, Hamburgo, Berlín, Copenhague, Oslo, Helsinki, Estocolmo, Vilnius, Varsovia, Budapest, Praga, Viena, Dublín, Londres, Birmingham, Sheffield, Manchester y Toronto), es el ámbito de trabajo para la presentación de un barómetro con diferentes parámetros relacionados con el transporte público.

Dentro del barómetro EMTA se enmarcan los habituales y múltiples indicadores de oferta y demanda que ya se han mencionado al hablar de los estudios de Persia. Con toda la cantidad de ciudades consideradas y de variables cuantificadas, los resultados obtenidos son igualmente dispersos en cuanto a su capacidad para formar una teoría homogénea que permita la mejor comprensión de las características de las redes de transporte. De hecho, este no parece ser el fin último del barómetro, sino que, más bien, se limita a exponer los indicadores en los que mejor y peor están las ciudades como aliciente para la mejora de los miembros en aquellos parámetros que peores características demuestran.

En cualquier caso, la muestra de la utilidad del estudio comparado de la EMTA es evidente cuando se observan los resultados de esta clase de compilaciones y los cruces de datos realizados, ya que sin ningún fin concreto en cuanto a la identificación de efectos o consecuencias específicas de las infraestructuras del transporte, si que se obtienen algunas conclusiones interesantes.

Así, en primer lugar, en cuanto a la propia metodología de las mediciones, no deja de ser sintomático que el órgano que aglutina a tantas autoridades del transporte metropolitano exponga la conveniencia de la armonización en la recogida y presentación de la información, puesto que dentro de su propia experiencia de trabajo, con la base de datos aportada, se muestra que bajo una aparente homogeneidad de información existe una fuerte diversidad en cómo esta se expresa y, en un grado mayor de exigencia, en como se obtiene. Esta conclusión, en la que se profundizará más adelante, puede ser perceptible desde la óptica del estudio de los ensayos existentes dentro de la bibliografía referente a las redes de infraestructuras del transporte, pero sólo es demostrable desde el diseño conceptual que aporta el estudio comparado.

En segundo lugar, además de la importante conclusión metodológica expuesta, se obtienen otros resultados sobre la concepción de las infraestructuras del transporte, por ejemplo:

- Dentro del campo de la movilidad se identifica el importante papel del transporte colectivo dentro de las ciudades, la mayor utilización de este en los centros urbanos que en las periferias o las diferencias existentes entre las distintas ciudades y las longitudes medias en sus viajes.
- Dentro de la óptica de la oferta se puede identificar la importancia del autobús dentro del sistema de transporte público y su desplazamiento en las ciudades grandes por el transporte ferroviario.
- Dentro de la óptica de la demanda de transporte se concluye la mayor atracción de las ciudades grandes para captar viajeros de transporte público o el sobredimensionamiento del transporte público en cuanto a medias de ocupación de los vehículos.

Sin embargo, todas estas interpretaciones sobre las verificaciones realizadas no se introducen dentro de unas conclusiones homogéneas sobre las características de las redes de infraestructuras del transporte, y se exponen sucesivamente como si unas y otras no tuviesen una relación común, perdiendo mucho del valor añadido que una lectura conjunta proporcionaría. Esto puede ser una consecuencia de la falta de un objetivo concreto en la definición de los trabajos.

Además de la EMTA, existen otras múltiples organizaciones y foros que se enmarcan en ámbitos similares. Entre ellas, cabría citar la Asociación Internacional del Transporte Público (UITP)¹², quién también presenta sus propias publicaciones, como la "*Mobility in cities. Database*" con datos sobre la oferta y la demanda de transporte público en diferentes ámbitos, configurándose como una especie de estudio comparado en cuanto a la exposición de datos y mediciones.

Dentro del panorama estatal, entre otros, se podría hacer mención a los datos aportados en los informes del Observatorio de la Movilidad Metropolitana (OMM), perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente, la Fundación Movilidad, con una extensa biblioteca de datos y artículos, el Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT), dependiente de la Universidad Politécnica de Madrid o el Centro de Innovación del Transporte (CENIT), dependiente de la Universidad Politécnica de Catalunya. Todos ellos y algunos más contribuyen a la difusión de datos que pueden ser

incorporados dentro de los estudios comparados sobre las redes de infraestructuras del transporte de las ciudades españolas.

2.2.3.- Conclusiones extraídas del análisis de los estudios comparados expuestos

Tras el análisis de los diferentes estudios efectuado, se pueden extraer diversas conclusiones de interés para el desarrollo de los trabajos. Sin embargo, a pesar de estas conclusiones, el primer elemento que cabe destacar es la **relativamente escasa repercusión que tienen los estudios comparados dentro del grueso de la bibliografía existente**, hecho este que no se entiende desde la óptica de la necesidad de la comprensión de las características comunes asociadas a diferentes redes de infraestructuras con sustratos similares.

Habida cuenta de la escasez de estudios comparados, resulta especialmente preocupante la ausencia de una búsqueda de correlaciones entre la oferta de infraestructuras y sus repercusiones sobre el transporte, el territorio o la planificación. Así, este amplio campo apenas estudiado va a ser el lugar sobre el que se asientan los trabajos que ahora se desarrollan, campo que, por otra parte, soporta el ámbito de este análisis y de muchos otros trabajos que sobre él se quisiesen desarrollar.

Dentro las características de las redes de infraestructuras, se encontraría el estudio de las características morfológicas de las propias redes. Así, si el estudio genérico de las características de las redes de infraestructuras estaba débilmente estudiado, **las características morfológicas de dichas redes de infraestructuras presenta un vacío todavía mayor en los ámbitos de estudio del transporte y el territorio**. Todo ello conforma este análisis como una oportunidad de estudio de las redes de infraestructuras del transporte bajo una óptica novedosa y con posibilidades de arrojar argumentos, conclusiones y directrices no encontradas con anterioridad.

Finalmente, en cuanto a las conclusiones extraídas de los documentos analizados, se deriva una importante lección, **para la consecución de resultados válidos es necesario determinar con precisión las condiciones de contorno del problema**. Esto quiere decir que, dependiendo del problema que se quiera estudiar, se deben establecer los ámbitos y los escenarios temporales en los que se debe producir la modelización, ya que la modificación de estas variables de contorno influye en la propia definición de los indicadores y puede falsear las mediciones y conclusiones que se obtengan.

En el caso de estos trabajos, referidos al estudio de las características espaciales de las redes ferroviarias y a sus efectos territoriales y sobre el transporte, las condiciones de contorno vendrán marcadas por los siguientes condicionantes:

- Áreas metropolitanas de gran tamaño.
- Redes metropolitanas maduras.
- Un único instante para la comparación y en el mismo momento para todas las ciudades.

Con estas condiciones de contorno se entiende que no se desfigurarán las características espaciales de las redes ferroviarias y los efectos que las mismas han causado en el transporte y en el territorio de las áreas metropolitanas en estudio.

2.3.- La definición de Indicadores asociados a las redes de infraestructuras como elementos para la comprensión de las mismas

2.3.1.- Introducción

El estudio de las redes requiere de la definición de alguna clase de herramienta que proporcione información sobre su composición, funcionamiento y efectos. Esta herramienta de análisis habitualmente consiste en Indicadores asociados a las mismas, a través de los cuales se definen las características intrínsecas de las propias redes, su forma de gestión y explotación o sus efectos de

todo tipo. Estas **características definidas a través de Indicadores son las herramientas que proporcionan información sobre las redes de transporte.**

La necesidad de conocer el comportamiento de las redes es evidente, ya que de otra manera no existiría manera de procurar su mejor planificación y funcionamiento. Con los Indicadores, como herramienta de definición de las características de las redes, se puede avanzar en el estudio comparado que se está planteando, ya que, por un lado, se pueden observar los cambios que se producen dentro de una red en un ámbito concreto y, por otro lado, se pueden identificar las diferencias existentes en las redes de distintos ámbitos. Por tanto, se demuestra que los Indicadores son un elemento adecuado para ser introducido dentro del estudio comparado que se va a realizar en estos trabajos.

Si se realiza una lectura general de los Indicadores como definidores de las características de las redes, se puede comprender que se hayan definido innumerables características de dichas redes y, lo que es más preocupante, que existan infinidad de formas de definir una misma característica dentro de la literatura especializada. Por ello, el abanico de Indicadores asociados a las infraestructuras es amplísimo y necesita ser revisado para poder escoger las características de las redes que mayor y mejor información pueden dar dentro del estudio que se pretende realizar. Además, conviene especificar que una inadecuada elección de los Indicadores de trabajo puede producir no sólo la no obtención de conclusiones, sino la obtención de resultados confusos sobre las características de las redes de infraestructuras ferroviarias.

Por todo lo anterior, es necesario abrir un apartado en el que se reflexione sobre los diferentes indicadores definidos a lo largo de toda la bibliografía existente. A través del estudio de los análisis efectuados con anterioridad, se podrán identificar cuales son las características más relevantes de las redes y cuales son las formas más correctas de definir las, para, de esta forma, conseguir el diseño de unos Indicadores asociados a las redes lo más ajustados a los objetivos perseguidos dentro de los trabajos.

2.3.2.- Exposición de los Indicadores habitualmente utilizados

2.3.2.1.- Introducción

Como ya se ha comentado en el anterior bloque introductorio, la cantidad de Indicadores asociados al transporte es realmente amplia y, se podría decir sin miedo al equívoco, que cada autor procura definir sus propios Indicadores. Sin embargo, esta reiterada definición de Indicadores no es ya tanto una continua reflexión intelectual sobre las características que rodean a las redes de infraestructuras, sino que más bien se trata de un acomodo de los datos disponibles a las necesidades y objetivos predefinidos.

Por esta razón, se ha realizado una **clasificación conceptual** sobre los elementos que frecuentemente rodean la definición de Indicadores asociados a las redes de infraestructuras del transporte. Así, para una correcta comprensión de los mismos, se van a ir desglosando según grupos más o menos homogéneos, algunos ejemplos interesantes en la definición de los diferentes Indicadores asociados a las redes.

De esta forma, se posibilitará la comprensión tanto de las numerosas consideraciones que se pueden hacer de cada característica asociada a las redes, como de la gran cantidad de características que se pueden analizar en el campo de las redes de infraestructuras.

2.3.2.2.- Indicadores Básicos

Si se comienza el estudio de la clasificación por el conjunto de Indicadores más sencillo desde el punto de vista conceptual, se establece, en primer lugar, el grupo denominado como de Indicadores Básicos. Estos ofrecen mediciones sencillas asociadas a aspectos relacionados con la oferta, la demanda y las condiciones de contorno de las redes de transporte. Debido a esta sencillez, son los Indicadores que con mayor frecuencia han entrado a formar parte de los estudios comparados entre ámbitos.

Esta mayor "práctica" con los Indicadores Básicos no ha concluido con el descubrimiento de correlaciones de relevancia o utilidad entre los Indicadores pero, sin embargo, si que ha proporcionado un abundante grupo de mediciones en diferentes ciudades que pueden ser utilizadas en distintos estudios y análisis de las redes.

Dentro del análisis de los Indicadores Básicos, se puede hacer referencia a los definidos por tres estudios ya referidos dentro del apartado dedicado al análisis de los estudios comparados. Así, los trabajos realizados por la EMTA¹¹, Julià⁹ y Persia² definen los siguientes Indicadores Básicos:

	<i>EMTA¹¹</i>	<i>PERSIA²</i>	<i>JULIÀ⁹</i>
Indicadores de Oferta	<i>Longitud de las redes</i> <i>Número de redes</i> <i>Número de paradas</i> <i>Número de vehículos</i> <i>Plazas-Km</i>	<i>Vehículos-Km/hab de transporte público</i> <i>Velocidad media del transporte público</i> <i>Longitud viaria</i> <i>Aparcamientos/1000 empleos en centro de negocios</i>	<i>Longitud viaria</i> <i>Longitud ferroviaria</i> <i>Longitud viaria por kilómetro cuadrado</i> <i>Longitud ferroviaria por kilómetro cuadrado</i> <i>Longitud viaria por habitante</i> <i>Longitud ferroviaria por habitante</i>
Indicadores de Demanda	<i>Número de viajes</i> <i>Pasajeros-Km</i>	<i>Cuota modal del transporte público</i> <i>Viajes por habitante en transporte público</i> <i>Pasajeros-Km en transporte público</i>	<i>Viajes por año y habitante</i> <i>Viajes por año y Kilómetro de red</i>
Indicadores de Contorno	<i>Población del área metropolitana</i> <i>Población de la ciudad central</i> <i>Superficie del área metropolitana</i> <i>Superficie de la ciudad central</i> <i>Número de puestos de trabajo</i> <i>Porcentaje de desempleo</i> <i>PIB por habitante</i>	<i>Población</i> <i>Densidad de población</i> <i>Población residente en centro de negocios (%)</i> <i>Población residente en coronas metropolitanas (%)</i> <i>Densidad de empleos</i> <i>Empleos en centro de negocios (%)</i> <i>Empleos en corona metropolitana (%)</i> <i>Vehículos/1000 hab</i> <i>Distancia media recorrida en automóvil</i>	<i>Población</i> <i>Densidad de población</i> <i>Superficie</i>

Tabla 2.2, comparación entre Indicadores Básicos

(f. propia)

Como se puede observar dentro de estos tres ejemplos escogidos, se puede establecer una subclasificación en tres tipos de Indicadores que, implícita o explícitamente, es habitualmente utilizada por los diversos autores y que ya establecía Persia de forma concreta. Esta clasificación se estructura según el siguiente esquema:

- 1)** Un primer bloque de Indicadores que se suelen denominar de Oferta, que consideran las características intrínsecas de las redes dentro de su ámbito. Entre estos Indicadores suelen ser habituales, por ejemplo, aquellos referidos a las longitudes de las redes, al número de vehículos o al número de paradas.
- 2)** Un segundo bloque de Indicadores que se suele denominar de Demanda, que tiene por objeto definir la utilización que se da a las redes. En este caso, Indicadores habituales suelen ser la cuota de reparto modal o el número de viajeros de los servicios de transporte.
- 3)** Finalmente existe un tercer bloque, denominado de Indicadores de Contorno, cuya principal función es la de definir un conjunto de características asociadas a los elementos que interaccionan con las redes. En este caso, entre otros Indicadores habituales suelen estar la población, la densidad de población, la superficie de las áreas metropolitanas asociadas a las redes, el empleo dentro del área de influencia de la red o el número de automóviles.

Para el grupo de Indicadores de Contorno, Persia establecía que estos sólo variaban a largo o muy largo plazo. Sin embargo, más adecuada que esta conclusión, parece el afirmar que la fijación temporal correcta de unas condiciones de contorno adecuadas asegura la concreción del problema a estudiar.

Dentro del análisis de los Indicadores Básicos, y a través de su implementación sobre casos concretos, existen algunos intentos de evaluación de las características del transporte. Así, por ejemplo, se pueden mencionar los trabajos de Fàbregas y Unceta¹³ (1.998) al respecto. En ellos se realizó un estudio comparado a partir de una base de datos de 36 ciudades, de entre las que se eligieron 8 de ellas y se establecieron una serie de Indicadores Básicos respecto de los que se procedió a estudiar sus interrelaciones.

Con este planteamiento, se identificaron una serie de Indicadores Básicos principales. En este caso, la denominación que se dio a los mismos fue de Indicadores de eficacia y de eficiencia, pero se pueden identificar respectivamente como Indicadores de demanda y de oferta, dentro de la clasificación dada con anterioridad. Los Indicadores considerados fueron los siguientes:

<i>Indicadores básicos de eficacia</i>	<i>Indicadores básicos de eficiencia</i>
viajeros/habitante	bus x Km/conductor
viajeros/km de red	conductor/vehículo punta
viajeros/bus x km	bus x km/vehículo punta
	absentismo de conductores
	coste de conductor

Tabla 2.3, Indicadores Básicos

(f. Fàbregas y Unceta¹³)

Así, en el análisis se estableció una conclusión importante dentro del estudio de los indicadores, y es que los parámetros y **los Indicadores que expresan valores relativos parecen no depender del tamaño de las ciudades**, contrariamente a lo que ocurre con los Indicadores que expresan valores absolutos. A parte de esta conclusión, no se extrajeron otros elementos de juicio relevantes para la planificación de las infraestructuras, estableciéndose que los factores considerados, analizados por separado uno a uno, mediante los parámetros que los caracterizan, no mostraban correlaciones significativas con los indicadores de eficiencia o eficacia y que, por tanto, se podría decir que, uno a uno no aportaban una explicación determinante de la eficacia ni de la eficiencia de los servicios públicos de transporte urbano. De aquí se dedujo que probablemente entonces, la eficacia y la eficiencia de un servicio público de transporte urbano dependen de una multitud de factores, cada uno con incidencia diferente.

Como se puede observar, los Indicadores Básicos no ofrecen una información que permita identificar con claridad los efectos provocados por las redes de transporte o, al menos, no han sido estudiados lo suficiente como para mostrar esos efectos de las redes. Sin embargo, los Indicadores Básicos si que han demostrado una ventaja que se pierda dentro de otros indicadores más complejos, y es su fuerte componente física, que permite comprender rápidamente qué se está estudiando. Esta característica debe hacer reflexionar sobre su verdadera utilidad, ya que muchos de los efectos causados por las redes de infraestructuras son tan físicos y comprensibles como, por ejemplo, la superficie ocupada por las mismas o la cantidad de viajeros que las utilizan. Por esta razón, se incluirán parte de estos Indicadores dentro de los trabajos.

Vista la aparente simplicidad y falta de obtención de resultados concretos por parte de las publicaciones existentes, la literatura ha ido experimentando con otros conceptos o características asociadas a las redes. Así, se han buscado características que puedan aportar nueva información sobre las redes o se ha profundizado en la propia composición de los Indicadores Básicos. De esta manera, se ha trabajado sobre una serie de Indicadores que, atendiendo a la característica objeto de investigación, se pueden englobar en las categorías siguientes.

2.3.2.3.- Indicadores de Accesibilidad

Una vez analizados los Indicadores Básicos y comprendidas sus limitaciones y oportunidades como informadores de las características de las redes de infraestructuras del transporte, comienzan a

surgir otras lecturas en el análisis de las redes. Uno de los primeros y más importantes enfoques asociados a estas características de las redes es la asociada al concepto de accesibilidad.

La accesibilidad ha sido definida en múltiples ocasiones. Entre otras formulaciones se pueden mencionar las dadas por Hilbers y Verroen¹⁴ (1.993), que definen accesibilidad como la posibilidad de alcanzar una localización en un tiempo o coste razonable. De forma similar Koenig¹⁵ (1.980) y Monzón¹⁶ (1.988) la definen como la facilidad de una zona a la hora de acceder a las diferentes actividades y centros de actividad de un ámbito determinado, incluyendo un factor motivante (el destino) y un factor resistente (molestias del viaje).

Como estas definiciones existen otras, pero todas ellas coinciden en un eje conceptual común alrededor de la accesibilidad, y es que la accesibilidad mide el tiempo, el coste o el esfuerzo que supone para un individuo moverse desde un punto a otro. Ahora bien, la forma de medir el concepto de accesibilidad va cambiando según los autores, siendo la más empleada la medición en tiempos, ya que se trata de un concepto físico de fácil comprensión.

Dentro de esta cuantificación de la accesibilidad a través del tiempo, se encuentra, por ejemplo, el trabajo de Martín, Cristóbal y Gómez¹⁷ (2.002) que, como medida de accesibilidad, utilizan el tiempo de viaje en transporte público entre la residencia de la población y una selección de centros de atracción, incluyendo en esa definición de accesibilidad el tiempo de viaje, los tiempos de acceso y regreso, esperas, etapas a pie y trasbordos. Este ejemplo es interesante desde el punto de vista de la existencia de una **descomposición del tiempo total en tiempos parciales**. Esta es la forma más habitual de fragmentar el concepto de accesibilidad y de simplificar el cálculo hacia otros más numerosos pero más sencillos.

La definición de la accesibilidad como suma de una cantidad de tiempos de viaje es usual dentro de la bibliografía existente. Sin embargo, esta formulación se suele ir complicando para introducir diferentes aspectos que se consideran influyentes dentro del concepto de accesibilidad. De esta manera, Gatti, Cavuoti y Dell'Olio¹⁸ (2.002) proponen la siguiente metodología de cálculo dentro de un modelo taxonómico para el estudio de las condiciones de red y desarrollo del territorio.

Dichos autores explican que la formulación adoptada en este contexto para medir la accesibilidad es muy simple y ampliamente utilizada en el campo de la vialidad. Así, el punto de partida es la matriz de recorrido más breve. En dicha matriz a las filas les corresponde el conjunto de los nudos origen y a las columnas el conjunto de los nudos destino. Los elementos de la matriz están expresados por la función de impedancia d_{ij} relativa a la pareja O-D examinada.

Sumando los elementos de la línea i -ésima se obtiene el valor de la accesibilidad del nudo i -ésimo, que representa la facilidad de acceso, denominada accesibilidad:

$$A_i = \sum_j d_{ij}$$

La "impedancia" puede estar representada por cualquier dimensión que mida la dificultad de los desplazamientos por las ramas de la red, por ejemplo, distancia, tiempo de recorrido o coste del viaje.

Una medida de la accesibilidad más evolucionada es la facilitada por la suma de las impedancias pesadas con el número de los desplazamientos. La accesibilidad del nudo i la da la siguiente expresión:

$$A_i = \sum_j (S_{ij} \cdot d_{ij})$$

Donde, S_{ij} indica el número de desplazamientos, referidos a un periodo de tiempo determinado, hacia el centro genérico j , que tienen origen en el centro i .

Sin embargo, un elemento importante que hay que tener presente al introducir el número de desplazamientos dentro de la formulación, es que se está modificando la definición dada para el concepto de accesibilidad, ya que se está introduciendo una componente de demanda como es el

mencionado número de desplazamiento. Así, el indicador resultante sería una combinación entre la facilidad de desplazamiento dentro de la red y la cantidad de población que utiliza la red, por tanto el indicador dejaría de representar una propiedad morfológica pura de la red.

La accesibilidad total del conjunto de los nudos considerados de la red para este caso de estudio, obtenida tanto sumando la ida para cada i , como la vuelta para cada j es:

$$A_T = \sum_i \sum_j S_{ij} \cdot d_{ij}$$

En caso de que no se conociera el número de desplazamientos del nudo i al nudo j , S_{ij} , pero que si se conociera el número de desplazamientos totales que parten de i , O_i , y el número de desplazamientos totales en el mismo periodo de tiempo hacia el centro j , D_j , se podría adoptar:

$$A_T = \sum_i \sum_j (O_i \cdot D_j \cdot d_{ij})$$

Como se puede observar a través de este ejemplo, la formulación se puede ir complicando para tener en cuenta diversos aspectos que pueden influir en la definición de la accesibilidad según los objetivos buscados. Una variación de estos elementos es propuesta por De Oña, Osorio y Monzón¹⁹ (2.002), quienes al buscar las variables que modifican las condiciones para la implantación de un sistema de transporte, implementaron una formulación en la que lo importante no es la accesibilidad, sino el estudio de la variación de la accesibilidad o del tiempo de viaje de los usuarios.

Así, se propone un indicador que dependa exclusivamente del tiempo total de recorrido, en el que se deben incluir los diferentes tiempos en los que se puede dividir el viaje (tiempo en vehículo, tiempo de aparcamiento, tiempo a la parada más próxima, etc). Finalmente, habrá que crear un indicador que tenga en cuenta la variación de la accesibilidad global (ΔA), entendiendo como tal la variación media para todos los usuarios estudiados, cambien o no de modo de transporte, así se tiene:

$$\Delta A = (1/U) \cdot \sum_{(i=1..U)} \Delta a_i$$

Siendo:

- U : Número total de usuarios estudiados.
- Δa_i : Incremento de la accesibilidad para el usuario i .

Con estos casos expuestos, ya se puede ir comprobando como dentro del concepto, más o menos unitario, de accesibilidad se puede cambiar la forma de medición de la misma o el enfoque en la definición del Indicador. Así, los elementos definidores de los criterios son constantemente reelaborados por los autores y, por tanto, se deja un amplio margen para posibilitar la definición de la accesibilidad de acuerdo a los objetivos perseguidos y a los medios de cálculo disponibles.

Este margen de interpretación existente alrededor del concepto de accesibilidad se convierte en una oportunidad de trabajo dentro de los objetivos planteados por estos trabajos. En cualquier caso, el propio objeto de estudio de los trabajos, lleva a utilizar los conceptos de accesibilidad más asociados a la propia definición espacial de la red. Por ello, se evitará la introducción de ciertas ponderaciones o añadidos en la definición basados en propiedades no morfológicas y se empleará una formulación basada en estudios como los de Martín, Cristóbal y Gómez¹⁷ (2.002), que definen la accesibilidad sobre la descomposición de los diferentes tiempos de viaje que forman parte del recorrido realizado por un usuario de la red.

2.3.2.4.- Indicadores de Utilidad asociados al concepto de accesibilidad

Asociados al concepto de accesibilidad se han elaborado otra serie de Indicadores que pretenden expresar la utilidad que esta aporta. Así, la búsqueda de esos **gradientes de utilidad que la accesibilidad confiere** al territorio o a los distintos asentamientos ha sido el campo de trabajo de la Economía Urbana.

De esta forma, aún no siendo la accesibilidad la única variable estudiada por la Economía Urbana, si que ha sido la característica que con mayor amplitud se ha tratado. Esto es debido al entendimiento de la importancia que tiene la distancia, medida en tiempo, dentro de las relaciones sociales y económicas que se desarrollan en la sociedad.

Así, dentro de estos indicadores de utilidad, se puede destacar el índice de Hansen²⁰ (1.959) como uno de los más famosos. Su expresión matemática es la siguiente:

$$A_i = \sum_j B_j / C_{ij}^x$$

Siendo:

- B_j : El tamaño de la actividad atractora en la zona j .
- C_{ij}^x : El tiempo, distancia o coste generalizado del desplazamiento.
- X : Constante a determinar.

También a través de la teoría microeconómica de la accesibilidad, se ha intentado evaluar la utilidad media obtenida por los ciudadanos de unas características socioeconómicas dadas y viviendo en una zona concreta en sus desplazamientos. La utilidad bruta se define:

$$U_{ij}^t = V_j^t - C_{ij}^t$$

Siendo:

- U_{ij}^t : La utilidad asociada a un individuo t en su desplazamiento de la zona i a la j .
- V_j^t : La utilidad bruta de alcanzar el destino j .
- C_{ij}^t : El coste generalizado asociado al viaje.

Maximizando la función de utilidad se obtiene la expresión de Koenig¹⁵ (1.980):

$$U_i = X_o \cdot \log A_i + C$$

Existen otros indicadores de este tipo, pero tampoco merece la pena profundizar en todas sus variantes, ya que, aunque incorporan la accesibilidad como una característica que determina ciertos condicionantes socioeconómicos, hay que criticar de ellos que no han profundizado en el estudio de las características de las redes. Entendiendo de esta forma las redes, como el verdadero definidor de numerosos fenómenos asociados al territorio y al transporte.

Un nuevo enfoque sobre estos postulados de la utilidad asociada a la accesibilidad se produce con la ampliación conceptual realizada por la Ecología Urbana. En este caso, se consigue pasar de una interpretación meramente económica o de maximización de la utilidad de las personas a una interpretación en la que además de procurar una mejor accesibilidad para los ciudadanos, se intenta buscar que el sistema sea posible a nivel global, o lo que es lo mismo, que tenga en cuenta otros factores como la energía consumida, la compacidad, la cohesión social, la diversidad y otros parámetros incluidos dentro del concepto de sostenibilidad.

Dentro de todo este cúmulo de indicadores, asociado al transporte, se puede mencionar el Indicador de Eficiencia Urbana definido por Rueda²¹ (2.006). Este indicador mide la cantidad de energía o de recursos que se precisa para mantener una determinada organización urbana. Por tanto, su evolución hacia valores menores permitirá conocer la mejora del grado de eficiencia del sistema y, en consecuencia, comprobar si se dirige hacia un modelo más sostenible. La formulación de este indicador es la siguiente:

$$E_f = E/H$$

Siendo:

- E: Consumo total de recursos, incluidos los energéticos.
- H: Indicador de Diversidad.

El Indicador de Diversidad está relacionado con la complejidad organizativa en un determinado territorio, se calcula por medio de la fórmula de Shannon²² (1.948) y forma parte de la teoría de la información. La fórmula de Shannon establece la máxima cantidad de información que se puede difundir por un canal sin error, y para una comunidad dada, esta H máxima se obtiene con la diferenciación máxima de los portadores de información y la máxima equifrecuencia de cada uno de ellos.

En el salto conceptual dado por la Ecología Urbana, se puede apreciar la complejidad de los parámetros usados en el desarrollo conceptual que van adquiriendo los estudios. Sin embargo, cabe apuntar que el consumo total de recursos vendrá condicionado por la propia morfología de las redes, ya que una vez establecidas estas es cara y difícil su modificación. Por tanto, en primer lugar parece fundamental definir e incorporar los efectos de la creación de nuevas redes de infraestructuras para poder actuar sobre estos indicadores relacionados con la movilidad sostenible.

Igualmente, esta clase de Indicadores avanza en la introducción de parámetros ajenos a la propia morfología de la red. Por tanto, este hecho los aleja de los objetivos fundamentales de los trabajos. Además de ello, la complejidad de los parámetros a manejar hace difícilmente implementables estos Indicadores dentro de las limitadas capacidades de cálculo de los trabajos que aquí se presentan.

2.3.2.5.- Indicadores de Conexión

Dentro de la reelaboración de los conceptos asociados a la accesibilidad, uno de los elementos que con mayor asiduidad se han puesto en juego es el de conexión a la red de infraestructuras del transporte. De esta forma, se empieza a poner el centro de atención en la pertenencia o no pertenencia a la red como elemento definidor de la utilidad del espacio.

Así, en primer lugar, se puede comentar el Indicador ICON, definido Turró y Ulied²³ (2.000) entre finales de los años 80 y principios de los 90. Su estudio y definición se basó en intentar corregir las limitaciones que los indicadores de accesibilidad convencionales tenían para evaluar el impacto territorial de las redes de transporte.

El indicador ICON parte de la premisa de que las oportunidades de desarrollo dependen fundamentalmente del nivel de conexión de cada zona al llamado "espacio de los flujos", constituido por los grandes canales de comunicación física y de información. Es, por tanto, una hipótesis distinta de la hipótesis convencional de accesibilidad como distancia a todos los posibles destinos. Por tanto, el indicador ICON define el concepto de distancia entre dos lugares basándose en la conexión relativa de cada uno de ellos respecto a las redes básicas, en lugar de por su lejanía geográfica.

El ICON proporciona el valor de la "conectividad" de un cierto punto a las redes básicas de transporte midiendo el tiempo de acceso, la utilidad del nodo y un término complementario que refleja tanto la existencia de otros nodos que mejoran la conectividad del punto como la presencia de dificultades en las redes. Todo esto se lleva a cabo dentro de una formulación matemática que pretende ser lo más simple, flexible e intuitiva posible. Además, este Indicador pretende ser útil para estudios estratégicos orientados a la oferta y al largo plazo, destinados a explorar las implicaciones espaciales de las infraestructuras del transporte.

Entrando en la formulación matemática del ICON, la conectividad desde cualquier punto a una red se define, en principio, como el mínimo tiempo o coste (t_a) requerido para llegar al acceso más cercano de la red. De manera general:

$$iCON_i = f(t_a)$$

Esta simple medida sería ya un indicador útil para planes de infraestructuras de transporte basados en objetivos territoriales. Sin embargo, para obtener una medida más realista de la oferta del

transporte, es necesario considerar así mismo el nivel de servicio, o la utilidad, que proporcionan los nodos en los que se produce la conexión a la red. Para cada tipo de acceso o terminal puede establecerse un umbral de utilidad deseado o ideal. La falta de utilidad con respecto a este umbral puede ser entendida intuitivamente como un "tiempo de espera generalizado (t_w)" que debe añadirse al tiempo de acceso.

Se incluye además un tercer componente que contempla problemas identificados con cada nodo o con sus conexiones a la red. Aquí se incluyen los factores particulares y las externalidades producidas por el sistema de transporte (ruido, polución, accidentes, etc). Estas reducciones de utilidad (t_g) deben estar incluidas en la formulación general del ICON, a pesar de sus obvias dificultades de cuantificación. De hecho, en las aplicaciones del ICON efectuadas hasta el momento, esta componente ha sido medida en función de las características específicas y propósito del ejercicio y no se ha desarrollado todavía una formulación general para calcularla. La expresión genérica de la conectividad será:

$$iCON_i = f(t_a, t_w, t_g)$$

Esta medida parcial del ICON debe ser adaptada para tener en cuenta qué otros nodos pueden añadir conectividad al punto y agregada para todas las redes de transporte.

Para la obtención final del parámetro ICON se calcula el valor del $iCON_i$ para cada red de transporte ($i=1...N$). De este modo, el valor agregado del ICON es:

$$iCON = \sum_{(i=1...N)} p_i \times iCON_i$$

Donde:

$$\sum_{(i=1...N)} p_i = 1$$

Los pesos relativos pueden ser ajustados en relación con el valor económico añadido por cada sector de transporte o estimados en una primera aproximación por el reparto modal actual. La ventaja principal que dice ofrecer este método es el significado intuitivo del valor agregado del ICON, ya que da el tiempo de acceso promedio a las redes expresado en horas o en minutos. Por otro lado, la suma promediada es consistente con la vocación de planificación estratégica y a largo plazo del ICON, ya que se supone que las contribuciones de cada red a la oferta regional son independientes.

Como se puede observar en la metodología de desarrollo expuesta, el cálculo se convierte en un elemento fundamental del procedimiento debido a su complicación. Cabe añadir que no sólo el cálculo es complejo sino también subjetivo, porque como se apunta desde la metodología aparecen unas ponderaciones a determinar y unas externalidades y unos niveles de servicio que no son fácilmente cuantificables.

Igualmente, el indicador tampoco se puede definir como morfológico, ya que al factor de conexión se introducen una serie de factores exógenos a la red como pueden ser externalidades o faltas de utilidad. Por lo tanto, este indicador tampoco estaría dentro de los adecuados a la definición de objetivos establecida para estos trabajos.

A favor del ICON hay que establecer sus numerosas implantaciones a lo largo de diversos proyectos, en general promovidos desde organismos europeos. Sin embargo, aún con todas estas aplicaciones, no existe una conclusión empírica del porqué de la bondad de este Indicador, a parte de la razón subyacente de que una mejora de la conectividad fomentará unos mejores efectos territoriales.

El ICON muestra la complejidad que se puede alcanzar en las formulaciones que se da a los Indicadores, sin embargo también muestra nuevas aportaciones conceptuales al ámbito de las características de las redes. La aplicación de la conectividad a un Indicador puede considerarse como una aportación al entendimiento de las propiedades de las redes. Este concepto de conectividad pretende medir la multiplicidad de relaciones posibles que asegura la red del sistema. Dentro de los Indicadores de Conectividad más conocidos, y con una formulación mucho menos

compleja que el ICON, se encuentra el índice β o de Kansky²⁴ (1.963), que es la relación entre el número de arcos y el número de nodos de una red:

$$\beta = a / n$$

Siendo:

- a: Número total de arcos.
- n: Número total de nodos.

Asociado a este concepto de conectividad existen más Indicadores como el denominado índice ciclomático:

$$\mu = a - n + p$$

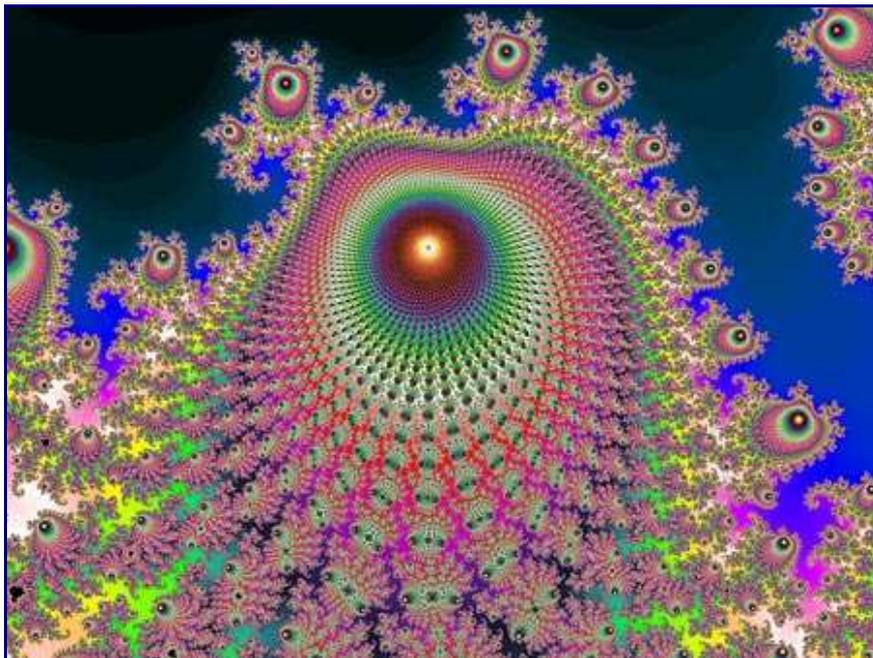
Siendo:

- a: Número total de arcos.
- n: Número total de nodos.
- p: Número de subgrafos posibles no conectados entre si.

Estos indicadores de conectividad se encontrarían dentro de un grupo amplio de indicadores que tienen en cuenta una serie de características de la red como pueden ser la conexión, la homogeneidad o la centralidad entre otros.

2.3.2.6.- Indicadores de Fractalidad

La teoría fractal es una rama del análisis de las redes que se centra en la forma de las mismas, como elemento central definidor de las características de las propias redes. De esta forma, la teoría fractal tiene sus orígenes en el estudio de la formación de los cristales de Von Koch, que muestran como crecen en proporciones muy diferentes las aristas y la superficie que estas cubren, siendo la forma más conocida la del copo de nieve. La teoría fractal fue rescatada por Mandelbrot²⁵ (1.982) dentro de sus trabajos sobre la formulación matemática de las formas naturales, gracias al reconocimiento de la existencia de ciertos patrones en dichas formas.



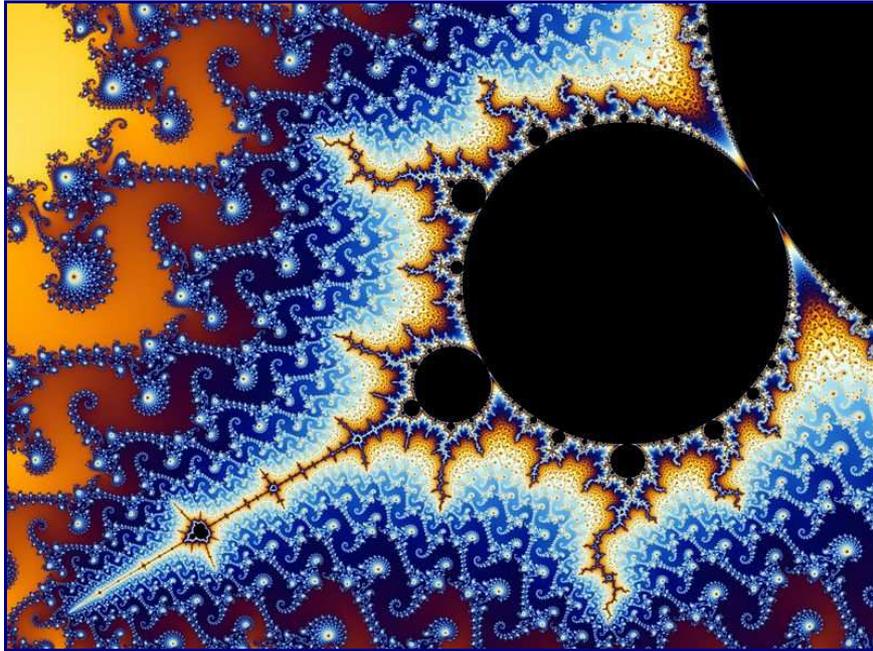


Figura 2.1, formas fractales

(f. Mandelbrot²⁵)

Estas formas fractales presentan una serie de características comunes, entre las que se han estudiado y establecido las siguientes:

- Son demasiado irregulares para ser descritas en términos geométricos tradicionales.
- Poseen detalle a cualquier escala de observación.
- Son autosimilares (exacta, aproximada o estadísticamente).
- Su dimensión de Hausdorff-Besicovitch²⁶ es estrictamente mayor que su dimensión topológica.
- Se definen mediante un algoritmo recursivo.

Pero, por encima de todas estas consideraciones formales o definitorias de los objetos fractales, cabe preguntarse por su aplicación sobre redes de transportes reales y por experiencias ya existentes en este campo o en otros similares.

Así, la aplicación de las formas fractales a las redes de infraestructuras, ya ha sido afrontada desde la óptica de la relación existente entre la longitud de la red y la superficie ocupada por la misma, de manera que redes infinitamente crecientes permanecen sobre superficies finitas. El análisis de las formas fractales de la naturaleza muestra que su formación responde a una regla de división iterativa que mantiene un orden de tamaño. De esta manera, existe una relación constante entre la longitud de la red de cobertura y la superficie, tal y como se expone en la figura 2.2, que muestra una ley de división fractal simple de $n=1/3$ y $N=4$, y otra de ocupación de una superficie cuadrada a la que se aplica una ley de $n=1/2$.

Mandelbrot²⁷ (1.993) ha conseguido probar que en estas formaciones se mantiene constante, en cada paso de la iteración, una relación entre el logaritmo de la longitud y el logaritmo del área cubierta en cualquier fragmento del espacio ocupado. Esta relación, además, varía de un mínimo de 1 a un máximo de 2, pasando por distintos valores según el paso de la iteración de que se trate. Para el caso anterior, se comprueba que esa relación pasa del valor 1 a $\log 3 / \log 2$. De esta forma, al ir cubriendo más superficie esta relación se irá aproximando a 2.

A todo ello, como primer punto de aproximación, se acompaña la figura 2.3 de los resultados obtenidos por Dupuy²⁸ (2.003). Dicho gráfico permite constatar la existencia de una relación fractal entre el número de estaciones de la red de ferrocarriles regionales de París y la superficie de ámbitos concéntricos al centro, con un valor más alto en los círculos centrales.

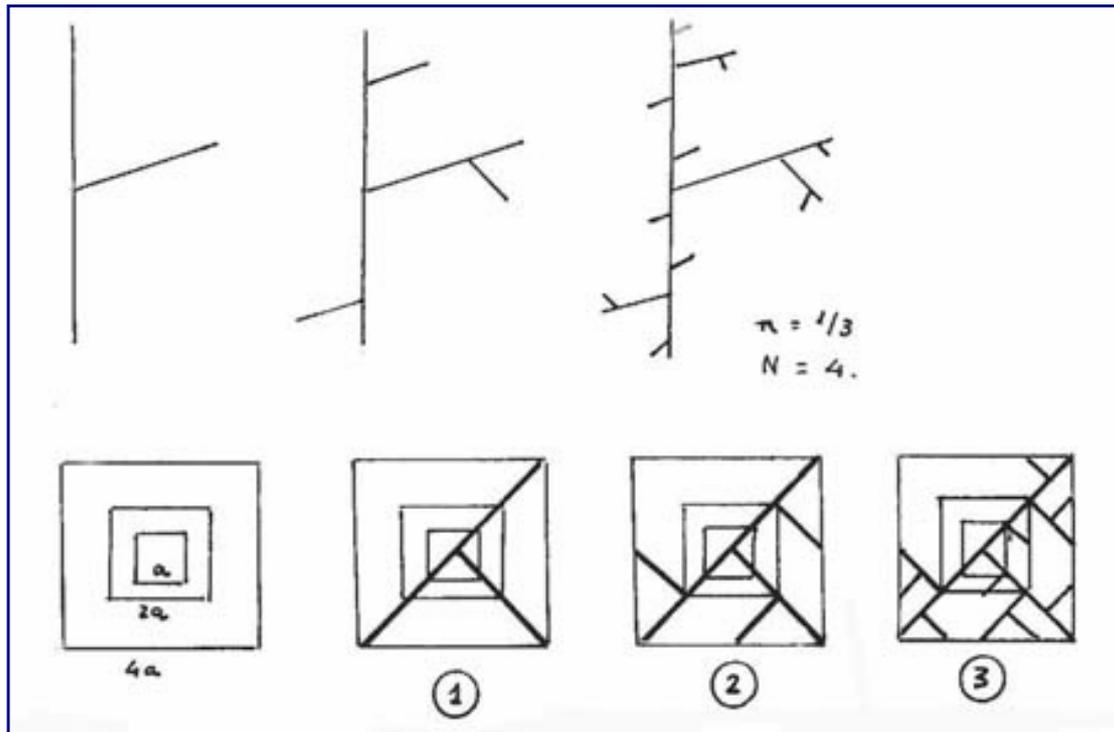


Figura 2.2, desarrollo de figuras fractales

(f. Dupuy²⁸)

En este sentido, y tal como señala Genre-Grandpierre²⁹ (1.999), si la teoría de grafos permite medir las relaciones de proximidad entre los puntos del espacio que una red produce, una aproximación basada en la geometría fractal puede caracterizar, en cierta manera, la proximidad externa a la red y su cualidad de conexión especial. Es por ello, que los más recientes trabajos de investigación buscan representar un diseño de una red urbana a partir de figuras fractales. Se ha modelizado con éxito con este enfoque las redes de saneamiento y de autobuses en la aglomeración de Lyon, la red de metro y ferroviaria de Stuttgart o la citada de la aglomeración de París. Este tipo de análisis permite comparar diferentes morfologías de redes con tal de optimizar la relación entre la longitud de la red (o su coste) y la calidad de servicio por el grado de accesibilidad ofertado.

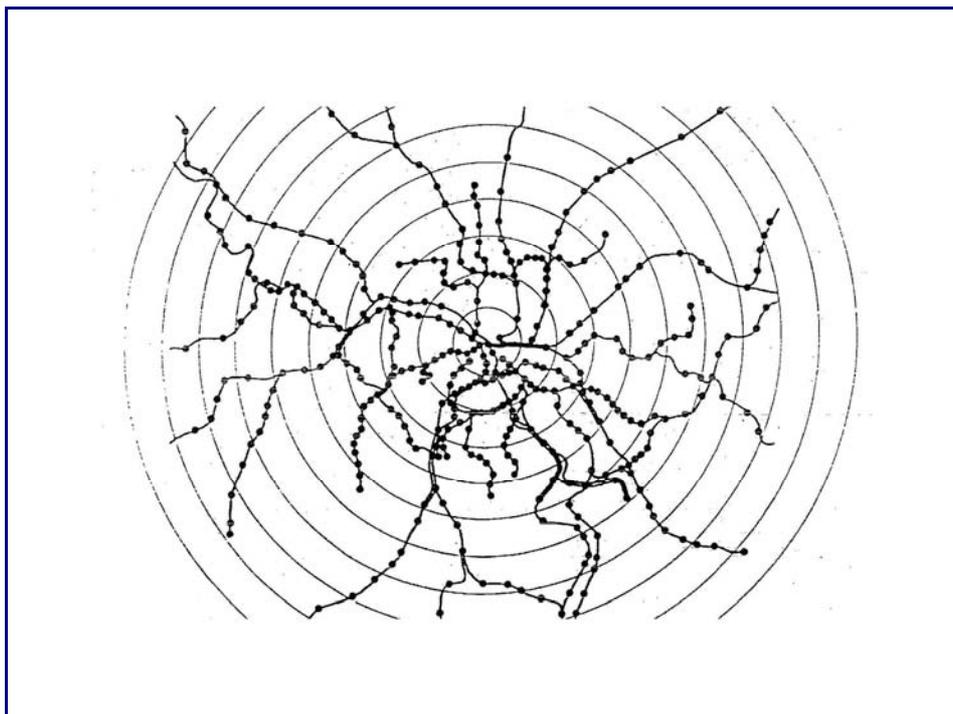


Figura 2.3, red de ferrocarriles del RER de París

(f. Dupuy²⁸)

De esta manera, la lógica de las formas fractales ha sido aplicada dentro de los conceptos abordados por estos trabajos, ya que la geometría fractal permite estudiar la evolución de la cobertura de una red que se va volviendo cada vez más compleja. Con ello, se puede observar donde puede ser conveniente la intervención pública, reforzando la inversión en sectores de la red que están en fases más atrasadas de desarrollo para maximizar la utilidad de la propia red.

2.3.2.7.- Indicadores de Cobertura

El concepto de accesibilidad analizado tiene cierto componente asociado a la gestión de la red. Ello es debido a que la mayoría de los autores contabilizan la accesibilidad a través de los tiempos de viaje, y estos dependen, en parte, de la propia gestión que se haga de la red. Igualmente, los Indicadores de Utilidad asociados a la accesibilidad introducen el concepto de utilidad en sus definiciones para intentar acercarse a una mejor comprensión de las redes. Este nuevo grupo de Indicadores que se va a exponer, aunque siga incorporando características de la morfología de la red, intenta incorporar en la formulación otros parámetros que tienen en cuenta esa gestión y esa utilidad de las redes de infraestructuras del transporte.

El **concepto de cobertura** de la red ya está presente en algunos indicadores pioneros como el definido por Wooton y Pick³⁰ (1.967). En este caso, dentro del estudio de los viajes generados por las familias inglesas, se determinó un Indicador que intentaba cuantificar la influencia que pueden representar algunas características del transporte público en la decisión del modo de transporte a elegir. Así, se concluyó que serán determinantes las frecuencias de los servicios que se presten y para el autobús se establece un Indicador que viene dado por la fórmula siguiente:

$$I_i = \sum_j \sqrt{N_{ij}} / \sqrt{A_j}$$

Siendo:

- N_{ij} : Las frecuencias de autobuses en período no punta, en el camino i , a través de j .
- A_j : El área de la zona j .

Se puede comprobar como, desde los momentos iniciales, ya se comienzan a incluir parámetros relacionados con la forma de las redes, introduciéndose, en este caso, el área asociada a cada una de las paradas de autobús y entendiendo que, además de la frecuencia de los servicios, la superficie de territorio satisfactoriamente atendida por las paradas, influye a la hora de evaluar la capacidad de atracción de los servicios de transporte.

En esta misma dirección se han ido definiendo una serie de Indicadores topológicos a lo largo de la bibliografía. Así, se puede mencionar la distancia a la parada más próxima de transporte público como indicador más sencillo, el cual además se puede ponderar con la frecuencia de los servicios. Otros indicadores definidos son el índice de Shimbél, como suma de distancias al resto de las zonas de una red o el índice de Ingram, que considera también la distancia al resto de las zonas como variable fundamental pero que utiliza funciones más complejas. Su formulación, utilizada también por Echevarría³¹ (1.998), sería:

$$I_i = 1/N \cdot \sum_j A_{ij}$$

Siendo:

- A_{ij} : Función dependiente de la distancia.

De esta forma, el desarrollo de la caracterización de la utilidad que se asocia a las redes de transporte, así como la introducción de la gestión de la red dentro de los Indicadores, se va volviendo más compleja y va adquiriendo paulatinamente unas características que se alejan del estudio puramente morfológico. Debido a ello, dentro de estos trabajos, sólo se atenderá a las definiciones más sencillas dadas para la cobertura, de forma que expresen características espaciales y estén ajustadas a las posibilidades de cálculo que se poseen.

2.3.2.8.- Indicadores de Demanda de Movilidad

Dentro de la investigación de Indicadores, se ha convertido en una tarea habitual su aplicación para identificar la utilidad de la implantación de una nueva red de transporte. De esta forma, ante la necesidad de una ciudad de saber qué actuaciones son las más correctas en materia de transporte, se ha recurrido a los Indicadores como herramienta de trabajo.

Esta situación, demandada por la sociedad, ha originado un conjunto de metodologías e Indicadores que han sido desarrollados asistemáticamente para cada caso de estudio. Como ejemplo de estos Indicadores de identificación de la demanda ante nuevas situaciones de la red de movilidad, se puede volver sobre el estudio de De Oña, Osorio y Monzón¹⁹ (2.002), sobre la metodología de evaluación de la demanda de un sistema de transporte. En este caso, a parte de la accesibilidad, definen una serie de Indicadores adaptados al estudio que realizan, en concreto se definen los siguientes:

1) Indicador de Movilidad: Se define un indicador de movilidad basado en el número de viajes diarios por persona que se realizan en el área objeto de estudio.

$$\Delta M = (1/U) \cdot \sum_{(i=1..U)} \Delta m_i$$

Siendo:

- Δm_i : la variación de la movilidad para el usuario i.
- U: el número total de usuarios estudiados.

2) Indicador de Cambio Modal: La formulación del cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte se basa en la formulación realizada por Giuliano et al.³² (1.990) y modificada por González³³ (2.000), para la evaluación de vías de alta ocupación.

Se consideran cambios positivos aquellos que se producen hacia modos de mayor ocupación y negativos los que se producen hacia modos de menor ocupación.

$$CMNMP = (((VP-TP) + (VP-TD)) - ((TP-VP) + (ND-TD))) / ((VP-VP) + (VP-TP) + (VP-TD) + (TP-TP) + (TP-VP) + (TP-TD) + (ND-TD))$$

Donde el primer término de cada paréntesis representa el modo de transporte utilizado antes de la puesta en funcionamiento del sistema de transporte a la demanda, y el segundo término representa el modo de transporte utilizado después, siendo:

- VP: vehículo privado.
- TP: transporte público.
- TD: transporte a la demanda.
- ND: personas que antes no se desplazaban en los medios mecánicos.

3) Indicadores de Beneficio: Se distinguen dos grandes grupos de población que se beneficiarían del sistema de transporte a la demanda. En primer lugar, los usuarios del servicio, se utiliza un indicador para determinar el beneficio económico que obtienen los nuevos usuarios del transporte a la demanda. Este indicador se obtiene como la media ponderada de las variaciones del coste de los viajes para los usuarios del vehículo privado ($\Delta CUVP$) y para los usuarios del transporte público ($\Delta CUTP$) que cambian de modo hacia este nuevo sistema.

$$\Delta B^* = (UVP^* \cdot \Delta CUVP + UTP^* \cdot \Delta CUTP) / (UVP^* + UTP^*)$$

Siendo:

- UVP*: antiguos usuarios del vehículo privado que cambian hacia el nuevo modo de transporte.
- UTP*: antiguos usuarios del transporte público que cambian hacia el nuevo modo de transporte.

En segundo lugar, la sociedad en general, los beneficios que obtiene la sociedad son, fundamentalmente, de tipo medioambiental. Por tanto, se proponen los indicadores que tienen en cuenta la variación de la contaminación atmosférica y el ruido. Los indicadores propuestos se basan en los utilizados en el proyecto europeo TRANSPRICE³⁴ (1.999) y en el "Manual para la evaluación de inversiones de transporte en ciudades" del Ministerio de Fomento³⁵ (1.996). Este método fue utilizado en la red de transporte del área metropolitana de Granada, en un intento por crear un servicio de transporte.

Como se puede observar, la definición de indicadores es algo habitual, aun cuando su aplicación sea reducida como en este caso. Además, esta serie de estudios se desprenden de la concepción espacial de la red, como auténtica definidora de las condiciones inducidas sobre determinados elementos, como pueden ser el transporte y el territorio. En cualquier caso, los Indicadores asociados a la demanda se comentarán más adelante de forma más extensa.

2.3.2.9.- Indicadores Monetarios

Un elemento presente dentro de la concepción de los Indicadores en busca de una información añadida, es la necesidad de comparar, bien con otros Indicadores, bien entre diferentes alternativas a un problema. De esta forma, a lo largo de esta exposición de Indicadores se ha ido viendo como, en muchos casos, existe una búsqueda de la utilidad máxima o una minoración de las pérdidas. Por ello, siguiendo este razonamiento de la comparación entre alternativas o de la búsqueda de la máxima utilidad, muchos autores llegan a la monetarización. Este subterfugio para la equiparación consiste básicamente en **traducir los Indicadores a dinero**, de esta forma se posibilita la comparación entre elementos que anteriormente no concordaban en sus unidades. Por ejemplo, se traduce el tiempo procedente del cálculo de la accesibilidad a dinero o las superficies cubiertas por el transporte se traducen en un incremento de su valor en dinero.

Dentro del ámbito de la monetarización existen elementos que son, más o menos, cuantificables. Por ejemplo, Echevarria³¹ (1.998), en su ensayo sobre el control de la localización de las actividades como herramienta para la gestión de la movilidad, define el coste potencial del transporte como el coste incurrido al suministrar a un mercado completo desde una localización i dada. Esta definición se traduce matemáticamente en la siguiente expresión:

$$I_i = \sum_j (C_{ij} \cdot T_{ij}) / T_{ij}$$

Siendo:

- C_{ij} : el coste del viaje entre las zonas i y j
- T_{ij} : el número de viajes entre i y j .

El resultado es una fórmula de apariencia sencilla, pero muy compleja de determinar. Esto es debido a que hay que determinar el coste del viaje entre las zonas i y j . A los efectos de la oferta de transporte es sencillo entender que el coste será el referido al autobús, el conductor, los carburantes, costes indirectos, etc. Sin embargo, dentro de la valoración de los costes de la demanda de transporte, está claro que la percepción del valor del tiempo cambia de individuo a individuo, por ejemplo, una persona dedicada al cuidado de su casa y sin salario valorará su tiempo de una manera diferente que una persona que desarrolla funciones directivas en una empresa. Además de esto, cada persona valora el tiempo de forma diferente según las circunstancias del momento, por ejemplo, esa persona con funciones directivas valorará el tiempo de forma diferente un día con gran cantidad de trabajo que un día que está de vacaciones.

A lo explicado en el párrafo anterior hay que añadir que la propia metodología de valoración también interfiere en el valor dado al tiempo. Por ejemplo, la valoración del tiempo no será igual si se realiza una encuesta domiciliaria en la que el encuestado está tranquilamente en su sofá, que si la valoración se realiza a través de una encuesta en cordón en una carretera completamente congestionada y saturada, con los encuestados incómodos y molestos por la situación que están sufriendo.

Ante esta exposición se puede argumentar que existirán unas medias y unas desviaciones típicas que permiten expresar matemáticamente el valor del tiempo de una comunidad de individuos con

unas determinadas características económico-sociales y obtener unos valores fiables. Sin embargo, el principal problema, si es que no son suficientemente importantes los anteriores, es que aún suponiendo que fuese perfectamente fiable la conversión de tiempo en dinero, ¿por qué la planificación tiene que admitir que el óptimo económico sea el óptimo social? De esta manera, parece poco entendible que, por ejemplo, para que la utilidad del transporte sea máxima, haya que admitir que los usuarios del transporte privado necesiten mucho menos tiempo que los usuarios del transporte público en la realización de sus desplazamientos, cuando son estos últimos los que permiten a los primeros desplazarse en vehículo privado gracias a su elección modal.

Como resumen de todo lo dicho y según las conclusiones aportadas por Alonso³⁶ (1.964), el tema del valor del tiempo, a los efectos de decisión de viaje y por tanto de su influencia en la adopción de rutas, es decir, de **la estimación de caminos mínimos, es un tema no resuelto** a pesar de la gran cantidad de estudios de investigación y literatura especializada dedicados a él. Por ello, y porque la monetarización no es una característica morfológica de las redes, en estos trabajos no se tendrán en cuenta esta serie de Indicadores monetarios.

2.3.2.10.- Indicadores Multicriterio

Para finalizar este apartado dedicado a recorrer los diferentes Indicadores existentes en la literatura, se va a hablar brevemente de los Indicadores Multicriterio. Como se ha podido comprobar a lo largo de este apartado 2.3.2 de los trabajos, la cantidad de Indicadores existentes es muy elevada. Así, se puede afirmar que la imaginación que se posee desde el conjunto de los textos existentes, ha permitido crear una vorágine de conceptos, formulaciones y apreciaciones sobre los conceptos y las formulaciones que impide la comprensión transversal de todos los elementos abordados.

Ante este magma definitorio, y considerando la necesidad de evaluar diferentes aspectos dentro del estudio de las redes, del territorio y del transporte, se han definido los denominados Indicadores Multicriterio. Estos se definen, básicamente, por la elección de las diferentes características que interesa considerar dentro de los objetivos planteados y por la ponderación de su valor relativo respecto al resto de las variables.

Dentro de esta conceptualización, y siguiendo los ejemplos ya comenzados para otros Indicadores, se encuentra la formulación dada por De Oña, Osorio y Monzón¹⁹ (2.002). Estos autores definen una formulación multicriterio a partir de los seis indicadores previamente construidos dentro de su modelo. Para ello, previamente, es necesario normalizarlos (U_i) y ponderarlos (w_i) en función de las preferencias relativas y de los criterios del centro decisor. De esta forma, se puede obtener el indicador global de evaluación siguiente.

$$I_G = w_A \cdot U_A + w_M \cdot U_M + w_{MP} \cdot U_{MP} + w_B \cdot U_B + w_{CA} \cdot U_{CA} + w_R \cdot U_R$$

Siendo:

- A: Accesibilidad.
- M: Movilidad.
- MP: Cambio Modal.
- B: Beneficio de los usuarios del servicio.
- CA: Contaminación atmosférica.
- R: Ruido.

De esta forma, se supone que con este Indicador global se dispondrá de una herramienta que permitirá la comparación entre diferentes posibilidades de elección, lo cual redundará en una mejor planificación. Analizada la metodología, estos Indicadores tienen una crítica inmediata, que es el riesgo moral. Así, los pesos asignados para homogeneizar los Indicadores relativos siempre serán subjetivos, y podrán venir impuestos por los compromisos políticos o técnicos del decisor.

A pesar de todo lo que implica el párrafo anterior y aún suponiendo una asignación imparcial de los pesos, esa no es la crítica fundamental. Así, dentro de estos trabajos, lo más criticable de los métodos multicriterio es la pérdida del sentido físico de los Indicadores. De esta forma, dejando en manos de una formulación de este tipo la elección de una inversión, lo que se está haciendo es diluir

los criterios de elección, escogiendo una alternativa que posiblemente no llegue a solucionar ninguno de los problemas de partida. Por ello, estos Indicadores, salvo para casos absolutamente tasados en sus valores y efectos, hacen perder el sentido físico de lo que realmente se está haciendo y con ello la posibilidad de actuar sobre objetivos concretos.

2.3.3.- Enfoques existentes en el estudio de los Indicadores: demanda-oferta

2.3.3.1.- Introducción

A lo largo del apartado 2.3.2 se han expuesto las clases de Indicadores existentes dentro de la literatura especializada, sin embargo, esos Indicadores pueden estudiarse de diferentes maneras. Por ello, en este apartado se analizan los enfoques fundamentales con que se aborda el tratamiento de los Indicadores en los estudios existentes. Este estudio se produce porque hay que entender que un mismo problema, dependiendo de cómo se enfoque, puede aportar lecturas diferentes.

Así, entrando directamente al fondo del asunto, dentro de la literatura consultada existen dos enfoques principales a la hora de abordar los Indicadores, el enfoque de la demanda y el enfoque de la oferta. En el primero, el objetivo fundamentalmente perseguido es el de la satisfacción de la demanda de transporte y el de la minimización de los costes asociados a la movilidad. En el segundo enfoque, el fin principal es el de modelar la oferta de redes de infraestructuras del transporte para conseguir un territorio más equilibrado y con ello una mejor asignación de los recursos, en general asociados a la energía consumida globalmente por el sistema.

Estas dos maneras de afrontar el problema de la planificación de las infraestructuras del transporte parten, hasta cierto punto, de antecedentes similares y pueden parecer equivalentes, sin embargo, el desarrollo de los mismos conlleva hipótesis diferentes y metodologías centradas en aspectos nada similares que pasan a desarrollarse en los epígrafes siguientes.

2.3.3.2.- Estudio de los Indicadores centrado en la demanda de transporte

Dentro del estudio de las redes de infraestructuras del transporte, uno de los primeros elementos que siempre surgen es la necesidad de conocer la demanda de transporte que existe en el territorio cubierto por dichas redes. Así, la necesidad de determinar los usuarios del servicio de transporte es uno de los puntos de partida para establecer las actuaciones a realizar en las redes de infraestructuras. Por ello, parece básico y correcto el abordar su estudio de una manera lo más cercana a la realidad posible, lo que se traduce en la necesidad de cuantificar la demanda.

Sin embargo, a pesar del largo historial de estudio de la demanda de transporte, hasta el momento este no ha dejado herramientas que permitan un sólido conocimiento sobre el problema. Esto es debido en parte a que la multitud de modelos de cálculo existentes han desviado su atención hacia la creación de algoritmos matemáticos más que hacia la comprensión de la propia realidad social, cultural y antropológica que genera los viajes. Aún así, no se puede olvidar que si se poseen más conocimientos sobre las razones que guían al individuo a la elección del modo de desplazamiento o sobre la influencia de los condicionantes sociales del individuo. Sin embargo, estos avances no resultan taxativos a la hora de determinar los motivos del viaje y estos han de ser calibrados individualmente en cada estudio que se realiza.

Así, si se repasa la evolución de los métodos de cálculo de la demanda de transporte, se puede observar como en un principio la determinación de la generación de viajes se realizaba a través de correlaciones con parámetros relativamente sencillos, por ejemplo, se podía entender que la generación podía ser dependiente del parque móvil de vehículos que, por ejemplo, a su vez está vinculado con la renta por cápita de las familias.

De esta forma, en el periodo inicial de estudio, Wooton³⁰ (1.964), en su artículo sobre los viajes generados por las familias, ya postulaba estas teorías a través del manejo de dos variables consideradas para él como fundamentales, como son la distribución de las familias según renta y la distribución de familias según la posesión de automóviles. Por ello, se vió obligado a modelizar su comportamiento a través de funciones descriptivas del fenómeno:

Distribución de familias según la renta: Se asumen conocidas la media y la desviación estándar para la muestra de estudio, las familias están agrupadas en grupos de renta asumiendo que la renta se representa por una función de densidad, de probabilidad continua $\varphi(x)$; siendo el número de hogares que tienen una renta x , tal que $a < x < b$, el dado por:

$$N \int(a,b) \varphi(x) d(x)$$

Siendo N el número de familias en la zona. Para la función $\varphi(x)$ se ha utilizado una distribución gamma, en la que el parámetro α en ella presente se tomará de manera que se pueda actualizar año a año según los índices de crecimiento de la renta en las familias.

Distribución de familias según la posesión de coches: Se establece que existe una función de probabilidad $P(n/x)$ de posesión, si la renta en relación con el precio del automóvil es x . La proporción de familias que poseen n coches está dada por:

$$P(n) = \int(\infty,0) P(n/x) \varphi(x) d(x)$$

Siendo $\varphi(x)$ la función anterior y $P(n/x)$ una función exponencial con constantes conocidas para la zona de estudio.

Con estos datos ya se pueden obtener curvas con la probabilidad de posesión de un número n de coches para las familias según su tipo de renta. Aplicando igualmente la función de incremento de renta con el tiempo y la de disminución de los precios de los automóviles se obtiene la proyección de coches que poseerán las familias a lo largo del tiempo.

Como se puede observar, ya desde estos momentos iniciales del estudio de la prognosis de la demanda, se empiezan a introducir funciones de probabilidad. A ello, hay que incorporar la reflexión de que la satisfacción de la movilidad viene condicionada por la posesión de vehículos privados. Es decir, el modelo de prognosis establece la distribución modal de viajes en función del vehículo privado, relegando el transporte público a la gestión de los desplazamientos que no se realizan en automóvil particular.

A lo largo del tiempo, las funciones de probabilidad van ganando complejidad, a la vez que se asientan sobre datos de tipo estadístico que requieren, para poder ser aplicadas, de simplificaciones tanto cuantitativas como cualitativas. Por ejemplo, abundando en la **creciente complejidad de los modelos** se puede hablar del modelo ESTRAUS, desarrollado e implementado por De Cea y Fernández Larrañaga³⁷ (2.000) en Santiago de Chile.

ESTRAUS es un modelo de equilibrio simultáneo que combina la distribución de viajes, la partición modal y la asignación para analizar redes de transporte urbano con múltiples clases de usuarios y modos de transporte puros y combinados, interactuando sobre una red física única. En el modelo las elecciones de destino y modo tienen una estructura jerárquica, con un modelo de distribución doblemente acotado de maximización de la entropía y de partición modal Logit jerárquica. Una de las características importantes de este modelo es la consideración de los efectos de la congestión sobre la red vial y sobre cada red de transporte público.

Para la resolución del modelo, el equilibrio entre los costes/tiempos y los modos se realiza a través del equilibrio de flujos, basado en el primer principio de Wardrop³⁸ (1.952), y que viene a decir que cada individuo trata de minimizar su costo de operación o costo medio generalizado de viaje. La formulación de todo este proceso lleva a la obtención de un algoritmo solución agrupado en ocho sumandos, de los cuales algunos se pueden suprimir. Para la resolución de este algoritmo además deberá procederse a la calibración de una determinada cantidad de parámetros.

Como se puede comprobar a través de la descripción realizada, el método presenta una **complejidad matemática y computacional realmente alta**. Además, se puede ver como la asignación modal se produce a través de la optimización de costes, lo cual impide centrar las actuaciones en la mejora de los modos públicos de transporte. Esto es así, porque los tiempos de viaje en vehículo privado suelen ser menores que los del transporte público y, a parte de por las

dudas ya expuestas sobre la monetarización, tampoco se internalizan en el modelo todos los efectos que producen las diferentes redes de transporte. Sin embargo, lo realmente importante de este ejemplo es que esta complejidad se encuentra asumida por la gran mayoría de las metodologías basadas en la optimización de la demanda. Así, la complicación de los cálculos choca para un lector que no sea experimentado en la materia, ya que sin duda la explicación anterior no resulta fácil de entender.

Otros ejemplos dentro de este campo podrían ser los modelos desarrollados por Montella, Gallo y D'Acerno³⁹ (2.001), quienes implementan un modelo similar al anterior. En este caso se trata de un modelo de asignación multimodal, con la novedad de desarrollarlo para poder incorporar políticas de Park and Ride. La metodología de elección modal se basa en el Cross Nested Logit desarrollado por Vovsha⁴⁰ (1.997), y el modelo de elección de rutas se basa en un Logit Multimodal.

También con este enfoque basado en la introducción dentro del modelo de un sistema de Park and Ride, Carrese y Gori⁴¹ (2.001) postulan un método basado en el cálculo mediante funciones Logit. Sin embargo, como novedad, estos autores ya son conscientes de la limitación de la metodología que van a utilizar en el diseño de una red de infraestructuras del transporte, y asumen las conclusiones de un conjunto de autores formado por Miller⁴² (1.973), Newell⁴³ (1.979) y Morlok⁴⁴ (1.978), que aventuran que **la planificación de redes, basada en la formulación matemática para un problema de optimización a través de una función objetivo, no admite una formulación exacta.**

Aún más allá, dentro de la misma publicación, Carrese y Gori⁴¹ (2.001), muestran como otros autores que han trabajado sobre esta clase de métodos de demanda, y entre los que se encuentran Rea⁴⁵ (1.972), Rhome⁴⁶ (1.972), Marwah et al⁴⁷ (1.984), Axhausen et al⁴⁸ (1.984), Van Nes et al⁴⁹ (1.988), Filippi et al⁵⁰ (1.988), Gori⁵¹ (1.989) y List⁵² (1.990), concluyen que **la utilización de métodos heurísticos puede ofrecer resultados aceptables pero que, en cualquier caso, no pueden asegurar una solución óptima.**

Todo lo expuesto se ve refrendado en la propia conclusión del artículo de Carrese y Gori⁴¹ (2.001), ya que exponen que la propia complejidad de los cálculos hace que estos enfoques no puedan ser implementados en las grandes redes subterráneas. Por ello, en su exposición han jerarquizado la red, de manera que se permita la aplicación del método a las grandes redes de transporte ferroviario. A priori, este planteamiento no tiene por que soportar ninguna objeción conceptual, el interrogante surge cuando se comprueba el gran esfuerzo matemático desarrollado para finalmente acabar recurriendo a simplificaciones. Por tanto, la puntualización a la metodología es evidente, **parece tener más sentido el conservar la percepción física de la red que perderse en la complejidad del cálculo, de esta manera, se podrán comprender también físicamente las simplificaciones que se realizan a lo largo de la modelización.**

Esta pérdida de la realidad física de las metodologías basadas en la optimización de las funciones de demanda aparece en numerosos ejemplos. Si se aborda el trabajo por Bellei, Gentile y Papolo⁵³ (2.001), se pueden identificar algunos de los aspectos comentados anteriormente. En este caso, los autores abordan el problema de la optimización del transporte urbano mediante la optimización del peaje y la adecuación de la frecuencia.

En primer lugar, respecto a la complejidad de la formulación estamos ante un caso parecido a los últimos explicados. Para la determinación de la función de demanda se utiliza un Nested Logit y para la definición de la función de oferta se recurren a los estudios realizados por Daganzo⁵⁴ (1.983). Todo ello se formaliza dentro de un juego no cooperativo, dentro de la Teoría de Juegos de Cournot⁵⁵ (1.838) a resolver mediante un juego de Cournot-Nash⁵⁶ (1.950). Con este planteamiento se evidencia la complicación matemática en el enfoque que se hace del problema.

En segundo lugar, respecto de las simplificaciones, la metodología afronta algunas simplificaciones para poder hacer frente al problema de cálculo que se le avecina. Así, para facilitar la operabilidad, en el cálculo de la demanda se asume que esta está definida por una única clase de usuario y la elasticidad se define en función de la decisión de realizar el viaje y de la decisión del modo de transporte a elegir, pero se opta por no considerar la elección del destino. Evidentemente, todas estas simplificaciones apuntan en la línea de la pérdida de la concepción física del viaje, ya que la elección del destino y las características personales del viajero son elementos primordiales a la hora de plantear un desplazamiento en la vida real.

Finalmente, en relación con las conclusiones obtenidas, se encuentran los siguientes resultados:

	<i>Situación actual</i>	<i>Mejor situación conseguida</i>
Tiempo en transporte público con carril compartido (min.)	36,1	35,3
Tiempo en transporte público con carril reservado (min.)	31,2	29,5
Tiempo en transporte privado con carril compartido (min.)	12,1	9,8
Tiempo en transporte privado con carril reservado (min.)	12,0	9,7

Tabla 2.4, mejora de tiempos entre situaciones

(f. Bellei, Gentile, Papolo⁵³)

Todos los cálculos realizados a través del complejo proceso planteado conducen a unos resultados en los que la mejora del transporte público es mínima y sigue siendo escasamente competitivo con el transporte privado, que es tres veces más rápido. Es más, la mejora del transporte privado es proporcionalmente mayor que la experimentada por el transporte público, por tanto toda esta compleja metodología parece que poco puede ayudar a la mejora de la movilidad de los ciudadanos de esa área metropolitana.

En este punto se puede identificar la pérdida de la concepción física del sistema global del transporte. Si a los datos anteriores se añade que el estudio muestra como el peaje produce unos desplazamientos de los usuarios desde el transporte privado al público, es fácil comprender que lo que realmente sucede es que el peaje excluye a una serie de usuarios hacia el transporte público por ausencia de medios económicos, consiguiéndose aumentar la cantidad de personas que requiere gastar el triple de tiempo en acudir a sus destinos sin conseguir que el transporte público mejore sustancialmente. Esto tiene dos posibles lecturas, desde el punto de vista de la planificación, los peajes ayudan a alimentar los sistemas de transporte público y a aumentar su rentabilidad, pero desde el punto de vista social parece inaceptable el condenar a un grupo social a perder el triple de tiempo en sus desplazamientos, ya que en ningún momento se plantea la mejora del transporte público con una oferta adecuada.

A través de la visualización de las escasas mejoras en los servicios de transporte que genera el ímprobo esfuerzo matemático realizado, así como de la pérdida de la percepción física del problema de la planificación de la movilidad que suponen tanto la simplificación del problema como la compleja formulación, se puede percibir en estas metodologías la falta de una verdadera política global sobre la red de infraestructuras del transporte basada en la mejora de la movilidad de los usuarios, la planificación de los asentamientos o la mejora energética del sistema.

Resumiendo lo expuesto, se puede decir que los **métodos de demanda** obvian la mayor de las características de las redes de infraestructuras, es decir, **no tienen en cuenta que las redes son las auténticas configuradoras de las condiciones espaciales para la definición de las relaciones entre los asentamientos y entre las personas**. Por ello, estos métodos, a través del cálculo detallado y de la minimización de costes, se han desviado de los objetivos más importantes que se pueden buscar en la planificación de las redes de infraestructuras.

2.3.3.3.- Estudio de los Indicadores centrado en la oferta de redes de infraestructuras

Los métodos de oferta de infraestructuras, al menos tal y como se están entendiendo desde estos trabajos, tienen dos elementos diferenciales fundamentales respecto a los métodos de demanda anteriormente comentados. En primer lugar, parece necesaria la superación de todas las limitaciones que se han ido desgranando en el apartado precedente. Así, por un lado, se debe atender a las verdaderas mejoras sociales, energéticas y ambientales que ofrecen unas redes de infraestructuras del transporte racionales y una planificación global con un enfoque físico. Por otro lado, se cuestiona la optimización de costes, tiempos y utilidades globales que se plantea y que, finalmente, acaba centrada en la monetarización de elementos difícilmente cuantificables y más difícilmente modelizables y en la definición de metodologías obsesionadas por la precisión del cálculo.

En segundo lugar, las metodologías basadas en la demanda han aportado elementos que han de servir de base y de apoyo a los métodos de oferta de infraestructuras. Entre estos elementos se puede hablar de los métodos de prognosis de la demanda. Ya que, en cualquier caso, parece necesario saber sobre qué población se está actuando y cuales son las demandas potenciales de transporte que se van a requerir. De esta forma, se podrán planificar las redes de infraestructuras del transporte de manera que se obtengan los efectos deseados por el planificador.

Otro elemento a valorar positivamente es la amplia definición de Indicadores del Transporte que se han venido desarrollando y que sirven de nexo entre las características de las redes, la movilidad y el territorio. De esta forma, la accesibilidad, entendida como la facilidad o la resistencia que un individuo tiene para poder desplazarse entre dos puntos, o la cobertura, entendida como el espacio físico que la red y sus servicios de transporte logran atender dentro de un territorio, son elementos de indudable utilidad y que, dentro de su propia definición, logran **conjugar las características de las redes y de los servicios del transporte con los propios efectos que estos originan.**

Por todo ello, los métodos de oferta deben ser la herramienta que logre articular la planificación de las redes de infraestructuras con sus efectos territoriales y con la propia mejora de la gestión del transporte. Esta metodología del entendimiento de la oferta de redes de infraestructuras, como auténtico modificador de las condiciones que hacen que determinados territorios sean o no atractivos, ya ha sido estudiada por diversos autores, y por eso se va a dar un recorrido por algunos de los ejemplos más representativos encontrados.

Con los antecedentes expuestos, se puede hablar de determinadas políticas europeas marcadas por la consciencia de la relación entre accesibilidad y usos del suelo. Dentro de este campo se mencionan dos ejemplos representativos:

1) En Gran Bretaña, se ha aprobado la Directiva de Política de Planificación denominada PPG13, desarrollada por los Departamentos de Medio Ambiente y Transportes⁵⁷ (1.990). Esta directiva aconseja a las autoridades locales cómo deberían integrar la planificación del transporte y los usos del suelo. El objetivo clave es asegurar que las autoridades locales lleven a cabo sus políticas de desarrollo urbano y sus programas de transporte de manera que:

- Reduzcan el crecimiento del número y longitud de los viajes motorizados.
- Fomenten modos de transporte alternativos con un menor impacto medioambiental.
- Reduzcan la necesidad del automóvil.

La necesidad de gestionar la demanda y no de, únicamente, satisfacerla con nuevas infraestructura de transporte, aparece como un aspecto básico en esta Directiva. Así, si se pretenden mantener unos niveles altos de eficiencia del sistema de transporte es necesario, especialmente en áreas urbanas, promover alternativas aceptables al automóvil, permitiendo a los ciudadanos que alcancen sus destinos diarios con una menor necesidad de modos motorizados. Más concretamente, en lo que se refiere a políticas de localización de actividades recomienda:

- Localizar la mayor cantidad de zonas residenciales en las áreas urbanas ya existentes de forma que tengan mayor accesibilidad a los diferentes equipamientos y a una amplia oferta de modos de transporte público.
- Promover desarrollos de suelo en zonas capaces de ser bien servidas por modos de transporte público.
- Evitar expansiones importantes de unidades residenciales en pueblos o ciudades pequeñas donde sea probable que se generen elevadas necesidades de viajes recurrentes o de larga distancia y donde las necesidades de desplazamiento no puedan ser bien satisfechas por el transporte público.
- Concentrar desarrollos residenciales de alta densidad cerca de los centros nodales de transporte público o a lo largo de corredores bien servidos por estos modos.
- Relocalizar diferentes actividades económicas siguiendo criterios de máxima accesibilidad.

2) Con la filosofía de: *"el negocio adecuado en el lugar adecuado"* surgió en el Ministerio de Vivienda holandés⁵⁸ (1.994) el plan ABC. Dos elementos han sido claves en su definición, el nivel de accesibilidad de una zona y el patrón de desplazamientos de una empresa. Este plan define tres tipos de zonas, en función de sus niveles de accesibilidad según modos de transporte:

- Zonas A: Acceso óptimo al transporte público; la accesibilidad en coche es menos importante.
- Zonas B: Puntos nodales de transporte público con vías urbanas de primer orden.
- Zonas C: Acceso óptimo por carretera; sin exigencias respecto al transporte público.

De esta forma, oficinas y compañías con funciones de servicio público son típicamente zonas A; empresas con importantes funciones de distribución o uso extensivo de mano de obra y que necesitan grandes superficies deberán colocarse en las zonas C. Se está tratando a través de la regulación de los planes regionales atraer compañías y equipamientos con alto número de empleados y de generación de viajes a zonas A y B. Las empresas que dependan del transporte por carretera, deberán elegir zonas B y C.

Estos enfoques, aunque bien intencionados en cuanto a su lógica de ordenación de las actividades en relación con la accesibilidad, pecan de cierta ingenuidad, ya que nada dicen de las nuevas infraestructuras del transporte. Se explica la necesidad de ubicar las actividades sobre los lugares con accesibilidad óptima según el caso, sin embargo, pasan por alto la modificación de la accesibilidad que supone la construcción sectorial de nuevas infraestructuras de gran potencia como ferrocarriles y autopistas, ya que estas nuevas redes modifican por completo las características de la accesibilidad a nivel local y sobrepasan la capacidad de decisión de las corporaciones locales e incluso regionales.

Otro de los campos donde es más fácil visualizar esta relación entre territorio y transporte viene dado por la Economía Urbana. Ya se han comentado anteriormente algunos de los Indicadores introducidos por esta disciplina, pero cabe destacar en este momento el origen de muchos de esos Indicadores. El origen básico resulta de la relación entre accesibilidad y valor del suelo, o lo que es lo mismo, transporte y territorio relacionadas a través de las redes de infraestructuras. Muchas de las teorías de la Economía Urbana han pivotado en la búsqueda de las repercusiones que tiene la accesibilidad sobre el valor del suelo, entendiendo que la ubicación de las actividades productivas tiene relación con la posibilidad de comunicar esas actividades con los asentamientos humanos.

Entrando a enumerar estos modelos se puede hablar de aquellos que tratan de estimar la evolución de las distintas clases de localizaciones, dentro de la localización industrial se puede hablar de los modelos de Isard⁵⁹ (1.956) o Pred⁶⁰ (1.967), sobre la localización residencial se tienen los trabajos de Hansen²⁰ (1.959) y sobre la localización de comercios se poseen los análisis de Berry⁶¹ (1.972). En un contexto diferente están los trabajos de Alonso o Wingo⁶² (1.961), que buscan relacionar la influencia del coste del transporte en la formación del precio del suelo, que a su vez es el que determina las actividades que se pueden implantar. Finalmente, dentro de la economía urbana, se pueden mencionar los trabajos de Lowry⁶³ (1.966) en su afán por estimar la respuesta de todo tipo de actividades en función de unos índices de atractividad de cada zona cuantificada según parámetros como la renta, el suelo disponible o la accesibilidad.

Todos estos trabajos pertenecientes a la Economía Urbana consideran la accesibilidad como uno de los factores fundamentales en la localización de actividades y en el desarrollo urbano. Sin embargo, en general, obvian el carácter físico y material de las redes y se centran en un único efecto de los que las redes de infraestructuras del transporte producen, que es la modificación de la accesibilidad. Este primer enfoque, que muestra las consecuencias de la mejora de la accesibilidad sobre el uso del suelo o la ubicación de las actividades es realmente importante, puesto que ya se puede distinguir que **las redes de infraestructuras del transporte no son un elemento neutro sobre el territorio**, sino que generan unos gradientes en la movilidad que genera efectos sobre las actividades y sobre el territorio, que en general no son considerados en la propia planificación de dichas infraestructuras.

Además de lo dicho, es necesario acentuar el hecho de que la mejora de la accesibilidad de determinadas zonas genera efectos negativos en zonas contrapuestas. Estos efectos de las redes ya han sido estudiados, por ejemplo por Herce⁶ (1.992), quien a través del estudio de la construcción de nuevas variantes de carretera en ciudades de tamaño medio, identifico tres zonas de aparición de plusvalías en el territorio. Así, determinó una primera zona entre la variante y el núcleo de población en la que la plusvalía se incrementaba de mayor manera que en el resto del municipio, una segunda zona exterior a la variante en la que la plusvalía también aumentaba pero en una menor cantidad y una tercera zona, diametralmente opuesta a la variante y situada al otro lado del núcleo urbano, en el que la plusvalía del suelo disminuía.

Con este ejemplo se puede observar la importancia de la oferta de infraestructuras en la generación de efectos sobre el territorio, efectos a veces mucho más importantes que los inicialmente previstos a la hora de plantear la propia infraestructura del transporte. A través de esta lectura de las redes se puede llegar fácilmente a una nueva conclusión, y es que **no existe una forma unívoca de plantear las redes**, es decir, dependiendo de los efectos que se quieran causar, será necesario plantear una u otra forma para la red. Esto ya fue mostrado por Bunge⁶⁴ (1.962), a través de su ejemplo, mostrado en la siguiente figura, de comunicación en una red formada por puntos, en ella se obtenía distinta solución según el planteamiento lógico de un usuario, de un promotor de la red o de otro tipo de objetivos.

Otra aplicación práctica de la oferta de infraestructura a un corredor viario fue realizada por Aragón⁶⁵ (1.975), que en el estudio del trazado más conveniente de una nueva autopista entre Madrid y Galicia, formuló un modelo que permitía relacionar cuantitativamente la población, la capacidad de crecimiento de cada municipio del corredor viario y la población ponderada por la accesibilidad al resto de municipios. De esta manera, se podía estudiar el trazado que mejor se adaptase a la realidad económica y social que se quisiese generar en los municipios Gallegos.

Una tercera exposición que permite ejemplificar la relación entre las condiciones inducidas por las características de las redes de infraestructuras del transporte y el territorio viene dada en los análisis hechos por Gatti, Cavuoti y Dell'Olio¹⁸ (2.002). Dentro de este estudio se concluye que el empleo de los modelos taxonómicos en el análisis socio-económico-territorial (modelos descriptivos) permite evidenciar geográficamente la relación entre la variación de las amplitudes de los hinterlands territoriales de los centros hegemónicos y la variación de la accesibilidad.

Esta deducción se realizó a través del estudio del territorio de la provincia de Bari a lo largo del periodo de tiempo comprendido entre 1961 y 1991. Se localizaron los hinterlands de influencia para las actividades laborales y se evidenció la estructura jerárquica de los centros examinados. Gracias a este proceso se han determinado las variaciones de la estructura jerárquica de los centros para los años 1961 y 1991, evidenciando la estrecha interdependencia espacial de las variaciones de accesibilidad de la red viaria beneficiadas por las intervenciones de modernización.

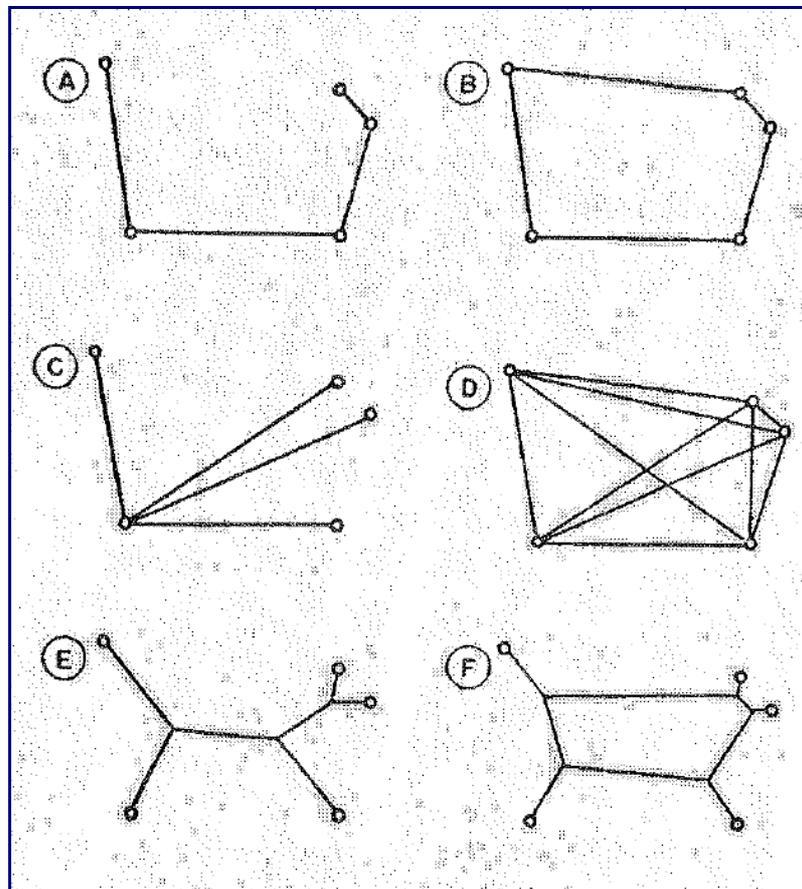


Figura 2.4, alternativas de redes de distancia mínima según objetivos (f. Bunge⁶⁴)

Un último ejemplo entre accesibilidad y relaciones sociales y económicas se puede encontrar en los trabajos de López Pita⁶⁶ (2.001), en este caso el análisis ya no defiende tanto la relación entre infraestructuras y asentamientos territoriales como la relación entre transporte aéreo y ferroviario y las condiciones sociales y económicas. De esta manera, a través de la mejora de la accesibilidad que proporcionan las nuevas redes de ferrocarriles de alta velocidad se pueden generar nuevas relaciones sociales y económicas que con otras infraestructuras de menor potencia no se podrían dar. Yendo más allá de estas afirmaciones, se puede conjeturar que esas nuevas relaciones sociales se pueden materializar en otras formas diferentes de asentamientos o actividades asociados a estas nuevas infraestructuras anteriormente inexistentes.

Estos son sólo algunos de los ejemplos que ponen de manifiesto la relación entre una sola de las características morfológicas que poseen las redes, la accesibilidad, y las condiciones que éstas provocan en las relaciones sociales, las relaciones económicas, el valor del suelo, la localización de asentamientos de todo tipo o las áreas de influencia de las ciudades. Como se puede ver, existe una lógica subyacente a la implantación de las redes de infraestructuras del transporte que se suele olvidar y que va mucho más allá de la mera maximización de la utilidad de los usuarios de los servicios de transporte.

Desafortunadamente, como ya apuntan Carrese y Gori⁴¹ (2.001) en sus estudios, los intentos de integración de los modelos de previsión del tráfico en el proyecto de redes son escasos, sin embargo, lo peor es que los intentos de integración de las características asociadas a las redes en los proyectos son todavía más escasos, lo cual redundaría en la introducción de diferentes gradientes de accesibilidad, cobertura, conectividad o conexión en el territorio que no son aprovechados de la manera social, económica y medioambiental más correcta.

Por todo ello, **la oferta de redes de infraestructuras se demuestra como un elemento clave a la hora de modelar el territorio**, de forma que todos los elementos que rodean la vida del ser humano puedan configurarse de una forma más adecuada. De esta manera, la definición de Indicadores que consideren las características que ofertan las redes, las cuales son a la postre las que condicionan los asentamientos y las actividades, se configura como uno de los mejores métodos de análisis que se posee para planificar la configuración del territorio a través del entendimiento de la lógica del espacio de las redes.

2.3.4.- Conclusiones de interés para el desarrollo de los trabajos extraídas del estudio de los Indicadores asociados a las redes de infraestructuras

A lo largo de este apartado se han intentado mostrar diversos elementos relevantes para la comprensión de la utilidad de los Indicadores asociados a las redes de infraestructuras del transporte y para la visualización de sus formas concretas de aplicación. Además de esto, el apartado se ha ido estructurando de manera que se pudiesen identificar los elementos que mayor trascendencia y utilidad pueden tener a la hora de plantear estos trabajos. Por tanto, en este breve epígrafe, lo único que se pretende es condensar las líneas maestras con que se han desarrollado los trabajos en lo referente a los Indicadores asociados a las infraestructuras del transporte.

Explicado esto, lo primero que es necesario recalcar es **el enfoque de los trabajos, que se orientan sobre el estudio de la eficacia espacial de las redes a través de la oferta de infraestructuras**. Esto no quiere decir, como puede desprenderse de algunos textos técnicos, que sea necesario ofertar infraestructuras para continuar con las mismas dinámicas de crecimiento existentes, sino que lo fundamental es comprender qué características morfológicas poseen las redes y cómo la oferta de infraestructuras modifica dichas características y, por tanto, los condicionantes principales de la planificación en general y de la economía, los aspectos sociales, los asentamientos o la propia gestión del transporte en concreto. La consecuencia de todo ello es una visión general de las redes que sólo puede obtenerse desde un enfoque alejado de aquel fomentado por los métodos de demanda y consistente en la mera optimización de los costes o de las utilidades asociados a los servicios del transporte. Esta es una precisión importante, ya que estos trabajos no pretenden tratar sobre los servicios del transporte, sino sobre las redes de infraestructuras del transporte, sus características morfológicas y los efectos sobre los propios servicios de transporte y sobre muchos otros elementos.

Con respecto a los Indicadores a utilizar, Fàbregas y Unceta¹³ (1.998) en uno de sus análisis muestran una serie de **características que deben presentar los Indicadores** que parecen extraordinariamente razonables:

- La no existencia de correlaciones entre ellos.
- La facilidad de obtención, dando preferencia a los más sencillos.
- Su fiabilidad, esto aportará cierta garantía de trabajar sobre un conjunto de datos homogéneo.

De esta forma, repasando las clases de Indicadores analizados y asumiendo los criterios expuestos, se puede identificar ya qué Indicadores serán utilizados a lo largo de los trabajos. En primer lugar, por lo que se refiere a la metodología, esta será de oferta, tratando de identificar las características que definen la eficacia espacial de las redes ferroviarias. Por lo tanto, se procurará indagar en Indicadores que permitan aumentar el conocimiento que se tiene de las redes, dejando para otros análisis el estudio de la demanda de movilidad.

En segundo lugar, por lo que se refiere a los Indicadores concretos de estudio, se puede comentar que los Indicadores Básicos serán tomados de otros trabajos, como los ya mencionados de Julià⁹ (2.006), y de las propias mediciones que se realicen en los modelos que se vayan desarrollando. De estas mediciones, se extraerá un Indicador de Densidad que relacione las superficies urbanizadas con las superficies servidas por el ferrocarril.

Por otro lado, respecto a todos los elementos relacionados con la accesibilidad que se han estudiado, se definirá un Indicador de esta característica alrededor de los conceptos ya expuestos por Martín, Cristibal y Gómez¹⁷ (2.002). El Indicador de Accesibilidad definido será de fácil obtención dentro del conjunto de los estudiados.

Entrando en los aspectos asociadas a la conexión y a la fractalidad de la red, se profundizará en esta última característica a través del desarrollo de los estudios iniciados por Dupuy⁶⁷ (1.991). De esta forma, se promoverá el estudio de un campo altamente relacionado con la morfología de las redes y que hasta el momento no ha sido desarrollado en exceso. Por otra parte, la valoración de la utilidad de la red se realizará a través de la cobertura y de la definición dada para la misma por Wooton³⁰ (1.967). Con este concepto, se podrán estudiar aspectos relacionados con la eficacia espacial de las redes, relativos a las superficies afectadas por el transporte o a las frecuencias de los servicios.

Finalmente, los Indicadores Monetarios y Multicriterio no serán considerados en el estudio. Esto es debido a dos factores fundamentales, la pérdida de la percepción espacial del problema y la necesidad de introducir consideraciones subjetivas en la definición de los Indicadores.

Respecto a la fiabilidad como característica fundamental de los Indicadores, se puede decir que los Indicadores escogidos han sido ampliamente utilizados. Además, su utilización se relaciona con conceptos bien definidos y que poseen una perceptibilidad física y espacial que otros Indicadores no poseen, lo cual les confiere mejores posibilidades a la hora de comprender las relaciones reales con el resto de elementos que se analizan en el trabajo. Así mismo, dentro de las posibilidades de definición, se priorizarán los Indicadores más sencillos que, como consecuencia, posibilitarán un cálculo más simple dentro del análisis.

De esta forma se definirán cuatro Indicadores, accesibilidad, cobertura, fractalidad y densidad, independientes entre si, que cumplirán los criterios predefinidos a lo largo de todo el apartado y que permitirán un estudio transversal de las características de las redes.

2.4.- La construcción metodológica en la elaboración de modelos de estudio de las redes de infraestructuras del transporte

2.4.1.- Introducción

Dentro del estudio de las características de las redes de infraestructuras ferroviarias existe un paso que es indispensable abordar, se trata de la definición de una arquitectura de representación gráfica

y de cálculo que permita modelizar lo que se pretende estudiar. Hasta este momento de la exposición, se ha valorado el objeto de análisis y las herramientas con que se cuenta para su estudio, sin embargo, para poder realizar ese análisis existe un camino intermedio que es necesario recorrer y que necesita de una serie de reflexiones previas.

De esta forma, **en la construcción de una metodología de modelización adecuada reside parte del éxito de estos trabajos**, ya que, la importancia del procedimiento dentro de la consecución de los fines es un elemento fuera de toda duda. En este caso, el procedimiento lo constituye la construcción de una metodología lo suficientemente sólida, clara y fiable como para que se minimicen las posibles dudas conceptuales sobre su validez. Así, para conseguir esos objetivos uno de los elementos fundamentales será la destreza en el manejo de la información. Por ello, no se puede olvidar que los continuos avances en el tratamiento de los datos, a través de los nuevos equipos informáticos y paquetes de software, suponen una mejora en las posibilidades de investigación. Sin embargo, este aumento en la capacidad de manejo de datos, se ve a su vez diluido por la mayor complejidad de los métodos y por la constante introducción de nueva información dentro de los modelos. Este bucle entre cantidad de información y capacidad de tratamiento de la información se va retroalimentando y es uno de los elementos que se pretenden evitar desde estos trabajos. Para ello, en la construcción metodológica, se empleará la información que se considere necesaria por aportar elementos de utilidad, además, el procedimiento de cálculo será sencillo allí donde no se requiera otra cosa o complicado donde no quede otro remedio.

Dentro de esta consideración del procedimiento como una parte vital de la obtención de los resultados, es necesario entender que a lo largo de los trabajos se deberán realizar algunas simplificaciones con la finalidad de mejorar la eficiencia de la metodología. Estas simplificaciones se indicarán y explicarán lo más claramente posible a lo largo de la misma para así no fallar a los objetivos metodológicos de fiabilidad y confianza.

No se puede olvidar que muchos de estos elementos, relativos a la metodología y a la simplificación de la misma, ya han sido abordados en sus análisis por otros autores. Por ello, a lo largo del siguiente epígrafe, se van a estudiar los problemas metodológicos que han ido surgiendo en las investigaciones previas y las soluciones que se han ido aplicando a estos problemas. La vocación de este apartado es, por tanto, el conocimiento detallado de los trabajos ya realizados y el aprendizaje de los problemas ya resueltos por otros autores.

Finalmente, para la consecución de estos objetivos, este apartado va a tener una estructura sencilla basada en la explicación de todos estos problemas metodológicos y en un último apartado en el que se expresarán las conclusiones obtenidas del estudio realizado.

2.4.2.- Análisis de diversas consideraciones relacionadas con la construcción metodológica

2.4.2.1.- Ajuste del grado de complicación de la metodología a los objetivos propuestos

Como ya se ha apuntado en apartados precedentes, el grado de complicación en la parametrización puede alcanzar valores realmente altos. De esta posibilidad ya se es consciente desde los trabajos realizados por Newell⁴³ (1.979), en su diseño de líneas de autobuses, allí asegura que en un contexto urbano de dimensiones reales, el problema de la planificación de una red de transporte público se convierte en una optimización de tipo combinatorio de dimensiones computacionales prohibitivas.

Como consecuencia de esto, Newell dice sentirse forzado a la utilización de métodos heurísticos o, lo que es lo mismo, a métodos que no dan una solución exacta al problema. Por otra parte, Camus y Rupi⁶⁸ (2.001) también postulan sobre la posibilidad de utilizar métodos probabilísticos o determinísticos en diferentes partes de su estudio. Ante estas disyuntivas planteadas, parece necesario exponer que por la gran cantidad de datos que conforman los modelos, **nunca se va a estar ante una solución determinística o exacta del problema.**

Por ejemplo, si se analiza el cálculo de la demanda de transporte, se puede comprobar que el propio cálculo se basa en estimaciones estadísticas y en extrapolaciones de situaciones planteadas por el

propio método. Por otro lado, si se analiza el cálculo de la oferta se demuestra que también presenta procesos con características dinámicas, es decir no es igual la capacidad de una vía de noche que de día, con sol o con lluvia, etc. Igualmente, los servicios de transporte también tienen características dinámicas, ya que la propia puntualidad de los mismos o su propia utilización conllevan situaciones no programadas.

Con estos pequeños ejemplos sobre casos reales se pretende ejemplificar el hecho de que no se puede pensar en planteamientos metodológicos guiados únicamente por la exactitud de las soluciones, ya que la propia forma de estudio de las infraestructuras del transporte no permite soluciones unívocas.

Ante esta situación, la primera reflexión que se plantea es la de que las metodologías tratan de **ajustar la complicación de los cálculos y algoritmos a los verdaderos objetivos que guían cada estudio en particular**. Esto se puede observar a través del recorrido sobre los trabajos realizados por los diferentes autores, por ejemplo, toda la cantidad de estudios sobre métodos de demanda enumerados anteriormente, buscan una precisión en sus resultados que roza el segundo, por tanto han desarrollado formulaciones largas y complejas con necesidad de potentes equipos informáticos.

Bajo un enfoque opuesto se tendrían, por ejemplo, los trabajos de Parejo et al⁶⁹ (2.004), en este caso su análisis se basa en la búsqueda de un algoritmo para la recomendación de itinerarios interurbanos de transporte público. Aquí, el objetivo buscado es la creación de una herramienta informática que, vía web, determine los caminos óptimos dentro de una red de transporte. Sin embargo, esta herramienta está orientada a los usuarios, por tanto debe calcular los mismos en tiempo real, lo que lleva a un aligeramiento de los propios cálculos para poder ofrecer un servicio ágil. En este caso, la simplificación principal del procedimiento fue el afrontar el cálculo minimizando la cantidad de trasbordos, pudiéndose de esta manera mejorar la eficiencia de la herramienta diseñada a través de la disminución de las iteraciones de cálculo.

Como se puede observar, el establecimiento de los objetivos a alcanzar es clave en el planteamiento de la metodología y, bajo esta óptica, se deberán tratar los diferentes problemas asociados a la modelización que irán surgiendo a lo largo de la concreción de la metodología.

2.4.2.2.- Soluciones concretas para problemas metodológicos existentes en la literatura especializada

La modelización de una metodología es un proceso largo y lleno de problemas, por ello conviene aprender de los trabajos ya realizados, puesto que los problemas metodológicos que irán surgiendo en este proceso son a la vez numerosos y específicos: Numerosos, porque la gran cantidad de datos a tratar hace que su manipulación sea complicada en muchas ocasiones y, Específicos, porque existen varios tramos diferenciados a lo largo de la modelización, siendo estos tramos, a grandes rasgos, los siguientes:

- El dedicado a la modelización del territorio que se convierte en el ámbito de estudio.
- El dedicado a la modelización de la red de infraestructuras que se quiere estudiar.
- El dedicado a la creación de algoritmos de cálculo, relativos principalmente al análisis de los tiempos de viaje.

Considerada esta estructura de modelización, cabe preguntarse qué es exactamente una modelización, esta podría definirse como "*la representación o el esquema teórico de la realidad que se quiere estudiar*". Por tanto, se puede entender que **modelizar consiste en simplificar y clasificar**:

- Simplificar, porque se está representando la realidad a través de elementos teóricos o gráficos que nunca van a poder llegar a copiarla con todo su detalle.
- Clasificar, porque la única manera de tratar la información será a través de su compartimentación en conjuntos con características definidas de un mismo modo.

Si se comienza por la clasificación que la metodología supone, se puede hablar de los estudios de Gatti, Cavuoti y Dell'Olivo¹⁸ (2.002), en ellos se aborda el concepto de clasificación y de sistemas de clasificación, identificando el objeto general de un sistema de clasificación como la agrupación de

objetos semejantes. Desde este análisis se especifica que para ello es una condición necesaria la definición de una medida de disimilaridad.

Estos principios expuestos son claves para comprender el proceso conceptual que se sigue dentro de la simplificación general en la que se traduce la metodología, puesto que se irán buscando los elementos con características comunes que proporcionan una información útil, o lo que es lo mismo, se procederá a una clasificación de elementos valiosos para el estudio dentro de los tres tramos establecidos de modelización.

1) Entrando en la primera fase de la modelización, es necesario determinar que características del territorio son las que se van a estudiar, es decir, hay que establecer una jerarquización de la estructura del territorio con los elementos que interese considerar.

Dentro de este ámbito territorial, Gatti, Cavuoti y Dell'Olio determinan que el esquema estructural de los diferentes modelos examinados es substancialmente el siguiente, cada centro esparcido por el ámbito territorial en examen se individualiza mediante un conjunto de variables o atributos. Tales dimensiones, oportunamente transformadas, pueden ser asumidas para representar la "dimensión" o el "valor" del centro, en particular su "masa", entendida en el sentido gravitacional de poder atrayente o generante. La elección de la variable constituye la fase más delicada en la construcción del modelo, puesto que está ligada a los objetivos que se pretenden alcanzar y condiciona, a su vez, los resultados de la misma jerarquización.

Otra técnica utilizada para modelizar la estructura territorial y su relación con la población la explican Martín, Cristóbal y Gómez¹⁷ (2.002), en sus estudios sobre el corredor del Henares, en este caso se trata de la desagregación espacial de la población o microseccionado y tiene como novedad que va más allá en el tratamiento detallado del espacio que el estudio mencionado anteriormente.

Para ello, se ha incidido especialmente en la elaboración de polígonos de población, de manera que el cálculo fuera lo más preciso posible. La información de partida ha sido el seccionado censal. La sección censal agrupa conjuntos de población de 1000 a 3000 habitantes. Sin embargo, desde el punto de vista espacial, no representa una distribución homogénea de la población ya que las secciones incluyen, frecuentemente, áreas extensas no pobladas. Por ello, se ha elaborado el "microseccionado" que ha consistido en una partición del seccionado en polígonos de menor tamaño a los que se ha asignado la población de la sección censal correspondiente.

El conjunto de los 23 municipios del Corredor del Henares se componía de 255 secciones censales, con una población media de 1670 habitantes (año 1996). El microseccionado elaborado en este estudio cuenta, para este mismo ámbito, con 1569 microsecciones de las cuales 589 contienen población, con una población media de 723 habitantes.

En los dos casos expuestos como ejemplo y en la gran mayoría de los trabajos, se puede comprobar como **el elemento fundamental es la división del territorio en ámbitos diferentes**, de manera que existirán zonas que por sus características geográficas, poblacionales o económicas interesen en el cálculo, y habrá otras zonas que no se considerarán dentro del modelo por no cumplir esas mínimas características exigidas dentro de la clasificación. Dentro de estos trabajos, será necesario conceptualizar qué ámbitos del territorio interesan y cuales no para el desarrollo de la metodología de cálculo.

2) En una segunda fase de la metodología se encuentra la modelización de la red. Para realizar este trabajo **es preciso distinguir los elementos fundamentales de los que consta la red** que, en este caso, serían los nodos de interconexión entre la red y el territorio y las líneas que definen los flujos de viajeros. Resumiendo, se puede hablar de paradas o estaciones y líneas férreas.

Los elementos fundamentales de las redes de infraestructuras ferroviarias son las **paradas**, puesto que en ellas y solamente en ellas se puede producir la incorporación de los usuarios a la red. De esta manera, este lugar de intercambio debe ser tratado con el máximo cuidado dadas sus especiales características.

Sobre la modelización de estaciones se puede hablar del estudio realizado por Camus y Rupé⁶⁸ (2.001), en dicho análisis se produce secuencialmente la representación de una estación de forma que, poco a poco, se van incorporando todos los elementos consustanciales a ella y que van

generando pérdidas de tiempo. Así, se crean cuatro niveles de estación en las que se van incorporando al nodo, entre otros elementos, los tiempos de subida y de bajada, la posibilidad de cambiar de línea o los flujos de movimientos generados dentro de la estación.

Gracias a esta modelización de las estaciones se puede incorporar uno u otro nivel de estación a cualquier metodología de cálculo, dependiendo del grado de complejidad de la propia metodología. Por otro lado, el método, además de conseguir conceptualizar todo el funcionamiento de una estación, consigue plasmarlo en papel a través de una representación gráfica bastante intuitiva.

Otro elemento que suele estar dentro del debate sobre la utilidad de las paradas es su capacidad para servir a los usuarios. Asociado al mismo surgen conceptos como el de cobertura, que viene a intentar identificar la superficie de territorio que se encuentra eficazmente servida por la estación. A este respecto, los trabajos de Martín, Cristóbal y Gómez¹⁷ (2.002) sobre el corredor del Henares en Madrid, ya muestran algunas conclusiones como las siguientes.

Para determinar la cobertura de una red es necesario definir un alcance o distancia de referencia que delimite la población servida. Esta distancia es variable según el modo de transporte. Se asume, por ejemplo, que un usuario potencial está dispuesto a recorrer una mayor distancia para acceder a una estación de metro o cercanías que a una parada de autobús.

En el estudio sobre el corredor del Henares, se analizan tres radios de cobertura que se han definido como áreas de influencia "inmediata", "próxima" y "extendida". En lo que se refiere a las estaciones de ferrocarril se trata de los radios de 300, 600 y 900 metros, respectivamente. Esto equivale a 5, 10 y 15 minutos caminando, si se considera una velocidad media de 4,5 km/h y se acepta un índice de rodeo medio de 1,2 propio de un viario ortogonal. En sentido estricto se considera población cubierta la que se localiza dentro del radio de 600 metros de una estación. En cuanto a las paradas de autobús, los radios propuestos se sitúan en 150, 300 y 450 metros, siendo el radio de 300 metros el de referencia para la población cubierta.

Estas primeras conclusiones aportadas son un adecuado punto de partida en la definición de la cobertura de las estaciones, a todo ello los autores añaden una metodología en el caso de competencia por proximidad entre las estaciones. En este caso, si se producen solapes entre las coberturas de dos o más estaciones se resuelve mediante la generación de los polígonos de Thiessen estudiados por Voronoi⁷⁰ (1.907).

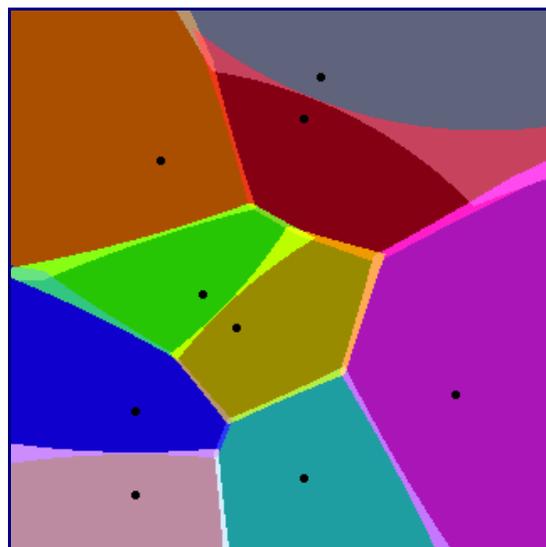


Figura 2.5, diagrama de Voronoi (f. Wikipedia⁷¹)

En cuanto a la modelización de las diferentes **líneas** asociadas a las infraestructuras del transporte colectivo guiado, la mayor complejidad dentro de las metodologías abordadas surge nuevamente por el tamaño de las redes a tratar. Si la red es de un tamaño no muy grande, la modelización se puede hacer con menores problemas, asignando a cada arco el valor de su longitud como características

fundamental. El problema surge cuando se presentan redes de gran tamaño que complican los cálculos hasta hacer que estos limiten los propios algoritmos de modelización.

Como ejemplo ante uno de estos casos se puede hablar, entre otros, de los trabajos de Carrese y Gori⁴¹ (2.001). En este caso, a la hora de abordar la definición del grafo de una red de transporte público de autobús se recurre a la organización de la misma en 5 categorías. Dentro de su estudio, las categorías establecidas son:

- Express.
- Principal A.
- Principal B.
- Tram.
- Feeder.

Para la delimitación de estas categorías los autores se basan en características tanto de gestión del servicio como topológicas de la red. Concretamente, la diferenciación se produce a través de dos de los parámetros habituales en el estudio de las redes, la frecuencia de paso de los servicios del transporte y la distancia existente entre estaciones. Según la graduación de estos parámetros la línea se clasifica en uno u otro grupo.

Pero aún en redes no muy densas surgen problemas a la hora de abordar la definición de las características de las líneas. Dentro de estas características de las líneas férreas, la más habitual podría ser la longitud de la misma, y como forma de abordar su definición se pueden citar las dadas por Acosta y Estrada⁷² (1.998), en este caso la primera diferenciación que se establece es entre longitudes estáticas y longitudes dinámicas. Las primeras permanecen estables independientemente de las características de la explotación, y dependen básicamente de las dimensiones y las variaciones de las infraestructuras de la red. Las segundas varían en función de características de la explotación, como son las longitudes en las maniobras, el tipo de composición de los trenes o la posición de parada de los trenes.

Con estos ejemplos se puede observar como, aún dentro de características morfológicas aparentemente sencillas de definir, pueden existir interpretaciones muy variadas dependiendo de los objetivos que se establezcan en el trabajo propuesto. Dentro de estos trabajos y, como se verá más adelante, la definición milimétrica de la longitud de la vía no va a cobrar un valor muy relevante y, por tanto, no será necesario el adentrarse dentro de esta formulación llena de tantos matices.

3) La tercera parte fundamental de la metodología viene dada por la modelización de los cálculos a realizar para la definición de los diversos parámetros que intervienen en la definición de los Indicadores. Ya se ha hablado anteriormente sobre las diferentes formas de abordar el tratamiento de los Indicadores, basadas principalmente en la oferta de infraestructuras o en la demanda de transporte. Hay que especificar que, estas formas de enfocar el estudio, llevan implícitamente diferentes maneras de hacer frente a los cálculos dentro de la metodología.

Como ya se ha expuesto, los trabajos que aquí se abordan van a contemplar un enfoque basado en la oferta de infraestructuras, encaminado a la verificación de los efectos causados por las características de las infraestructuras férreas. Por ello, no parece necesario embarcarse en los complicados cálculos que acompañan a las modelizaciones tipo Logit de los métodos de demanda.

En cualquier caso, si que es recomendable detenerse sobre la **modelización que se ha dado a la determinación de caminos mínimos** dentro de la literatura existente. Esta modelización, puede verse resumida dentro de lo expuesto por Parejo et al⁶⁹ (2.004) en su trabajo sobre la elaboración de un algoritmo para la recomendación de itinerarios interurbanos de transporte público, el diagrama de flujo ideado en este ejemplo sería el mostrado en la figura 2.6.

El algoritmo planteado tiene un paso en el que se ha de buscar el camino mínimo. La búsqueda de este en un grafo es un problema clásico en programación de flujos en redes y en el campo de la optimización en general, algunos de los ejemplos más clásicos y estudiados pueden encontrarse en los trabajos de Dijkstra⁷³ (1.959) o Denardo y Fox⁷⁴ (1.979).

Estos estudios sobre caminos mínimos son importantes, puesto que uno de los elementos que más esfuerzo conlleva, dentro del estudio de la accesibilidad, es la asignación de las rutas óptimas en cada desplazamiento y su cuantificación en tiempo.

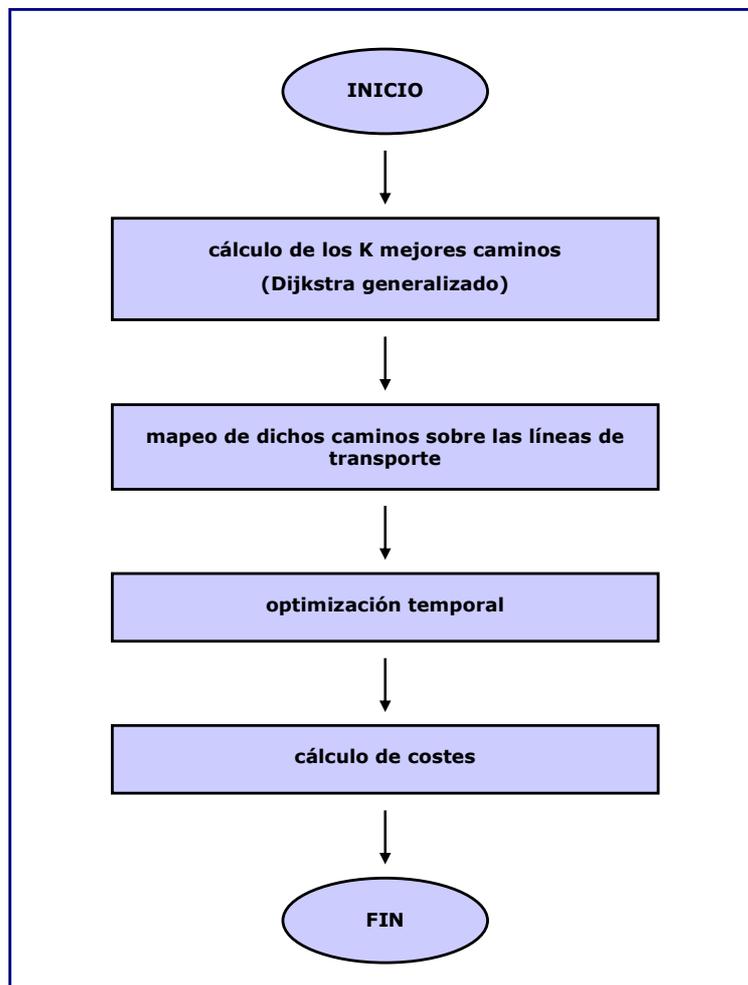


Figura 2.6, diagrama de flujo

(f. Parejo et al⁶⁹)

Existen otros estudios al respecto que poco difieren en cuanto al cálculo de los caminos mínimos, siendo únicamente reseñable la posibilidad de introducir restricciones para facilitar el cálculo o resistencias para tener en cuenta los efectos producidos en todo el proceso del viaje. Dentro de las restricciones, Parejo et al⁶⁹ (2.004), introducen el hecho de que se tomarán los caminos más directos, o con menos intercambios, para facilitar su algoritmo. En el otro extremo, Turró y Ulled²³ (2.000) por ejemplo, en su definición del Indicador ICON, introducen una resistencia en el cálculo, que sería un término aglutinador de lo que ellos denominan "reducciones de utilidad", y que no sería otra cosa que la identificación de externalidades y factores particulares producidos por el sistema de transporte.

Estos elementos se tendrán en cuenta según el grado de complejidad que se le vaya dando al modelo que se elabore en los trabajos y, por tanto, será algo que se determinará según se vaya elaborando y calibrando este modelo.

2.4.2.3.- Herramientas existentes para la modelización metodológica

La modelización de una metodología asociada a la planificación de las redes de infraestructuras del transporte no es un elemento novedoso dentro de la literatura existente. De hecho, con el paso del tiempo se han ido creando herramientas y aplicaciones a medida que iba progresando la capacidad de computación y, especialmente, a partir de la socialización de los ordenadores personales. Esta mayor capacidad y accesibilidad de las herramientas informáticas ha proporcionado una mayor

facilidad para el tratamiento de más datos y para una representación gráfica más amable de los mismos.

Dentro de la mejora continua del tratamiento de la información, el primer paso importante en la modelización física de los ámbitos se ha producido a través de las herramientas basadas en la representación gráfica. En este caso, hay que hacer referencia a los programas de **Diseño Asistido por Ordenador (CAD)** como, por ejemplo, AutoCad y MicroStation, que son dos de las herramientas de tratamiento gráfico que más se han utilizado. Estas herramientas presentan el inconveniente de que no se les pueden asociar bases de datos, cosa habitualmente necesaria en los estudios del transporte, pero no se puede olvidar que a la hora de transcribir una realidad física a papel son las herramientas más avanzadas y fáciles de utilizar.

La imposibilidad de asociar datos a los elementos presentes en las representaciones condujo a la introducción de una nueva herramienta informática, los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**. A través de la experiencia primigenia del Sistema de Información Geográfica de Canadá y, tras el rápido desarrollo de estos a lo largo de los años 80 y 90, se ha llegado a contar con numerosas herramientas comerciales, entre las que se pueden citar, entre muchas otras ArcGis o MapInfo, además de las aplicaciones gratuitas existentes en Internet como SigPac o Google Earth.

Toda estas nuevas posibilidades de representación gráfica se han conseguido implementar sobre **soportes informáticos integrales**, entre los que destacan las herramientas EMME/2 y CUBE. Gracias a estas herramientas de representación y cálculo, se ha posibilitado la determinación de parámetros asociados al transporte y a las infraestructuras del transporte de manera mucho más eficaz, además, se ha conseguido una representación visual atractiva para el usuario.

Sin embargo, aún con todos los elementos positivos mencionados, la mayoría de estas nuevas herramientas integrales de cálculo parten sobremedida de las complicadas metodologías elaboradas por los métodos de demanda. De esta forma, la obtención de resultados dentro de estos sofisticados paquetes informáticos se ve condicionada por las lógicas definidas por la satisfacción de la demanda de transporte que tienen introducidas en su programación. A esto, hay que añadir que el incorporar la modelización dentro de una herramienta completamente desarrollada elimina posibilidades de decisión dentro de los trabajos.

Debido a estos elementos, dentro de los trabajos se va a partir de las herramientas de modelización más sencillas basadas en el Diseño Asistido por Ordenador. De esta forma, la capacidad de decisión en cada paso dado no se verá condicionada por la propia guía por la que conducen los programas informáticos más avanzados y, por tanto, se tendrá un control absoluto sobre los pasos dados y sobre las modelizaciones introducidas.

Igualmente, dentro del planteamiento de qué herramientas gráficas utilizar, se ha optado por las herramientas CAD sobre las herramientas GIS. Esta decisión se ha debido principalmente a dos razones, la complicada obtención de herramientas GIS gratuitas y la dificultad para encontrar cartografía adecuada para la realización de los trabajos. Todo ello desde la óptica de que los primeros momentos de elaboración de los trabajos se remontan al año 2.004.

Finalmente, esta decisión es, además, consecuente con el planteamiento inicial de analizar los efectos de la morfología de las redes, ya que las herramientas de trabajo fundamentales van a ser aquellas que mejor permiten manipular los elementos espaciales de la red. De la misma forma, existe coherencia con uno de los principios básicos expresados con anterioridad, el de ajustar el grado de dificultad, en este caso gráfico, a los objetivos planteados.

[2.4.3.- Conclusiones de interés para el desarrollo de los trabajos extraídas del estudio de las metodologías de modelización](#)

A través de todos los ejemplos que se han puesto en el recorrido realizado sobre las metodologías de modelización, se ha pretendido mostrar la importancia de las mismas y los grados de desacuerdo que existen en la representación de los parámetros que las componen. Este hecho demuestra la importancia de **afrentar la creación de una metodología de la manera más rigurosa posible**,

a fin de poder tener la confianza necesaria a la hora de obtener los resultados que de la misma se desprenden.

Dentro de esta necesidad de crear metodologías fiables, el punto más importante es el que focaliza la complejidad de la metodología en relación con los resultados que se pretendan obtener. Partiendo del hecho de que los datos que se poseen son, en general, estadísticos o procedentes de procesos de agregación y desagregación, la búsqueda de resultados no puede estar condicionada por la obtención del enésimo decimal, aunque no por ello deje de ser necesario el establecer metodologías robustas y ajustadas al grado de precisión que se requiera dentro los resultados buscados.

Estos criterios de modelización deben venir acompañados de la elección de la herramienta de tratamiento de la información más adecuada a cada caso. Por ejemplo, si el enfoque del estudio es sobre la morfología se deberá trabajar prioritariamente sobre los métodos de representación gráfica, en cambio si el enfoque se da sobre la optimización de costes, las herramientas fundamentales serán los algoritmos de cálculo más avanzados que se puedan programar.

A parte de estos elementos de definición conceptual del método de estudio, existen unos problemas de interpretación de elementos concretos similares en muchas de las casuísticas. Estos aspectos comunes suelen estar referidos a la representación de tres elementos principales, el territorio, la red y el cálculo de algoritmos. Así, se ha visto como existen numerosas soluciones estudiadas en cada uno de los tres campos señalados y, se puede concluir, que los análisis preexistentes suponen valiosas aproximaciones a los problemas que se plantearán en el desarrollo de la metodología de cálculo.

Finalmente, es necesario relacionar el contexto sobre el que se actúa en estos trabajos y la propia modelización. El contexto de actuación es el de los estudios comparados, esto quiere decir que se deberá implementar una misma modelización sobre distintos ámbitos de estudio. Para que esto sea posible es indispensable el desarrollo de condiciones de cálculo y representación extrapolables entre todos los ámbitos que se deseen estudiar. Esto conlleva, aún si cabe, una mayor necesidad de cuidado en el desarrollo de la metodología y en el ajuste de objetivos antes de lanzarse a la transcripción de la realidad sobre un modelo, ya que se podría producir la imposibilidad de implantación de la metodología sobre determinados ámbitos, con la amputación de resultados que ello supondría para los trabajos

Con todo lo dicho se deja constancia de la importancia que supone la metodología, o el procedimiento, dentro de la planificación realizada para la elaboración de estos trabajos.

2.5.- Resumen de objetivos y planteamientos

Gracias al análisis de la literatura existente y a la reflexión sobre los fundamentos de los trabajos, se pueden establecer las líneas fundamentales que se van a abordar en este estudio. Así, a modo de resumen, se puede exponer que el **objetivo** básico de los trabajos va a ser el estudio de la eficacia morfológica de las redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija.

Para poder conseguir este objetivo se va a plantear un estudio comparado sobre las redes de transporte colectivo. El **ámbito** sobre el que se va a introducir el estudio es un conjunto de áreas metropolitanas con redes ferroviarias de gran tamaño, y la **forma de estudiar** la eficacia espacial va a ser la realización de ensayos con diversos Indicadores de Oferta sobre las redes ferroviarias de las áreas metropolitanas definidas.

Como se observa, el guión que han de seguir los trabajos está claro y, en él, se incluyen todos los elementos que han sido abordados en este capítulo referido a la historia del arte. De esta manera:

- Se han sentado las bases para la elección de los estudios comparados como la mejor metodología para la identificación de las características de las redes de infraestructuras.
- Se han repasado los diferentes Indicadores que se han ido definiendo a lo largo del tiempo para el estudio de las redes de infraestructuras del transporte y del propio transporte.

- Se han comentado los aspectos metodológicos más importantes que va a ser necesario tener en cuenta en la modelización del territorio, de la red de infraestructuras del transporte y de los algoritmos de cálculo.

Así, con el trabajo realizado sobre la bibliografía existente, se consigue asentar la base conceptual para la elaboración de los presentes trabajos. Por tanto, a partir de este punto queda efectuar el desarrollo de los principios y objetivos básicos que se han ido desgranando y que conforman el núcleo de estos trabajos.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 2

- ¹ REAL ACADEMIA DE LA LENGUA ESPAÑOLA: *Diccionario de la Lengua Española*. Vigésima segunda edición.
- ² PERSIA, L. (2.001): "Tecniche innovative di Benchmarking per la pianificazione dei sistemi di trasporto pubblico urbano", en *Metodi e modelli per il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán.
- ³ KARLOF, B. (1.995): *Benchmarking Workbook*. Wiley.
- ⁴ HARRINGTON, H.J.; HARRINGTON, J.S. (1.996): *High performance benchmarking*. McGraw-Hill.
- ⁵ NEWMAN, P.; KENWORTHY, J. (1.989): *Cities and automobile dependence: an international sourcebook*. Gower.
- ⁶ HERCE VALLEJO, M. (1.992): *Las formas del crecimiento urbano y las variantes de carretera*. Tesis Doctoral, UPC. Barcelona.
- ⁷ MONZÓN, A. (2.006): *Observatorio de la movilidad Metropolitana en España*. I Congreso Internacional: Los ciudadanos y la Gestión de la Movilidad. http://www.fundacionmovilidad.es:8080/_archivos/_upload/_archivos/S2-Monzon.pdf.
- ⁸ NICOLÁS LOSCOS, A. (2.002): *Estudi comparatiu de xarxes de transport metropolita*. Biblioteca UPC. Barcelona.
- ⁹ JULIÀ SORT, J. (2.006): *Redes Metropolitanas*. Agencia Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.
- ¹⁰ PARCERISA, J.; RUBERT DE VENTÓS, M. (2.002): *Galaxias metropolitanas*. Ediciones UPC.
- ¹¹ www.emta.com
- ¹² www.uitp.com
- ¹³ FÀBREGAS, C.; UNZETA, E. (1.998): *Identificación de los principales factores que determinan la eficacia y la eficiencia de un servicio de transporte urbano de viajeros*. III Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Barcelona.
- ¹⁴ HILVERS, H.D.; VERROEN, E.J. (1.993): *Measuring accessibility, a key for successful transport and land-use planning strategies*. PTRC Education and Research Services Ltd. Vol P863.
- ¹⁵ KOENIG, J.K. (1.980): *Indicators of urban accessibility*. Transportation, vol 9.
- ¹⁶ MONZÓN, A. (1.988): *Los indicadores de accesibilidad y la planificación del transporte: concepto y clasificación*. Revista de Estudios del Transporte y las Comunicaciones, nº35.
- ¹⁷ MARTÍN DUQUE, D.; CRISTOBAL PINTO, C.; GÓMEZ LÓPEZ, F.J. (2.002): *Cobertura y Accesibilidad en transporte público en un corredor metropolitano: el corredor del Henares en Madrid*. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander.
- ¹⁸ GATTI, G.; CAVUOTI; DELL'OLIO, L. (2.002): *Modelos taxonómicos para el estudio de las relaciones entre condiciones de red y desarrollo del territorio*. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander.

- ¹⁹ DE OÑA LÓPEZ, J.; OSORIO ROBLES, F.; MONZÓN DE CÁCERES, A. (2.002): *Nueva metodología para la evaluación de un sistema de transporte a la demanda*. V Congreso de Ingeniería Civil CIT. Santander.
- ²⁰ HANSEN, W. (1959): *How accessibility shapes land use*. Journal of the American Institute of Planners, nº 25, pp. 73-76.
- ²¹ RUEDA, S. (2.006): *Un modelo urbano para el desarrollo de ecobarrios*. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.
- ²² SHANNON, C.E. (1.948): *The bell system technical journal*. Vol. 27.
- ²³ TURRÓ, M.; ULIED, A.; ESQUIUS, A.; CAÑAS, E. (2.000): *Definición del Indicador de Conectividad: ICON*. IV Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Valencia.
- ²⁴ KANSKY, K.J. (1.963): *Structure of transport networks: relationships between network and regional characteristics*. Research papers nº 84, Department of Geography, University of Chicago.
- ²⁵ MANDELBROT, B. (1.982): *La geometría fractal de la naturaleza*. Tusquets Editores, ISBN 84-8310-549-7.
- ²⁶ FALCONER, K. (2.003): *Fractal Geometry: mathematical foundations and applications*. 2ed. Wiley.
- ²⁷ MANDELBROT, B. (1.993): *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Tusquets Editores, ISBN 978-84-7223-458-1.
- ²⁸ DUPUY, G.; CURIEN, N. (2.003): *Réseaux de communication, marchés et territoires*; Presses de Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Conferencia "Territorio en Redes", Barcelona.
- ²⁹ GENRE-GRANDPIERRE, C. (1.999): *La desserte spatiale des réseaux de transport routier: una approche fractale*. Rev. Flux nº38, París.
- ³⁰ WOOTTON, H.J.; PICK, G.W. (1.967): *A Model for trips generated by households*, Journal of Transport economics and policy, mayo.
- ³¹ ECHEVARRÍA JADRAQUE, D. (1.998): *El control de la localización de actividades como herramienta de gestión de la movilidad metropolitana*. III Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Barcelona.
- ³² GIULIANO, G.; LEVINE, D.W.; TEAL, R.F. (1.990): *Impacts of high occupancy vehicle lanes and carpooling behaviour*. Transportation 17 (2), pp 159-177.
- ³³ GONZÁLEZ GONZÁLEZ, O. (2.000): *Propuesta metodológica para la evaluación de vías de alta ocupación. Aplicación al caso de la carretera Nacional-VI de Madrid*. Tesis Doctoral.
- ³⁴ TRANSPRICE (1.999): *Deliverable D7, Evaluation Results*. European Commission.
- ³⁵ MINISTERIO DE FOMENTO (1.996): *Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades*. Serie Monografías. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes.
- ³⁶ ALONSO, W. (1.964): *Location and land use*. Ed. Cambridge Mass, resumido al castellano en W. Hirsch: "Análisis de economía urbana". Ed. IEAL, Madrid.
- ³⁷ DE CEA, J.; FERNÁNDEZ LARRAÑAGA, J.E. (2.000): *ESTRAUS: un Modelo de equilibrio oferta-demanda para redes multimodales de transporte urbano con múltiples clases de usuarios*. IV Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Valencia.
- ³⁸ WARDROP, J.G. (1.952): *Some theoretical aspects of road traffic research*. Proceedings, Institute of Civil Engineers, Part II, Vol 1, pp 325-378.

³⁹ MONTELLA, B.; GALLO, M.; D'ACIERNO, L. (2.001): "Un modello di assegnazione multimodale su iperrete per la simulazione degli spostamenti di tipo Park and Ride", en *Metodi e modelli peri il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán

⁴⁰ VOVSHA, P. (1.997): *The Cross Nested Logia Model: application to mode choice in the Tel Aviv metropolitan area*. Transportation Research Record.

⁴¹ CARESE, S.; GORI, S. (2.001): "Prestazioni dei Modelli per la Progettazione del Trasporto Pubblico Locale", en *Metodi e modelli peri il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán.

⁴² MILLER, N.C.; GOODKNIGHT, J.C. (1.973): *Policies and procedures for planning transit systems in small urban areas*. Highway Res. Record, n.449.

⁴³ NEWELL, G. (1.979): *Some issue relating to the optimal design of bus lines*. Transportation Science 13, pp.20-35.

⁴⁴ MORLOK, E.K. (1.978): *Introduction to transportation engineering and planning*. McGraw Hill, New York.

⁴⁵ REA, J.C. (1.972): *Designing urban transit systems: an approach to the route-technology selection problem*. Highway Research Record 417, pp 48-59.

⁴⁶ RHOME, R.C. (1.972): *A strategy for urban mass transportation route-technology selection*. NTIS, UMTA.

⁴⁷ MARWAH, B.R.; UMRIGAR, F.S.; PATNAIK, S.B. (1.984): *Optimal design of bus lines and frequencies for Ahmedabad*. TRR n994.

⁴⁸ AXHAUSEN, K.W.; SMITH, R.L. (1.984): *Evaluation of heuristic transit network optimization algorithms*. TRR n.976, pp.7-20.

⁴⁹ VAN NES, R.; HAMERSLAG, R.; IMMERS, B.H. (1.988): *Design of public transport networks*. TRR n.1202.

⁵⁰ FILIPPI, F.; GORI, S.; PAGLIARI, E. (1.988): *Progetto di una rete di trasporto pubblico*. 5º convegno nazionale PFT CNR, Napoli.

⁵¹ GORI, S. (1.989): *Progettazione di una rete di autobus in campo urbano*. Giornate di Lavoro, AIRO, Udine.

⁵² LIST, G.F. (1.990): *Toward optimal sketch-level transit service plans*. Transportation Research 24B, pp.325-344.

⁵³ BELLEI, G.; GENTILE, G.; PAPOLA, N. (2.001): "Ottimizzazione del trasporto urbano mediante l'ottimizzazione dei pedaggi e l'adeguamento delle frequenze", en *Metodi e modelli peri il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán.

⁵⁴ DAGANZO, D.F. (1.983): *Stochastic network equilibrium with multiple vehicle types and asymmetric, indefinite link cost jacobians*. Transportation Science n.17, pp 283-300.

⁵⁵ COURNOT, A.A. (1.838): *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses*.

⁵⁶ NASH, J. (1.950): *Equilibrium points in n-person games*. Proceedings of the National Academy of the USA 36(1):48-49.

⁵⁷ DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT (1.990): *Planning policy guidance: Transport*. PPG13. HMSO, Londres, Reino Unido.

⁵⁸ MINISTRY OF HOUSING (1.994): *The right business in the right place*. Ministry of Housing, Physical planning and environment. Department of Information and International Relations. La Haya.

⁵⁹ ISARD, W. (1.956): *Location and space-economy: A general theory relating to industrial location, market areas, land use, trade and urban structure*. Technology press of the Massachusetts Institute of Technology and Wiley.

⁶⁰ PRED, A.R. (1.967): *Behaviour and location: Foundations for a geographic and dynamic location theory*. Part I, Lund 1967; Part II, Lund 1969. The Royal University of Lund, Department of Geography Studies in Geography Ser.B (Human Geography) Nos. 27 & 28 / C.W.K.Gleerup, Lund.

⁶¹ BERRY, B. (1.972): *Geografía de los centros de mercado y de la distribución al por menor*. Barcelona, Vicens Vives. (Título original: "Geography of market centres and retail distribution". Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1967).

⁶² WINGO, L. (1.961): *Transportation and Urban Land*. John Hopkins Press, Baltimore.

⁶³ LOWRY, I.S. (1.966): *Migration and metropolitan growth: Two analytic models*. Ed. Chandler, San Francisco.

⁶⁴ BUNGE, W. (1.962): *Theoretical geography*. Lund Studies in Geography. Comentado por P. Haggett.

⁶⁵ ARAGÓN, F. (1.975): *Los modelos de potencial y selección de inversiones en carreteras*. Ed. MOP, Madrid.

⁶⁶ LÓPEZ PITA, A. (2.001): *Ferrocarril y avión en el sistema de transporte europeo*. Ed. UPC, Temas de Transporte y Territorio 1, Barcelona.

⁶⁷ DUPUY, G. (1.991): *Urbanisme de Reseaux, théories et méthodes*. Ed. A. Colin, París.

⁶⁸ CAMUS, R.; RUPI, F. (2.001): "Modelli di fermata e calcolo degli ipercammini minimi nelle reti di trasporto pubblico urbano", en *Metodi e modelli per il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán.

⁶⁹ PAREJO, J.A.; CANCA, D.; RACERO, J.; EGUÍA, I.; GUERRERO, F. (2.004): *Algoritmo para la recomendación de itinerarios interurbanos de transporte público*. VI Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Valencia.

⁷⁰ VORONOI, G. (1.907): *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques*. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 133:97-178.

⁷¹ www.wikipedia.es

⁷² ACOSTA ESTRADA, R.; MONTAÑES GONZALEZ, J. (1.998): *Definición y clasificación de las longitudes en la red del ferrocarril metropolitano de Madrid*. III Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Barcelona.

⁷³ DIJKSTRA, E. (1.959): *A note on two problems in connection with graphs*. Numerical Mathematics (1), pp. 269-271.

⁷⁴ DENARDO, E.V.; FOX, B.L. (1.979): *Shortest route methods: reaching, pruning and buckets*. Operation Research (27), pp. 161-186.

capítulo 3

ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA LA MODELIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1.- Introducción

A lo largo de los dos primeros capítulos se ha realizado, respectivamente, un recorrido por el objeto de los trabajos y por la literatura existente. Con este análisis se ha conseguido poner de manifiesto qué es lo que se quiere estudiar y cuáles son los antecedentes sobre dicho estudio. De esta forma, en este capítulo, se puede pasar a centrar los aspectos fundamentales que formarán parte de los trabajos.

Con estos antecedentes, el estudio realizado en el capítulo segundo, ha mostrado determinadas características de las investigaciones precedentes relacionadas con el objeto de estos trabajos, que es el estudio de las características de las redes a través de Indicadores. Así, tras haber investigado sobre las metodologías de estudio de las redes de infraestructuras, se ha podido comprobar la predominancia de los modelos de demanda. A su vez, se ha determinado cómo estos modelos de demanda focalizan sus esfuerzos en la elección modal y en la optimización de costes/tiempos. Debido a ello, este enfoque se suele olvidar de la red en sí misma como generadora de las condiciones necesarias para la existencia de asentamientos y actividad. De esta manera, los métodos de demanda cercenan la utilidad planificadora de la red para centrarse en la mera satisfacción de la movilidad existente, lo cual lleva a continuos procesos de reinversión sobre los corredores más solicitados.

Con esta argumentación, a lo largo de los trabajos se pretenden analizar metodologías de estudio de las redes que profundicen en las características de las redes como definidoras de la utilidad de la propia red. A su vez, siguiendo esta concepción del estudio, se ha realizado un recorrido sobre las formas de representación y conceptualización de las redes.

En primer lugar, en cuanto a la representación, se han repasado los grafos como elemento gráfico fundamental de representación dentro de la literatura asociada a las redes, y la teoría fractal, como forma alternativa de diseño gráfico de la red. De esta forma, se contará con ambos elementos para diseñar la parte más visual de los trabajos.

En segundo lugar, en cuanto a la forma de conceptualizar las redes, se ha realizado una amplia descripción de los Indicadores desarrollados por los distintos autores. De esta forma, se han repasado tanto los Indicadores como los conceptos asociados a estos. Así, a través de esta investigación, se ha podido concluir qué Indicadores pueden ser útiles al enfoque metodológico que se está dando a los trabajos.

Así, poniendo estos aspectos fundamentales abordados en el centro del enfoque metodológico, métodos de oferta, representación fractal y mediante grafos e Indicadores, se puede pasar a enumerar los aspectos más importantes que habrá que considerar en la modelización de los trabajos.

De esta forma, los trabajos a realizar, como se ha comentado con anterioridad, presentan dos ámbitos fundamentales de desarrollo, el metodológico y el de búsqueda de resultados. Dentro de esta dualidad de campos de trabajo, el bloque dedicado a la investigación de las características de las redes de infraestructuras va a estar guiado por la **definición, ensayo y comparación entre Indicadores**, de forma que estos ayuden a la comprensión de las características de las redes de infraestructuras del transporte. Para ello, la decisión sobre qué Indicadores tomar se ha basado en las experiencias existentes en los análisis descritos y estudiados en el capítulo anterior y en el enfoque expuesto en los párrafos precedentes.

Para la definición de estos Indicadores asociados a las redes de infraestructuras del transporte, se han tomado en consideración las directrices dadas por Fábregas y Unceta¹ (1.998) y expuestas en el capítulo anterior. Éstas se resumen en:

- No existencia de correlaciones entre Indicadores.
- Facilidad relativa de obtención asociada al grado de precisión requerido.
- Fiabilidad de los Indicadores.

Así, con estas directrices fundamentales, se definen la serie de Indicadores posteriormente enumerados.

Una vez definidos qué elementos forman parte del diseño conceptual del análisis, será necesario actuar sobre el otro bloque fundamental de los trabajos. La directriz básica a seguir en este caso es **ajustar el grado de complicación de la metodología a los resultados que se pretenden obtener**. Éste procedimiento de afrontar los problemas de creación metodológica se seguirá en el grueso de las modelizaciones y simplificaciones que se planteen. Así, a partir de este principio, en el epígrafe 3.3 se exponen los momentos de decisión fundamentales que existen en la elaboración de la metodología.

De esta forma, con la consideración de los fundamentos conceptuales expuestos y con la correcta modelización metodológica, se posibilita el análisis de las características de las redes de infraestructuras férreas y, con ello, se define el camino para la consecución de los objetivos perseguidos.

3.2.- Características asociadas a las redes de infraestructuras ferroviarias consideradas en el desarrollo de los trabajos

3.2.1.- Accesibilidad

A lo largo del estudio de la literatura especializada destaca la especial referencia que se hace del concepto de accesibilidad, apareciendo este asociado al conjunto de redes de infraestructuras y a estudios de todo tipo. Así, solamente éste hecho podría resultar suficiente para plantear su introducción dentro de los trabajos a realizar, pero lo más importante del concepto de accesibilidad parecen las propias consecuencias que los investigadores han ido atribuyéndole.

De esta forma, es necesario mostrar como los diferentes gradientes de velocidad asociados a la accesibilidad conforman territorios con diferentes utilidades. Esta manifestación territorial de la accesibilidad, puesta de relieve, por ejemplo, por la economía urbana, hay que conjugarla con el evidente valor del tiempo para los seres humanos. Así, la búsqueda de la eficiencia del transporte pasa por asegurar la movilidad de los ciudadanos de forma que estos consigan desplazarse en unos tiempos razonables.

Por esta razón, las sucesivas definiciones de la accesibilidad dadas, por ejemplo, por Hilbers y Verroen² (1.993) o Koenig³ (1.980) y Monzón⁴ (1.988), centran su atención sobre el tiempo de viaje que utilizan los ciudadanos para asegurar su movilidad de la manera más eficiente. De esta forma, se puede decir que los usuarios de las infraestructuras del transporte, para realizar un viaje, pasan una serie de tiempos consecutivos dentro de los servicios ferroviarios tal y como muestran, entre otros, Martín Duque y Cristóbal Pinto⁵ (2.002). Esta metodología de cálculo de la accesibilidad, basada en su descomposición en tiempos de viaje consecutivos, será la empleada dentro de los trabajos.

Consecuentemente, es un hecho más o menos asumido, que cuanto menor sea el tiempo de duración de un viaje entre idénticas distancias, mayor será el grado de utilidad del servicio de transporte y por tanto mejor servida se encontrará la población. Así, la accesibilidad queda ligada al grado de utilidad de los servicios del transporte y a la posibilidad de comunicación entre los diferentes territorios.

De estos argumentos se desprende que la accesibilidad proporcionada por las redes se configura como una característica interesante desde el punto de vista de los efectos que genera, de raíces morfológicas, homogénea dentro del tratamiento dado a los indicadores por el conjunto de la literatura especializada y con una dimensión física que la hace entendible de manera intuitiva. Por

todo ello, se ha considerado adecuado introducir el estudio de la accesibilidad dentro de los indicadores a analizar por los trabajos.

3.2.2.- Cobertura

Otro concepto de indudable interés analizado dentro del estado del arte es el de cobertura. Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido con la accesibilidad, bajo este concepto no se ha podido organizar una definición homogénea del mismo. Aún así, de una manera más o menos amplia, si que se puede decir que la cobertura es una característica que mide la utilidad que la red de infraestructuras ofrece.

De esta forma, se puede entender que asociado al concepto de utilidad de la red, y por tanto al de cobertura, se encuentran elementos como la propia accesibilidad que ofrece la red de transporte, la posibilidad de intercambio dentro de la red o con otras redes, la frecuencia de paso de los servicios, la superficie servida por cada nodo de la red u otros determinantes que se puedan considerar implicados dentro de esta definición de utilidad de la red.

Así, estas características enumeradas son tomadas y estudiadas de diferente manera por los autores. Dentro del capítulo segundo, se han mostrado algunos ejemplos al respecto como los dados por Wooton y Pick⁶ (1.967) o Echevarría⁷ (1.998). En ellos, se muestra como se va entendiendo que para que las redes de infraestructuras den un servicio adecuado deben existir otros elementos a considerar a parte del tiempo de viaje entre puntos.

Con estos antecedentes, se ha considerado adecuado el introducir un indicador asociado a la característica definida por la cobertura dentro de los trabajos. Así, dentro de estas aproximaciones a la cobertura, se ha escogido el Indicador de Wooton por varias razones. En primer lugar, por ser un indicador que tiene en cuenta dos elementos de los anteriormente asociados a la utilidad de la red, como son, la frecuencia de paso de los servicios y el área a la que sirve cada estación. En segundo lugar, porque al ser un indicador pionero no muestra una complejidad tal que se pierda el sentido físico de lo que se está calculando. Finalmente, porque requiere un esfuerzo de cálculo bastante adaptado a las posibilidades de los trabajos.

A todo ello hay que añadir una relativa independencia con el Indicador de Accesibilidad, ya que los parámetros puestos en juego son diferentes en ambos casos. De esta forma, se da cumplimiento a otro de los criterios de definición de indicadores enumerados en epígrafes anteriores.

3.2.3.- Fractalidad

Dentro de la definición que se ha realizado del objeto general de los trabajos, se ha establecido una consideración que resulta clave a la hora de comprender el desarrollo de los mismos. Así, se ha hablado de investigar la eficacia espacial de las redes. Con este principio enunciado, se han focalizado los trabajos sobre la propia eficacia morfológica de las redes más allá de la eficacia del transporte. Por tanto, dentro de los indicadores a definir se hace necesario incrementar la cantidad de estos que se centren precisamente en las propiedades espaciales de las redes.

De esta forma, a lo largo del estudio del arte, se identifican un grupo de estudios muy concreto que centran su análisis sobre una propiedad de las redes que ha sido denominada fractalidad. Esta propiedad, estudiada entre otros por Dupuy⁸ (1.991) o Genre-Grandpierre⁹ (1.999), es característica de cada red y está definida por la relación existente entre la longitud de dicha red y el espacio que dicha red cubre. Como muestra de esta propiedad existen estudios, por ejemplo, sobre redes de carreteras o sobre redes de alcantarillado de diversas ciudades.

Así, el estudio de la fractalidad, o del grado de fractalidad de las redes de transporte ferroviario, encaja perfectamente en los objetivos de los trabajos, ya que, además de configurarse como una propiedad puramente topológica, es un indicador plenamente incorporado en el estudio de otras redes de características morfológicas similares a las que puedan presentar las redes ferroviarias en áreas metropolitanas de gran tamaño. Por ello, a lo largo de los trabajos, se van a desarrollar los

trabajos ya comenzados por Dupuy¹⁰ (2.003) alrededor del estudio del grado de fractalidad de las redes ferroviarias.

A todo ello hay que añadir que, dentro del grupo de cualidades expuestas que se han de exigir a los indicadores para poder ser tenidos en consideración, la fractalidad también se ajusta de manera bastante coherente. De esta manera, se constituye como un indicador independiente de los demás, ya que los parámetros que definen la fractalidad son independientes de los que definen la cobertura o la accesibilidad, el grado de complejidad que presenta su cálculo es adecuado a las capacidades que se poseen en este trabajo y tiene la fiabilidad requerida, la cual se concretará con su definición dentro del siguiente capítulo.

3.2.4.- Densidad

Repasando los tres indicadores definidos anteriormente, se puede observar como la accesibilidad se centra en el tiempo de viaje necesario para los desplazamientos, la cobertura se define a partir de la utilidad que la red aporta a los usuarios y se estudia a través del indicador de Wooton y la fractalidad es una propiedad espacial asociada a las redes a través de la relación entre longitud y superficie cubierta por las mismas. Así, desde el análisis que se pretende hacer, se hace necesario cerrar el conjunto de indicadores con uno que defina la relación entre la superficie urbanizada en el continuo proceso constructivo y la capacidad de las redes para dar servicio a esas áreas urbanizadas.

De esta forma, el concepto de densidad se aborda desde el punto de vista de la eficacia con que las redes de transporte ferroviario cubren el espacio edificado. Para ello, la definición que se va a dar a este concepto de densidad vendrá determinada por la relación entre, la superficie de territorio que es eficazmente servido por las infraestructuras del transporte, y la superficie de territorio que ha sido sometida al proceso urbanizador.

Así, este nuevo indicador se define guiado bajo la óptica de que la correcta implantación de las redes de transporte debe permitir servir a la mayor cantidad de usuarios posibles, ya que la búsqueda de la eficacia en el servicio es necesaria desde el punto de vista de la escasez de los recursos y de la racionalización de las inversiones. A todo ello, hay que añadir que este es además un indicador que mantiene una relación muy estrecha con el soporte físico de las infraestructuras, que no es otro que el propio territorio ocupado.

Finalmente, en cuanto a los criterios de definición de indicadores, la densidad, tal y como se ha expuesto, es un concepto independiente del estudiado por el resto de indicadores. Además, el grado de dificultad en su cálculo está ajustado a las necesidades de los trabajos y presentará la fiabilidad aportada por la posibilidad de realizar su cálculo en todas las áreas metropolitanas de estudio.

3.2.5.- Otros Indicadores analizados

Los Indicadores hasta ahora planteados representan la parte de los mismos que va a ser calculada directamente dentro de la modelización elaborada. Sin embargo, además de las propias relaciones entre los mismos, se van a utilizar otros Indicadores que permitan el estudio de otros campos sobre los que las redes ejercen su influencia.

Así, desde la importancia que para una red de transporte tiene el captar viajeros, **se van a comparar los Indicadores diseñados con la carga real de viajeros que presenta la red.** De esta forma, se podrá identificar qué características deben poseer las redes ferroviarias para ser más eficaces desde el punto de vista de la demanda de viajes captada. A su vez, este elemento tiene una relación directa con la posibilidad de rentabilizar la propia red y con la satisfacción de las necesidades de movilidad de los ciudadanos. Dentro de este análisis de la carga de viajeros, se va a hacer referencia también a la eficiencia de la propia red en el transporte de viajeros. A través de la definición de un Indicador que permite comparar como satisfacen las necesidades de transporte las distintas redes, se va a poder determinar cuales son las redes más eficaces en su gestión.

Por otro lado, dentro del campo de la planificación, **se va a definir un Indicador que tenga en cuenta la inversión en infraestructuras de diferentes tipos.** De esta forma, analizando las

inversiones realizadas en los distintos modos de transporte, se va a poder estudiar la eficiencia que las redes de transporte ferroviario alcanzan y su relación con las propias características de la red. Este análisis resulta importante desde el punto de vista de la competencia existente entre las inversiones a repartir entre los diferentes modos de transporte.

Finalmente, en cuanto a la perspectiva territorial de los trabajos, **se va a definir un Indicador que tenga en cuenta la dispersión en la urbanización** y se va a comparar con el resto de Indicadores definidores de las características físicas de la red. A través de este análisis se podrán investigar las consecuencias que la propia morfología de la red ferroviaria tiene en la conformación del espacio urbano. Esto tiene indudables consecuencias sobre la sostenibilidad del sistema de asentamientos, sobre la eficiencia energética global del sistema de transporte y sobre la conformación de las relaciones sociales dentro del territorio.

Con todas las conclusiones expuestas en el último tramo de los trabajos sobre los análisis efectuados, se da un pequeño paso en el entendimiento del territorio de las redes a través del estudio de sus características. A su vez, es de esperar que las conclusiones que se van a ir exponiendo sirvan como elemento de reflexión y punto de partida para nuevas investigaciones dentro del campo de las redes.

3.3.- Principales momentos de decisión dentro de la elaboración de la metodología de modelización

3.3.1.- Elección de los ámbitos de estudio

La determinación de las áreas metropolitanas a estudiar es el primer momento en la elaboración de la metodología que requiere de una reflexión. Así, a lo largo de la exposición realizada en el capítulo segundo, se puede ver como los numerosos estudios comparados existentes van escogiendo sus ciudades "ámbito" según criterios internos de los propios trabajos. De esta forma, la elección de los ámbitos de trabajo se configura como la primera condición de contorno importante que, por otro lado, vinculará a los resultados que se vayan obteniendo.

En el caso aquí estudiado, a lo expuesto en el párrafo anterior, hay que añadir una necesidad extra. Así, para poder realizar la mayor cantidad de ensayos sobre los indicadores a definir, se hace necesario contar con datos preexistentes y homogéneos de diferentes áreas metropolitanas. Por ello, ha sido necesario revisar al detalle los diferentes estudios comparados ya existentes antes de decidir cuales podrían ser los ámbitos de estudio seleccionados.

De esta forma, teniendo en cuenta la necesidad de estudiar áreas metropolitanas de gran tamaño en las que los efectos provocados por las infraestructuras ferroviarias estuvieran ya presentes sobre el territorio, se ha decidido completar los parámetros de elaboración propia con los ya elaborados por Julià¹¹ (2.006) en su publicación Redes Metropolitanas. Esta elección se ha debido a que las ciudades estudiadas por Julià encajan con los criterios seguidos en la selección de ámbitos que se pretenden estudiar en estos trabajos.

Con todos estos elementos expuestos, se ponen las bases para realizar una elección de ciudades que resulte útil a los objetivos establecidos y que cuente con los datos necesarios para poder ampliar los parámetros que a lo largo de los trabajos se desarrollen.

3.3.2.- Definición del área metropolitana

Una vez determinadas las ciudades a estudiar, el siguiente condicionante básico de actuación va a ser la delimitación del área metropolitana asociado a cada ciudad. Este es, posiblemente, el problema de más difícil resolución de todos los trabajos, ya que la forma dispersa de crecimiento de las ciudades impide la determinación unívoca del límite físico de las ciudades y lo convierte en una tarea subjetiva en muchos momentos. Además, hay que tener en cuenta que el desbordamiento de los límites administrativos es un hecho dentro de la conexión funcional de la ciudad que, sin

embargo, choca con la posibilidad de obtención de datos, muy ligada a la compartimentación administrativa de la propia ciudad.

Para poder solventar todos estos problemas arriba expuestos, se hace necesario el establecimiento de una definición de lo que en estos trabajos se entiende por área metropolitana. Con ello se conseguirá poner las bases para marcar ese límite tan difuso que determina las superficies que sí son área metropolitana y las que no lo son.

Finalmente, para conseguir dar sentido a lo establecido por la definición de área metropolitana, será necesario extraer unas directrices que sirvan como guía de ayuda en el momento material de determinar la pertenencia al área metropolitana de una ciudad. Así, con estas directrices se podrá establecer de una manera menos subjetiva estos límites asociados a cada ciudad. De esta forma, se conseguirá cerrar una primera capa de la metodología de modelización, consistente en la definición territorial del ámbito de trabajo.

3.3.3.- Definición de la red de transporte colectivo de infraestructura fija

Realizados los trabajos anteriores, se puede pasar a elaborar la segunda capa conceptual del estudio, consistente en la materialización de la red de infraestructuras del transporte sobre la base territorial diseñada. Así, la representación física de la red férrea se convierte en un aspecto fundamental dentro de los trabajos, ya que el estudio de la propia disposición espacial de la red, es el núcleo central de los objetivos propuestos por los trabajos.

Como se ve en el capítulo anterior, la definición de la red de transporte y su modelización están en el grueso de los sistemas de representación de redes. De esta forma, se han llegado a crear potentes herramientas informáticas, como EMME/2, CUBE o TransCad, destinadas únicamente a la creación de redes y al cálculo de tiempos de viaje. Así, dentro de estos trabajos, será igualmente necesario establecer un sistema de modelización que incorpore los elementos fundamentales que se pretenden estudiar y que además se ajuste a las posibilidades existentes.

De esta forma, para avanzar en la definición de la red se procederá a su representación a través de las dos técnicas principales existentes. Por un lado, se establecerá el grafo de la red para poder estudiar la interpretación que proporcionan las características asociadas a la accesibilidad, la cobertura y la densidad. Por otro lado, se realizará la representación fractal de la red para poder analizar la lectura de la misma que proporciona la teoría fractal.

Estas dos visiones de la red se modelizarán prestando especial atención a la definición de las estaciones de las redes, ya que la parada se convierte en el elemento de interacción entre usuario del transporte y red de transporte. Por tanto, dentro del conjunto de la red, la estación se constituye con el elemento más sensible e importante de la misma.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se cubren las necesidades de definición morfológica de la red ferroviaria. Una vez realizadas estas labores, quedará pendiente la modelización de los servicios ferroviarios sobre la propia red. Concretamente, la determinación de los tiempos de viaje o de las frecuencias de paso de los servicios ferroviarios deberán ser modelizadas para obtener la visión conjunta de la red de transporte ferroviario en funcionamiento. Así, de la integración de todos estos elementos mencionados se conseguirá extraer la segunda capa de la metodología de estudio.

3.3.4.- Definición de la interacción entre la red de transporte y el ámbito físico del área metropolitana

Con una primera capa territorial y una segunda capa referida a la infraestructura ferroviaria, la interacción entre ambas capas se constituye como la tercera capa gráfica a definir dentro de la metodología de modelización. Así, hay que tener en cuenta que la relación entre infraestructuras del transporte y territorio es uno de los elementos de estudio dentro de los objetivos marcados por los trabajos. Sin embargo, para poder abordar las relaciones y los efectos de orden superior que se generan, primero es necesario definir las interacciones más sencillas que red y territorio tienen entre sí.

De esta forma, será necesario fijarse en las soluciones que ya se dan desde la literatura especializada. Así, a modo de ejemplo, se puede mencionar como Martín, Cristóbal y Gómez¹² (2.002) consiguen determinar cuales son las superficies eficazmente cubiertas por las diferentes paradas ferroviarias, como a través de los diagramas de Voronoi¹³ (1.907) se consigue dar solución al problema que surge de la existencia de áreas eficazmente cubiertas por varias estaciones ferroviarias o como Carrese y Gori¹⁴ (2.001) consiguen jerarquizar las diferentes líneas de transporte en función de su importancia objetiva.

A través de la implementación de estas soluciones a problemas puntuales de modelización, antes de proceder a abordar los objetivos asociados a los trabajos, se conseguirá armar esta última capa gráfica y conceptual de interacciones entre territorio y red.

3.3.5.- Determinación de los parámetros de cálculo

Todos los procedimientos elaborados hasta este punto, se convierten en la herramienta que debe posibilitar la obtención de los parámetros integrantes de las diversas formulaciones que se pretenden desarrollar. De esta manera, resulta fundamental que las modelizaciones y representaciones gráficas sobre las que se ha trabajado resulten adecuadas al fin de obtener los parámetros de cálculo, ya que, toda la representación espacial desarrollada se configura como el elemento del que se van a extraer los datos necesarios para conformar los Indicadores de Oferta.

Dentro de la unicidad de la herramienta de representación, los parámetros a calcular presentan características de obtención diferentes entre si, por tanto, la determinación de los mismos requerirá de cálculos y procedimientos individualizados para cada caso. De esta manera, la metodología de cálculo de cada parámetro requerirá la toma de decisiones independientes que sean capaces de extraer las informaciones en cada caso necesarias.

Finalmente, en cuanto a la determinación de los parámetros, comentar que este no es el fin de los trabajos, es un medio para poder abordar los diferentes ensayos sobre los Indicadores de Oferta definidos. Por tanto, la obtención de los parámetros pertenecientes a los indicadores se realizará de acuerdo a los objetivos planteados, sin entrar en complejos métodos de cálculo que hagan perder la componente física que forma parte del núcleo de los trabajos o que requieran simplificaciones de difícil justificación en el entendimiento del viaje como acción proveniente de una necesidad concreta.

3.3.6.- Desarrollo de la formulación

La correcta modelización de las áreas metropolitanas, de la red de transporte ferroviario, de las interacciones entre red y territorio y de la obtención de parámetros debe posibilitar el desarrollo de la formulación. De esta manera, la introducción homogénea de los parámetros obtenidos dentro de las formulas y la consecución de los correspondientes resultados, es el primero de los objetivos dentro de la realización de los trabajos, ya que reflejará la consecución de una metodología ajustada a los fundamentos expuestos en el apartado 1.4, es decir, se habrá conseguido:

- Confianza.
- Extrapolabilidad.
- Fiabilidad.

De esta forma, estos resultados serán la herramienta que va a permitir el posterior estudio de las características morfológicas de las redes de infraestructuras férreas, así como la observación de los efectos inducidos por estas sobre el territorio, la gestión del transporte o la planificación de las propias infraestructuras entre otros.

3.3.7.- Consideraciones adicionales del desarrollo metodológico

A lo largo de este epígrafe 3.3 se ha pretendido exponer brevemente algunos de los aspectos que es necesario determinar a lo largo de los trabajos. Gracias a ello, se han determinado los que serán los puntos básicos de la modelización:

- Territorio.
- Red.
- Interacciones entre red y territorio.
- Cálculo.

Así, cabe señalar una característica fundamental que es común a todos los estadios de modelización, y es **la dificultad que presenta la consideración de todos los elementos que forman parte de la metodología desarrollada**. De esta forma, antes de adentrar los trabajos en el grueso de las simplificaciones y modelizaciones realizadas, es preciso poner de relieve todos estos momentos críticos de la metodología que han puesto en juego la capacidad final de la misma para ofrecer unos resultados fiables.

Igualmente, este elemento es necesario contraponerlo con los medios materiales y humanos de que se han dispuesto para afrontar todos los trabajos, que han hecho necesario el tomar diferentes caminos en la búsqueda de unos resultados fiables, extrapolables y válidos que a su vez presenten una economía de cálculo ajustada.

Con todo ello, y para finalizar esta exposición, remarcar todos estos puntos de conflicto en el desarrollo metodológico, que no sólo en estos trabajos sino en el conjunto de la bibliografía, ponen de relieve la dificultad conceptual de manejar tanta información. A su vez, la manipulación de esa información, es la que define el enfoque que acaban teniendo los trabajos y que, en este caso, se guía por el análisis de las características de la oferta de las redes de infraestructuras ferroviarias.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 3

¹ FÀBREGAS, C.; UNZETA, E. (1.998): *Identificación de los principales factores que determinan la eficacia y la eficiencia de un servicio de transporte urbano de viajeros*. III Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Barcelona.

² HILVERS, H.D.; VERROEN, E.J. (1.993): *Measuring accessibility, a key for successful transport and land-use planning strategies*. PTRC Education and Research Services Ltd. Vol P863.

³ KOENIG, J.K. (1.980): *Indicators of urban accessibility*. Transportation, vol 9.

⁴ MONZÓN, A. (1.988): *Los indicadores de accesibilidad y la planificación del transporte: concepto y clasificación*. Revista de Estudios del Transporte y las Comunicaciones, nº35.

⁵ MARTÍN DUQUE, D.; CRISTÓBAL PINTO, C.; GÓMEZ LÓPEZ, F.J.; MALDONADO, G.; NEGRÓN, C. (2.004): *Niveles de accesibilidad y cobertura de la red de transporte público en la región de Madrid*. VI Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Zaragoza.

⁶ WOOTTON, H.J.; PICK, G.W. (1.967): *A Model for trips generated by households*, Journal of Transport economics and policy, mayo.

⁷ ECHEVARRÍA JADRAQUE, D. (1.998): *El control de la localización de actividades como herramienta de gestión de la movilidad metropolitana*. III Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Barcelona.

⁸ DUPUY, G. (1.991): *Urbanisme de Reseaux, théories et méthodes*. Ed. A. Colin, París.

⁹ GENRE-GRANDPIERRE, C. (1.999): *La desserte spatiale des réseaux de transport routier: une approche fractale*. Rev. Flux nº38, París.

¹⁰ DUPUY, G.; CURIEN, N. (2.003): *Réseaux de communication, marchés et territoires*; Presses de Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Conferencia "Territorio en Redes", Barcelona.

¹¹ JULIÀ SORT, J. (2.006): *Redes Metropolitanas*. Agencia Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.

¹² MARTÍN DUQUE, D.; CRISTOBAL PINTO, C.; GÓMEZ LÓPEZ, F.J. (2.002): *Cobertura y Accesibilidad en transporte público en un corredor metropolitano: el corredor del Henares en Madrid*. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander.

¹³ VORONOI, G. (1.907): *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques*. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 133:97-178.

¹⁴ CARRESE, S.; GORI, S. (2.001): "Prestazioni dei Modelli per la Progettazione del Trasporto Pubblico Locale", en *Metodi e modelli per il trasporto pubblico locale*. Edizioni FrancoAngeli. Milán.

capítulo 4

DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES DE OFERTA PLANTEADOS: OBJETIVO, ALCANCE Y DIFICULTADES METODOLÓGICAS

4.1.- Introducción

A lo largo de este capítulo cuarto se van a desarrollar detalladamente los conceptos asociados a los indicadores de las infraestructuras del transporte que fueron enunciados en el apartado 3.2. Para ello, este capítulo se va a estructurar de forma que, en primer lugar, se va a hacer una breve introducción y, en segundo lugar, se van a volver a remarcar los objetivos fundamentales que tiene la definición de los indicadores. Finalmente, en tercer lugar, se va a desglosar cada indicador individualmente, de manera que se especificarán todos los aspectos que los conforman.

Dentro de esta definición de indicadores, se va a prestar especial atención a identificar los motivos que llevan a la elección de los mismos, a la definición y formulación detallada del indicador y de los parámetros que forman parte del mismo, y a la exposición de las principales dificultades en el cálculo y de las posibles críticas que afecten a los indicadores.

De esta manera, entendiendo que la definición de indicadores es un punto fundamental en el desarrollo conceptual de los trabajos, se han escogido cuatro indicadores fundamentales para su estudio. La elección se ha debido a diferentes causas que se irán exponiendo a continuación, pudiéndose adelantar que se ha escogido:

- Un primer indicador relacionado con la accesibilidad de la red.
- Un segundo indicador relacionado con la cobertura de la red.
- Un tercer indicador relacionado con la longitud de la red y con la eficacia espacial con la que esta cubre el territorio.
- Un cuarto indicador también relacionado con la eficacia espacial en la cobertura de la red.

Debido a las características metodológicas de la elaboración de los trabajos, y de la voluntad de definir indicadores de fácil comprensión, se ha decidido la utilización de indicadores clásicos y sencillos dentro de los existentes en la literatura sobre las redes de transporte. Esto permitirá la futura extrapolación de los mismos a otros ámbitos, de forma que puedan servir de base para el estudio de los puntos fuertes y débiles de otras redes.

Dentro de esta definición de conceptos se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para estudiar la accesibilidad se va a emplear un indicador basado en la acumulación de los distintos tiempos de viaje existentes entre los diferentes puntos del espacio, similar conceptualmente a lo expuesto en los estudios de Martín, Cristóbal y Gómez¹ (2.002).
- Para estudiar la cobertura se va a utilizar un indicador pionero como el de Wooton² (1.967).
- Para estudiar la eficacia espacial en la distribución de la red se va a emplear un indicador de fractalidad basado en los análisis previamente desarrollados por Dupuy³ (1.991).
- Para estudiar la eficacia de la red en la cobertura del espacio se va a utilizar una relación entre superficies.

4.2.- Criterios fundamentales para la definición de los indicadores

Aún habiéndose indicado ya algunos de los criterios seguidos en la definición de indicadores, parece necesario remarcarlos para conseguir una mejor comprensión del presente capítulo. Esto es necesario porque estos criterios se deben tener en cuenta en la forma de operar y calcular los indicadores, en las simplificaciones a realizar y en la metodología a seguir para la obtención de los diferentes parámetros necesarios para el cálculo.

El primer criterio planteado a la hora de diseñar los indicadores es el de la **simplicidad**, entendida como la sencillez tanto de cálculo como de interpretación:

- En cuanto al cálculo parece necesario disminuir lo más posible todos los algoritmos matemáticos. Por tanto, se va a procurar, dentro de una estricta metodología, realizar los procesos necesarios para obtener parámetros de fácil cálculo.
- Respecto a la sencillez de interpretación, resulta conveniente plantear indicadores perceptibles físicamente y que, por tanto, estén compuestos por un alto número de parámetros que se basan en fenómenos medibles y contrastables. Este aspecto dará una mayor confianza en los resultados obtenidos, al huir de formulaciones complejas que pueden esconder la oportunidad de modificar los procesos de cálculo al objeto de conseguir determinados resultados.

El siguiente criterio a la hora de abordar la definición de los indicadores a desarrollar es que exista la **posibilidad de comparación**. Para ello, la búsqueda de la simplicidad se convierte en el instrumento que va a permitir extrapolar la metodología elaborada a los diferentes ámbitos. Es necesario recordar que cada ciudad o ámbito de estudio incorpora unas peculiaridades morfológicas, topográficas, demográficas, económicas, etc. que requieren de una capacidad de síntesis dependiente de la lógica del viaje. Por ello, sólo un proceso que desde su confección tenga en cuenta la necesidad de extrapolación puede conducir a obtener indicadores que posibiliten la comparación entre ciudades.

Asociado a la posibilidad de comparación se encuentra la **posibilidad de repetición**. Así, si no se puede repetir el cálculo de los indicadores sucesivas veces, no es posible introducir la posibilidad de comparación, no ya sólo entre diferentes ciudades, sino también asociada a la comparación de una misma ciudad en diferentes estados. Este elemento resulta de gran importancia para la planificación técnica de las infraestructuras.

Estos tres criterios son los que inicialmente van a dirigir la lógica en la toma de decisiones, para la elección de los indicadores a utilizar y para conducir la metodología que ha de permitir la obtención de los distintos parámetros de cálculo.

4.3.- Indicador de accesibilidad

4.3.1.- Exposición de motivos

A lo largo de la exposición realizada se ha podido comprobar como el concepto de accesibilidad se ha ido repitiendo con asiduidad, siendo, sin lugar a duda, al que más importancia se le ha dado desde los diferentes estudios realizados. Esto es así, porque la accesibilidad devuelve como output el tiempo de trayecto entre dos puntos del territorio, y este tiempo es una medida fácilmente comprensible debido a su rápida percepción física, que es lo que finalmente advierte un usuario del transporte con necesidades de movilidad.

Debido a este doble carácter, de percepción física del viajero e importancia en la literatura consultada, se va a definir un parámetro de accesibilidad que sea aplicable al conjunto de las redes a analizar y fácilmente extrapolable a otras redes.

Para el estudio de la accesibilidad de la red se van a dar una serie de definiciones necesarias para su comprensión, para a continuación abordar la exposición de las diferentes fórmulas y conceptos.

4.3.2.- Definición de accesibilidad

Para comprender a que se refiere el concepto de accesibilidad parece conveniente definir qué se va a entender, dentro de estos trabajos, por accesibilidad de un punto del espacio respecto a otro, qué se va a entender por accesibilidad media de un punto del espacio respecto al resto de puntos y qué se va a entender por accesibilidad de una red.

La **accesibilidad de un punto del espacio respecto a otro** del mismo ámbito se puede definir como: "el tiempo total que necesita un individuo para ir desde un punto A hasta otro punto B".

De esta misma manera se puede definir la **accesibilidad media de un punto del espacio respecto al resto de puntos del espacio** como: "el tiempo medio que necesita un individuo para ir desde un punto A hasta cualquiera del resto de puntos del ámbito considerado".

Finalmente se puede abordar la **accesibilidad de una red de puntos en el espacio**, definiéndola como: "la media de la accesibilidad media de cada punto del espacio respecto al resto de puntos".

A partir de estas definiciones ya se puede establecer una formulación para obtener la accesibilidad de cada red. El proceso de formulación expuesto a continuación sigue la misma progresividad que las definiciones, de manera que primero habrá que obtener la fórmula de la accesibilidad de un punto respecto a otro punto, a continuación la accesibilidad media de este punto con el resto de puntos y finalmente la accesibilidad media de todos los puntos considerados, o accesibilidad de la red.

4.3.3.- Parámetros a considerar

Como se ha expuesto, el concepto de accesibilidad está íntimamente ligado al concepto de tiempo de viaje. Este tiempo de viaje es una percepción global del viajero que se puede descomponer en diferentes percepciones o tiempos parciales, tal y como ya expusieron en sus trabajos Martín, Cristóbal y Gómez¹ (2.002). A continuación se especifican y definen estos tiempos parciales que definirán el tiempo de viaje.

Tiempo de acceso a la red (t_a): En este tiempo está comprendido aquel que es necesario para llegar desde cualquier lugar del área de influencia de la estación hasta el lugar preciso de la parada. Así, se tendrá por un lado el tiempo que se recorre a pie por la superficie, que está constituido por el tiempo necesario para ir desde el lugar de partida hasta la parada en superficie y, por otro lado, se tendrá el tiempo de recorrido que existe dentro de la estación para llegar desde la superficie hasta el andén correspondiente.

Tiempo de espera (t_e): En este caso el tiempo a considerar es el que el pasajero ha de estar esperando, desde que llega al andén hasta que aparece el tren. Este tiempo de espera es, de media, el correspondiente a la mitad de la frecuencia del servicio de transporte.

Tiempo de viaje (t_v): El tiempo de viaje es aquel en que el usuario se encuentra físicamente realizando el viaje dentro del medio de transporte, e incluirá desde el momento en que el pasajero se monta en el vehículo hasta que lo abandona.

Tiempo de transbordo (t_t): Se refiere a la cantidad de tiempo perdida para el intercambio entre líneas de transporte, una vez que ya se ha realizado un primer tramo del viaje. Este tiempo de transbordo no siempre aparecerá y será consecuencia de la necesidad de los viajeros de acceder a destinos no servidos directamente por una línea de transporte. Una vez realizado el transbordo en el intercambiador correspondiente existirá una nueva repetición de tiempos de espera y de viaje.

Tiempo de salida hasta el destino (t_s): El tiempo de salida será simétrico al tiempo de acceso en cada estación, y se corresponderá con la suma de los tiempos de llegada desde el andén hasta la superficie y del recorrido desde la parada al aire libre hasta el punto de finalización del viaje.

4.3.4.- Formulación del Indicador de Accesibilidad

Utilizando los tiempos parciales y siguiendo la terminología expuesta con anterioridad, se van a formular los diferentes indicadores de accesibilidad definidos. En primer lugar se va a definir el Indicador de Accesibilidad ($I_{A(A-B)}$) de un punto (A) del espacio de estudio respecto a otro (B) del mismo ámbito

$$I_{A(A-B)} = t_{aA} + (t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-B} + t_{sB}$$

Donde el sumatorio de n representa el número de transbordos realizados durante el viaje. El número de transbordos puede ir desde 0 hasta el número máximo que exija el trayecto dentro de la red (nt).

De esta forma, se tiene caracterizado el tiempo de viaje existente entre dos puntos cualesquiera del ámbito de estudio. El siguiente paso es la definición del Indicador de Accesibilidad Media ($I_{A(A-N)}$) de un punto (A) con el conjunto de puntos (N) del ámbito estudiado.

$$I_{A(A-N)} = \left(\sum_{(i:1...N)} [t_{aA} + (t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-i} + t_{sI}] \right) / N$$

Este indicador puede permitir la creación de un mapa de curvas isócronas del área de estudio. En el mismo, se representa el grado de utilidad de cada uno de los puntos representados en cuanto al tiempo medio de viaje de cada punto con el resto.

Finalmente, el Indicador de Accesibilidad de la Red (I_A) se definirá como la suma de los diferentes indicadores de accesibilidad de cada uno de los puntos de estudio ($I_{A(i-N)}$), que en este caso ya se pueden asociar con las diferentes paradas (N), ponderados por su propio área de influencia o cobertura (A) y entre el sumatorio de dichas áreas de influencia. La ponderación por las áreas de cobertura se produce para tener en cuenta la accesibilidad del conjunto de puntos del territorio y no sólo la accesibilidad del conjunto de paradas de la red. De esta manera, ya se dispone de un indicador que teóricamente permite la comparación entre diferentes redes ferroviarias, atendiendo a una de sus características principales como es la media de los tiempos de viaje.

$$I_A = \left(\sum_{(i:1...N)} (I_{A(i-N)} \cdot A_{(i)}) \right) / \left(\sum_{(i:1...N)} A_{(i)} \right)$$

Expuesto el Indicador de Accesibilidad, para su obtención será necesario el cálculo de los siguientes parámetros:

- t_a : tiempo de acceso a cada parada de la red.
- t_e : tiempo de espera desde el acceso al andén hasta la entrada en el vagón.
- t_v : tiempo de viaje físicamente dentro del medio de transporte.
- t_t : tiempo de transbordo caminando dentro de cada intercambiador.
- t_s : tiempo de salida desde la red hasta el punto de destino.
- n_t : número de transbordos para cada viaje.
- N: número de paradas a considerar.
- A: área de cobertura de cada estación.

4.3.5.- Dificultades en el cálculo de los parámetros

La dificultad en el cálculo de los parámetros es algo intrínsecamente asociado al proceso de modelización del ámbito y, por tanto, muy identificado con la metodología utilizada. Por ello, se van a esbozar en este capítulo mínimamente las dificultades en el cálculo de los parámetros, para comentar con posterioridad en profundidad estos problemas, así como las soluciones dadas, dentro del capítulo de los trabajos dedicado a la metodología seguida.

El primer elemento a tener en cuenta es la **gran cantidad de valores necesarios para poder desarrollar la formulación**. Además, esta alta cantidad de parámetros a calcular, está directamente relacionada con la complejidad de la red. Esta circunstancia es de extraordinaria importancia, ya que cada elemento nuevo que se incorpora al cálculo genera la necesidad de realizar cálculos con todo el resto de elementos ya pertenecientes a la red. Así, por ejemplo, si se pasa de 3 a 4 elementos será necesario el cálculo de 3 nuevas relaciones (las resultantes de relacionar el nuevo elemento con los ya existentes en la red, 1 con 3). Sin embargo, si la red pasa de contar con 99 a contar con 100 elementos, será necesario el cálculo de 99 nuevas relaciones (1 con 99). Este hecho puede hacer fracasar cualquier procedimiento cuyas directrices sean la simplicidad de procesamiento y la posibilidad de repetición de los cálculos. Cabe comentar en este punto que, como media orientativa, se pueden establecer alrededor de 500 paradas de metro y ferrocarril de cercanías dentro de las grandes aglomeraciones europeas.

A parte de la dificultad de cálculo asociada a la gran superficie de las redes y al gran número de paradas de las mismas, es necesario exponer otras **dificultades de cálculo asociadas a la propia obtención de los parámetros existentes** en la formulación. Si se analiza individualmente cada uno de los parámetros necesarios se pueden identificar las siguientes dificultades concretas de su obtención.

1) En primer lugar se analiza el parámetro t_a , asociado al tiempo de acceso a cada estación de la red. Si se reflexiona sobre su significado, será necesario el cálculo del tiempo medio que la totalidad de los puntos de un área de cobertura requieren para acceder a la boca de metro o a la parada de ferrocarril correspondiente. Esto significa que, matemáticamente, se debe definir exactamente cada zona de estudio, definir sus viales y proceder a calcular los tiempos de recorrido, que incluirán la determinación de una velocidad media de viaje, unos tiempos de espera por cruce de calles e incluso una discretización que tenga en cuenta la diferente densidad de población de cada una de las manzanas.

2) Analizando el parámetro t_e , se debe determinar en este caso el tiempo de espera entre el acceso a la parada y la entrada al vagón, este tiempo es proporcional a la frecuencia de los convoyes. Por tanto será necesario saber la frecuencia de cada línea en cada horario diferente.

3) El siguiente tiempo a analizar es t_v , o sea, el tiempo físico de viaje. En este caso es necesario considerar la inevitable variación de tiempos que se produce de un viaje a otro, por tanto, el tiempo de viaje debe introducir la media de los viajes entre cada dos puntos de estudio. Estos tiempos de viaje, estarán integrados además por un tiempo de viaje efectivo y un tiempo de parada en cada estación intermedia a las de estudio.

4) El tiempo de transbordo, t_t , está asociado con el tiempo perdido dentro de cada intercambiador de línea, lo cual conlleva el conocimiento de la geometría de los mismos para poder determinar el tiempo perdido en este movimiento. Asociado a este tiempo, se encontraría el parámetro n , o número de intercambios que se producen en cada viaje.

5) Finalmente, el tiempo de salida desde la red hasta el punto de destino t_s , es un parámetro simétrico al parámetro t_a anteriormente mencionado, y tiene las mismas dificultades de cálculo que este.

El cálculo de todos estos tiempos presenta la dificultad añadida de que **el modelo necesita la introducción unívoca de tiempos**, cuando todos ellos van a variar con el propio usuario del transporte público y con las circunstancias propias de cada viaje realizado. Buscando la practicidad del cálculo, se establecerán tiempos medios, perdiéndose en muchos casos los valores relativos a las desviaciones medias de estas medias.

Además, se deben determinar el resto de parámetros anteriormente indicados, N , que se corresponde con la concreción del número de estaciones a estudiar, y A , que se corresponde con el área de cobertura o influencia de cada estación. Estos dos parámetros serán abordados con mayor detenimiento en el capítulo dedicado al indicador de cobertura, ya que físicamente tienen una mayor relación con este indicador.

Como se observa, el proceso de cálculo no va a poder ser matemáticamente unívoco y la multitud de factores a considerar, para el simple cálculo del tiempo de viaje, va a conducir a un proceso de simplificación. Cualquier proceso simplificativo es finalmente una manipulación de la realidad para convertirla en un proceso del cual se puedan extraer conclusiones y como cualquier manipulación, puede ser llevada a cabo con mayor o menor acierto y con unos mejores o peores procedimientos en pos de obtener unos resultados concretos.

Como resumen se puede concluir que la obtención de **los mejores procedimientos de simplificación es un elemento inherente al indicador, ya que la información es masiva.**

4.3.6.- Críticas al Indicador de Accesibilidad

Las **dificultades asociadas al cálculo de los parámetros** necesarios para identificar el Indicador de Accesibilidad son el elemento más importante para plantear las críticas al propio indicador. Como ya se ha comentado, la información para definir con precisión los parámetros es ingente y, por tanto, el propio manejo de esa información va a condicionar las críticas en uno u otro sentido. De esta manera, si existe un abuso de la información, con escasas simplificaciones, se obtendrá un Indicador de Accesibilidad extremadamente pesado a la hora de ser manipulado, el periodo de cálculo será largo y el tiempo de variación que en él puede exigir una modificación de la red también será largo. Este hecho puede invalidar el indicador, por su escasa valía para adaptarse a una red cambiante.

En el otro extremo se tendría un exceso de simplificación. La excesiva información puede llevar a eliminar datos de valor dentro del proceso de cálculo. Si esto se produce se obtendrán indicadores amputados de parte de su utilidad o, lo que es peor, indicadores que devuelvan resultados incoherentes con el proceso lógico seguido a la hora de formularlos.

Otro elemento importante en indicadores sobreabundantes de datos es la **forma de obtención de la información**. Una información que puede ser obtenida en una red puede no tener correspondencia en otras redes y viceversa. De esta manera, es importante evitar datos "extraños" que puedan acarrear la imposibilidad de comparación entre redes.

Según se ha expuesto, la simplificación es un proceso necesario, sin embargo, no hay que olvidar que la simplificación es una manipulación. Una manipulación que puede ser llevada a cabo con un fin científico o que, por el contrario, puede tener el fin de dirigir los resultados dados por el indicador hacia unos fines previamente determinados. Es necesario tener en cuenta la manipulabilidad de esta clase de indicadores, sobre todo a la hora de identificar objetivos guiados por intereses económicos, políticos o ajenos a la lógica de la ordenación del espacio en busca de una ciudad más equilibrada.

4.4.- Indicador de Cobertura

4.4.1.- Exposición de motivos

La cobertura es también un concepto ampliamente abordado por numerosos estudios, tal y como se ha ido exponiendo en los diferentes capítulos anteriores. Gran parte de la literatura existente entiende que cualquier estación de estudio tiene un área de influencia relacionada con la utilidad de la parada, de esta manera, la determinación de esta área de influencia de cada estación es uno de los objetivos centrales asociado a la definición de los indicadores de cobertura.

La importancia adquirida por los indicadores de cobertura se fundamenta en el objetivo de procurar el mejor servicio de transporte posible y, este mejor servicio, se asocia a la consecución de una cobertura uniforme del territorio, de manera que no existan áreas con deficiencia de las infraestructuras necesarias para satisfacer la movilidad de los ciudadanos.

Para abordar el concepto de cobertura de una red se van a dar una serie de definiciones necesarias para su mejor comprensión, para a continuación abordar la exposición de las diferentes fórmulas y parámetros considerados.

4.4.2.- Definición de cobertura

La definición de cobertura no surge de manera tan inmediata como la dada para la accesibilidad e incluso puede dar lugar a interpretaciones sobre el propio significado de la misma. Para poder centrar el tema dentro de los trabajos, la cobertura se ha abordado desde el concepto físico de esta. Así, se puede definir la cobertura como: "*El grado de atracción que la red ejerce, o la utilidad que la red tiene sobre los individuos, para que estos la utilicen en sus desplazamientos*".

4.4.3.- Formulación del Indicador de Cobertura y parámetros a considerar

El tratamiento de la cobertura que se va a utilizar en estos trabajos viene determinado por un indicador clásico. Se va a emplear el indicador definido por Wootton² (1967) en su teoría sobre los viajes generados por las familias. La formulación de dicho indicador es la siguiente:

$$I_C(i) = \sum_{(j:1...N)} (\sqrt{F_{ij}} / \sqrt{A_i})$$

Siendo $I_C(i)$ el indicador de cobertura del punto i , F_{ij} la frecuencia de los servicios en la línea que desde i pasan por j , y A_i el área de cobertura de la zona i . Todo ello para el conjunto de puntos (N) a los que se puede acceder desde el punto i . Este indicador se puede utilizar directamente para la realización de planos de Isocoberturas de las diferentes redes ferroviarias de estudio. Estos planos de Isocobertura sirven para identificar qué puntos de la red están mejor servidos por la misma.

Esta formulación dada por Wootton incorpora de forma básica las características enunciadas en la definición expuesta con anterioridad, en cuanto que recoge el grado de atracción o utilidad de la red. Para ello se introducen dos conceptos, la frecuencia de paso de los servicios de transporte y el área cubierta por cada estación. Estos dos conceptos pretenden englobar, de forma matemática, la subjetividad que se engloba dentro de la utilidad que cada viajero concede a la red de transporte. A continuación se detallan en mayor medida estos dos parámetros.

Frecuencia de los servicios F_{ij} : Se corresponde con el número de servicios de transporte que utilizan la parada en estudio por unidad de tiempo. La frecuencia de paso se revela como un aspecto fundamental en la eficacia del transporte urbano y, en ocasiones, se llegan a sacrificar otros aspectos funcionales de la red por aumentar la frecuencia de paso de los servicios.

El servicio poseerá mejor calidad cuanto mayor sea la frecuencia de paso y, por tanto, cuanto menores sean los intervalos de paso. Debido a esto la frecuencia es proporcional al índice de cobertura, ya que mejores frecuencias darán lugar a una mejor satisfacción de las necesidades por parte del usuario.

Área de cobertura A_i : Se refiere a la cantidad de superficie eficazmente servida por la red. Esto se traduce en que la existencia de una gran cantidad de paradas por unidad de superficie hará que el área a cubrir por cada una de ellas sea menor y que, por ello, áreas de cobertura de superficies más pequeñas se correspondan con coberturas mejores de la red. Por tanto, el área de cobertura será inversamente proporcional a la cobertura de la red y, como consecuencia de esto, aparece en el denominador de la expresión matemática correspondiente al Indicador de Cobertura.

A partir de la definición del Indicador de Cobertura para cada punto i se puede definir un indicador de cobertura global (I_C) de toda la superficie metropolitana. Para ello, se pondera el indicador de cobertura de cada estación ($I_C(i)$) por el área eficazmente cubierta por dicha estación (A_i), y se divide la resultante por la Superficie total del área metropolitana en estudio (S).

$$I_C = (\sum_{(i:1...N)} I_C(i) \cdot A_i) / S$$

De esta manera, se ha conseguido definir un indicador asociado a la cobertura de la red que es comparable en diferentes redes de transporte. Expuesto el Indicador de Cobertura, para su obtención será necesario el cálculo de los siguientes parámetros:

- F_{ij} : frecuencia de paso de los servicios de transporte entre cada dos paradas a estudiar.
- A : área de cobertura de cada estación.
- S : superficie del área metropolitana en estudio.
- N : número de paradas a considerar.

4.4.4.- Dificultades en el cálculo de los parámetros

La dificultad en el cálculo de los parámetros está asociada a problemas similares a los comentados en la exposición dedicada al Indicador de Accesibilidad. Así, se pueden identificar similares problemáticas en lo relativo a la mayor cantidad de cálculos asociados a una mayor cantidad de datos y a la necesidad de afrontar simplificaciones que den lugar a procedimientos ágiles. Si se tratan uno a uno cada parámetro se pueden ir comprobando las **dificultades de su cálculo individualizado**.

1) En primer lugar se aborda el cálculo de F_{ij} , en este caso se hace referencia a la frecuencia de paso de los servicios de transporte en cada estación. Para abordar estas operaciones es necesario conocer las frecuencias de cada línea, además hay que tener en cuenta que dentro de cada línea será necesaria la discriminación de los diferentes horarios, ya que las frecuencias van variando a lo largo del día. En este caso, si se está elaborando un indicador de cobertura de la red, se deberá tener en cuenta la frecuencia media de todas las horas del día en cada línea diferenciada.

Otro elemento a tener en cuenta es la posibilidad de realizar el viaje por distintos caminos, debiéndose escoger el camino que mayor utilidad aporte. En general, este camino está relacionado con el que menor tiempo requiera y en menor medida está también relacionado con el que menos rupturas de carga tenga. Como elemento a tener en cuenta dentro de esta opción de tener diferentes caminos, se debe observar la posibilidad de que para un itinerario existan diferentes líneas con el mismo trazado que realicen el recorrido, esta posibilidad reducirá la frecuencia de paso del itinerario.

2) Al analizar el parámetro S , superficie del área metropolitana, surge una dificultad principal, determinar qué es área metropolitana y qué no lo es. Además, es necesario identificar hasta donde llega esta área metropolitana en extensión y la delimitación concreta del perímetro de la ciudad. Todos estos problemas no son cuestiones menores en la determinación de este parámetro y será necesario abordarlos más adelante.

3) Finalmente, se debe determinar el parámetro A , área de cobertura de cada estación. En este caso se deben determinar varios aspectos:

- En primer lugar, cabe considerar que las bocas de metro o de estación de ferrocarril suelen ser varias para cada parada en concreto, a lo que se une el hecho de que el andén para llegar hasta el medio de transporte se encuentra en muchas ocasiones en el subsuelo, con lo que no se puede identificar en la cartografía aérea. Todos estos elementos deben ser considerados para determinar el punto de acceso al medio de transporte.
- En segundo lugar, se debe determinar cual es la superficie eficazmente cubierta por la parada, esto es, el área que se beneficia de la influencia de la estación y desde la cual existirán usuarios dispuestos a realizar un desplazamiento inicial, en otro medio de transporte, para poder acceder a la red. Esta superficie también depende de la configuración interior de la propia área de influencia, de forma que el entramado de calles y las preferencias por las estaciones puede aumentar o disminuir la resistencia de los usuarios a acercarse a la parada correspondiente.

4.4.5.- Críticas al Indicador de Cobertura

En cuanto a las críticas al indicador de cobertura, responden en un primer lugar a aquello ya desgranado a cerca del indicador de accesibilidad. Por un lado, la cantidad de información a tratar es tan grande que su manejo puede dar lugar a un abuso o escaso uso de la misma, por otro lado, el proceso simplificador puede no estar carente de vicios.

A parte de estos dos temas recurrentes, si que en este caso parece quedar más claro el hecho de la utilización de información "extraña". Para la definición de la superficie cubierta es necesaria la incorporación de diferentes términos municipales que formarán parte del área metropolitana y la incorporación de municipios distintos puede llevar aparejada la incorporación de información diferentemente tratada. Esta disgregación de los datos ha de ser tenida en cuenta para la obtención de métodos homogéneos.

Un último elemento de extraordinaria importancia es la **determinación del camino a seguir por los viajeros**. La existencia de diferentes posibilidades de elección conlleva inevitablemente que, a igualdad de itinerarios, haya viajeros que utilicen diferentes alternativas. Los métodos tradicionales cargan los viajes sobre un determinado itinerario, elegido en general a través de una función que minimiza el tiempo de viaje entre los puntos en relación. A su vez, esta función de minimización de tiempos también presenta críticas y dificultades en cuanto a su concepción. El principal problema que se puede achacar a la función de minimización de tiempos de viaje es que es altamente susceptible a los cambios de las velocidades medias de viaje. De esta manera pequeños errores en el cálculo de las velocidades de viaje de los diferentes itinerarios, pueden llevar asociados grandes cambios en la carga de tráficos de los itinerarios, que a su vez afectan a la planificación de las frecuencias de paso y a la rentabilidad misma de dichos itinerarios.

4.5.- Indicador de Fractalidad

4.5.1.- Exposición de motivos

La búsqueda de los mejores medios para la consecución de ciudades equilibradas debe llevar a la investigación de nuevos procedimientos para la inversión en infraestructuras. Uno de esos métodos de reciente aplicación es la implementación de las teorías fractales dentro de las técnicas de la ordenación del territorio y del transporte.

La fractalidad se presenta como un indicador de base topológica y asociado a la forma en que las redes de transporte cubren el territorio. La fractalidad es un fenómeno que se ha traducido desde diversas lógicas naturales, entre ellas se pueden exponer la formación de ramas en los árboles o la formación de las estructuras de los copos de nieve. Desde estas experiencias iniciales se ha logrado entender que la naturaleza emplea configuraciones óptimas de ocupación del espacio y de minimización de la energía que pueden ser imitadas por las redes de infraestructuras del transporte.

Estas configuraciones óptimas, asociadas a la fractalidad, poseen algunas características peculiares que merece la pena comentar. Como característica fundamental, cabe decir que las configuraciones fractales presentan una relación invariante independientemente del tamaño de red que se tome, lo que se traduce en que la relación asociada a una parte de la red es igual a la asociada para el conjunto de la red. Esto es así porque para la formación de las diferentes estructuras se siguen unos parámetros fijos, que consiguen introducir cantidades suplementarias de longitud de red proporcionalmente en cada ámbito individual.

Como ha sido habitual el resto de indicadores se van a realizar algunas definiciones necesarias para la comprensión del concepto de fractalidad antes de abordar la formulación y el resto de conceptos asociados a la construcción propiamente dicha del Indicador.

4.5.2.- Definición de fractalidad

Según lo comentado en el apartado anterior, se puede definir el grado de fractalidad de una red como: *"La relación constante existente entre el logaritmo de la longitud de la red y el logaritmo de la superficie cubierta por dicha red"*.

4.5.3.- Formulación del Indicador de Fractalidad y parámetros a considerar

Para la definición del Indicador de Fractalidad a usar en el desarrollo de los trabajos se transpondrá la definición de fractalidad arriba dada en una fórmula. Sin embargo, a la hora de realizar esta transposición a un ejemplo práctico cabe realizar alguna puntualización. La definición de fractalidad es la adecuada para fenómenos físicos naturales o artificiales como los descritos anteriormente, pero las redes de transporte público terrestre guiado presentan una conexión reducida a las paradas, es decir, no toda la longitud de la red permite el acceso a la misma, ya que sólo a través de las estaciones se conseguirá el acceso a la red. Debido a esto, considerar la relación entre la longitud de la red y la superficie cubierta no parece lo más apropiado, ya que el poseer longitudes mayores de red no tiene porqué asegurar ni un mejor ni un peor comportamiento de la misma. Así, parece más

correcta la utilización del número de paradas que el de la longitud de la red, puesto que el número de paradas si va a denotar la utilidad de la red, ya que estas son el punto de contacto entre los individuos y la red de transporte. Esta argumentación es similar a la realizada por Dupuy³ (1.991) en sus investigaciones

Con esta justificación y siguiendo los modelos ya desarrollados por Dupuy, la definición del Indicador de Fractalidad (I_F) para cada red se corresponde con la siguiente formulación:

$$I_F = \log (N) / \log (O)$$

Dentro de la formulación se pueden distinguir dos parámetros a obtener para el cálculo del Indicador de Fractalidad. En este caso el primer parámetro sería nuevamente el **Número de Paradas (N)**: El número de paradas será el total de las existentes en el área metropolitana considerando las particularidades de su disposición espacial.

Área Ocupada (O): Dupuy permitió constatar la existencia de una relación fractal entre el número de estaciones de la red de ferrocarriles regionales de París y la superficie de ámbitos concéntricos al centro urbano. Debido a esto, para la introducción del parámetro Área Ocupada, se van a utilizar superficies circulares concéntricas dentro del área metropolitana, de forma que se cubra el conjunto de las paradas ferroviarias de la red.

El resumen sería que los parámetros intervinientes en la formulación son los siguientes:

- N: número de paradas a considerar.
- O: área ocupada por las estaciones.

4.5.4.- Dificultades en el cálculo de los parámetros

Las **dificultades** teóricas que se advierten en un primer momento en el cálculo del Indicador de Fractalidad son **bastante menores** que en el de los anteriores indicadores. De hecho, el haber calculado los anteriores Indicadores, hace que el cálculo del Indicador de Fractalidad suponga una proporción de tiempo poco apreciable con relación a los demás.

La obtención del número de paradas vendrá determinada en la propia obtención del grafo de la red, y la problemática con el posicionamiento de las paradas ya viene explicada con anterioridad.

La obtención del área ocupada es inmediata puesto que, como ya se ha dicho, se trata del área de superficies circulares concéntricas. El único elemento problemático de obtención será la ubicación del centro de estas superficies concéntricas.

4.5.5.- Críticas al Indicador de Fractalidad

Como se puede extraer del estudio del proceso deductivo a la hora de definir los distintos indicadores, el Indicador de Fractalidad presenta unas características propias y algo alejadas del resto de los indicadores. Este **alejamiento teórico del resto de Indicadores** es una primera crítica que se puede realizar, ya que a priori no debería mostrar conclusiones similares a las del resto, debido a su escasa proximidad conceptual.

Una segunda crítica del Indicador de Fractalidad puede venir de su simplicidad. Hasta ahora se ha explicado como asociado a las infraestructuras del transporte y a su implantación en el territorio existe una cantidad de datos muy alta. Dicho esto, parece evidente la simplificación realizada por las teorías fractales asociadas a las redes, en cuanto a la importancia de determinados parámetros dentro de las relaciones existentes entre las redes y su distribución espacial.

4.6.- Indicador de Densidad

4.6.1.- Exposición de motivos

La definición de un Indicador de Densidad está intelectualmente relacionada con la definición del Indicador de Cobertura anteriormente realizada. La cobertura es un concepto muy abierto conceptualmente que en estos trabajos ha sido asociado teóricamente con el grado de atracción que la red ejerce sobre los usuarios de la misma. Este grado de atracción se ha relacionado a su vez con aspectos como el área o la frecuencia de servicio a través del Indicador de Cobertura dado por Wootton y con otros parámetros desde otros indicadores.

Este ligero desligamiento de la cobertura de la realidad física del territorio necesita un contrapunto que va ser introducido por un nuevo Indicador. Este nuevo indicador definido va a ser fácilmente comprensible desde el punto de vista del usuario de la red y de la ocupación del territorio, ya que va a identificar el grado de superficie servido por la red de transporte.

La densidad de superficie cubierta es además un indicador relativamente utilizado por la literatura y que, por los parámetros necesarios para el desarrollo del resto de Indicadores, resulta determinable sin un gran desarrollo suplementario de la metodología.

4.6.2.- Definición de Densidad

Dentro de estos trabajos, se va a definir Densidad como *"la cantidad de superficie servida por las estaciones de la red, respecto a la superficie total ocupada por el área metropolitana"*.

4.6.3.- Formulación del Indicador de Densidad y parámetros a considerar

Vista la definición dada, la Densidad se trata de un parámetro global del área metropolitana y no tiene una formulación individualizada para cada estación. Esto último sin perjuicio de la posibilidad de sectorización del área metropolitana, aunque esta posibilidad tiene más sentido dentro de la comparación de la densidad de los diferentes ámbitos dentro de un solo área metropolitana determinada, no siendo este un objeto de los actuales trabajos.

Dada la definición, la formulación del Indicador de Densidad (I_D) que se desprende de la misma es más o menos inmediata:

$$I_D = \left(\sum_{(i:1...N)} A_i \right) / S$$

Siendo:

- S: superficie del área metropolitana en estudio.
- A: área de cobertura de cada estación.
- N: número de paradas a considerar.

Todos los parámetros considerados para la definición del Indicador de Densidad ya han sido desarrollados dentro de la definición de otros indicadores, por tanto no se va a ser reiterativo en su explicación, ya que no han cambiado de significado en esta nueva formulación.

4.6.4.- Dificultades en el cálculo de los parámetros

Como ya se ha comentado en el apartado sobre la elaboración de la formulación, los parámetros necesarios para la definición de este indicador ya han sido desarrollados en otros apartados. Por

tanto, las dificultades asociadas a la obtención de las diferentes áreas ya vienen referidas en anteriores epígrafes.

4.6.5.- Críticas al Indicador de Densidad

La principal crítica asociada a este Indicador es la dificultad asociada a la **determinación del límite de las diferentes áreas**. En primer lugar está la determinación del límite físico del área metropolitana, que conlleva la necesidad de establecer qué es y qué no es ciudad. Esta definición tiene la dificultad de que es necesario determinar el área definida por la ciudad en el espacio, pero también en el tiempo, ya que el límite urbano es un elemento cambiante dentro de la dinámica de crecimiento de la ciudad.

En segundo lugar, está la dificultad de determinar qué es un área servida y qué no es un área servida por la red de transporte, ya que esta diferenciación es un elemento subjetivo para cada individuo, además, incluso resulta cambiante según los destinos de viaje o los momentos de elección del destino.

4.7.- Síntesis de Indicadores

Con la definición que se ha realizado de estos cuatro Indicadores se puede dar por concluido este apartado referido a la concreción de las herramientas que van a servir para estudiar el transporte, el territorio y su planificación conjunta a través del análisis de las características de las redes.

De esta manera, se puede decir que se ha definido un indicador como el de Accesibilidad que responde a una lógica basada en la del transporte, un indicador como el de Cobertura que mezcla conceptos referidos al transporte y al territorio y un indicador como el de Densidad referido fundamentalmente a aspectos relacionados con el territorio. Además de todos ellos, se ha definido un último indicador, el de Fractalidad, que reflexiona fundamentalmente sobre la lógica topológica de la propia red y que, por tanto, tiene un carácter fuertemente marcado por la planificación de las redes de infraestructuras del transporte.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 4

¹ MARTÍN DUQUE, D.; CRISTOBAL PINTO, C.; GÓMEZ LÓPEZ, F.J. (2.002): *Cobertura y Accesibilidad en transporte público en un corredor metropolitano: el corredor del Henares en Madrid*. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander.

² WOOTTON, H.J.; PICK, G.W. (1.967): *A Model for trips generated by households*, Journal of Transport economics and policy, mayo.

³ DUPUY, G. (1.991): *Urbanisme de Reseaux, théories et méthodes*. Ed. A. Colin, París.

capítulo 5

DESARROLLO METODOLÓGICO DE LOS TRABAJOS

5.1.- Introducción

En este capítulo se va a abordar la forma en que se ha desarrollado la modelización de los diferentes parámetros que afectan al estudio que se está realizando. Como criterio de partida a la hora de afrontar el capítulo, cabe establecer que **el método de consecución de los objetivos debe de ser igual de claro que los propios objetivos**. Esta será la mejor manera de evitar malas interpretaciones sobre los procedimientos empleados y de posibilitar la confianza necesaria en la bondad de los resultados que a posteriori se obtendrán. Debido a ello, se va a detallar cada uno de los pasos seguidos en el desarrollo de los diferentes parámetros que componen los indicadores elaborados.

Para el adecuado seguimiento de la metodología desarrollada, se va a ir ejemplificando cada uno de los pasos más importantes dados. Para ello, se ha realizado el proceso comenzando con la modelización de Madrid como ciudad ejemplo para el desarrollo de los indicadores. La elección de dicha ciudad, a modo de primera área metropolitana tratada y ejemplo, se debe a la posibilidad de obtener datos con facilidad y al hecho de tratarse de una ciudad mediana, en la que es más fácil implementar los diferentes indicadores por primera vez.

A partir de este momento, y con los antecedentes expuestos, se ira explicando en qué han consistido los principales pasos metodológicos dados, cuales son las simplificaciones que ha sido necesario ir realizando y el porqué de esas simplificaciones.

5.2.- Elección de las diferentes ciudades de estudio, obtención de los planos de las áreas metropolitanas y modelización de las áreas de estudio

5.2.1.- Elección de las ciudades de estudio

El primer elemento que se necesita abordar para el estudio que se pretende realizar es la elección de los diferentes ámbitos de actuación. Así, los ámbitos de actuación serán las áreas metropolitanas de las ciudades en estudio. En este primer párrafo ya se apuntan dos cuestiones básicas a dilucidar, en primer lugar, determinar qué ciudades se van a estudiar y, en segundo lugar, delimitar qué es el área metropolitana de esas ciudades, punto este último que será tratado en el siguiente epígrafe.

Respecto a las ciudades a estudiar, se puede decir que dado que **los trabajos se desarrollan en el ámbito de estudio de las redes de metro y de ferrocarril de cercanías**, lo lógico es realizar la elección de ciudades que presenten estos dos modos de transporte urbano. Por tanto, se ha optado por identificar ciudades en las que las infraestructuras de transporte público guiado presenten redes maduras y lo suficientemente complejas como para obtener resultados extrapolables a todo tipo de aglomeraciones urbanas.

Visto el objetivo inicial de estudiar ciudades con redes de transporte colectivo guiado, un presupuesto básico para poder analizar las redes de las ciudades objeto de estudio debe ser la **posibilidad de disponer de los suficientes datos** para poder realizar comparaciones entre los Indicadores de Oferta definidos. Bajo este supuesto se han escogido dos fuentes de datos, por un lado el estudio realizado por Álvaro Nicolás Loscos¹ (2.002) y por otro los trabajos publicados por Jordi Julià Sort² (2.006), ambos sobre redes metropolitanas. Además, se dispone de la información que suministran las propias entidades metropolitanas de transporte de las diferentes áreas metropolitanas.

Con este criterio, para el análisis se ha podido elegir entre las siguientes 10 ciudades:

- Barcelona.
- Berlín.
- Ciudad de Méjico.
- Los Ángeles.
- Londres.
- Madrid.
- Milán.
- Nueva York.
- París.
- Tokio.



Figura 5.1, ciudades seleccionadas para el estudio

(f. propia)

La dificultad que supone la aplicación de la metodología exige restringir todavía más la primera aproximación realizada a las diferentes ciudades preseleccionadas. De esta forma, la cantidad de parámetros a obtener y la complejidad de los datos a analizar obligan a replantear la elección de ciudades antes de comenzar el proceso de cálculo. Para ello, se van a abordar, ciudad por ciudad, las ventajas e inconvenientes de su introducción dentro de la modelización.

De esta manera, se plantean las siguientes consideraciones:

1) En primer lugar, si se centra el análisis sobre las ciudades de Nueva York y de Los Ángeles, se puede comentar la gran importancia que tiene el automóvil dentro de la composición modal del transporte. Este razonamiento permite identificar el transporte ferroviario como un modo subsidiario al transporte privado en automóvil. Siendo así, la actuación sobre estos núcleos no permitirá identificar los desarrollos urbanos propiciados por el transporte público sobre infraestructura fija dentro de redes maduras, siendo este uno de los objetivos que a priori se pretenden estudiar a lo largo de los trabajos.

2) En segundo lugar, se aborda la elección de Ciudad de Méjico como elementos de análisis. En este caso, el principal problema se origina no por la importancia del transporte privado por carretera, sino por la importancia del transporte público por carretera. Así, la relevancia del autobús dentro de los modos de transporte de Ciudad de Méjico es realmente importante, lo cual genera el mismo problema comentado en el punto anterior, centrado en la subsidiariedad del modo ferroviario y en su incapacidad para generar efectos asociados al mismo. Además, en este punto hay que añadir el

hecho de que el estudio de esta red puede poner el énfasis en el cambio modal, generando otro tipo de resultados a los inicialmente buscados.

3) Abordando el caso de Tokio se puede establecer la siguiente consideración. La observación de las publicaciones de las que se tiene constancia, especialmente los trabajos anteriormente comentados de Julià sobre las redes de transporte, ponen de relieve una anomalía de esta área metropolitana con respecto al resto de ciudades. Así, se encuentra una eficiencia de la red muy superior al del resto de ciudades tanto en cuanto a viajes por año y por habitante como en cuanto a viajes por año y por kilómetro de red. Este hecho es suficientemente significativo como para que se haya considerado adecuado el no acometer el estudio de esta ciudad en un primer momento, dada la distorsión que podía producir sobre los resultados.

Hechas estas consideraciones, se descartan estas cuatro primeras ciudades por poseer unas condiciones de contorno inadecuadas para alcanzar los objetivos propuestos. A partir de aquí, se tienen seis ciudades que a priori pueden ser objeto de estudio, Barcelona, Berlín, Londres, Madrid, Milán y París. Repasando el tamaño y las características de las seis áreas metropolitanas se obtienen las siguientes consideraciones:

1) Existe una primera red, la de Londres, de mayor tamaño y con una mayor complejidad, en la que tiene una fuerte presencia el ferrocarril suburbano dentro del binomio metro/ferrocarril urbano.

2) La segunda red en complejidad y tamaño sería la de París, en ella la red de metro tendría incluso un peso relativo mayor que en el anterior caso. Sin embargo, la red de ferrocarril de cercanías tiene una estructura menos mallada.

3) A continuación se presentan cuatro aglomeraciones urbanas similares, Barcelona, Berlín, Madrid y Milán, oscilando entre los 4 y los 5 millones de habitantes cada una. Dentro de estas aglomeraciones, más o menos equivalentes, se pueden distinguir tres casos similares, los compuestos por Barcelona, Berlín y Madrid, con redes de metro bastante densas y redes de ferrocarril de menor entidad, escasamente conectadas entre sí, salvo en la ciudad principal de la aglomeración. De estas tres ciudades, para evitar la repetición de casos, se ha optado por el análisis de dos, Madrid, dado la mayor facilidad de obtención de datos, y Barcelona, por idénticas razones y, además, por contar con una singularidad, la presencia del mar hace que sólo se tenga la mitad de la red, lo cual puede originar variaciones de ciertos resultados. Finalmente, se estudia el caso de Milán por tener una configuración de red diferenciada de las anteriores tres ciudades mencionadas. En este caso, la red de Milán presenta un desarrollo mayor de la red de ferrocarril de cercanías y un menor desarrollo de la red de metro de la aglomeración principal.

De esta manera, después reanalizar las condiciones de contorno de los datos disponibles, **el examen que se propone se circunscribirá a las áreas metropolitanas de Barcelona, Londres, Madrid, Milán y París.** Así, una vez definidas las ciudades que van a formar parte del estudio, se llega al siguiente problema metodológico, la definición de área metropolitana.

5.2.2.- Definición de área metropolitana

Como hipótesis básica en la definición de los indicadores, se ha considerado que estos deben ser aplicados sobre las diferentes áreas metropolitanas. Por tanto, el límite físico de las ciudades que las componen y de sus redes de transporte vendrá dado por el límite de estas áreas metropolitanas.

Para definir el ámbito de actuación dentro de cada área metropolitana el primer paso es el planteamiento de la siguiente pregunta: *¿cuál es el límite que marca el fin de un área metropolitana y a partir del cual da comienzo un nuevo concepto territorial?*. El establecimiento de ese límite es, sin lugar a duda, uno de los problemas metodológicos más complejos que se van a plantear en el desarrollo del proceso de modelización.

En una primera aproximación, puede parecer razonable el asegurar que la delimitación municipal puede mostrar determinadas informaciones sobre el ámbito del área metropolitana. Sin embargo, los términos municipales raramente definen esa línea que marca la división entre lo construido y lo no construido. De esta forma, debido a su fácil percepción tanto conceptual como morfológica, **la diferenciación entre el espacio construido y el no construido va a servir como criterio para la delimitación de la ciudad.** Además, resulta necesario ser consciente de que esa línea que marca el perímetro va variando constantemente, debido a la creciente actividad urbanizadora que se desarrolla en las afueras de las grandes ciudades y que se alimenta de los suelos más baratos existentes en esas zonas.

Del párrafo anterior se pueden extraer un par directrices que se van seguir en el desarrollo de los trabajos:

1) En primer lugar, para la determinación del espacio objeto de estudio, el ámbito se va a ceñir al espacio construido, obviando huecos intersticiales entre estos espacios, y sumando posibles islas urbanizadas desconectadas de la ciudad principal. Este elemento se va a determinar así porque, sin lugar a dudas, el área metropolitana no es un continuo de edificación y tanto las relaciones humanas, como las económicas o las sociales cotidianas se extienden más allá de la expansión en mancha de aceite de las ciudades centrales.

2) En segundo lugar, se necesita una foto fija del área a estudiar, no es posible seguir la evolución temporal de la construcción ya que en ese caso no se podría alcanzar el objeto de los trabajos. Precisamente, uno de los presupuestos principales de estos trabajos es que se realice sobre redes maduras, de manera que el desarrollo de la edificación no condicione en gran medida los flujos de viajes generados. Por ello, el establecer una programación temporal en el surgimiento de los límites de las ciudades sería un criterio contrario a los fines que se persiguen.

Con estos criterios, se ha conseguido definir teóricamente qué será un **área metropolitana** dentro del ámbito de los trabajos, así, se podrá definir como: **"el espacio de ciudad construido, continuo o discontinuo, en el que se producen relaciones humanas de carácter presencial y diario, todo ello dado para un determinado instante de tiempo"**.

5.2.3.- Representación del área metropolitana

En este epígrafe se va a explicar como se ha traducido la definición teórica de área metropolitana a una representación sobre el papel, de forma que se obtenga un conjunto de superficies útiles para el trabajo. Así, el primer elemento imprescindible para poder realizar la delimitación de las áreas metropolitanas de las ciudades es la **obtención de una colección de planos de escalas adecuadas para trabajar sobre ellos**.

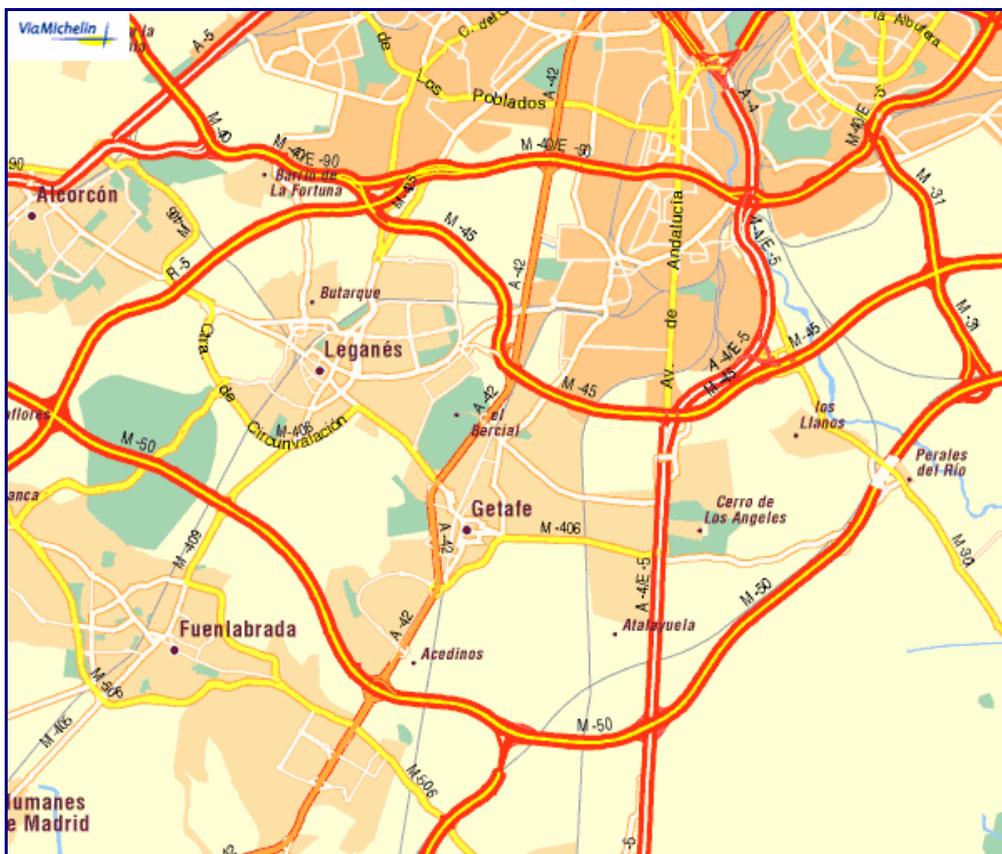


Figura 5.2, escala y tamaño de los planos empleados para el montaje

(f. ViaMichelin³, 2.005)

La dificultad del proceso estriba en que la colección de planos a obtener debe tener una serie de características contrapuestas. De esta forma, por un lado, debe abarcar una cantidad de territorio lo suficientemente grande como para que se observe una superficie mayor que la del área metropolitana, con el fin de poder identificar adecuadamente la línea de separación que se marcará como límite del espacio de ciudad construido. Por otro lado, debe ser lo suficientemente detallada como para que se observe el límite real de la superficie urbanizada y así poder marcar esa línea límite por el lugar exacto.

Para la resolución del problema planteado, lo que se ha hecho es obtener planos parciales de ámbitos consecutivos de las ciudades, a escala aproximada de 1:10.000 e incluso inferiores. De esta manera, en cada pequeño plano se tendrá la información que servirá para marcar el límite físico exacto de separación entre el terreno construido y el no construido. Estos planos se han "pegado" de manera que finalmente se obtenga un plano de gran tamaño suma de los anteriores. En este plano de mayor tamaño es donde se tiene una visión de conjunto, de manera que se puede advertir con mayor claridad donde empieza y donde acaba el área metropolitana en estudio.

De esta forma, planos como el mostrado en la anterior figura han sido insertados en un programa de diseño asistido por ordenador, procediendo al montaje de los planos parciales necesarias para la correcta composición del área necesaria para el estudio del perímetro del área metropolitana.

Aún con este trabajo, la delimitación final se ha convertido en una tarea intuitiva en muchos casos, debido a la extraordinaria fragmentación y dispersión que presentan las ciudades objeto de estudio. Así, para la correcta definición de la línea de delimitación del área metropolitana se han establecido una serie de características físicas de la región que sirven como guía en este proceso. De esta manera, se ha procurado:

- Identificar polos, infraestructuras, ejes y corredores de actividad que debieran incluirse por su densidad.
- Identificar accidentes geográficos como cadenas montañosas, ríos o el mar que en ocasiones pudieran determinar zonas de difícil avance para la ciudad.
- Incluir zonas con una densidad de construcción similar, dejando fuera las zonas en que esta densidad construida decrece de forma evidente.

De esta manera, se han conseguido crear los planos de conjunto urbano que posteriormente se adjuntan en el anejo primero. Estos mapas son el resultado de la yuxtaposición de un conjunto de planos más pequeños en los que **se ha definido una línea delimitando las diferentes superficies construidas.**

Una vez montados los planos, se presenta el problema de **dotarlos de escala**. Los pequeños planos que se han utilizado para la realización del plano general se han ido insertando a una escala cualquiera que únicamente depende de la resolución del dibujo, de esta manera, una vez montados hay que asignarles la escala real. Para la realización de esta tarea se han utilizado planos convencionales de los centros de las ciudades, de manera que se han medido distancias largas, de unos 8 kilómetros al menos, con las que poder escalar el plano, pero siempre conservando la proporción original. Así, encontrando la relación existente entre el conjunto de planos montados y la dimensión real de la ciudad se ha realizado el escalado correcto.

Para la inserción de estas distancias de escalado, de forma que los puntos de apoyo del escalado fuesen identificables, lo que se ha hecho es insertar otros planos todavía más detallados en el centro de las ciudades. De esa manera, la inserción y el escalado han podido ser mucho más preciso.

Realizado todo este trabajo, midiendo la superficie encerrada por la línea de límite del área metropolitana se obtendrá una característica intrínseca de cada ciudad, el **parámetro Superficie del área metropolitana en estudio (S)**, que, como ya se ha explicado en el capítulo cuarto, forma parte de la formulación de los diferentes indicadores a calcular. La forma de cálculo de esta superficie no plantea problemas metodológicos, puesto que el programa de diseño asistido por ordenador, al haber utilizado una función polilínea en la definición de la superficie construida, devuelve el área interior de la función polilínea como una característica propia de la misma.

5.3.- Realización de los grafos de las redes de metro y de cercanías

Una vez que se han realizado los planos donde se representan las áreas metropolitanas, se tiene el soporte físico sobre el que trabajar. Este elemento es un hecho relevante, puesto que a partir de este momento sólo interesará aquello que suceda dentro del área delimitada por la edificación y que ha sido determinada a través del proceso anteriormente descrito.

Con este soporte de trabajo, se pasa a **identificar y representar gráficamente las líneas que recorrerán los metros y ferrocarriles** de cercanías. Para ello, se van a seguir utilizando los mismos programas de diseño asistido por ordenador, de manera que las diferentes líneas férreas se graficarán encima de los planos que se han configurado, pero en otras capas de datos distintas.

En este caso, los planos sobre los que se trabaja muestran las líneas de ferrocarril que van en superficie, pero no muestran las líneas de metro y de ferrocarril que eventualmente van soterrados. Aún así, la definición exacta de las líneas no es el elemento fundamental dentro de los trabajos, puesto que el elemento determinante debe ser la ubicación de las bocas y estaciones de ferrocarril como elementos de acceso a la red. Sin embargo, no es menos cierto que la longitud de las líneas si que es un elemento que interviene en algunos procesos del cálculo. Debido a esto, para la definición de estas longitudes soterradas, se han seguido criterios lógicos en la resolución del trazado y en el diseño de los recorridos. Para ello, se han utilizado como criterios de interpretación el seguimiento de corredores viarios potentes y la imposibilidad de realizar cambios en el trazado que provoquen puntos de inflexión o curvas de escaso radio. Igualmente, ha sido de ayuda la información que las compañías explotadoras ponen a disposición del público, consistente en los diferentes gráficos comerciales.

Para el **posicionamiento de las estaciones** ha sido necesaria la utilización de planos de escala todavía más detallada, estos también los proporcionan las mismas páginas web que se han utilizado anteriormente para obtener los planos de escala menor. Así, con estos nuevos planos, se conseguirá ubicar con precisión cada una de las paradas de ferrocarril y de metro.

Respecto al posicionamiento de las estaciones, en numerosas ocasiones existen diversas bocas de metro para una misma parada, esto representa dos nuevos problemas. En primer lugar, los tiempos de acceso desde cada boca varían, la solución a este problema viene dada desde la propia definición de los distintos tiempos de cálculo asociados al tiempo de viaje. Como ya se ha comentado, dentro del tiempo de acceso, no se considera el tiempo que transcurre desde la entrada a la estación hasta el andén, esto es debido a la imposibilidad material de conocer la geometría de todas las estaciones, bocas de metro y andadores y a la despreciable de este tiempo respecto al conjunto de todos los tiempos de cálculo.

En segundo lugar, se tiene el problema de la ubicación del centro del área de cobertura de cada estación. La ubicación de este punto debe ser unívoca, para de esta manera simplificar el tratamiento geométrico del conjunto de intersecciones que se provocan entre las áreas de cobertura de las estaciones colindantes. Sin embargo, la existencia de varias entradas hacia los andenes provoca la posibilidad de establecer múltiples accesos desde la superficie hasta el lugar físico de parada de los vehículos. Ante esta situación se establece el siguiente procedimiento, la unión de las paradas de metro por una poligonal delimita un área de referencia en la que debe estar el centro del área de cobertura, por tanto identificando el centro de gravedad de la poligonal descrita se puede establecer un centro para las diferentes áreas de cobertura. Este punto será el lugar sobre el que se ubicará la estación correspondiente a cada parada. A este criterio hay que añadir una consideración extra, en las paradas de mayor interés, que serán las asociadas a los intercambiadores no va ser posible la definición de un centro único de influencia por parada, ya que las diferentes líneas tienen andenes de paradas para los vehículos independientes, por tanto, el establecimiento de un único centro siempre se va a tratar de una aproximación. Por todo ello, la ubicación de la estación en el punto determinado por el centro de gravedad de la poligonal descrita se revela como una aproximación lo suficientemente válida.

Dentro del **tratamiento de la información** expuesta y para una mayor claridad en la utilización posterior de los planos, se ha dividido la red en diferentes capas, de manera que se tendrán capas para:

- Intercambiadores y fines de línea.
- Paradas normales, sin intercambio.

- Red de metro.
- Red de cercanías.
- Otras redes de ferrocarril que puedan existir dependiendo de las diferentes ciudades.

En el proceso de digitalización, a la hora de ir definiendo las diferentes líneas ferroviarias, lo que se ha hecho es representar cada una con un solo arco de curva, de esta manera se gana en manejabilidad a la hora de manipular los distintos tramos de la red. Para no perder la información relativa a la distancia real entre estaciones lo que se ha hecho es ir curvando estos arcos, de manera que finalmente tendrán una longitud similar a la del propio ramal representado. Se perderá parte de la información del trazado en planta preciso, pero esto no es preocupante, puesto que la información más relevante para el estudio es el contacto entre los viajeros y la infraestructura férrea, y esto se produce en las diferentes estaciones, que si estarán bien dispuestas en el plano de superficie y que si contarán con un elemento de unión de longitud aproximada a la real.

Realizando estos pasos se obtiene el grafo de la red que, posteriormente, será de utilidad para la determinación de los diferentes parámetros que se requieran para el cálculo de los indicadores de transporte seleccionados.

Finalmente, intersectando la capa del límite del área metropolitana con las de la red de transporte se tendrá la parte de la red que interesa para el desarrollo de los trabajos. Esta parte de la red "útil" será, en unos casos, mayor que la red definida por las autoridades de transporte de cada ciudad y, en otros casos, menor que la misma. Este hecho permite observar cómo los límites administrativos sólo coinciden en parte con la realidad física de las ciudades cuando, sin embargo, es dentro de estos límites administrativos en donde se tendrán los diferentes datos de tráfico y de cargas transportadas.

5.4.- Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Cobertura de la red

5.4.1.- Introducción

Para la obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Cobertura, parece necesario recordar la fórmula dada por Wootton⁴ (1.967) para analizar la cobertura de cada estación. Dicha fórmula es la siguiente:

$$I_{C(i)} = \sum_{(j:1...N)} (\sqrt{F_{ij}} / \sqrt{A_i})$$

La fórmula ha sido desarrollada para la obtención de toda la cobertura de la red según la siguiente formulación:

$$I_C = (\sum_{(i:1...N)} I_{C(i)} \cdot A_i) / S$$

Vista la formulación, los parámetros que se deben calcular serán el área de cobertura de cada una de las estaciones de la red (A_i) y la frecuencia de paso de los diferentes servicios (F_{ij}). Esto es así porque el parámetro Superficie del área metropolitana en estudio (S), ya ha sido calculado según la metodología expuesta en el apartado 5.2.3.- Representación del área metropolitana.

5.4.2.- Obtención del área de cobertura de las diferentes estaciones de la red

El área de cobertura de la red se ha definido como: "la suma del conjunto de áreas eficazmente servidas por cada parada". De esta manera, para obtener el área de cobertura global se debe obtener el conjunto de áreas de coberturas individualizadas para cada parada (A_i).

La definición dada en el párrafo anterior se refiere al área eficazmente servida, esto quiere decir que, como intuitivamente se percibe, hay una distancia, medida en tiempo, en la que la influencia de la

parada es despreciable y a partir de la cual la población utilizará otros medios de transporte cuya cobertura le sea más satisfactoria, y que en general serán el coche o el autobús.

Para la determinación de esta distancia de servicio límite se cuenta con estudios ya realizados al respecto, que van a servir como guía para definirla. Algunos de estos estudios están comentados en el capítulo segundo sobre el estado del arte. De esta forma, el criterio de delimitación no se va a alejar de lo marcado por la literatura existente, de manera que la hipótesis será adoptar como área de influencia la marcada por las siguientes premisas:

- La velocidad normal a la que camina una persona oscila entre los 4,5 y los 5 Km/h, para el caso en estudio se ha considerado que la velocidad de paso será de 4,8 Km/h.
- Un individuo está dispuesto a caminar en busca de un modo férreo de transporte aproximadamente 15 minutos.
- Se considera un índice de rodeo de 1,20, habitual para mallas urbanas cuadrículas.

Aplicando estas restricciones se obtiene un **radio para el área de cobertura de 1000 metros**. Con este dato ya se pueden trazar las áreas de cobertura de las diferentes paradas de la red. Una vez determinado este radio, hay que tener en cuenta que en numerosas ocasiones, sobre todo en el centro de las ciudades, las diferentes áreas de influencia de las estaciones se cortan entre si. En este caso, lo que se hace es escoger en cada punto la estación más cercana, de manera que a cada punto le corresponda únicamente una estación. De esta forma, en el supuesto de superficies completamente rodeadas por otras, se estará en el caso de los polígonos de Thysen estudiados por Voronoi⁵ (1.907).

A través de esta metodología, se tendrá el área de cobertura de la red como el conjunto de polígonos resultado de definir la influencia de cada parada en particular. A partir de aquí, y continuando con el procedimiento, se cortará el plano de las áreas de cobertura con el del límite del área metropolitana. De esta acción resulta la intersección de ambas figuras, así se eliminarán tanto zonas del área metropolitana no cubiertas por ninguna estación, como zonas de cobertura adecuada pero en las que no existe superficie edificada y que, por tanto, no pueden beneficiarse del transporte público.

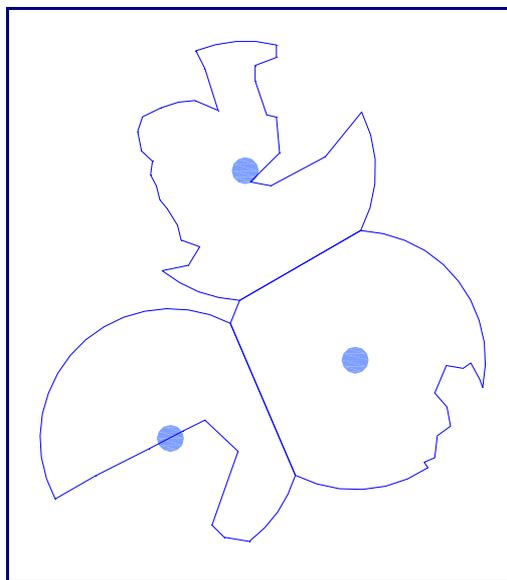


Figura 5.3, ejemplo de áreas de cobertura obtenida (f. propia)

Realizados todos estos procesos para definir el Área de cobertura A_i de cada estación, lo único que se tiene que hacer es medir la superficie de los polígonos trazados. Esto es sencillo, porque los polígonos están trazados a través de la función polilínea del programa de diseño gráfico por ordenador, por tanto, la superficie será una propiedad intrínseca a dicha función polilínea, y el programa de tratamiento gráfico la dará instantáneamente como un dato más.

Finalmente, se abordan dos elementos de carácter más conceptual que metodológico, pero que han sido estudiados y tenidos en cuenta a la hora de definir las áreas de cobertura:

1) En primer lugar, el hecho de otorgar **igual utilidad a las estaciones de metro que de ferrocarril** es un elemento que conviene aclarar conceptualmente. Así, se puede pensar que un individuo puede estar dispuesto a perder más tiempo en desplazarse hasta una estación de ferrocarril que hasta una estación de metro. Estando esto justificado por la propia configuración física del ferrocarril, ya que habitualmente no están soterrados y discurren más bien tangencialmente a las ciudades. Sin embargo, el hecho de actuar sobre ciudades con redes maduras hace que la densidad de dichas redes varíe entre el centro, asociado en mayor medida al modo metro, y la periferia, asociada en mayor medida al modo ferrocarril suburbano. La mayor densidad de los centros se traduce en estaciones más cercanas, lo cual produce áreas de cobertura con radios mucho menores de los 1.000 metros de radio asociados por el cálculo. De esta manera, la propia configuración morfológica de la red hace que quede reflejada la verdadera utilidad física de las estaciones, asociada a su posición dentro del conjunto de la red.

2) El otro elemento de análisis es que la consideración de todas las **áreas de influencia con una misma densidad de población** no representa una contradicción conceptual. Esto es así porque los trabajos no están enfocados desde el punto de vista de la influencia que tiene la localización de la población sobre la utilización del transporte público. El objetivo es la cobertura, que es un concepto diferente al de la densidad y distribución de la población. Se considera que la superficie mejor cubierta presentará unos grados de población más homogéneos, y esperadamente más densos, precisamente por esa similar cobertura de la red de transporte. Todo ello viene dado porque, como principio establecido desde la definición de cobertura, esta no cambia con la población, es un concepto que cambia con la percepción de la distancia por los habitantes y su facilidad o dificultad a la hora de acceder a la red. Además, el hecho de trabajar con redes maduras, que poseen muchos años de funcionamiento, hace que la población residente ya haya interiorizado el concepto de cobertura, lográndose una distribución de la densidad de población más homogénea.

5.4.3.- Obtención de las frecuencias de paso de los servicios

La frecuencia de paso es un parámetro de difícil obtención, como ya se ha apuntado dentro del capítulo 4.4.4. Esto es así porque surgen diversas dudas al abordar el concepto de frecuencia de paso:

- En primer lugar, surge la dificultad de conocer dicha frecuencia de paso dentro de cada línea férrea.
- En segundo lugar, está el hecho de que la frecuencia de los servicios es variable según cada franja horaria.
- En tercer lugar, hay que hacer frente a las desviaciones en la frecuencia media que suponen retrasos y adelantos sobre el horario.
- Finalmente, a todos estos problemas hay que añadir la posibilidad de paso de diferentes líneas por una misma estación, lo que representa una interacción entre las líneas y entre sus frecuencias.

Todo ello lleva a plantear la dificultad de obtener una frecuencia media para introducir en la formulación. Debido a estos problemas, se ha decidido modificar la formulación y **buscar un parámetro semejante a la frecuencia** y de más fácil cálculo según la exposición que sigue a continuación.

El Indicador de Cobertura se ha definido, teóricamente, como una función de la frecuencia de paso de las diferentes líneas que cruzan a través del punto de origen i hacia el punto de destino j . Esta frecuencia de paso lo que realmente explica es, la utilidad de la estación que está a disposición del viajero asociada con la cantidad de servicios que tiene dicha estación. Sin embargo, esta utilidad puede tener otra lectura, la que viene dada porque **la frecuencia es la inversa del tiempo**. Gracias a esta nueva lectura se va a aprovechar para modificar la fórmula del Indicador, así se va a pasar de tener:

$$I_C(i) = \sum_{(j:1...N)} (\sqrt{F_{ij}} / \sqrt{A_i})$$

A utilizar la siguiente expresión:

$$I_C(i) = \sum_{(j:1...N)} (1 / \sqrt{t_{vij}} \cdot \sqrt{A_i})$$

De esta manera, se utilizarán los tiempos de viaje entre los puntos de origen i y destino j en vez de las frecuencias entre estos dos puntos. Así, se obtendrá una fórmula conceptualmente equivalente a la anterior, pero que se adapta de mejor manera a las posibilidades reales de cálculo dentro de los trabajos. Esto soluciona muchos de los inconvenientes anteriormente descritos, además de otro problema difícilmente resoluble, que sería el hecho de que no todos los viajes son directos y que, por tanto, las frecuencias entre algunos puntos son combinaciones de frecuencias de diferentes estaciones.

La mejora en el proceso de cálculo se debe también a que el tiempo de viaje entre i y j (t_{vij}) es igualmente necesario para el cálculo del Indicador de Accesibilidad. De esta forma, se deja la explicación del cálculo de este tiempo de viaje para el apartado siguiente en el que, además, de este se explica el cálculo de muchos otros tiempos.

5.5.- Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Accesibilidad de la red

5.5.1.- Introducción

Para la obtención de los parámetros que forman parte del Indicador de Accesibilidad se va a recordar, en primer lugar, la formulación del mismo para cada estación individual:

$$I_{A(A-N)} = (\sum_{(i:1...N)} [t_{aA} + (t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-i} + t_{si}]) / N$$

Dicho Indicador de Accesibilidad se ha desarrollado para el conjunto de la red según la siguiente formulación:

$$I_A = (\sum_{(i:1...N)} (I_{A(i-N)} \cdot A_{(i)})) / (\sum_{(i:1...N)} A_{(i)})$$

En el caso de este Indicador los parámetros a obtener son más abundantes que los desarrollados para el Indicador de Cobertura, en concreto se deben obtener los siguientes:

- t_a : tiempo de acceso a cada parada de la red.
- t_e : tiempo de espera desde el acceso al andén hasta la entrada en el vagón.
- t_v : tiempo de viaje físicamente dentro del medio de transporte.
- t_t : tiempo de transbordo caminando dentro de cada intercambiador.
- t_s : tiempo de salida desde la red hasta el punto de destino.
- n_t : número de transbordos para cada viaje.
- N : número de paradas a considerar.
- A : área de cobertura de cada estación.

El proceso de obtención del área de cobertura de cada estación ya se ha mostrado en el anterior epígrafe, por tanto el desarrollo metodológico se centrará en el resto de parámetros.

5.5.2.- Obtención del tiempo de acceso a cada parada de la red (t_a)

A continuación se va a explicar el método de obtención del tiempo de acceso a cada parada de la red (t_{ai}). Este parámetro representa el tiempo que a cada punto de una región i , con un área de cobertura característica, le cuesta llegar hasta la parada que le corresponde por proximidad. Este tiempo de acceso se considera como un parámetro medio de cada zona de cobertura i , por tanto puede ser definido por la división de la suma de los tiempos de todos los puntos de la zona i , entre la superficie total de i (S_i). Teóricamente se obtiene la siguiente expresión para el cálculo:

$$t_{ai} = (\int_{S_i} t_{pi} \cdot S_i) / S_i$$

Siendo t_{pi} el tiempo que le cuesta a todo punto p perteneciente a la superficie S_i ir a la estación i de cada área. Para poder determinar la suma de todos los tiempos, la expresión se integra para todo el área de cobertura S_i .

Esta simple ecuación se revela bastante compleja de resolver cuando se intenta aplicar sobre los polígonos que representan la cobertura de cada parada. De esta forma, el problema metodológico surge por la necesidad de resolver una ecuación sobre una superficie cuyos límites son los numerosos lados del polígono contorno. Así, la complicación aparece porque, al intersectar las circunferencias que definen las áreas de cobertura con las áreas próximas de otras paradas y con el contorno del área metropolitana, se obtienen unos polígonos de difícil definición geométrica a la hora de aproximar sus límites a ecuaciones de contorno que sean introducibles en la integral. Este problema en la definición matemática de los límites es evidente si se observa la figura 5.3, que muestra un polígono ejemplo asociado a una estación tipo.

Para solventar este problema se va a emplear una simplificación que ayuda a facilitar los cálculos. Así, lo que se va a hacer es **dividir el desplazamiento total en otros dos equivalentes** y más sencillos. El primer tiempo de desplazamiento, t_1 , será el existente desde cada punto "P" del ámbito al centro de gravedad del polígono que representa el área de cobertura de la parada. El segundo tiempo de desplazamiento, t_2 , será el existente desde el centro de gravedad del polígono que representa el área de cobertura hasta el lugar físico en el que se ubica la parada:

$$t_{ai} = t_1 + t_2$$

1) Para el cálculo de t_1 , se va a realizar otra simplificación en el cálculo, esta se va a producir a través de la utilización de las superficies de las diferentes áreas de cobertura que, como ya se ha comentado, son un dato del cual se dispone. Con estas superficies lo que se va a hacer es generar unas circunferencias de área equivalente, que se denominarán "áreas de cobertura equivalentes", y que será con las que se trabaje para simplificar los cálculos. Estas áreas de cobertura equivalentes se posicionarán de manera que coincidan sus centros con los centros de gravedad de las superficies poligonales originales.

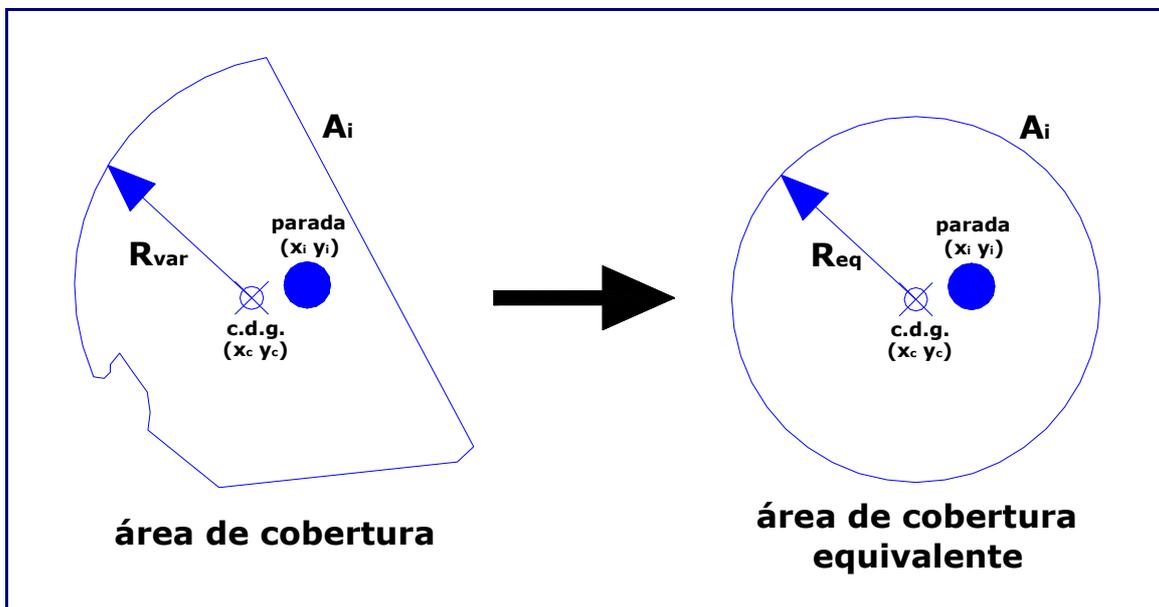


Figura 5.4, transformación de área de cobertura a área de cobertura equivalente

(f. propia)

Los centros de gravedad son calculados directamente por el programa de diseño asistido por ordenador a través de su orden REGION. Seleccionando la función polilínea deseada y convirtiéndola a través de la orden región se puede obtener la posición de su centro de gravedad. Por tanto, esta acción no supone un problema metodológico.

A partir de este punto el problema metodológico es sencillo, ya que la distancia media de todos los puntos de una circunferencia hasta su centro de gravedad está a dos terceras partes de su radio y

este dato es conocido. Por lo tanto, la primera distancia (t_1) será directamente esos dos tercios del radio de la circunferencia equivalente.

2) El segundo término (t_2) se obtiene a través de la medida de la distancia existente entre la parada de estudio y el centro de gravedad del polígono de trabajo asociado a esa parada que, previamente, se habrá situado sobre la planimetría. Esta medida se realiza con el programa de diseño asistido por ordenador.

De esta manera, sumando ambos términos (t_1 y t_2) se obtiene el valor del tiempo de acceso a la red t_{ai} .

El tiempo de acceso, además, debería de constar de un **sumando adicional**, que es el definido por el tiempo que cuesta llegar **desde la parada hasta el andén** correspondiente. El cálculo de este tiempo es diferente para cada estación y representa un término relativamente pequeño en relación con el anteriormente calculado. Además, su consideración exige el conocimiento geométrico del conjunto de paradas y subterráneos de la red. Debido a esto y a su escaso valor en comparación con el resto de tiempos que forman el viaje, se ha optado por eliminarlo del tiempo global de cálculo. Esta decisión conlleva que se consideren todas las estaciones homogéneas y que, por tanto, no exista diferencia entre ellas.

Esta simplificación se plantea inicialmente porque, como es comprensible, no resulta posible la medida de esos tiempos a la hora de realizar los presentes trabajos.

5.5.3.- Obtención del tiempo de espera (t_e)

Como ya se ha indicado, el tiempo de espera es aquel que transcurre desde el momento en que se llega al andén hasta que aparece el siguiente tren. Este tiempo dependerá indefectiblemente de la frecuencia del servicio y, para el conjunto de los usuarios, tenderá a ser la **mitad de la frecuencia** del propio servicio de transporte.

Vista esta definición, se debe fijar las frecuencias de paso de los diferentes servicios para tener el tiempo de espera. Esta definición no es tan inmediata como se puede suponer, ya que para cualquiera de las ciudades estudiadas cada línea de metro o cercanías presenta una frecuencia diferente. Además, cada línea varía sus frecuencias dependiendo la hora del día que se pretenda estudiar, tal y como ya se ha expuesto en el apartado dedicado a la obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Cobertura.

Para solucionar este problema, lo que se ha hecho es introducir un tiempo idéntico para todas las líneas y todos los horarios, ya que de otra forma resultaría muy poco manejable el modelo matemático que se está desarrollando. Además, hay que tener en cuenta que este tiempo es de una cuantía no muy representativa en el conjunto de los tiempos a obtener.

De esta forma, se utilizarán los siguientes valores:

- Líneas de metro, frecuencia media de 5 minutos. Por tanto, el tiempo de espera será de 150 segundos.
- Líneas de ferrocarril, frecuencia media de 15 minutos. Por tanto, el tiempo de espera será de 450 segundos.

Con estos valores se trabajará en el desarrollo del Indicador de Accesibilidad.

5.5.4.- Obtención del tiempo de viaje (t_v)

El tiempo de viaje (t_v) es el tiempo que físicamente se encuentra el usuario del servicio de transporte viajando dentro del vagón del tren. Este tiempo se calculará teniendo en cuenta el comportamiento real de los vehículos, para ello se computarán los siguientes pasos:

- 1) El vehículo realizará una aceleración inicial hasta llegar a su velocidad de viaje.
- 2) A continuación el vehículo viajará a esa velocidad "máxima".
- 3) Cuando se llegue a determinado punto, el vehículo decelerará hasta detenerse en la siguiente parada.
- 4) El vehículo estará parado durante un tiempo esperando a que suban y bajen los viajeros.
- 5) A partir de aquí se repite el ciclo, retornándose hasta el apartado número 1.

Este ciclo tiene la siguiente representación gráfica:

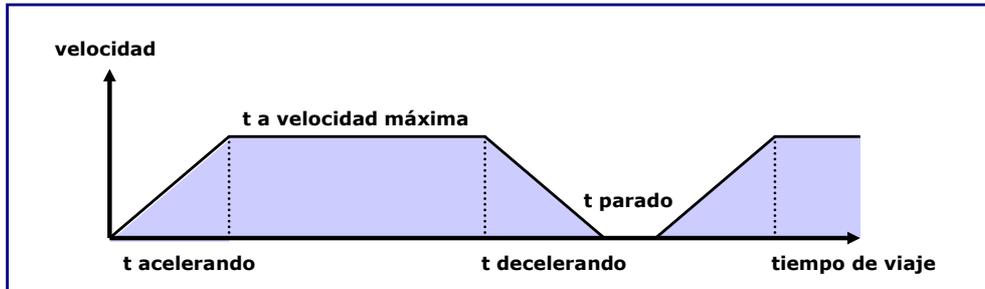


Figura 5.5, ciclo del tiempo de viaje

(f. propia)

Este proceso es el que se ha de seguir para calcular el tiempo entre cada dos estaciones consecutivas. Para la realización del cálculo de todos estos tiempos entre estaciones es necesario tener en cuenta diferentes consideraciones:

1) Es necesario conocer la distancia existente entre estaciones para poder aplicar el procedimiento. Esta distancia se conoce debido a que ya se ha realizado previamente el grafo de la red. De aquí se pueden medir las distancias, que como ya se ha comentado en anteriores apartados, estarán calculadas con la mayor aproximación posible.

2) Una vez determinada la distancia es necesario fijar los parámetros de velocidad y aceleración de los vehículos. Estas velocidades y aceleraciones aparecen en diversa documentación técnica. Así, para el desarrollo de estos trabajos se han utilizado las que aparecen en la página de Internet del metro de Madrid⁶ (2.006), en la sección referida a las características técnicas de las diferentes locomotoras. Este criterio se correlaciona con la decisión de utilizar la red de Madrid como red ejemplo en el desarrollo de la metodología. De esta forma los valores ha utilizar son:

- Aceleración: 1m/s.
- Velocidad máxima para metro: 45 km/h.
- Velocidad máxima para ferrocarril de cercanías: 75 km/h.
- Deceleración: 1m/s.

3) A estos datos habrá que añadir los tiempos de parada de los vehículos, se han escogido los siguientes valores:

- Tiempo de parada para el metro: 20 segundos.
- Tiempo de parada para el ferrocarril: 30 segundos.

Con todos estos datos ya se puede calcular el tiempo de viaje entre dos paradas, que ampliándolo al trayecto que interese, dará el tiempo de viaje entre las estaciones deseadas.

5.5.5.- Obtención del tiempo de transbordo (t_t)

El tiempo de transbordo (t_t) se corresponde con el tiempo perdido dentro de los diferentes intercambiadores de la red durante el viaje. Este tiempo depende de la longitud interna de cada intercambiador y, por tanto, es difícil realizar una medida física del mismo en el ámbito que estos trabajos pueden tener.

Por tanto, sucede algo parecido a lo dicho con el tiempo de acceso desde la boca de la parada hasta el andén correspondiente. Sin embargo, la diferencia que existe entre ambas magnitudes es que el tiempo de transbordo tiene una **fuerte componente psicológica** sobre los viajeros, de manera que a la hora de escoger la utilización de un servicio de transporte este es un elemento decisorio entre un modo u otro.

Debido a esta razón, se va a introducir un tiempo para la realización del transbordo. Aún conociendo que realmente existen diferencias entre los distintos intercambiadores, se considerará que se utiliza el mismo tiempo para todos ellos, debido a la imposibilidad de medir físicamente todos estos intercambiadores. Este tiempo, además, se intentará ajustar a esa componente de percepción de pérdida de eficacia que tienen los usuarios de la red, para ello se seguirá el razonamiento expuesto en el siguiente párrafo.

Los intercambiadores vienen representados en los distintos planos de información al público que las empresas explotadoras ofrecen a los viajeros. De esta manera, en esos planos se puede apreciar la existencia de unos intercambiadores "*cortos*", que suelen estar representados por un punto de mayor tamaño, y unos intercambiadores "*largos*", que se representan habitualmente por dos puntos de mayor tamaño unidos por un pasillo, y que podría asemejarse a dos intercambiadores cortos unidos por ese pasillo. Estas dos clases de intercambiadores definidos también influyen en la percepción que los pasajeros tienen sobre los mismos y, por eso, en este caso sí que se va a hacer una distinción entre ambos. De esta manera, los tiempos de trasbordo vendrán dados por:

- Tiempo en intercambiador "*corto*": 150 segundos.
- Tiempo en intercambiador "*largo*": 300 segundos.

Con estos valores tomados, se sigue el criterio de igualar el tiempo en el intercambiador corto con el definido como tiempo de espera, y se dobla este tiempo de espera para el intercambiador largo.

En este punto es necesario retomar el tema de los **tiempos de acceso a la red (t_a)**. Así, se ha comentado como se calcula el tiempo de llegada desde el punto de origen hasta la parada en superficie, sin embargo, en estos intercambiadores largos el concepto de parada esta más difuminado por la existencia de trayectos mayores entre las diferentes bocas. Para tener en cuenta este efecto, se ha introducido un tiempo adicional de 75 segundos en el tiempo de acceso a la red a través de los intercambiadores largos. Este tiempo se corresponde con la mitad de la diferencia entre el tiempo de transbordo entre un intercambiador largo y un intercambiador corto.

Este criterio adoptado se fundamenta en que sólo se introduce este tiempo suplementario de acceso en los intercambiadores largos y, por tanto, si en el intercambiador corto el valor es cero, para no distorsionar el sistema se deben restar ambos tiempos, esto es, 300 segundos menos 150 segundos. El hecho de que luego se divida entre dos se debe a que, probabilísticamente, el tiempo de acceso a la boca será la mitad de la distancia a los dos centroides de entrada a cada uno de los intercambiadores cortos en que se puede dividir el intercambiador largo.

Finalmente, el proceso de cálculo de tiempos de espera, de viaje y de trasbordo debe repetirse reiteradamente hasta que se llegue a la parada deseada, dependiendo del número de transbordos existentes dentro del itinerario escogido.

5.5.6.- Obtención del tiempo de salida hasta el destino (t_s)

El de salida desde la red hasta el destino (t_s) es el tiempo que necesita un usuario del sistema de transporte para dirigirse desde el andén de salida hasta el punto final del recorrido. Este tiempo es de cálculo equivalente al tiempo de acceso a la red (t_a), pero dentro del itinerario seguido cronológicamente se realiza de manera inversa.

De esta manera, los pasos para su obtención serán los mismos que los expuestos para el tiempo de acceso a la red.

5.5.7.- Aplicación del método de cálculo a la red

5.5.7.1.- Introducción

Hasta este momento se ha tratado de explicar, de manera más o menos teórica, la metodología que se ha ideado para el cálculo que es necesario efectuar sobre las redes de transporte. Dicho cálculo, va a ser introducido de lleno en la obtención de los indicadores definidos por los trabajos. Así, con la efectiva materialización práctica de los criterios enumerados se va a observar la aparición de nuevos problemas, en principio no detectados, y que necesitarán de las oportunas decisiones tendentes a garantizar un cálculo correcto. Igualmente, será necesaria la introducción de las simplificaciones adecuadas para asegurar la manejabilidad del modelo.

De esta manera, se procede a **aplicar el conjunto de la metodología sobre una red madura**. Como red "ejemplo" se ha escogido la de la ciudad de Madrid, debido a sus características de área metropolitana y red de tamaño intermedio y a la posibilidad de obtener datos con mayor facilidad debido a su proximidad geográfica.

5.5.7.2.- Primeras consideraciones prácticas para la realización de simplificaciones

Dentro de la aplicación de la metodología a un caso concreto aparecen algunas consideraciones que es necesario tener en cuenta. Así, en primer lugar cabe establecer que la aplicación del método de **cálculo devolverá matrices simétricas** de tiempos origen-destino. Esto es así porque se van a simplificar todos los elementos de la metodología en los que estas matrices pierden la simetría, como son:

- Tiempos en los intercambiadores.
- Tiempos de acceso y salida dentro de las estaciones.
- Diferentes frecuencias para cada sentido.

De esta manera, dada la forma simétrica de la matriz, se podrá reducir el cálculo a la mitad, con el consiguiente ahorro operativo que se produce con estas pequeñas simplificaciones antes explicitadas.

Aún con ello, la aplicación del método a toda una red de transporte requiere una cantidad de tiempo realmente alta y que, en el contexto de estos trabajos, impediría el trabajo más importante, que es la comparación de los resultados entre las diferentes redes. Debido a esto, en principio, **se va a aplicar el método tal cual solo a los intercambiadores y a los fines de línea**. Esta decisión viene apoyada en el hecho de que el tiempo de viaje de cualquier punto puede ser relacionado con el tiempo de viaje del intercambiador más cercano. Este proceso se puede conceptualizar, ya que la pertenencia a una red no se da por la pertenencia a una línea de dicha red, sino por la efectiva posibilidad de realizar trasvases entre las diferentes líneas, y esta posibilidad de trasvase se genera únicamente en los intercambiadores de la red. Además, la relación existente entre paradas e intercambiadores se puede internalizar a futuro incorporando el tiempo de viaje desde la estación correspondiente hasta el intercambiador, el tiempo de transbordo y el tiempo existente desde el intercambiador hasta el punto de destino.

Con este criterio, en el caso ejemplo de Madrid, se obtuvieron finalmente un total de 74 puntos a analizar del conjunto de 253 estaciones existentes. Aún así, la tarea de aplicar la metodología a este número reducido de estaciones ha supuesto alrededor de 110 horas de trabajo, lo cual representa casi tres semanas a jornada completa de una persona, para el cálculo de un solo parámetro, el tiempo de viaje (t_v), de una sola red.

5.5.7.3.- Simplificación para el cálculo del tiempo de viaje en paradas e intercambiadores

Debido a la gran cantidad de tiempo necesaria para el cálculo de sólo un parámetro de la red se ha decidido buscar alguna clase de simplificación que permita mejorar la eficiencia de la metodología. La opción de eliminar tiempos de cálculo, o de hacer estos menos complicados no ha parecido lo suficientemente correcta, pues reduciría la validez de los resultados que se obtengan. Por tanto, se ha establecido que la simplificación debe provenir de otra dirección.

Ante esta necesidad de disminuir el tiempo de cálculo, manteniendo la exactitud del procedimiento, se ha decidido realizar la siguiente consideración. A la vista de la constante necesidad de las empresas operadoras por prestar un mejor servicio de atención al cliente, se ha pensado que quizá los **tiempos que dichas operadoras calculan** y suministran en sus páginas web pueden ofrecer los caminos óptimos y suministrar los tiempos de recorrido entre andenes con fiabilidad.

De acuerdo con esta idea se ha procedido al cálculo, para la ciudad de Madrid, de los mismos 74 tiempos de viaje que antes ya se habían calculado según la metodología establecida. Así, se ha recogido la información que aparece en las páginas correspondientes a metro de Madrid y a cercanías de RENFE⁷ (2.006) en la Comunidad de Madrid.

Para el nuevo cálculo de los tiempos de viaje es obligada la introducción de algunos datos que los programas de información requieren para la concreción de las diferentes opciones de que dispone, estos datos son los siguientes:

- Como recorrido a elegir se ha introducido la opción de tiempo mínimo de viaje.
- Como día de la semana a elegir en el trayecto se ha escogido un día laborable, un lunes.
- Como hora de viaje se ha escogido las 9:00 de la mañana, y en su defecto la media de las frecuencias de los servicios existentes entre las 9:00 y las 10:00 de la mañana (caso este empleado en cercanías de RENFE).

Con la introducción de estos datos para cada desplazamiento se ha vuelto a realizar el ejercicio para todas las paradas en estudio. De esta manera, se han obtenido las dos matrices origen destino que se adjuntan en el Anejo número cuatro, la primera matriz muestra los tiempos de viaje obtenidos con la metodología elaborada expresamente para los trabajos y la segunda muestra los tiempos de viaje entre estaciones que ofrecen las operadoras del servicio. Dentro de estas matrices, en la columna final de cada una de ellas se obtiene el tiempo medio de viaje, expresado en minutos, de cada estación con todas las demás analizadas en la red. La representación gráfica de cruzar en una sola figura los tiempos obtenidos con los dos métodos de cálculo es la siguiente:

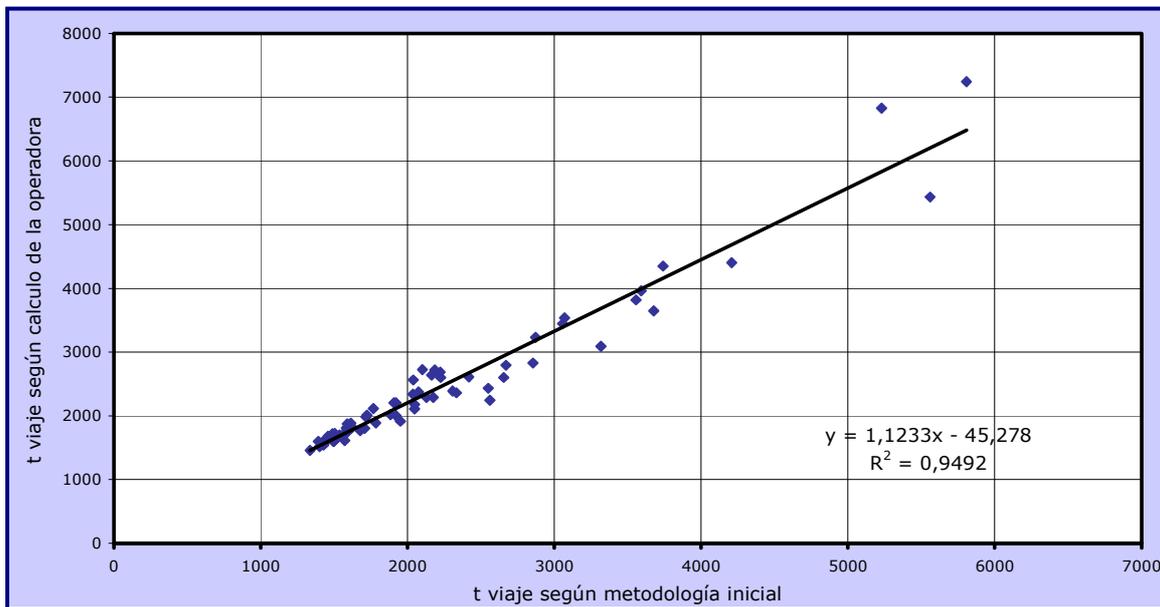


Figura 5.6, relación entre los tiempos calculados por el método original y por las operadoras, t en segundos (f. propia)

Para la obtención de los tiempos de viaje de la segunda matriz ha sido necesario el desdoblamiento de 2 estaciones para el cálculo, debido a la imposibilidad de realizarlo tal cual estaba modelizado según la primera metodología elaborada. Esto es debido a la consideración que se ha hecho sobre la existencia de intercambiadores "largos", que en principio se han representado como una sola estación y que para el programa informático del operador eran dos estaciones diferentes conectadas a través de un intercambiador. Para que finalmente coincidan el número de estaciones se han sumado los dos tiempos de las dos estaciones independientes y se ha obtenido su media.

Como se puede comprobar, con el ejemplo estudiado se ha conseguido identificar una relación en el cálculo de los tiempos de viaje bastante alta, obteniendo una R^2 de casi el 0,95, la cual resulta realmente elevada. Este es un primer elemento que aporta confianza en la metodología desarrollada y que se ha obtenido a través de la representación gráfica que se acaba de exponer. Sin embargo, la desviación media no es el único elemento que puede llevar a concluir sobre la similitud existente entre ambos procedimientos de cálculo.

En segundo lugar, cabría estudiar la expresión resultante de practicar la regresión lineal:

$$Y = 1,1233 \cdot X - 45,278$$

Para que ambos métodos resultasen absolutamente semejantes, la recta que debería haberse obtenido sería la siguiente:

$$Y = X$$

De estas ecuaciones se pueden extraer dos nuevas conclusiones:

1) Los puntos en los que la ecuación obtenida corta a los ejes son los siguientes:

- $X=0; Y=-45,278$
- $Y=0; X=40,308$

Esto quiere decir que, para los puntos obtenidos, que tienen un valor que alcanza hasta los 7.000 segundos, sólo se produce una desviación máxima de 45 segundos en el origen. Por lo tanto, la relación obtenida, además de presentar una desviación media realmente alta, puede considerarse también válida en cuanto a que los puntos que se aproximan a su límite en cero son coherentes con los resultados físicos previstos

2) Las pendientes de las dos rectas descritas son las siguientes:

- $Y' = 1,1233$
- $Y' = 1$

La pendiente obtenida con la recta resultado es ligeramente superior a la pendiente de la recta dada por el que sería el resultado exacto. Esto quiere decir que, a medida que la recta resultante de la regresión efectuada va tomando valores mayores, esta no se aleja excesivamente de la recta que proporcionaría la solución exacta. Por tanto, ambas rectas pueden considerarse equivalentes en pos de obtener una operativa más sencilla dentro de la metodología elaborada.

Vistos estos resultados, se puede concluir que **se podrán emplear ambos métodos indistintamente** según se adapten mejor o peor a las posibilidades del cálculo. Por ello, en los momentos en que se disponga de información dada por el operador, esta se utilizará por ser más rápido para el desarrollo de los indicadores. Por otro lado, si no se dispone de tal información se aplicará el método manual de cálculo por resultar equivalente.

Todos estos resultados tienen gran importancia metodológica, porque aunque suponga aproximadamente 70 horas de trabajo la generación de los tiempos siguiendo el método dado por el operador, se han conseguido disminuir las 110 horas iniciales necesarias con la anterior metodología de cálculo.

Finalmente, y como elemento relevante, cabe destacar que de la alta correlación de los métodos empleados se desprende la confianza necesaria en la **benevolencia de la metodología diseñada**. Así, se puede afirmar que el método de cálculo diseñado es, fundamentalmente, correcto y que se mantiene dentro de unas desviaciones que permitirán su utilización cuando no exista disponibilidad de datos públicos de explotación.

5.5.7.4.- Simplificación para realizar el cálculo del tiempo de viaje en el resto de estaciones

Se acaba de explicar el largo proceso de trabajo que supone el cálculo de los diferentes tiempos entre estaciones, todo ello aún con las simplificaciones realizadas. El cálculo de las interacciones existentes entre las 74 estaciones consideradas representa una cantidad total de entradas de:

$$[(74 \times 74) - 74] / 2 = 2.628$$

Si esto se aplica, en el caso de Madrid, a las 253 estaciones que forman parte del ámbito se obtiene que el número de entradas a calcular es de:

$$[(253 \times 253) - 253] / 2 = 31.878$$

Este número de relaciones supone aumentar en más de 12 veces el tiempo anteriormente empleado, siendo este hecho algo difícil de manejar en el ámbito en el que se mueven estos trabajos. Debido a este factor, se hace necesaria la búsqueda de una nueva simplificación si se quiere obtener la representación del resto de tiempos.

Para la resolución de este nuevo problema lo que se propone es la **reducción del problema general**, del cálculo de todas las estaciones al cálculo individual de las estaciones anteriormente no calculadas. Estas estaciones no calculadas se encuentran situadas entre intercambiadores y fines de línea que si que han sido obtenidos con anterioridad.

Por tanto, el proceso consistirá, simplemente, en relacionar cada estación no calculada con la estación más próxima que si esté calculada. El esquema podría ser el siguiente:

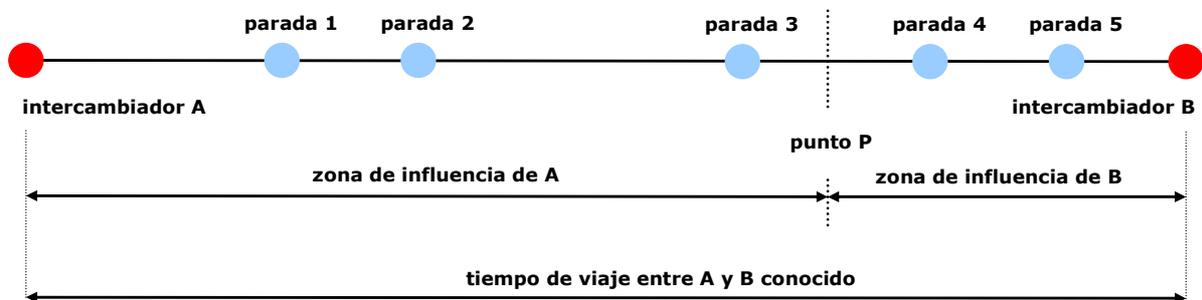


Figura 5.7, relación entre estaciones principales y estaciones no calculadas directamente

(f. propia)

De esta forma, existirá un punto P, dentro de la línea férrea, en el cual se equilibrará la influencia de los intercambiadores inicialmente calculados (A y B para el ejemplo). El tiempo de viaje medio del punto P será máximo dentro del intervalo determinado por los Intercambiadores A y B. A partir de este máximo, a cada lado del punto P el tiempo de viaje será menor según intercambiadores diferentes.

Se debe identificar este punto P en el cual la suma de tiempos medios de viaje se iguala entre ambos intercambiadores. Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$t_v (P-A) + t_t (A) + t_e (A) + t_v (A-N) = t_v (P-B) + t_t (B) + t_e (B) + t_v (B-N)$$

Siendo:

- $t_{v(A-N)}$ y $t_{v(B-N)}$: los tiempos medios de viaje calculados anteriormente entre los puntos de intercambio (A y B) y el resto de puntos de referencia (N) calculados con detalle.
- $t_{t(A)}$ y $t_{t(B)}$: los tiempos de trasbordo en los puntos de intercambio (A y B respectivamente).
- $t_{e(A)}$ y $t_{e(B)}$: los tiempos de espera en los intercambiadores (A y B respectivamente).
- $t_{v(P-A)}$ y $t_{v(P-B)}$: los tiempos de viaje entre el punto de tiempo máximo (P) y los intercambiadores (A y B respectivamente).

De esta manera se puede determinar cual será el intercambiador que más eficientemente comunica en cada caso las estaciones no calculadas con el resto de estaciones de la red. Para obtener el tiempo de viaje de cada estación no calculada anteriormente $t_{v(i)}$ sólo se tiene que aplicar la siguiente expresión:

$$t_{v(i)} = t_{v(i-A)} + [t_{t(A)} + t_{e(A)}] / 2 + t_{v(A)}$$

Siendo:

- $t_{v(i-A)}$: el tiempo de viaje que existe entre el punto en análisis (i) y el punto de influencia más cercano, A, ya calculado.
- $[t_{t(A)} + t_{e(A)}] / 2$: es la suma del tiempo de trasbordo y del tiempo de espera que se pierde en el intercambiador (A), este tiempo está dividido entre dos para tener en cuenta que el viajero puede seguir en la línea en la que está o bien cambiar de línea de viaje, a cada una de estas posibilidades se les asigna un 50% de probabilidades de suceder.
- $t_{v(A)}$: es el tiempo de viaje medio del intercambiador (A), en dicho intercambiador se produce la conexión con el resto de la red.

A través de este desarrollo del cálculo ya se tendrán identificados todos los tiempos medios de viaje de las estaciones de la red de estudio. De esta manera, se posibilita el cálculo de los tiempos de viaje para redes completas.

5.5.7.5.- Introducción de los tiempos de acceso y salida de la red en el indicador de accesibilidad

La completa formulación asociada al Indicador de Accesibilidad requiere la introducción de más tiempos que los hasta ahora mencionados. En dicha definición es necesario incorporar unos tiempos de acceso a la red y unos tiempos de salida desde la red hasta el punto de destino en superficie. Para abordar este nuevo problema metodológico conviene recordar, en primer lugar, la fórmula general del Indicador de Accesibilidad de un punto con los del resto de la red:

$$I_{A(A-N)} = (\sum_{(i:1...N)} [t_{aA} + (t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-i} + t_{si}]) / N$$

Se observa como tanto t_{aA} como t_{si} entran en la formulación dentro del sumatorio de tiempos. Esta expresión es aplicable tal cual está sólo en el caso de las paradas calculadas con mayor detalle, ya que sólo para ellas están calculados todos los tiempos entre estaciones, mientras que para el resto de paradas sólo está calculado un indicador simplificado de accesibilidad, y por tanto no es posible ir computando los tiempos paso a paso.

Para solucionar este problema lo que se ha hecho es aplicar esta expresión solamente a los puntos inicialmente escogidos como más representativos, para el resto de puntos se va a operar la expresión para que pueda ser manejable, de esta manera se obtiene que:

$$I_{A(A-N)} = t_{aA} + (\sum_{(i:1...N)} [(t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-i} + t_{si}]) / N$$

La extracción de t_{aA} del sumatorio se puede hacer porque el tiempo de acceso siempre será el mismo cada vez que se opere el sumatorio, esto es así porque el tiempo de acceso se ha definido como un tiempo medio de acceso, en ese caso, cada vez que se quiera hacer un recorrido desde la estación

de análisis, el tiempo de acceso a esa estación se repetirá. De esta manera, se puede introducir el tiempo de acceso en las estaciones calculadas por el método simplificado sin introducir ningún error.

A continuación se va a volver a operar la expresión de la siguiente manera para poder introducir los tiempos de salida:

$$I_{A(A-N)} = t_{aA} + \left(\sum_{(i:1...N)} (t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-i} \right) / N + \left(\sum_{(i:1...N)} t_{si} \right) / N$$

Colocando los factores de esta manera se tienen tres términos diferenciados tanto matemática como físicamente:

- 1) En primer lugar, queda el término del tiempo de acceso comentado anteriormente.
- 2) En segundo lugar, se tiene un término equivalente al tiempo de viaje entre andenes. Para este término, en el caso de las paradas no calculadas con detalle, ya se ha dado una expresión simplificada:

$$\left(\sum_{(i:1...N)} (t_e + t_v + [\sum_{(n:0...nt)} (t_t + t_e + t_v)_n])_{A-i} \right) / N = t_{v(i-A)} + [t_{t(A)} + t_{e(A)}] / 2 + t_{v(A)}$$

- 3) Finalmente, queda un tercer término que, expresado en la forma que ahora se ha dejado, representa el tiempo medio de salida al resto de estaciones de estudio y que, por tanto, puede ser calculado e introducido como un solo número en el Indicador, al margen del complicado proceso de cálculo de los tiempos de viaje. La formulación final para las estaciones no calculadas directamente sería la siguiente:

$$I_{A(A-N)} = t_{aA} + \{ t_{v(i-A)} + [t_{t(A)} + t_{e(A)}] / 2 + t_{v(A)} \} + \left(\sum_{(i:1...N)} t_{si} \right) / N$$

Con todas estas consideraciones **se dispone de una formulación que permite la determinación del Indicador de Accesibilidad para el conjunto del área metropolitana** que se ha tomado como ejemplo.

5.5.7.6.- Extensión del modelo a redes metropolitanas de tamaño máximo

La metodología descrita ha permitido, a modo de ejemplo, la determinación del Indicador de Accesibilidad del área metropolitana de la ciudad de Madrid. Además, gracias a ella se ha verificado la posibilidad de aplicar el procedimiento expuesto a toda una red. A través del modelo desarrollado ha sido igualmente posible la implementación del método en el área metropolitana de la ciudad de Barcelona sin ningún problema añadido.

A partir de aquí el reto ha consistido en **aplicar el modelo en una red metropolitana de tamaño máximo**. Para desarrollar la metodología se ha escogido el caso de Londres y como muestra del salto cuantitativo de esta red se presenta el siguiente cuadro comparativo. En él se cuantifican las estaciones de las redes de infraestructuras férreas de las ciudades hasta este momento estudiadas:

	Intercambiadores y fines de línea	Resto de estaciones	Total
MADRID	77	176	253
BARCELONA	48	171	219
LONDRES	236	614	850

Tabla 5.1, relación de estaciones según las distintas áreas metropolitanas

(f. propia)

Como se puede observar el número de paradas aumenta considerablemente para la red de Londres, ya que el número total de las mismas se multiplica por 3,35 si se compara con Madrid y casi por 4 para el caso de Barcelona. Pero lo importante es que este incremento es similar dentro de los puntos de especial importancia dentro de la red, como serían los intercambiadores y fines de línea. Se puede ver como la red londinense tiene casi tantos intercambiadores y fines de línea como

estaciones Madrid, e incluso más que Barcelona. Esto es relevante, si se recuerda la comparación realizada para las horas de trabajo dentro del área metropolitana de Madrid realizada con anterioridad. Así, se puede comprobar que el número de relaciones a determinar, aún con las simplificaciones realizadas, eleva la cantidad de trabajo a abordar de forma excesiva.

Debido a esta cantidad de información a tratar se hace necesaria una **nueva reflexión sobre la metodología**. La realización de los trabajos ha puesto de manifiesto la jerarquización de la red. De esta forma, la propia asunción de dos métodos de cálculo, según si la estación se trata de un intercambiador o de un punto sin intercambio posible con otras líneas de la red, es un punto que permite identificar la existencia de importancias relativas dentro de las diferentes estaciones. Por ello, para poder abordar el cálculo de las redes más complejas se debe ahondar en esta diferenciación de la red según la utilidad de sus paradas. Hasta ahora, la profundización realizada ha llevado a establecer que es más útil una estación que acoge dos líneas que una estación que acoge una sola línea. Este razonamiento es una simplificación de aquel que presume que a mayor cantidad de líneas en una parada, mayor utilidad de esa parada. Por tanto, el principal criterio de elección de estaciones para el análisis será el de escoger las que mayor número de líneas concentren.

Este criterio lleva aparejado, incluso para las redes de tamaño máximo, que todos los intercambiadores de tres o más líneas serán incluidos en el análisis, por no suponer un número que supere el límite de cálculos que se pueden abordar desde los trabajos. Este se puede cifrar, aproximadamente, en el comprendido por las relaciones que se establecen entre 75 estaciones, valor similar al abordado en la ciudad de Madrid

A partir de este criterio marcado, está claro que se analizarán todas las estaciones que presenten 3 o más intercambios, y que no formarán parte del análisis las estaciones que no presenten la posibilidad de intercambio entre líneas. El problema real está en la introducción de las estaciones que presentan la interacción de 2 líneas. En este caso, se ha procedido a la introducción intuitiva de los intercambiadores de mayor importancia para la red, hasta un máximo determinado por la capacidad de cálculo. Para llevar a la práctica este criterio lógico se han seguido determinadas directrices:

- No se han elegido puntos de intercambio que posibiliten desplazamientos reiterados. Es decir, si dos líneas que discurren paralelas tienen la posibilidad de producir intercambios en diferentes paradas consecutivas, no se han escogido estos intercambios reiterados entre idénticas líneas y con idénticas utilidades para el usuario de la red.
- La existencia de estaciones con intercambiadores dobles cerca de intercambiadores triples es habitual en los centros de las ciudades principales. Se entiende que estos intercambiadores dobles tienen una utilidad directamente relacionada y dependiente de la utilidad de los intercambiadores de mayor nivel cercanos.
- Se ha procurado respetar la densidad de paradas. Es decir, áreas densamente pobladas de estaciones presentarán dentro del modelo mayor número de estaciones que las áreas menos densamente pobladas de paradas.

Además de toda la casuística referida a los intercambiadores, los fines de línea entran a formar parte del cálculo simplificado, por tanto se asociarán al tiempo del intercambiador más cercano. Es importante la introducción de los fines de línea dentro del cálculo, aunque sea dentro del cálculo simplificado, ya que la exclusión de dichos fines de línea provocaría la distorsión del tamaño de la red. Esta distorsión puede llevar a la incoherencia entre resultados debido a la diferente distribución espacial de las paradas respecto al conjunto de estaciones de la red.

Atendiendo a la inclusión de los fines de línea dentro del procedimiento, y como novedad metodológica, se ha introducido en el cálculo la utilidad de la línea asociada a la parada fin de línea de estudio. Esta utilidad se visualiza en el momento de intercambio entre líneas, y se muestra a través de la cantidad de cambios de línea que se pueden realizar en cada intercambiador. De esta manera, no tendrá la misma utilidad una línea que desemboca en un intercambiador con un posible cambio de línea, que otra línea que desemboca en un intercambiador con tres posibles cambios de línea. Esta mayor utilidad de los intercambiadores que presentan más líneas se va a reflejar dentro del tiempo asociado al tiempo de viaje desde el intercambiador. Sin embargo, esto no excluye que también exista una mayor penalización en tiempos de transbordo, ya que existirá una mayor posibilidad de que el usuario efectúe un cambio de línea en los intercambiadores de mayor utilidad por la simple aglomeración de posibilidades de viaje. Para reflejar este hecho, dentro del método simplificado, el parámetro que mide el tiempo de transbordo (t_t) se formula de la siguiente manera:

$$t_t = 300 \times (I - 1) / I$$

Siendo:

- 300: Es el tiempo en segundos dado por los trabajos para los transbordos en los intercambiadores.
- I: Es el número posible de intercambios entre líneas que existirán dentro de la parada de intercambio.

De esta forma, el Indicador de Accesibilidad de una estación fin de línea ($I_{A (fl)}$), vinculado al tiempo de viaje de un intercambiador (t_i), vendrá representado por la fórmula siguiente:

$$I_{A (fl)} = t_a + t_{v (fl - i)} + t_t + t_i$$

Siendo:

- $I_{A (fl)}$: Indicador de Accesibilidad de una estación fin de línea.
- t_a : tiempo de acceso a la parada fin de línea.
- $t_{v (fl - i)}$: tiempo de viaje entre la estación fin de línea y la estación intercambiador asociada.
- t_t : tiempo de transbordo dentro del intercambiador que ha sido desarrollado en los párrafos anteriores.
- t_i : tiempo de viaje del intercambiador asociado a la parada fin de línea. En este caso el tiempo de viaje desde el intercambiador será el obtenido por la formulación general, pero eliminando el tiempo de acceso a la red, ya que este tiempo de acceso será el correspondiente a la parada fin de línea. La formulación correspondiente es la siguiente:

$$t_i = I_{A (i-N)} - t_a (i)$$

Siendo:

- $I_{A (i-N)}$: Indicador de Accesibilidad de la estación de intercambio asociada a la estación fin de línea que se pretende calcular.
- $t_a (i)$: tiempo de acceso a la estación de intercambio asociada a la estación fin de línea que se pretende calcular.

En otro ámbito de aspectos y pasando a abordar temas formales de la documentación, dentro de la numeración de las diferentes estaciones se pueden identificar las calculadas como fines de línea a través de la nomenclatura empleada. Estas estaciones fines de línea siguen una numeración correlativa, pero con la diferencia de que están precedidas de una M o una F según sean el final de una línea de metro o de un ferrocarril respectivamente.

Con todo el desarrollo metodológico efectuado ya es posible implementar la metodología dentro de las redes de transporte guiado más complejas o de grado de interrelaciones máximo.

5.6.- Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Fractalidad

5.6.1.- Introducción

Para la obtención de los parámetros que componen el Indicador de Fractalidad, en primer lugar, se va a recordar cual es la expresión de tal indicador:

$$I_F = \log (N) / \log (O)$$

Siendo:

- N: número de paradas a considerar.
- O: área ocupada por las estaciones.

Por tanto, para poder desarrollar el Indicador de Fractalidad, se debe conocer el número de paradas existentes y la posición en la que estas se encuentran ubicadas dentro de la superficie ocupada.

5.6.2.- Determinación de la superficie de estudio en la que se inscriben las estaciones

En el caso del análisis de la fractalidad de las redes, ya no interesa el área cubierta por las diferentes estaciones. En este indicador, lo que interesa estudiar es la superficie en la que se encuentran ubicadas las diferentes estaciones.

Para determinar el grado de fractalidad, se debe dividir la superficie a la que la red afecta en sectores. Para realizar esta sectorización, se aplica una metodología similar a la que Dupuy empleó en el análisis de la red de París. De esta manera, **se realizará una división de las ciudades de estudio en coronas circulares**. La discretización se hará de forma que las superficies circulares sean concéntricas y de radios crecientes en una cantidad constante. Para la elaboración de los trabajos, la cantidad a incrementar entre los radios de cada corona va a ser de 1000 metros.

Ahora bien, esas coronas descritas deben tener un centro que permanezca constante. Este punto será el centro de la ciudad y, con ello, se hace referencia al centro social y económico del área metropolitana. Debe ser el punto en el que se generen la mayor cantidad de relaciones y que, por tanto, contenga el mayor número de viajes de cualquier tipo. Este centro real de las ciudades pasa por el conocimiento subjetivo que de cada una de ellas se tiene, puesto que resulta prácticamente imposible saber cual es el centro exacto según los criterios que se ha expuesto.

De esta forma, se hará coincidir el centro con la estación más característica de cada ciudad y que, para el caso ejemplo de Madrid, coincidirá con la parada de Sol en la Puerta del Sol.

5.6.3.- Determinación de las paradas a estudiar

Una vez se ha llegado a este punto, la determinación de las paradas resulta inmediata, ya que, únicamente, habrá que ver cuales de las estaciones anteriormente grafiadas para la realización de la red e integradas en el proceso de cálculo están dentro de las diferentes coronas. Así, se procederá al recuento de las estaciones dentro de las coronas, de forma que se tendrá determinado unívocamente el número de estaciones que existen por corona.

5.6.4.- Introducción de los parámetros en la formulación

La teoría fractal determina la existencia de unos patrones naturales que, teóricamente, son reproducidos por las redes. Estos patrones son autosimilares en las manifestaciones fractales en general, sin embargo, dentro de las redes de transporte es difícil establecer dicha relación de autosimilitud. En cualquier caso, el resultado real es la existencia de superficies más o menos amplias en las que si es más evidente la conservación del patrón fractal. Esta diferenciación es el resultado lógico de la propia madurez de la red, de manera que en los ámbitos centrales del área metropolitana existe una densidad de red que conlleva un patrón fractal más alto que en la periferia de la misma área metropolitana.

Dentro del caso ejemplo del área metropolitana de Madrid, se ha podido descomponer gráficamente la relación entre el logaritmo de la cantidad de paradas y el logaritmo de la superficie de las coronas circulares en tres ramas aproximadamente constantes, tal y como se muestra en la siguiente figura expuesta:

- 1)** Una primera rama, que comprenderá desde el centro de la ciudad hasta la corona situada a 8 kilómetros del centro.
- 2)** Una segunda rama, de pendiente constante para el tramo comprendido entre los 8 y los 18 kilómetros al centro.
- 3)** Una tercera rama, que constará de las coronas comprendidas entre la situada a 18 kilómetros del centro y la más alejada al centro.

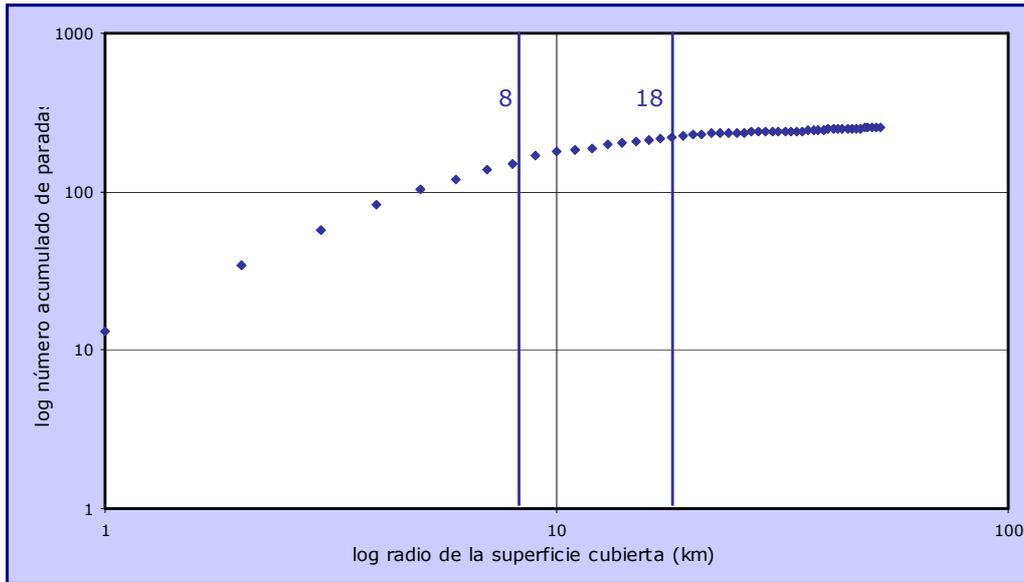


Figura 5.8, relación fractal para el área metropolitana de Madrid, tramos de pendiente constante (f. propia)

Dada esta falta de constancia en el patrón definido por la relación fractal para toda la superficie ocupada por la red, se va a proceder a modificar levemente la formulación asociada al Indicador de Fractalidad. Con la modificación del Indicador de Fractalidad, se pretende conseguir una mejor adecuación a la realidad de las redes existentes en las áreas metropolitanas, ya que de esta forma se tendrá en cuenta el concreto grado de madurez de las mismas.

Para conseguir lo expuesto en el anterior párrafo se puede pensar, en un primer momento, en proceder a identificar estos tramos de razón idéntica existentes y, por ejemplo, para el caso de Madrid proponer la existencia de tres razones constantes a considerar. Sin embargo, así se producirá una primera aproximación que restaría exactitud, ya que en la búsqueda de las rectas de regresión de cada uno de los tramos se produciría el error propio de aproximar una nube de puntos a una recta. De esta forma, se procederá a actuar de otra manera similar pero que no produzca estos errores de aproximación.

Dado que se ha supuesto correcta la **existencia de tramos de razón constante dentro de las áreas metropolitanas**, se van a utilizar las propias áreas circulares, que definen la distribución de estaciones, como ámbitos en los que permanece constante la razón. De esta manera, se va a obtener la razón para cada corona circular, procediendo finalmente a calcular la media de las razones halladas en las diferentes coronas circulares.

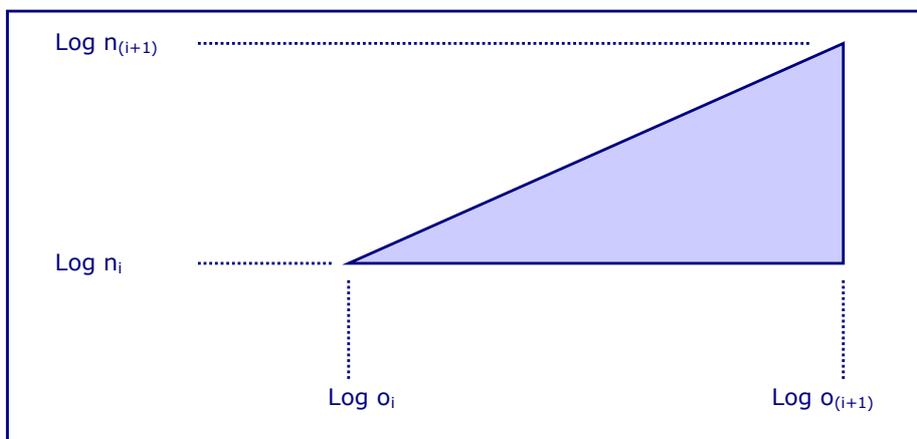


Figura 5.9, relación entre estaciones y superficie ocupada

(f. propia)

De esta manera, la transformación de la fórmula del Indicador de Fractalidad en una expresión que permita introducir el sumatorio de las diferentes coronas, conduce a la siguiente formulación:

$$I_F = \left(\sum_{(i:1...C)} [\log(n)_i / \log(o)_i] \right) / C$$

Siendo:

- n: número de paradas en cada corona circular.
- o: área ocupada por cada corona circular.
- C: número de coronas circulares.

De esta forma se podrá identificar un Indicador de Fractalidad para cada red, con las ventajas de evitar las diferentes razones que pueden establecerse dentro de una red según los grados de madurez de la misma y de no introducir los errores propios de la búsqueda de una regresión lineal.

5.6.5.- Dificultades asociadas al manejo de logaritmos

La utilización de logaritmos dentro de la formulación supone dificultades en el tratamiento de datos, ya que los logaritmos devuelven los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \text{Log}(1) &= 0 \\ \text{Log}(0) &= -\infty \end{aligned}$$

El resultado de la aplicación práctica de estas ecuaciones es que la existencia de cero paradas en una corona circular devuelve como resultado un menos infinito, lo cual imposibilita la resolución del problema. Para solucionar este problema de cálculo se han planteado dos alternativas, de manera que se pueda evitar la presencia del valor de menos infinito.

- 1)** La primera alternativa, consiste en considerar el valor de $\text{Log}(0) = 0$. Esto quiere decir que se iguala la utilidad de tener cero o una estaciones dentro de una corona circular.
- 2)** La segunda alternativa, consiste en añadir una parada a cada estación. De esta manera se aumenta artificialmente el Indicador de Fractalidad, pero no se introducirían errores relativos entre las diferentes redes metropolitanas.

De la aplicación de estos dos criterios sobre las diferentes redes se extraerá el Indicador de Fractalidad asociado a las mismas.

5.7.- Obtención de los parámetros relacionados con el Indicador de Densidad

Los parámetros asociados al Indicador de Densidad son también parte integrante de los parámetros que conforman los Indicadores de Cobertura y de Accesibilidad, por tanto, su determinación no varía de las definiciones dadas con anterioridad.

Para la mejor comprensión de los parámetros pertenecientes al Indicador de Densidad, se recuerda su formulación:

$$I_D = \left(\sum_{(i:1...N)} A_i \right) / S$$

Siendo:

- A_i : área de cobertura de las estaciones individualizadas.
- S: superficie ocupada por el área metropolitana.

Se puede observar como el proceso metodológico ya ha ofrecido la solución para determinar tanto el área de cobertura de las estaciones individualizadas, como la Superficie ocupada por el área metropolitana.

5.8.- Formulación propuesta para los Indicadores de Accesibilidad, Cobertura, Fractalidad y Densidad tras la incorporación de las sucesivas simplificaciones introducidas con el objeto de conseguir una metodología adecuada a los fines de los trabajos

5.8.1.- Introducción

Hasta este momento se ha abordado la metodología, o forma de operar con la red, que permitirá obtener datos de manera relativamente sencilla y fiable. Esta búsqueda metodológica se ha ido centrando en el cálculo de los distintos parámetros que intervienen en la formulación. Así, una vez establecida la forma en que estos se determinan, se puede pasar a formular los distintos indicadores asociados a la red tal cual han quedado tras todo el desarrollo metodológico efectuado.

5.8.2.- Indicador de Cobertura

El proceso de tratamiento de los datos ha demostrado la imposibilidad de analizar la totalidad de las estaciones de las redes metropolitanas de tamaño máximo, por ello se ha desarrollado un Indicador de Cobertura "Reducido". Este Indicador de Cobertura Reducido será el resultante de tener en cuenta las estaciones que forman parte del análisis detallado y estará ponderado para toda el área metropolitana.

Esta ponderación se puede entender de dos maneras, por un lado, asociado a la cantidad de paradas analizadas respecto al total y, por otro lado, asociado al área cubierta por las estaciones analizadas respecto al área cubierta por toda la red.

Así, si se introduce en la formulación la ponderación referida a la proporción de estaciones introducciones, se obtiene el Indicador de Cobertura Reducido ponderado al Número de Estaciones:

$$I_{C(e)} = [(\sum_{i:1...N} I_{Ci} \cdot A_i) / S] \cdot P_{(e)}$$

Para la formulación desarrollada, los parámetros tienen el siguiente significado:

- $I_{C(e)}$: Indicador de Cobertura Reducido ponderado al Número de Estaciones.
- I_C : Indicador de Cobertura de cada estación considerada.
- A : Área de cobertura de cada estación.
- S : Superficie del área metropolitana en estudio.
- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.
- $P_{(e)}$: Índice de Ponderación relativo al número de estaciones.

Este Índice de Ponderación relativo al número de estaciones, se formula de la siguiente forma:

$$P_{(e)} = N / R$$

Teniendo cada parámetro el siguiente significado:

- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.
- R : Número de paradas totales dentro de la red de transporte público colectivo guiado.

De esta manera, si se introduce en la formulación la ponderación referida a la cantidad de área cubierta por las estaciones analizadas, se obtiene Indicador de Cobertura Reducido ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones:

$$I_{C(a)} = [(\sum_{i:1...N} I_{Ci} \cdot A_i) / S] \cdot P_{(a)}$$

Para la formulación desarrollada, los parámetros tienen el siguiente significado:

- $I_{C(a)}$: Indicador de Cobertura Reducido ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones.
- I_C : Indicador de Cobertura de cada estación considerada.
- A : Área de cobertura de cada estación.
- S : Superficie del área metropolitana en estudio.
- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.
- $P_{(a)}$: Índice de Ponderación relativo al área de cobertura de las estaciones analizadas.

Este Índice de Ponderación relativo al área de cobertura, se formula de la siguiente forma:

$$P_{(a)} = [(\sum_{(i:1...N)} A_i) / (\sum_{(j:1...R)} A_j)]$$

Teniendo cada parámetro el siguiente significado:

- A : Área de cobertura de cada estación.
- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.
- R : Número de paradas totales dentro de la red de transporte público colectivo guiado en estudio.

5.8.3.- Indicador de Accesibilidad

La formulación del Indicador de Accesibilidad sufre idéntica problemática que el Indicador de Cobertura, el hecho de haber reducido el análisis detallado a un número de estaciones (N), hace necesario establecer una ponderación que tenga en cuenta el tamaño total de la red. Igualmente, se van a establecer dos ponderaciones, una primera que va a tener en cuenta el número de estaciones y una segunda que va a tomar en consideración el área cubierta por las estaciones estudiadas detalladamente.

Si se introduce en la formulación la ponderación referida a la proporción de estaciones estudiadas, se obtiene Indicador de Accesibilidad Reducido ponderado al Número de Estaciones:

$$I_{A(e)} = \sum_{(i:1...N)} I_{Ai} / N$$

Para la formulación desarrollada, los parámetros tienen el siguiente significado:

- $I_{A(e)}$: Indicador de Accesibilidad Reducido ponderado al Número de Estaciones.
- I_A : Indicador de Accesibilidad de cada estación considerada.
- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.

Si se introduce en la formulación la ponderación referida a la cantidad de área cubierta por las estaciones analizadas, se obtiene Indicador de Accesibilidad Reducido ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones:

$$I_{A(a)} = (\sum_{(i:1...N)} (I_{Ai} \cdot A_i)) / (\sum_{(i:1...N)} A_i)$$

Siendo el significado de los parámetros:

- $I_{A(a)}$: Indicador de Accesibilidad Reducido ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones.
- I_A : Indicador de Accesibilidad de cada estación considerada.
- A : Área de cobertura de cada estación.
- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.

5.8.4.- Indicador de Fractalidad

En este caso no existe el problema de haber reducido la cantidad de puntos a analizar dentro de la red por dificultad de gestión de todos los datos. Sin embargo, si que existe la dificultad asociada al trabajo con logaritmos, en este caso se obtienen otros dos indicadores.

En el primer caso, se asigna al logaritmo de 0 el valor de 0. La formula así obtenida sería la siguiente:

$$I_{F(0)} = \left(\sum_{(i:1...C)} [\log (n)_i / \log (o)_i] \right) / C$$

$$\begin{aligned} \text{Para } n = 0, \log (n) &= 0 \\ \text{Para } n \neq 0, \log (n) &= \log (n) \end{aligned}$$

Siendo:

- $I_{F(0)}$: Índice de Fractalidad asociado al valor cero del logaritmo de cero.
- n : Número de paradas en cada corona circular.
- o : Área ocupada por cada corona circular.
- C : Número de coronas circulares.

En el segundo caso, se añade una parada en todas las coronas circulares, la formulación obtenida en este caso sería la siguiente:

$$I_{F(1)} = \left(\sum_{(i:1...C)} [\log (n+1)_i / \log (o)_i] \right) / C$$

Siendo:

- $I_{F(1)}$: Índice de Fractalidad asociado a sumar una estación en cada corona circular.
- n : Número de paradas en cada corona circular.
- o : Área ocupada por cada corona circular.
- C : Número de coronas circulares.

5.8.5.- Indicador de Densidad

El Indicador de Densidad será unívoco según la metodología propuesta. Atendiendo a la nomenclatura dada en el resto de apartados de desarrollo, la formulación final del mismo es la siguiente:

$$I_D = \left(\sum_{(i:1...R)} A_i \right) / S$$

Siendo:

- I_D : Índice de Densidad.
- A : Área de cobertura de cada estación.
- S : Superficie del área metropolitana en estudio.
- R : Número de paradas totales dentro de la red de transporte público colectivo guiado en estudio.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 5

¹ NICOLÁS LOSCOS, A. (2.002): *Estudi comparatiu de xarxes de transport metropolitana*. Biblioteca UPC. Barcelona.

² JULIÀ SORT, J. (2.006): *Redes Metropolitanas*. Agencia Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.

³ www.viamichelin.es

⁴ WOOTTON, H.J.; PICK, G.W. (1.967): *A Model for trips generated by households*, Journal of Transport economics and policy, mayo.

⁵ VORONOI, G. (1.907): *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques*. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 133:97-178.

⁶ www.metromadrid.es

⁷ www.renfe.es

capítulo 6

APLICACIÓN DE LOS INDICADORES PLANTEADOS A LAS CINCO CIUDADES ELEGIDAS

6.1.- Introducción

Explicado el proceso de obtención de los distintos parámetros, así como el resultado de incorporar el proceso de cálculo a los diferentes indicadores, se va a pasar a exponer la **aplicación numérica concreta que ha tenido la metodología a las diferentes redes** de transporte de las ciudades consideradas.

Las ciudades estudiadas han sido Barcelona, Londres, Madrid, Milán y París. Sin embargo, debido al proceso de definición de la metodología, se han obtenido mayor número de datos dentro del área metropolitana de Madrid. De esta ciudad, además de los Indicadores de Accesibilidad y Cobertura Reducidos obtenidos para el conjunto de las ciudades estudiadas, se han obtenido los Indicadores de Accesibilidad y Cobertura de la red completa. De esta manera, y con el objeto de no dejar de mostrar resultados que pudieran ser aclaratorios de la metodología seguida, se van a exponer todos los datos hallados, de forma que cada ciudad contará con los datos referidos al procedimiento general explicado, pero dentro de la ciudad de Madrid, además se mostrarán los datos referidos al cálculo completo. Estos resultados completos únicamente son calculables, dentro del contexto diseñado por los trabajos, en ciudades con redes de tamaño medio o inferior al máximo.

A continuación se va a indicar, de una forma breve, cual es la estructura en la que se van a articular los siguientes apartados. Para cada una de las ciudades sometida a análisis se seguirá el siguiente esquema:

- En primer lugar, se mostrarán los límites de la ciudad estableciendo el marco de actuación.
- A continuación, se representará la red de transporte público colectivo guiado del área metropolitana en estudio.
- Posteriormente, se mostrará la interacción entre la ciudad y la red, determinando las áreas servidas por la red de transporte.
- Finalmente, se expondrán los resultados de los diferentes indicadores calculados.

Con esta estructura se posibilita una visualización clara de todos los resultados que se han obtenido a lo largo de los trabajos, siendo este el objeto principal de este capítulo sexto. De esta forma, se pasa a exponer los resultados obtenidos.

6.2.- Barcelona

6.2.1.- Definición del Área Metropolitana

Dentro de la exposición de resultados asociada al área metropolitana de Barcelona, en primer lugar se van a mostrar los datos relativos a la configuración física del área metropolitana. Para ello, se van a aportar los diferentes elementos que se han ido obteniendo de la aplicación de la metodología diseñada.

La superficie ocupada por el área metropolitana puede entenderse compuesta por dos áreas parciales, por un lado, la superficie del área extendida en mancha de aceite y, por otro lado, la superficie ocupada por las diferentes manchas urbanizadas de forma dispersa. De esta manera, en la siguiente tabla, se muestra la Superficie Ocupada medida sobre el plano de Superficie Ocupada que se adjunta en el Anejo 1.

Estos son los datos obtenidos tras definir todas las áreas urbanizadas que generan superficie ocupada y que, por tanto, crean ámbitos susceptibles de generar desplazamientos de los ciudadanos.

Superficie Ocupada Total	<i>Superficie Ocupada por la urbanización dispersa</i>	<i>Superficie Ocupada en mancha de aceite o de forma continua</i>
395,43 km²	267,97 km ²	127,46 km ²

Tabla 6.1, superficie ocupada por la ciudad de Barcelona

(f. propia)

6.2.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

En este epígrafe se define la Red de Transporte Colectivo de Infraestructura Fija, para ello se presenta a continuación un pequeño croquis de la misma en el que el elemento fundamental es la estación como instrumento de contacto entre la red y los usuarios. Dentro del Anejo 1 se incorpora el Plano de la red utilizado en el desarrollo de los trabajos.

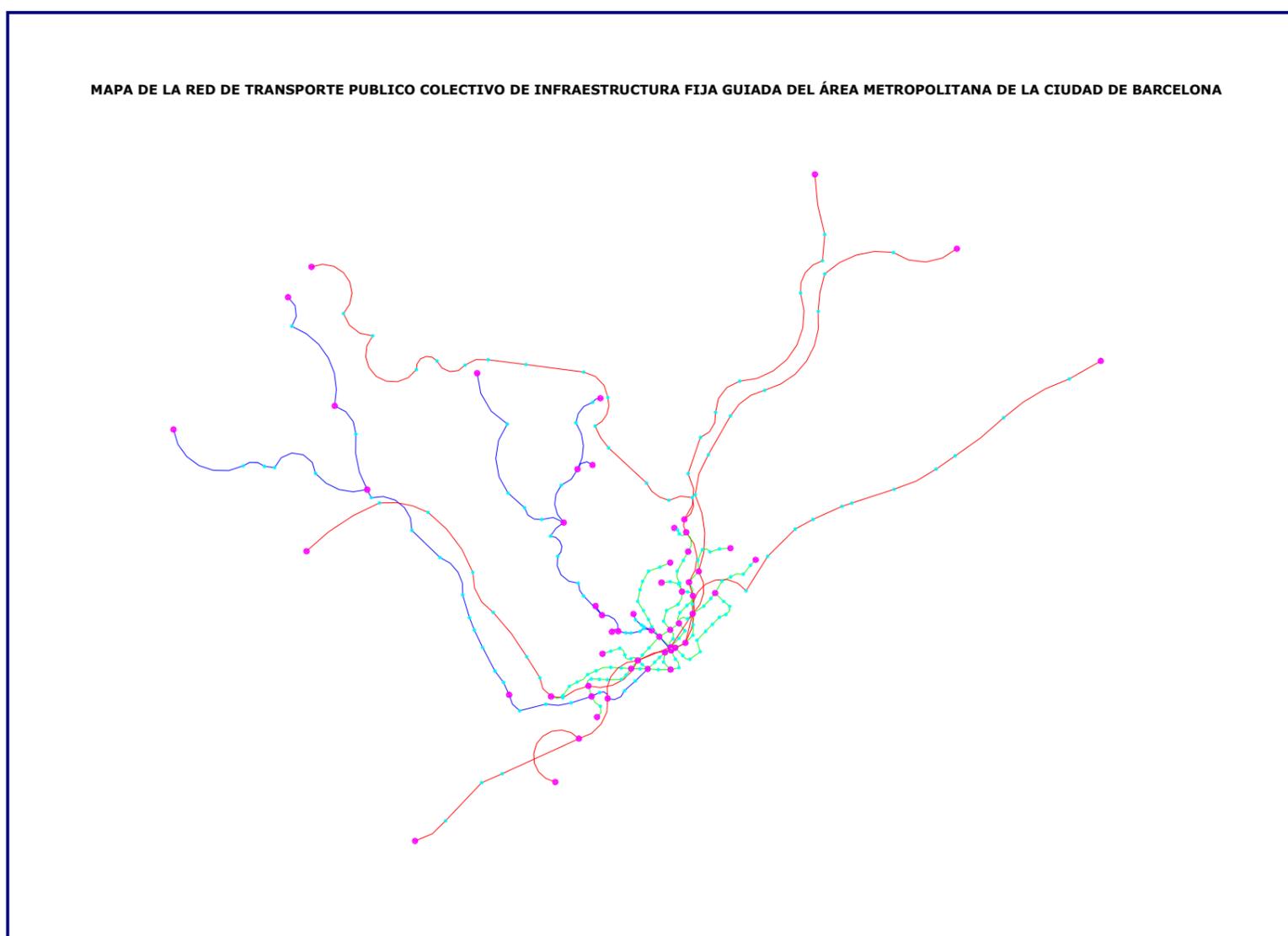


Figura 6.1, red de infraestructura férrea de Barcelona

(f. propia)

Para poder realizar el estudio de la red se han escogido unas determinadas estaciones según los criterios expuestos en el Capítulo 5 de los trabajos. Estas estaciones, con su correspondiente numeración son las siguientes:

1	CATALUNYA	29	AV CARRILET-SANT JOSEP
2	PASEO DE GRACIA	30	SANT SADURNI D'ANOIA
3	URQUINAONA	31	EL PRAT DE LLOBREGAT
4	UNIVERSITAT	32	TORRE DEL BARO
5	PARALLEL	33	HORTA
6	DIAGONAL-PROVENÇA	34	TRINITAT NOVA

7	SANTS ESTACIO	35	FONDO
8	ARC DE TRIOMF	36	LLINARS DEL VALLES
9	SAGRADA FAMILIA	37	REINA ELISENDA
10	VERDAGUER	38	PEU DEL FUNICULAR
11	CLOT	39	HOSPITAL DE BELLVITGE
12	LA PAU	40	MOLI NOU-CIUTAT COOPERATIVA
13	ESPANYA	41	AEROPORT
14	GRACIA	42	PLATJA DE CASTELLDEFELLS
15	CANYELLES	43	CAN CUIAS
16	PLAÇA DE SANTS	44	MONTCADA BIFURCACIÓ
17	ZONA UNIVERSITARIA	46	SANT CUGAT
18	L'HOSTIPALET-RBLA JUST OLIVERAS	47	MARTORELL ENLLAÇ
19	BELLVITGE-GORNAL	48	LA GARRIGA
20	SANT ANDREU ARENAL-FABRA i PUIG	49	CASTELLBEL, MONISTROL DE MONTS
21	SAGRERA	50	RUBI
22	MARAGALL	51	TERRASSA RAMBLA
23	ST ANDREU-ST ANDREU COMTAL	52	PIERA
24	CALDES d'ESTRAC	53	OLESA
25	PEP VENTURA	54	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
26	AVENIDA DEL TIBIDAVO	55	SABADELL RAMBLA
27	SARRIA	56	MONISTROL DE MONSERRAT
28	CORNELLA CENTRE		

Tabla 6.2, estaciones férreas consideradas

(f. propia)

Existe una importancia relativa de las estaciones y, por tanto, se puede establecer una diferenciación entre las mismas. Por un lado estarán las estaciones en las que es posible realizar un intercambio entre líneas y, por otro lado, estarán las simples paradas donde no es posible el intercambio de líneas. De esta manera, dentro del área metropolitana de Barcelona se encuentran el siguiente número de estaciones:

Estaciones Totales en la Red	<i>Estaciones sin posibilidad de intercambio</i>	<i>Estaciones con posibilidad de intercambio</i>
219	<i>171</i>	<i>48</i>

Tabla 6.3, jerarquización de las estaciones de la red férrea de Barcelona

(f. propia)

Dado que se ha utilizado información comercial facilitada por las empresas explotadoras de la red, se van a exponer los diferentes planos de la red que estas ofrecen. En el caso concreto de Barcelona, las empresas explotadoras implicadas son:

- Transportes Metropolitanos de Barcelona¹ (TMB).
- Ferrocarriles de la Generalitat Catalana² (FGC).
- Cercanías de RENFE³.

Estando todas las empresas englobadas dentro de la Autoridad de Transporte Metropolitano⁴ (ATM), consorcio que articula globalmente la gestión de la red. Los planos comerciales de la red serán los siguientes:

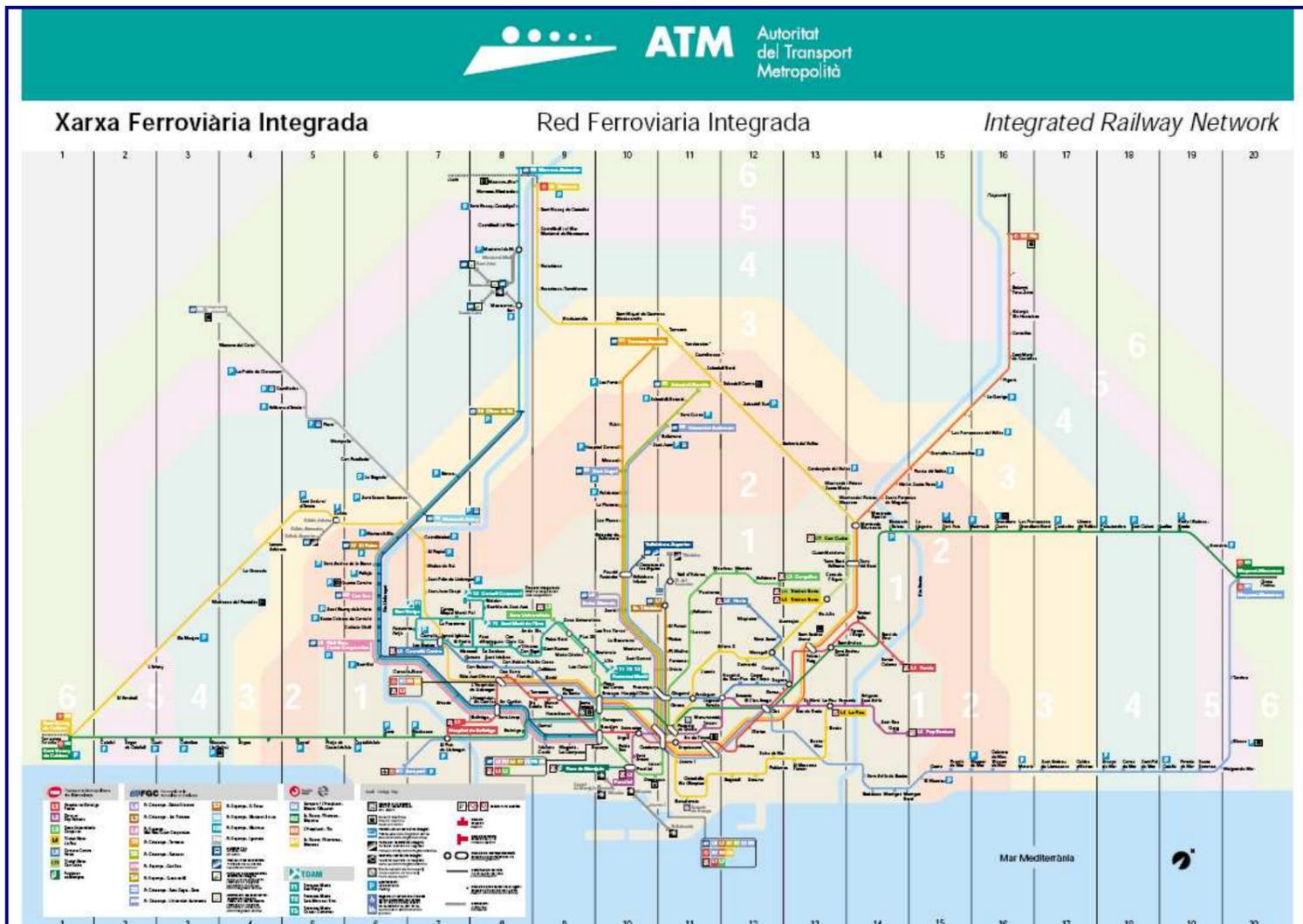


Figura 6.2, red ferroviaria integrada, visión global de la red

(f. ATM⁴ Barcelona)

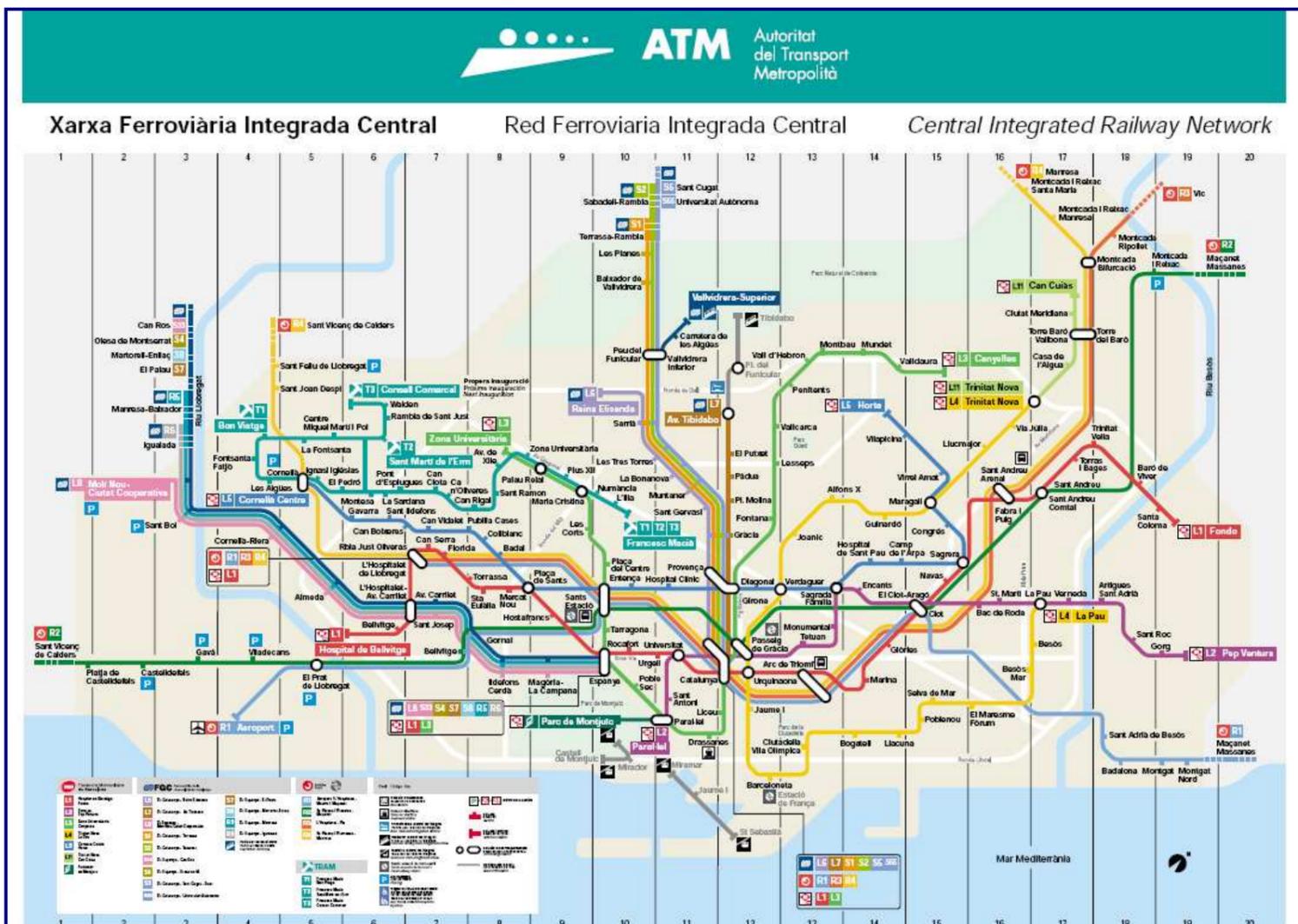


Figura 6.3, red ferroviaria integrada, visión central de la red

(f. ATM⁴ Barcelona)

Estos son los principales datos del análisis y modelización de la red pública de transporte guiado de infraestructura fija de Barcelona.

6.2.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

La relación entre la red de transporte colectivo guiado y el área metropolitana sobre la que aquella se asienta produce interacciones. Esta interacción se puede evidenciar a través de dos enfoques diferentes.

En primer lugar, existen zonas del área metropolitana servida por la red de transporte y zonas del área metropolitana que no están servidas por la red. Esta lectura de la red se manifiesta en superficies de ciudad que por estar servidas por dicha red de transporte pueden ser medidas y computadas.

En segundo lugar, la interacción se manifiesta en una distribución de las diferentes estaciones en el espacio comprendido por el área metropolitana. Esta distribución superficial, relacionada con el Indicador de Fractalidad, se muestra a través de la posición física de las distintas paradas dentro de coronas circulares. Estas coronas definen la sucesiva parcelación del área metropolitana con un criterio basado en el alejamiento del centro urbano

Si se comienza el análisis por la primera visión expuesta de la red, se puede mostrar la cantidad de superficie cubierta efectivamente por la red dentro del área metropolitana.

Superficie Cubierta Total	<i>181.919.090,66 m²</i>
----------------------------------	-------------------------------------

Tabla 6.4, superficie cubierta por las paradas

(f. propia)

Esta superficie cubierta por la red del área metropolitana de Barcelona se muestra físicamente dentro de los planos existentes en el Anejo 1.

Hasta este punto se ha mostrado la superficie cubierta efectivamente por el conjunto de la red del área metropolitana de Barcelona. Sin embargo, existe una serie de estaciones directamente implicadas en el cálculo, respecto a las cuales se ha necesitado determinar su superficie cubierta individualmente. El resultado detallado obtenido para todas estas estaciones se adjunta en el Anejo número 2.

Para acometer el segundo punto de vista expuesto, se adjunta, dentro del Anejo 1, un plano de fraccionamiento del espacio metropolitano en coronas circulares. Dentro de estas coronas circulares se inscriben las estaciones de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija. Para la interpretación del plano se ha procedido al recuento de estaciones por coronas circulares. El resultado obtenido se desagrega según la categoría de las estaciones, de esta manera se ofrecen dentro del Anejo 2 resultados parciales referidos, por un lado al número de estaciones que posibilitan el intercambio o que son fin de línea y, por otro lado, al resto de estaciones.

6.2.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Barcelona

6.2.4.1.- Indicador de Accesibilidad

El Indicador de Accesibilidad, medido en minutos, de cada una de las estaciones de estudio del área metropolitana de Barcelona se presenta en el Anejo número 2. Los indicadores de accesibilidad asociados al conjunto de la red presentan el siguiente resultado:

Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	66,74
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	73,11

Tabla 6.5, Indicador de Accesibilidad

(f. propia)

6.2.4.2.- Indicador de Cobertura

El Indicador de Cobertura de cada una de las estaciones en estudio del área metropolitana de Barcelona se presenta dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Cobertura asociados al conjunto de la red presentan los siguientes valores:

Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	11,06
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	11,02

Tabla 6.6, Indicador de Cobertura

(f. propia)

6.2.4.3.- Indicador de Fractalidad

Los Indicadores de Fractalidad asociados al área metropolitana de Barcelona, cuyo centro se ha situado sobre la estación de Catalunya a efectos de crear las sucesivas coronas circulares, presentan los siguientes valores:

Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,379
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,4363

Tabla 6.7, Indicador de Fractalidad

(f. propia)

6.2.4.4.- Indicador de Densidad

El Indicador de Densidad asociado a la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de Barcelona es el siguiente:

Indicador de Densidad (I_D)	0,46
---	-------------

Tabla 6.8, Indicador de Densidad

(f. propia)

6.3.- Londres

6.3.1.- Definición del Área Metropolitana

Dentro de la expresión de resultados asociada a la ciudad de Londres, en primer lugar se van a mostrar los datos relativos a la configuración física del área metropolitana. Así, se van a aportar los diferentes elementos que se han ido obteniendo de la aplicación de la metodología diseñada.

La superficie ocupada por el área metropolitana puede entenderse compuesta por dos áreas parciales, por un lado la superficie de la ciudad extendida, más o menos, en mancha de aceite y por otro lado la superficie ocupada por las diferentes áreas urbanizadas de forma dispersa. De esta manera, se tendrá la siguiente Superficie Ocupada, medida sobre el plano de Superficie Ocupada que se adjunta dentro del Anejo número 1.

Superficie Ocupada Total	<i>Superficie Ocupada por la urbanización dispersa</i>	<i>Superficie Ocupada en mancha de aceite o de forma continua</i>
2.646,98 km²	<i>1.245,64 km²</i>	<i>1.401,34 km²</i>

Tabla 6.9, superficie ocupada por la ciudad de Londres

(f. propia)

Estos son los datos obtenidos tras definir todas las áreas urbanizadas que generan superficie ocupada y que, por tanto, crean ámbitos susceptibles de generar desplazamientos de los ciudadanos.

6.3.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

En este epígrafe se define la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de Londres, para ello se presenta a continuación un pequeño croquis de la misma en el que el elemento fundamental es la estación como instrumento de contacto entre la red y los usuarios. Dentro del Anejo 1 se incorpora el Plano de la red utilizado en el desarrollo de los trabajos.

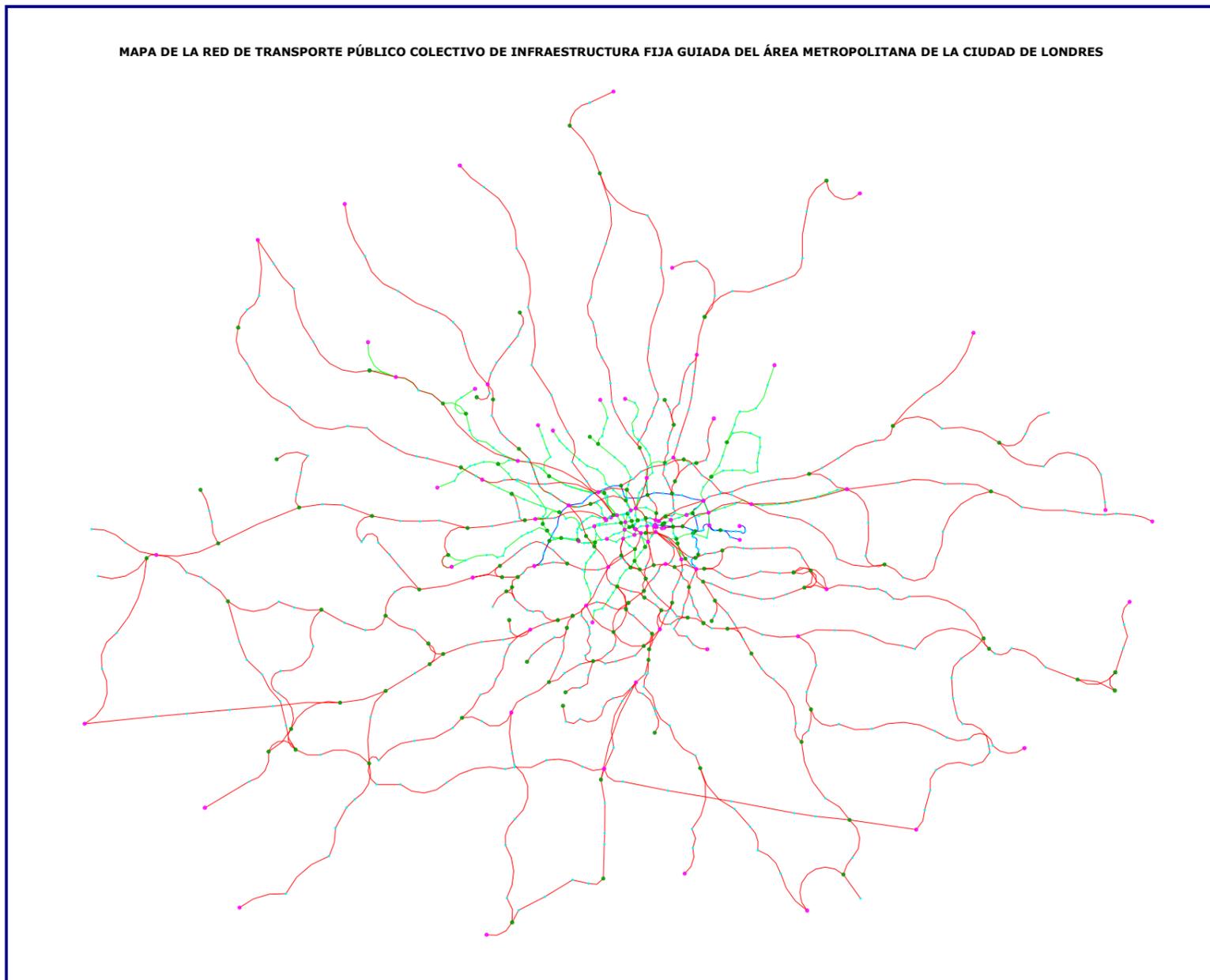


Figura 6.4, red de infraestructura férrea de Londres

(f. propia)

Para poder realizar el estudio de la red se han escogido unas determinadas estaciones según los criterios expuestos en el Capítulo 5 de los trabajos. Estas estaciones, con su correspondiente numeración son las siguientes:

1	OXFORD CIRCUS	45	CHESHUNT
2	GREEN PARK	46	WATFORD JUNCTION
3	BAKER STREET	47	CHALFONT & LATIMER
4	CHARING CROSS	48	SOUTH RUSLIP
5	EUSTON	49	FELTHAM
6	NOTTING HILL GATE	50	SURBITON
7	BANK	51	LEATHERHEAD
8	WESTMINSTER	52	PURLEY

9	VICTORIA	53	REDHILL
10	SOUTH KENSINGTON	54	SWANLEY
11	KING 'S CROSS-ST PANCRAS	M1	COCKFOSTERS
12	EDGWARE ROAD	M2	EPPING
13	PADDINGTON	M3	BECKTON
14	EMBANKMENT	M4	NORTH WOOLWICH
15	WATERLOO	M5	NEW CROSS GATE
16	WILLESDEN JUNCTION	M6	MORDEN
17	WEST HAMPSTEAD STATION	M7	HEATHROW TERMINAL 4
18	HAMMERSMITH	M8	UXBRIDGE
19	CANNON STREET STATION	M9	CHESHAM
20	MONUMENT	M10	WATFORD
21	MOORGATE	M11	STANMORE
22	LIVERPOOL STREET	M12	EDGWARE
23	CLAPHAM JUNCTION	M13	HIGH BARNET
24	FINSBURY PARK	F1	BALDOCK
25	EALING BROADWAY	F2	HERTFORD EAST
26	BLACKFRIARS	F3	STANSTED AIRPORT
27	LONDON BRIDGE	F4	CHINGFORD
28	ELEPHANT & CASTLE	F5	CHELMSFORD
29	RICHMOND	F6	SOUTHEND VICTORIA
30	WIMBLEDOM STATION	F7	SHOEBURYNES
31	TOWER HILL	F8	SHEERNESS-ON-SEA
32	WHITECHAPEL	F9	BEARSTED
33	MILE END	F10	PADDOCK WOOD
34	STRATFORD	F11	ERIDGE
35	WEST HAM	F12	HAYES
36	CANNING TOWN	F13	EAST GRINSTEAD
37	BARKING	F14	CHRISTS HOSPITAL
38	UPMINSTER	F15	LIPHOOK
39	LEWISHAM	F16	BENTLEY
40	DARTFORD	F17	BASINGSTOKE
41	PECKHAM RYE	F18	READING
42	NORWOOD JUNCTION	F19	AYLESBURY
43	HARROW ON THE HILL	F20	CHEDDINGTON
44	TOTTENHAM HALE	F21	LEAGRAEVE

Tabla 6.10, estaciones férreas consideradas

(f. propia)

Existe una importancia relativa de las estaciones y, por tanto, se puede establecer una diferenciación entre las mismas. Por un lado estarán las estaciones en las que es posible realizar un intercambio entre líneas y, por otro lado, estarán las simples paradas donde no es posible el intercambio de

líneas. De esta manera, dentro del área metropolitana de Londres se encuentran el siguiente número de estaciones:

Estaciones Totales en la Red	Estaciones sin posibilidad de intercambio	Estaciones con posibilidad de intercambio
850	614	236

Tabla 6.11, jerarquización de las estaciones de la red férrea de Londres

(f. propia)

A través del número de estaciones existentes dentro de la red de transportes del área metropolitana de Londres se puede identificar el grado de complejidad de la misma. Dado que se ha utilizado información comercial facilitada por las empresas explotadoras de la red, se van a exponer los diferentes planos de la red que estas ofrecen. En el caso concreto de Londres, las empresas explotadoras se agrupan con una sola imagen corporativa de nombre Transport for London⁵. Dentro de esta marca se aglutinan los servicios de metro, ferrocarril y DLR.

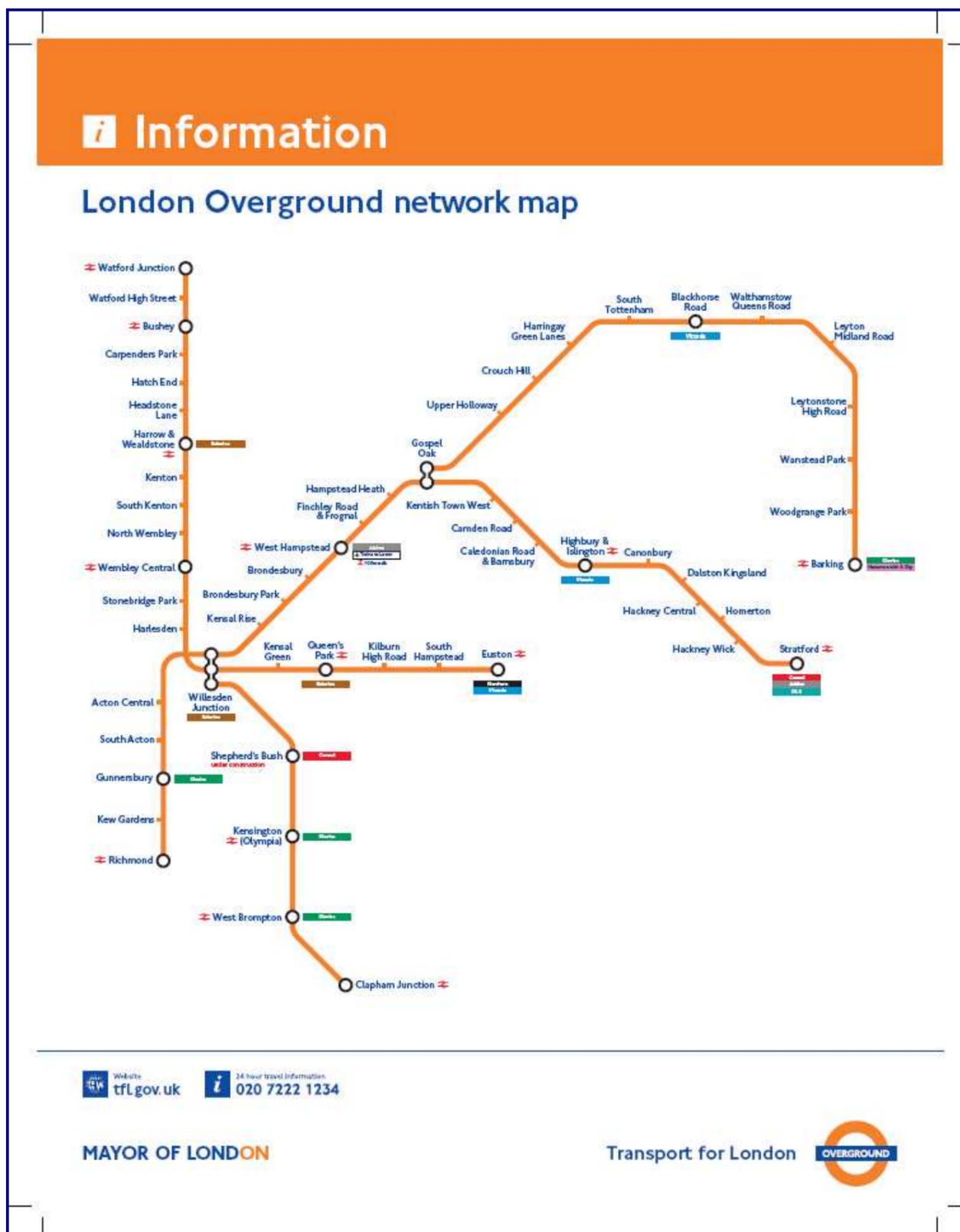


Figura 6.5, red de ferrocarril y DLR del centro y norte del área metropolitana de Londres (f. Transport for London⁵)

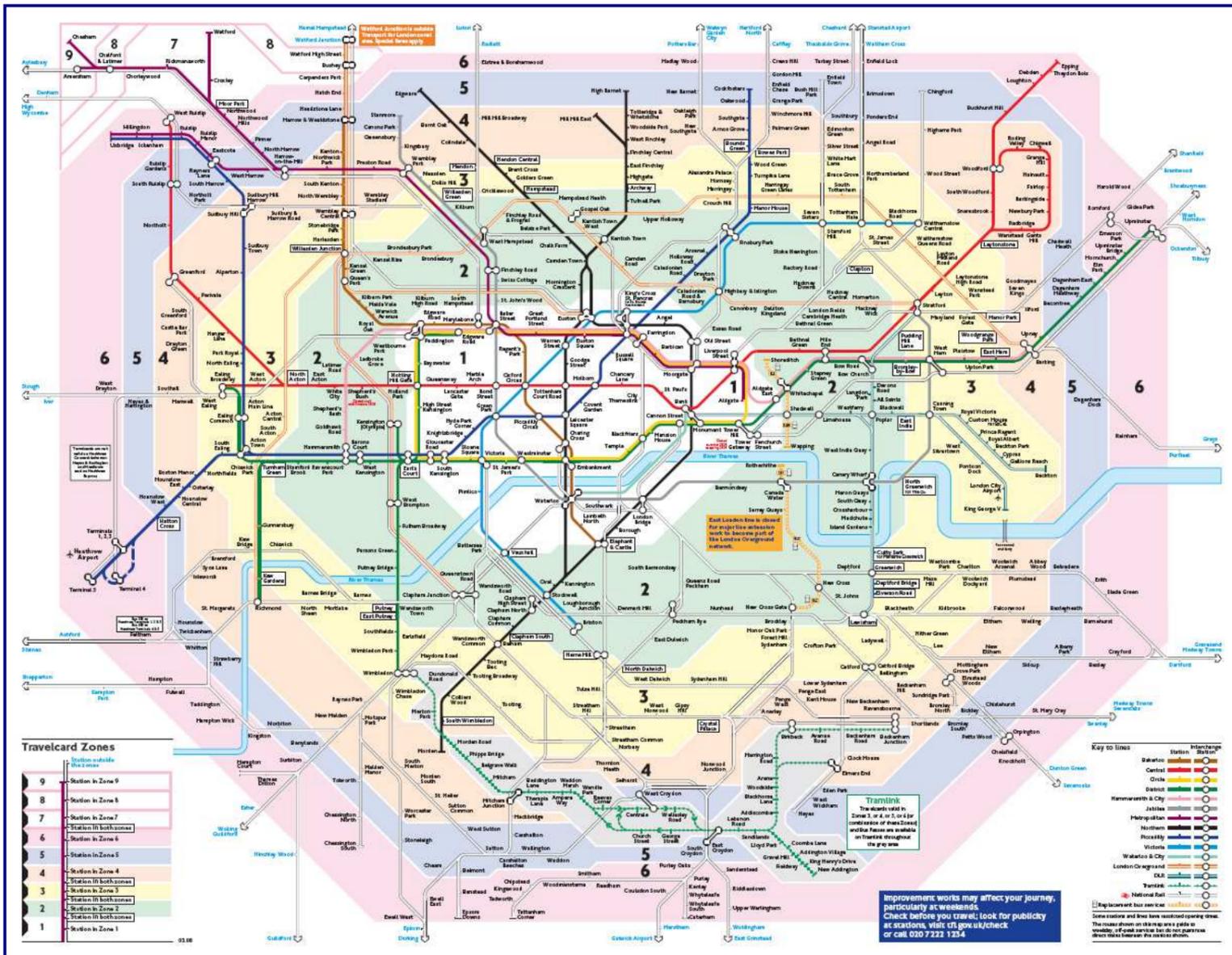


Figura 6.6, mapa de la red de Londres, incluye ferrocarril, DLR, metro y tranvía (f. Transport for London⁵)

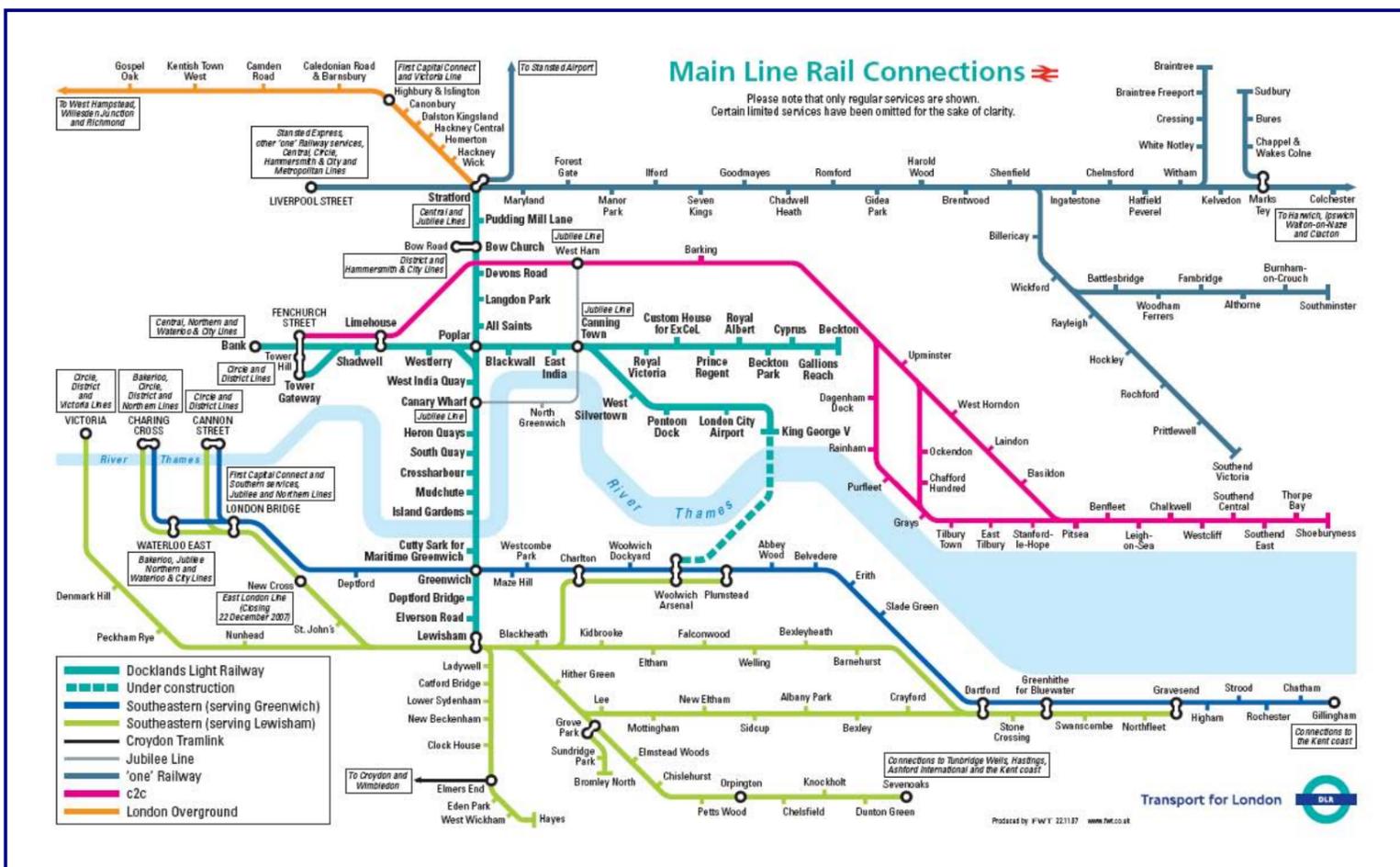


Figura 6.7, red de ferrocarril y DLR del este del área metropolitana de Londres (f. Transport for London⁵)

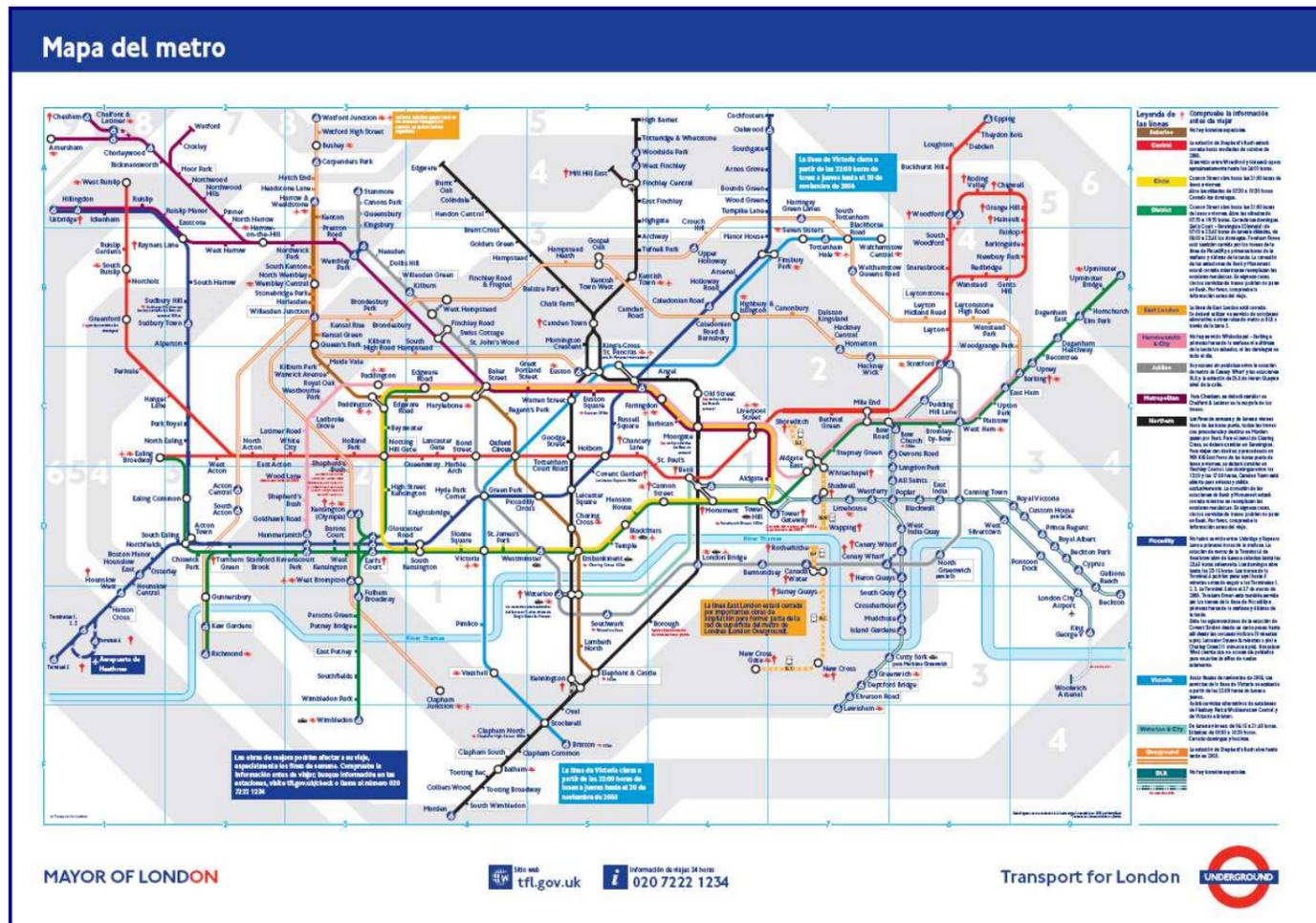


Figura 6.8, red de metro

(f. Transport for London⁵)

6.3.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

La relación entre la red de transporte colectivo guiado y el área metropolitana sobre la que aquella se asienta produce interacciones. Esta interacción se puede evidenciar a través de dos enfoques diferentes.

En primer lugar, existen zonas del área metropolitana servida por la red de transporte y zonas del área metropolitana que no están servidas por la red. Esta lectura de la red se manifiesta en superficies eficazmente servidas que pueden ser medidas y que se sitúan alrededor de las estaciones de ferrocarril.

En segundo lugar, la interacción se manifiesta en una distribución de las diferentes estaciones en el espacio comprendido por el área metropolitana. Esta distribución superficial, relacionada con el Indicador de Fractalidad, se muestra a través de la posición física de las distintas paradas dentro de coronas circulares. Estas coronas definen la sucesiva parcelación del área metropolitana con un criterio basado en el alejamiento del centro urbano.

Si se comienza por la primera visión expuesta de la red, se puede mostrar gráficamente la cantidad de superficie cubierta efectivamente por la red dentro del área metropolitana.

Superficie Cubierta Total	1.278.589.712 m²
----------------------------------	------------------------------------

Tabla 6.12, superficie cubierta por las paradas

(f. propia)

Esta superficie cubierta por la red del área metropolitana de Londres se muestra dentro de los planos existentes en el Anejo 1.

Hasta este punto se ha mostrado la superficie cubierta efectivamente por el conjunto de la red del área metropolitana de Londres. Sin embargo, existen una serie de estaciones directamente

implicadas en el cálculo, respecto de las que se ha necesitado determinar su superficie cubierta individualmente. El resultado detallado de todas estas estaciones se adjunta en el Anejo número 2.

Para acometer el segundo punto de vista expuesto, se adjunta, dentro del Anejo 1, un plano de fraccionamiento del espacio metropolitano en coronas circulares. Dentro de estas coronas circulares se inscriben las estaciones de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija.

Para la interpretación del plano se ha procedido al recuento de estaciones por coronas circulares. El resultado obtenido se desagrega según la categoría de las estaciones, de esta manera se ofrecen dentro del Anejo 2 resultados parciales referidos, por un lado, al número de estaciones que posibilitan el intercambio o que son fin de línea y, por otro lado, al resto de estaciones.

6.3.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Londres

6.3.4.1.- Indicador de Accesibilidad

El Indicador de Accesibilidad, medido en minutos, de cada una de las estaciones de estudio del área metropolitana de Londres se adjunta en el Anejo número 2. Los indicadores de accesibilidad asociados al conjunto de la red presentan el siguiente resultado:

Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	81,97
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	89,44

Tabla 6.13, Indicador de Accesibilidad

(f. propia)

6.3.4.2.- Indicador de Cobertura

El Indicador de Cobertura de cada una de las estaciones en estudio del área metropolitana de Londres se adjunta dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Cobertura asociados al conjunto de la red presentan los siguientes valores:

Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	6,17
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	6,60

Tabla 6.14, Indicador de Cobertura

(f. propia)

6.3.4.3.- Indicador de Fractalidad

Los Indicadores de Fractalidad asociados al área metropolitana de Londres, cuyo centro se ha situado sobre la estación de Picadilly Circus a efectos de crear las sucesivas coronas circulares, presentan los siguientes valores:

Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,4705
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,4986

Tabla 6.15, Indicador de Fractalidad

(f. propia)

6.3.4.4.- Indicador de Densidad

El Indicador de Densidad asociado a la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de Londres es el siguiente:

Indicador de Densidad (I_D)	0,48
---	-------------

Tabla 6.16, Indicador de Densidad

(f. propia)

6.4.- Madrid

6.4.1.- Definición del Área Metropolitana

Dentro de la exposición de resultado del área metropolitana de Madrid, en primer lugar se van a mostrar los datos relativos a la configuración física del área metropolitana. Así, se van a aportar los diferentes parámetros que se han ido obteniendo de la aplicación de la metodología diseñada.

La superficie ocupada por el área metropolitana puede entenderse compuesta por dos áreas parciales, por un lado, la superficie del área extendida en mancha de aceite y, por otro lado, la superficie ocupada por las diferentes áreas urbanizadas de forma dispersa. De esta manera, se tendrá la siguiente Superficie Ocupada medida sobre el plano de Superficie Ocupada que se adjunta en el Anejo número 1.

Superficie Ocupada Total	<i>Superficie Ocupada por la urbanización dispersa</i>	<i>Superficie Ocupada en mancha de aceite o de forma continua</i>
721,19 km²	240,64 km ²	480,55 km ²

Tabla 6.17, superficie ocupada por la ciudad de Madrid

(f. propia)

Estos son los datos obtenidos tras definir todas las áreas urbanizadas que generan superficie ocupada y que, por tanto, crean ámbitos susceptibles de generar desplazamientos de los ciudadanos.

6.4.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

En este epígrafe se define la red de transporte colectivo de infraestructura fija de la ciudad de Madrid, para ello se presenta a continuación un pequeño croquis de la misma (figura 6.9) en el que el elemento fundamental es la estación como instrumento de contacto entre la red y los usuarios del transporte. Dentro del Anejo 1, se incorpora el Plano de la red utilizado en el desarrollo metodológico.

Para poder realizar el estudio de la red se han escogido unas determinadas estaciones según los criterios expuestos en el Capítulo 5 de este análisis. Estas estaciones, con su correspondiente numeración, son las expuestas en la tabla 6.18 que se muestra en las páginas siguientes de los trabajos.

Dado que se están exponiendo los resultados asociados a la red de transporte ferroviario de Madrid, que se escogió como primer caso de estudio, las estaciones que figuran en la tabla 6.18, se corresponden con las paradas escogidas como punto de partida para desarrollar la metodología de cálculo del conjunto de parámetros que conforman los diferentes indicadores de oferta.

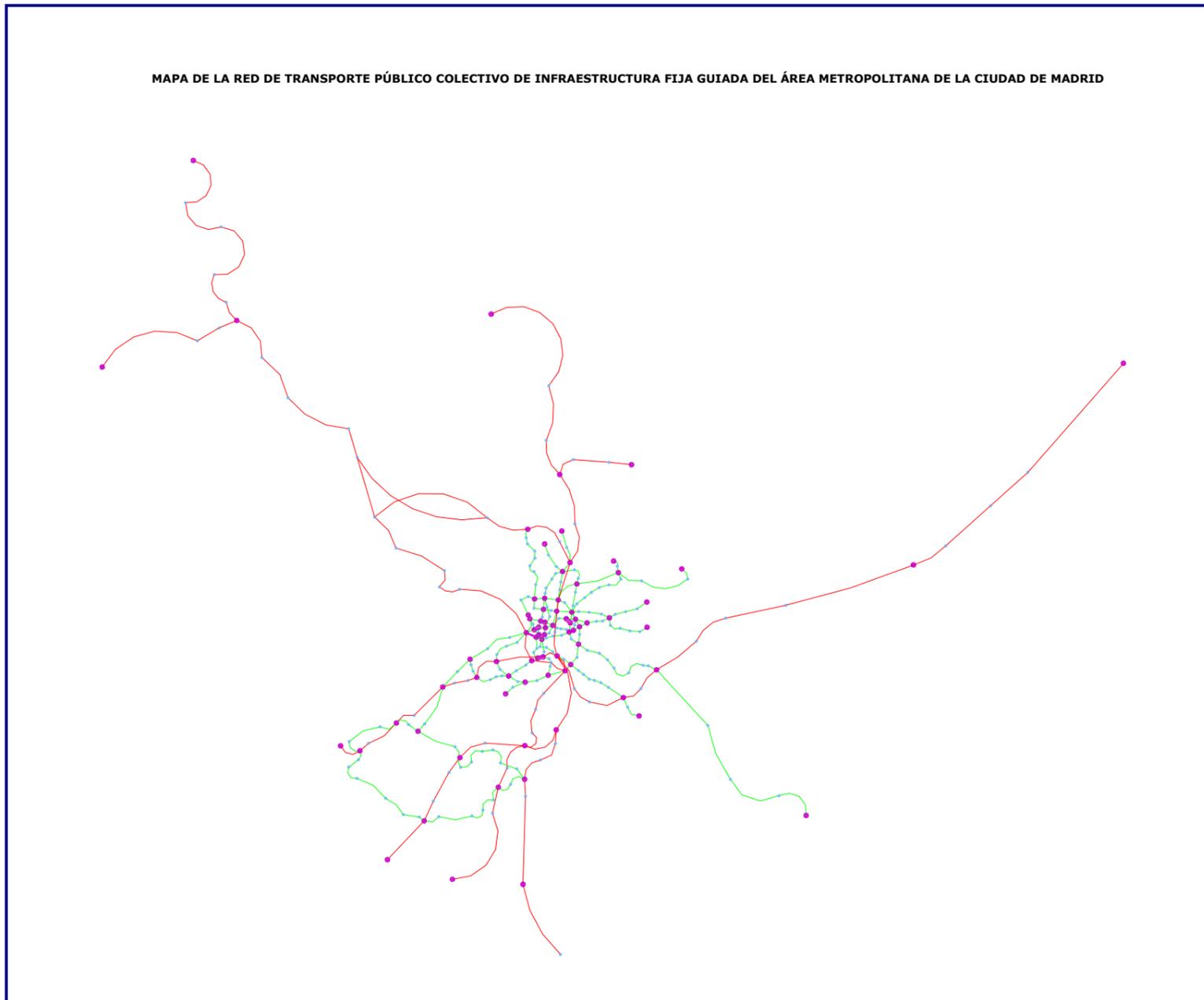


Figura 6.9, red de infraestructura férrea de Madrid

(f. propia)

1	SOL	37	COLOMBIA
2	CALLAO	38	EL CASAR
3	GRAN VÍA	39	PITIS
4A	PRINCIPE PIO-OPERA	40	PUERTA DE ARGANDA-VICALVARO
4B	OPERA-PRINCIPE PIO	41	CONGOSTO
5	EMBAJADORES-ACACIAS	42	MANUEL BECERRA
6	ATOCHA RENFE	43	DIEGO DE LEÓN
7	PRINCIPE VERGARA	44	CANAL
8A	PLAZA DE ESPAÑA-NOVICIADO	45	ALARCÓN CENTRAL
8B	NOVICIADO-PLAZA DE ESPAÑA	46	PUERTA DEL SUR
9	TRIBUNAL	47	PAN BENDITO
10	ALONSO MARTINEZ	48	GETAFE CENTRAL
11	ARGÜELLES	49	LEGANÉS CENTRAL
12	CASA DE CAMPO	50	HERRERA ORIA
13	LAGUNA	51	FUENCARRAL
14	PIRÁMIDES	52	CANTOBLANCO-UNIVERSIDAD

15	LEGAZPI	53	MAR DE CRISTAL
16	PACÍFICO	54	PUEBLO NUEVO
17	MENDEZ ÁLVARO	55	PINTO
18	NUEVOS MINISTERIOS	56	VILLALBA
19	VILLAVERDE BAJO	57	ARGANDA DE REY
20	SIERRA DE GUADALUPE-VALLECAS	58	ALCALÁ DE HENARES
21	GOYA	59	VENTAS
22	NUNEZ DE BALBOA	60	MOSTOLES CENTRAL
23	SAINZ DE BARANDA	61	FUENLABRADA CENTRAL
24	SAN BERNARDO	62	PARLA
25	BILBAO	63	ALCOBENDAS-SS DE LOS REYES
26	GREGORIO MARAÑÓN	64	COLMENAR VIEJO
27	GUZMÁN EL BUENO	65	PARQUE DE SANTA MARÍA
28	ALUCHE	66	BARAJAS
29	CUATRO VIENTOS	67	CANILLEJAS
30	OPORTO	68	LAS MUSAS
31	PLAZA ELÍPTICA	69	VALDEMORO
32	VILLAVERDE ALTO	70	EL ESCORIAL
33	PLAZA DE CASTILLA	71	CERCEDILLA
34	CHAMARTÍN	72	GUADALAJARA
35	CUATRO CAMINOS	73	MOSTOLES-EL SOTO
36	AVENIDA DE AMÉRICA	74	HUMANES

Tabla 6.18, estaciones férreas consideradas

(f. propia)

Existe una importancia relativa de las estaciones y, por tanto, se puede establecer una diferenciación entre las mismas. Por un lado estarán las estaciones en las que es posible realizar un intercambio entre líneas y, por otro lado, estarán las simples paradas donde no es posible el intercambio de líneas. De esta manera, dentro del área metropolitana de Madrid se encuentran el siguiente número de estaciones:

Estaciones Totales en la Red	<i>Estaciones sin posibilidad de intercambio</i>	<i>Estaciones con posibilidad de intercambio</i>
253	176	77

Tabla 6.19, jerarquización de las estaciones de la red férrea de Madrid

(f. propia)

Estos son los principales datos que se desprenden del análisis y modelización de la red pública de infraestructura fija de Madrid. Dado que se ha utilizado información comercial facilitada por las empresas explotadoras de la red, se van a exponer los diferentes planos de la red que estas ofrecen. En el caso concreto de Madrid, las empresas explotadoras implicadas son:

- Metro de Madrid⁶.
- Cercanías de RENFE³.

Estando todas estas empresas englobadas dentro del Consorcio Regional de Transportes de Madrid⁷, consorcio que articula globalmente la gestión de la red.

A continuación se muestran los planos comerciales de la red:



Figura 6.10, red ferroviaria de cercanías de Madrid

(f. RENFE³)

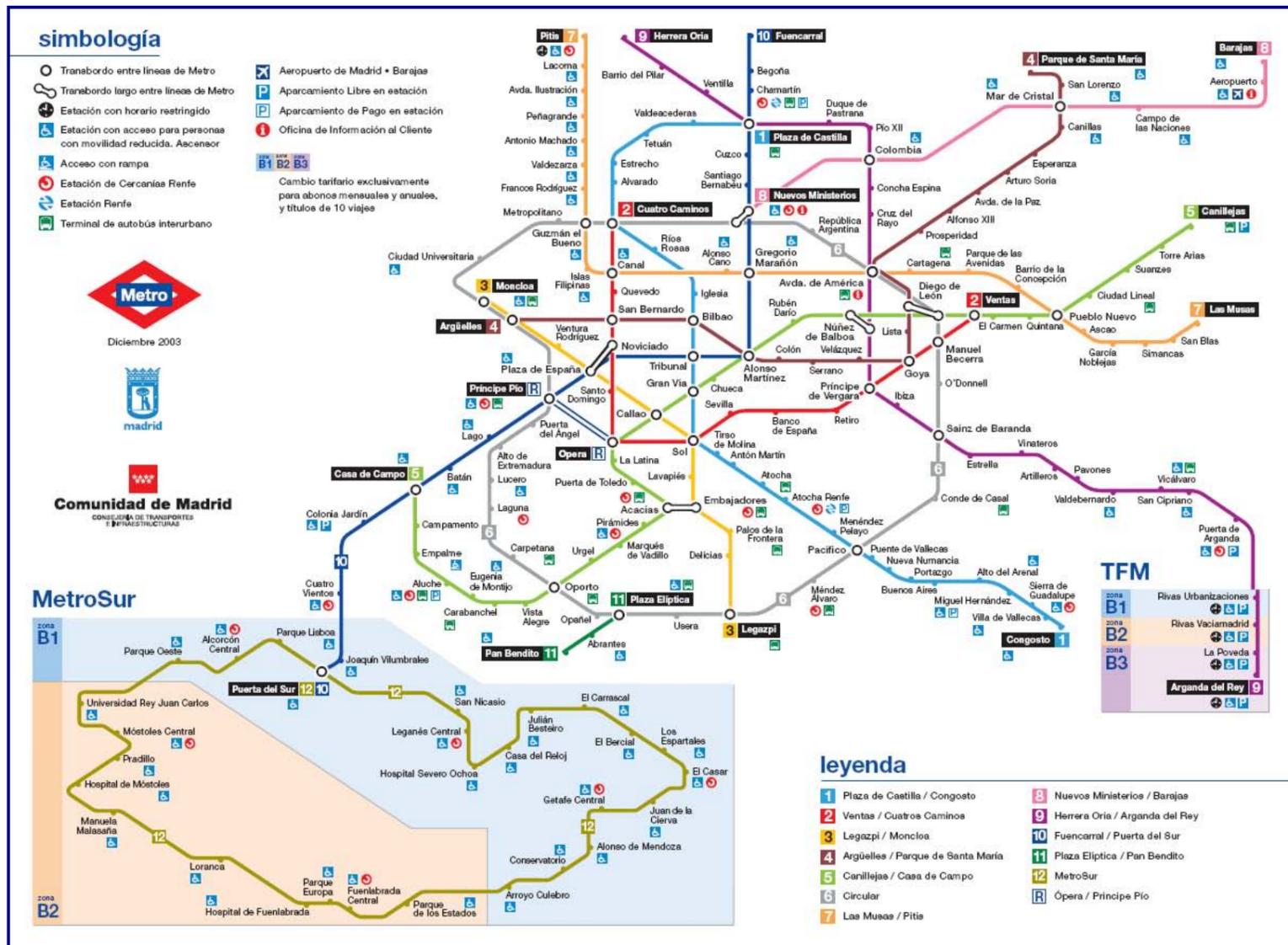


Figura 6.11, red de metro de Madrid (f. Metro de Madrid⁶)

6.4.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

La relación entre la red de transporte colectivo guiado y el área metropolitana sobre la que aquella se asienta produce interacciones. Esta interacción se puede evidenciar a través de dos enfoques diferentes.

En primer lugar, existen zonas del área metropolitana servida por la red de transporte y zonas del área metropolitana que no están servidas por la red. Este hecho se manifiesta físicamente en la existencia de superficies útiles para la movilidad colectiva que pueden ser medidas alrededor de las estaciones de ferrocarril.

Dentro de este enfoque, se puede mostrar la cantidad de superficie cubierta efectivamente por la red dentro del área metropolitana. Esta superficie incluye la suma del área cubierta por todas las estaciones de la red individualmente.

Superficie Cubierta Total	298.683.723,95 m²
----------------------------------	-------------------------------------

Tabla 6.20, superficie cubierta por las paradas (f. propia)

Además de la superficie efectivamente cubierta por el conjunto de la red del área metropolitana de Madrid, existen una serie de estaciones directamente implicadas en el cálculo, respecto de las cuales ha sido necesario determinar la superficie que individualmente cubren. El resultado detallado de todas estas estaciones se adjunta en el Anejo número 2.

En segundo lugar, la interacción se manifiesta en una distribución de las diferentes estaciones en el espacio comprendido por el área metropolitana. Esta distribución superficial, relacionada con el Indicador de Fractalidad, se muestra a través de la posición física de las distintas paradas dentro de

coronas circulares. Estas coronas definen la sucesiva parcelación del área metropolitana con un criterio basado en el alejamiento del centro urbano. Para acometer este segundo punto de vista expuesto, se adjunta, dentro del Anejo número 1, un plano de fraccionamiento del espacio metropolitano en coronas circulares. Dentro de estas coronas circulares se inscriben las estaciones de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija.

Para la interpretación del plano se ha procedido al recuento de estaciones existentes en dichas coronas circulares. El resultado obtenido se desagrega según la categoría de las estaciones, de esta manera, se ofrecen dentro del Anejo número 2 resultados parciales referidos, por un lado, al número de estaciones que posibilitan el intercambio o que son fin de línea y, por otro lado, al resto de estaciones.

6.4.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Madrid

6.4.4.1.- Indicador de Accesibilidad

El Indicador de Accesibilidad, medido en minutos, de cada una de las estaciones de estudio del área metropolitana de Madrid se encuentra expuesto en el Anejo número 2. Los Indicadores de Accesibilidad asociados al conjunto de la red presentan el siguiente resultado:

Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	55,95
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	62,92

Tabla 6.21, Indicador de Accesibilidad

(f. propia)

6.4.4.2.- Indicador de Cobertura

El Indicador de Cobertura de cada una de las estaciones en estudio del área metropolitana de Madrid se encuentra dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Cobertura asociados al conjunto de la red presentan los siguientes valores:

Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	8,56
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	9,31

Tabla 6.22, Indicador de Cobertura

(f. propia)

6.4.4.3.- Indicador de Fractalidad

Los Indicadores de Fractalidad asociados al área metropolitana de Madrid, con centro en la estación de Sol, presentan los siguientes valores:

Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,2763
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,3311

Tabla 6.23, Indicador de Fractalidad

(f. propia)

6.4.4.4.- Indicador de Densidad

El Indicador de Densidad asociado a la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de Madrid es el siguiente:

Indicador de Densidad (I_D)	0,41
---	-------------

Tabla 6.24, Indicador de Densidad

(f. propia)

6.4.5.- Resultados del área metropolitana de Madrid, desarrollados para la red de transporte colectivo de infraestructura guiada completa

El área metropolitana de Madrid ha sido el ámbito que se ha escogido como referencia para desarrollar la modelización de la metodología a aplicar al conjunto de áreas metropolitanas. Debido al mayor tiempo de trabajo dedicado a esta área metropolitana, se han obtenido mayor cantidad de resultados. Así, además de las matrices de tiempos de viaje expuestas en el Anejo 4, se han obtenido los Indicadores de Accesibilidad y de Cobertura para el conjunto de las estaciones de la red.

Dada la necesidad de trabajar con el número total de estaciones, se ha hecho necesario el establecer un sistema de numeración algo más complejo que el utilizado en el resto de áreas metropolitanas. Para ello, en primer lugar, se han numerado las estaciones analizadas con mayor grado de precisión con una numeración sencilla (1, 2, 3,...,N), además, estas estaciones así nombradas se han grafiado en un color rosáceo. A continuación, se ha pasado a numerar el resto de paradas, esto se ha hecho con un color azul pálido y a través de cinco o seis números divididos en tres bloques de la siguiente manera:

05282

Los dos primeros números hacen referencia a la estación de numeración menor, que está conectada a través de una línea férrea con la estación a numerar y que ha sido calculada con detalle, en este caso esa estación sería la 5. Los dos siguientes números indican la estación de numeración mayor, que está conectada con la estación a numerar y que ha sido calculada con detalle, en este caso sería la 28. El último número corresponde al orden de las estaciones que están conectadas entre las dos estaciones de numeración simple, en este caso sería la estación número 2 desde la estación de menor numeración, la 5, hasta la estación de mayor numeración, la 28.

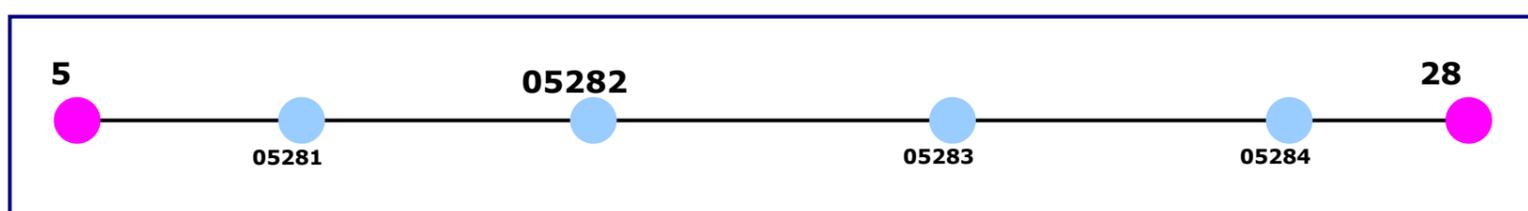


Figura 6.12, numeración de estaciones en redes completas

(f. propia)

Los resultados de los Indicadores de Cobertura y Accesibilidad obtenidos para la red completa del área metropolitana de Madrid se encuentran dentro del Anejo número 2.

6.5.- Milán

6.5.1.- Definición del Área Metropolitana

Como en el resto de áreas metropolitanas, para el caso de Milán en primer lugar se van a mostrar los datos relativos a la configuración física del área metropolitana. De esta forma, se van a aportar los diferentes elementos que se han ido obteniendo de la aplicación de la metodología diseñada.

La superficie ocupada por el área metropolitana, de nuevo puede entenderse compuesta por dos áreas parciales, por un lado la superficie del área extendida en mancha de aceite y, por otro lado, la superficie ocupada por las diferentes áreas urbanizadas de forma dispersa, de esta manera se tendrá la siguiente Superficie Ocupada medida sobre el plano de Superficie Ocupada que se adjunta en el Anejo 1.

Superficie Ocupada Total	<i>Superficie Ocupada por la urbanización dispersa</i>	<i>Superficie Ocupada en mancha de aceite o de forma continua</i>
864,47 km²	<i>623,79 km²</i>	<i>240,68 km²</i>

Tabla 6.25, superficie ocupada por la ciudad de Milán

(f. propia)

Estos son los datos obtenidos tras definir todas las áreas urbanizadas que generan superficie ocupada y que, por tanto, crean ámbitos susceptibles de generar desplazamientos de los ciudadanos.

Dentro de la definición de los diferentes límites de las áreas metropolitanas se encuentran islas carentes de urbanización dentro de ámbitos que si que presentan dicha urbanización. Para poder identificarlas gráficamente se han trazado de color magenta, de forma que sea posible su sustracción del conjunto de áreas que si son computables como superficies urbanas. Los ámbitos urbanos que si computan a efectos de superficie se han identificado a través de su tratamiento gráfico en color azul oscuro.

6.5.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

En este epígrafe se define la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de Milán. Para ello, se presenta a continuación un pequeño croquis de la misma en el que el elemento fundamental es la estación como instrumento de contacto entre la red y los usuarios. Dentro del Anejo 1 se incorpora el Plano de la red utilizado en el desarrollo de los trabajos.

Para poder realizar el estudio de la red se han escogido unas determinadas estaciones según los criterios expuestos en el Capítulo 5 de los trabajos. Estas estaciones, con su correspondiente numeración son las siguientes:

1	DUOMO	M4	S. DONATO
2	REPUBBLICA	M5	GESSATE
3	CADORNA/CADORNA FNMTRIENNALE	M6	COLOGNO NORD
4	PTA VENEZIA	M7	MACIACHINI
5	ROGOREDO	M8	SESTO 1º MAGGIO FS
6	CENTRALES FS	F1	VILLAMAGGIORE
7	PTA GARIBALDI FS	F2	MELEGNANO
8	PAGANO	F3	ABBIATEGRASSO
9	LORETO	F4	CARAVAGGIO
10	LAMBRATE FS	F5	MAGENTA
11	PIOLTELLO LIMITO	F6	VANZAGHELLO
12	LANCETTI	F7	DORMELLETO
13	BOVISA POLITECNICO FNM	F8	GALLARATE
14	SARONNO	F9	BISUSCHIO-VIGGIU
15	RHO	F10	GAVIRATE
16	SEVESO	F11	CHIASSO

17	VILLASANTA	F12	COMO NORD LAGO
18	MILANO GRECO PIRELLI/GRECO FS	F13	MERONE
M1	MOLINO DORINO	F14	LECCO
M2	BISCEGLIE	F15	PONTE SAN PIETRO
M3	ABBIATEGRASSO	F16	SERIATE

Tabla 6.26, estaciones férreas consideradas

(f. propia)

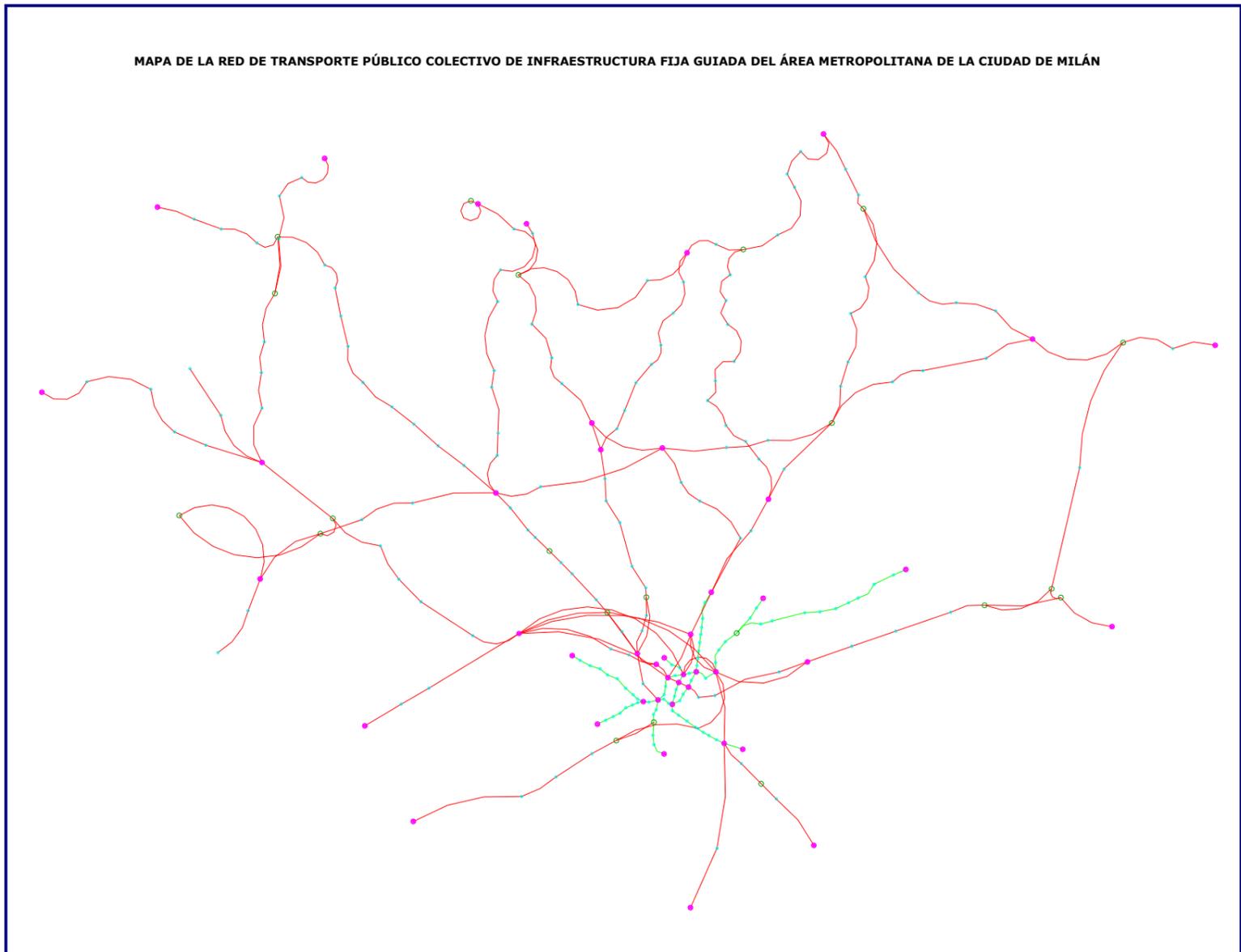


Figura 6.13, red de infraestructura férrea de Milán

(f. propia)

Existe una importancia relativa de las estaciones y, por tanto, se puede establecer una diferenciación entre las mismas. Por un lado estarán las estaciones en las que es posible realizar un intercambio entre líneas y, por otro lado, estarán las simples paradas donde no es posible el intercambio de líneas. De esta manera, dentro del área metropolitana de Milán se encuentran el siguiente número de estaciones:

Estaciones Totales en la Red	Estaciones sin posibilidad de intercambio	Estaciones con posibilidad de intercambio
247	191	56

Tabla 6.27, jerarquización de las estaciones de la red férrea de Milán

(f. propia)

Dado que se ha utilizado información comercial facilitada por las empresas explotadoras de la red, se van a exponer los diferentes planos de la red que estas ofrecen. Las empresas explotadoras dentro del área metropolitana de Milán se articulan dentro de la Autoridad de Transporte Milanés⁸ (ATM).

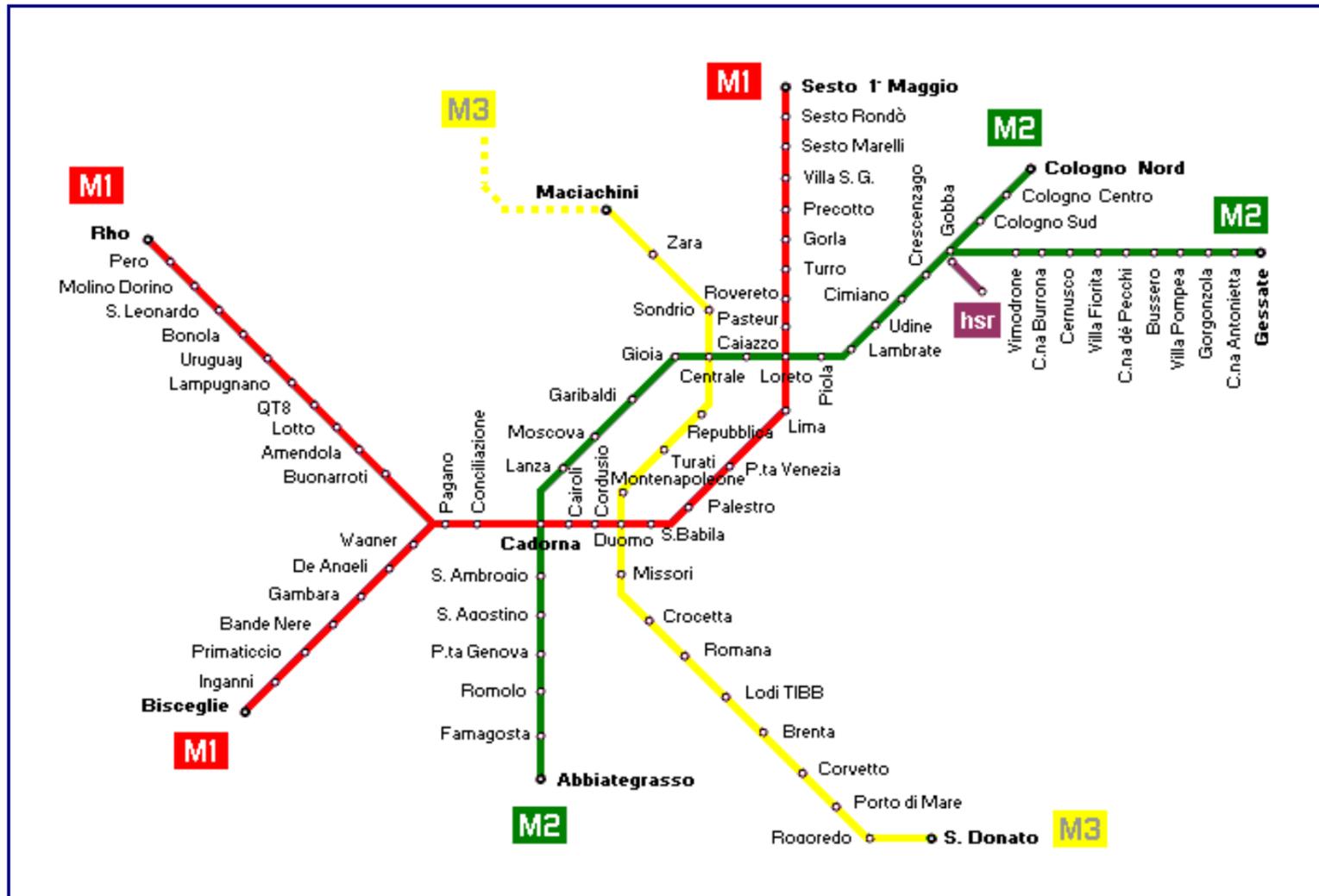


Figura 6.14, red de metro

(f. ATM⁸)

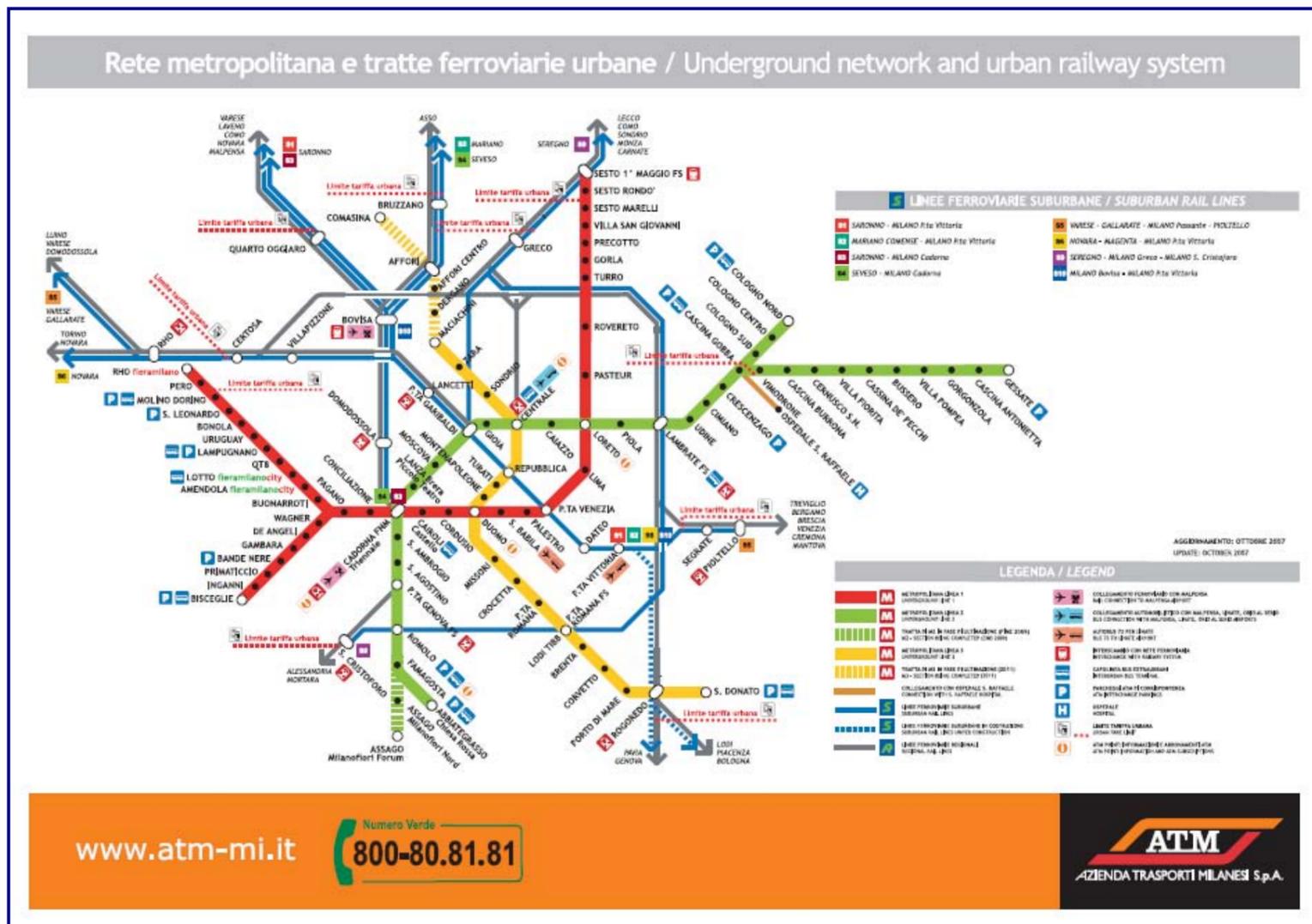


Figura 6.15, red de metro y ferrocarril urbano

(f. ATM⁸)

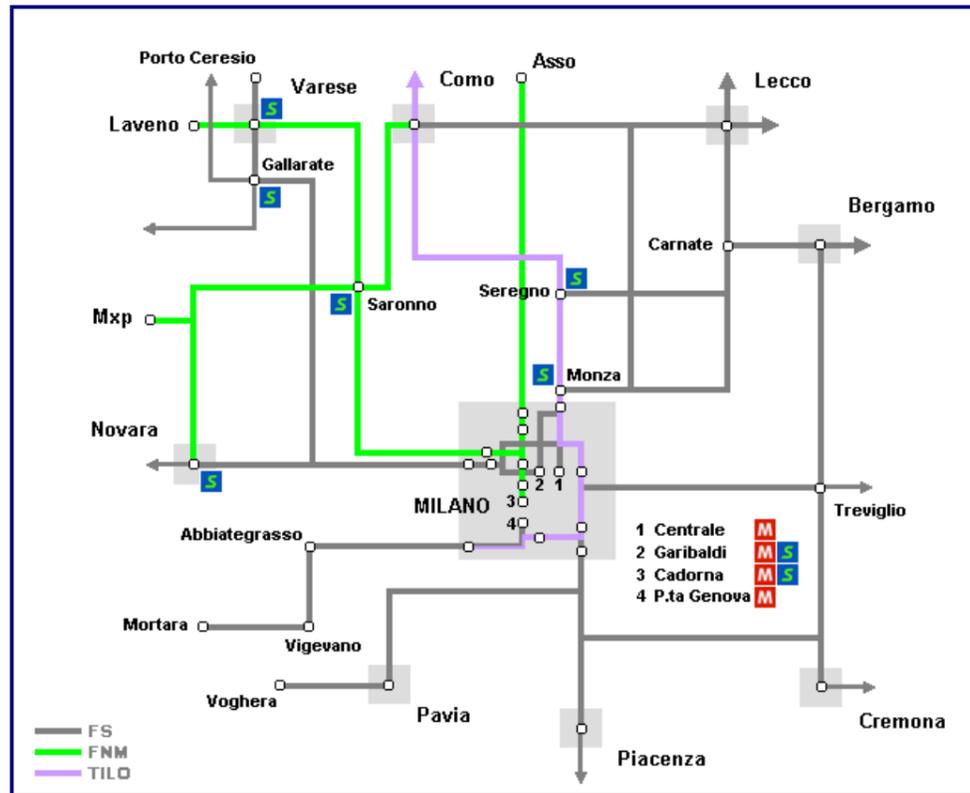


Figura 6.16, red de ferrocarril de cercanías (f. ATM⁸)

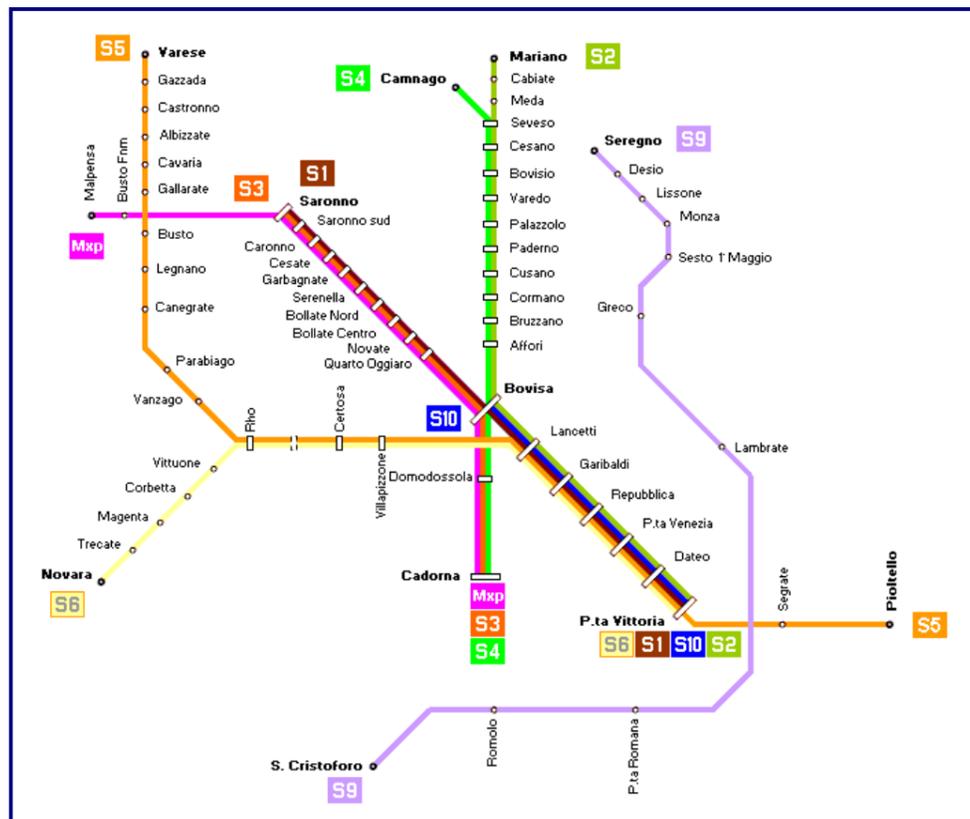


Figura 6.17, red de ferrocarril suburbano (f. ATM⁸)

Estos son los principales datos que se extraen del análisis y modelización de la red pública de transporte guiado de infraestructura fija de Milán.

6.5.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

La relación entre la red de transporte colectivo guiado y el área metropolitana sobre la que aquella se asienta produce interacciones. Esta interacción se puede evidenciar a través de dos enfoques diferentes.

En primer lugar, existen zonas del área metropolitana servida por la red de transporte y zonas del área metropolitana que no están servidas por la red. Esta lectura de la red se manifiesta en la existencia de superficies útiles a la movilidad colectiva que pueden ser medidas alrededor de las estaciones de ferrocarril. Los resultados de la medida individualizada de todas las estaciones de

estudio se encuentran expuestos dentro del Anejo número 2. De esta forma, se puede mostrar la cantidad de superficie cubierta efectivamente por la red dentro del área metropolitana de Milán.

Superficie Cubierta Total	<i>302.805.813 m²</i>
----------------------------------	----------------------------------

Tabla 6.28, superficie cubierta por las paradas

(f. propia)

La obtención de todos estos resultados se produce como consecuencia de la interpretación del plano de interacción entre las paradas de la red de infraestructuras férreas y el territorio urbanizado. Dicho plano se muestra dentro del Anejo número 1.

En segundo lugar, la interacción se manifiesta en la distribución de las diferentes estaciones en el espacio comprendido por el área metropolitana. Esta distribución superficial, relacionada con el Indicador de Fractalidad, se muestra a través de la posición física de las distintas paradas dentro de coronas circulares. Estas coronas definen la sucesiva parcelación del área metropolitana con un criterio basado en el alejamiento del centro urbano.

Para poder realizar una correcta interpretación de esta visión de la red de infraestructuras, se adjunta, dentro del Anejo número 1, un plano de fraccionamiento del espacio metropolitano en coronas circulares. Dentro de estas coronas circulares se inscriben las estaciones de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija.

Para la interpretación del plano se ha procedido al recuento de estaciones por coronas circulares. El resultado obtenido se desagrega según la categoría de las estaciones, de esta manera, dentro del Anejo número 2, se ofrecen resultados parciales referidos, por un lado, al número de estaciones que posibilitan el intercambio o que son fin de línea y, por otro lado, al resto de estaciones:

6.5.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de Milán

6.5.4.1.- Indicador de Accesibilidad

El Indicador de Accesibilidad, medido en minutos, de cada una de las estaciones de estudio del área metropolitana de Milán se encuentra expuesto dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Accesibilidad asociados al conjunto de la red presentan el siguiente resultado:

Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	61,26
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	63,14

Tabla 6.29, Indicador de Accesibilidad

(f. propia)

6.5.4.2.- Indicador de Cobertura

El Indicador de Cobertura de cada una de las estaciones en estudio del área metropolitana de Milán se expresa dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Cobertura asociados al conjunto de la red presentan los siguientes valores:

Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	6,93
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	6,34

Tabla 6.30, Indicador de Cobertura

(f. propia)

6.5.4.3.- Indicador de Fractalidad

Los Indicadores de Fractalidad asociados al área metropolitana de Milán, cuyo centro se ha situado sobre la estación de Duomo a efectos de crear las sucesivas coronas circulares, presentan los siguientes valores:

Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,3092
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,3612

Tabla 6.31, Indicador de Fractalidad

(f. propia)

6.5.4.4.- Indicador de Densidad

El Indicador de Densidad asociado a la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de Milán es el siguiente:

Indicador de Densidad (I_D)	0,35
---	-------------

Tabla 6.32, Indicador de Densidad

(f. propia)

6.6.- París

6.6.1.- Definición del Área Metropolitana

Concluyendo esta exposición de resultados, para la ciudad de París se va a comenzar por mostrar los datos relativos a la configuración física del área metropolitana. Así, se van a aportar los diferentes elementos que se han ido obteniendo de la aplicación de la metodología diseñada.

Superficie Ocupada Total	<i>Superficie Ocupada por la urbanización dispersa</i>	<i>Superficie Ocupada en mancha de aceite o de forma continua</i>
1.394,48 km²	<i>427,77 km²</i>	<i>966,71 km²</i>

Tabla 6.33, superficie ocupada por la ciudad de Barcelona

(f. propia)

La superficie ocupada por el área metropolitana puede entenderse compuesta por dos áreas parciales, por un lado la superficie del área extendida en mancha de aceite y por otro lado la superficie ocupada por las diferentes áreas urbanizadas de forma dispersa. De esta manera, se tendrá la anterior Superficie Ocupada medida sobre el plano de Superficie Ocupada que se adjunta en el Anejo 1. Estos son los datos obtenidos tras definir todas las áreas urbanizadas que generan superficie ocupada y que, por tanto, crean ámbitos susceptibles de generar desplazamientos de los ciudadanos.

Dentro de la definición de los diferentes límites de las áreas metropolitanas se encuentran islas carentes de urbanización dentro de ámbitos que si que presentan dicha urbanización. Para poder identificarlas gráficamente se han trazado de color magenta en los planos, de forma que sea posible su sustracción del conjunto de áreas que si son computables como superficies urbanas. Los ámbitos urbanos que si computan a efectos de superficie se han identificado a través de su tratamiento gráfico en color azul oscuro.

6.6.2.- Definición de la Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

En este epígrafe se define la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de París. Para ello se presenta a continuación un pequeño croquis de la misma en el que el elemento fundamental es la estación como instrumento de contacto entre la red y los usuarios. Dentro del Anejo 1 se incorpora el Plano de la red utilizado en el desarrollo de los trabajos.

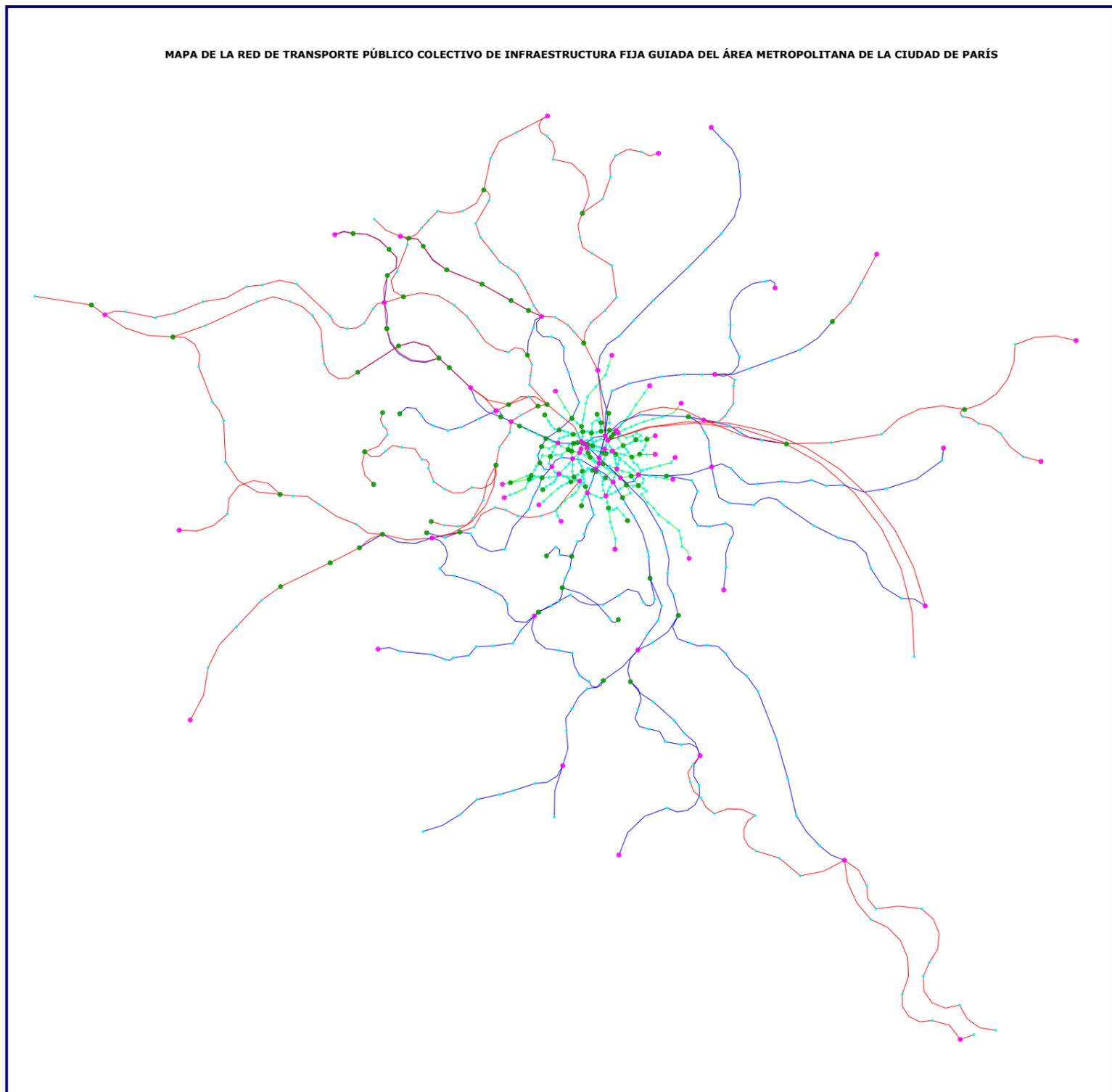


Figura 6.18, red de infraestructura férrea de París

(f. propia)

Para poder realizar el estudio de la red se han escogido unas determinadas estaciones según los criterios expuestos en el Capítulo 5 de los trabajos. Estas estaciones, con su correspondiente numeración, son las siguientes:

1	CHATELET	37	CONFLANS-FIN D' OISE
2	ST MICHEL/ST MICHEL-NOTREDAME	38	NANTES STATION
3	LES HALLES/CHATELET-LES HALLES	39	PONTOISE
4	OPERA	40	PERSAN BEAUMONT
5	AUBER/HAUSSMANN-ST LAZARE	41	CORBEIL-ESSONNES

6	SAINT LAZARE/GARE SAINT LAZARE	42	ARGENTIL
7	CONCORDE	M1	GABRIEL PÉRI, ASNIÈRES
8	MADELEINE	M2	SAINT-DENIS, UNIVERSITÉ
9	MONTPARNASSE BIENVENÛE	M3	LA COURNEUVE 8 MAI 1945
10	CHAMP DE MARS, TOUR EIFFEL	M4	BOBIGNY, PABLO PICASSO
11	LA MOTTER PICQUET GRENELLE	M5	MAIRIE DES LILAS
12	DENFERT ROCHEREAU	M6	GALLIENI
13	PLACE D'ITALIE	M7	MAIRIE DE MONTREUIL
14	GARE D'AUSTERLITZ	M8	CHÂTEAU DE VINCENNES
15	GARE DE LYON	M9	CRÉTEIL-PRÉFECTURE
16	BASTILLE	M10	VILLEJUIF-LOUIS ARAGON
17	NATION	M11	CHÂTILLON-MONTRouGE
18	STRASBOURG-SAINT DENIS	M12	MAIRIE D'ISSIE
19	REPUBLIQUE	M13	PONT DE SÈVRES
20	GARE DE L'EST	M14	BOULOGNE- PONT DE SANT CLOUD
21	GARE DU NORD/MAGENTA	F1	LUZARCHES
22	JAURES	F2	ORRY-LA-VILLE-COYE
23	STALINGRAD	F3	AERPORT CHARLES DE GAULLE2-TGV
24	CHARLES DE GAULLE ETOILE	F4	DAMMARTIN, JUILLY-SAINT-MARD
25	LA DEFENSE	F5	TRILPORT
26	GARE DE SAINT DENIS	F6	CRÉCY-LA CHAPELLE
27	ERMONT-EAUBONNE	F7	MARNE-LA-VALLÉE-CHESSY
28	AULNAY SOUS-BOIS	F8	BOISSY, SAINT LÉGER
29	BONDY	F9	MORET-VENEUX-LES-SABLONS
30	VAL DE FONTENAY	F10	BALLANCOURT
31	TOURNAN	F11	BRÉTIGNY-SOUR-ORGE
32	JUVISY SUR-ORGE	F12	SAINT-RÉMY-LÈS-CHEVREUSE
33	MELUN	F13	RAMBOUILLET
34	MASSY-PALaiseAU	F14	MONTFORT-L'AMAURY-MÉRÉ
35	VERSAILLES CHAUTIERS	F15	CERGY-LE-HAUT
36	HOUILLES-CARRIERES-SUR-SEINE		

Tabla 6.34, estaciones férreas consideradas

(f. propia)

Dado que se ha utilizado información comercial facilitada por las empresas explotadoras de la red, se van a exponer los diferentes planos de la red que estas ofrecen. En el caso concreto de París, las empresas implicadas en la explotación están englobadas dentro de la empresa RATP⁹ y son las siguientes:

- Red de metro.
- Red de RER, o ferrocarril suburbano.
- Red de Transilien, similar a los ferrocarriles de cercanías y gestionado por SNCF¹⁰.

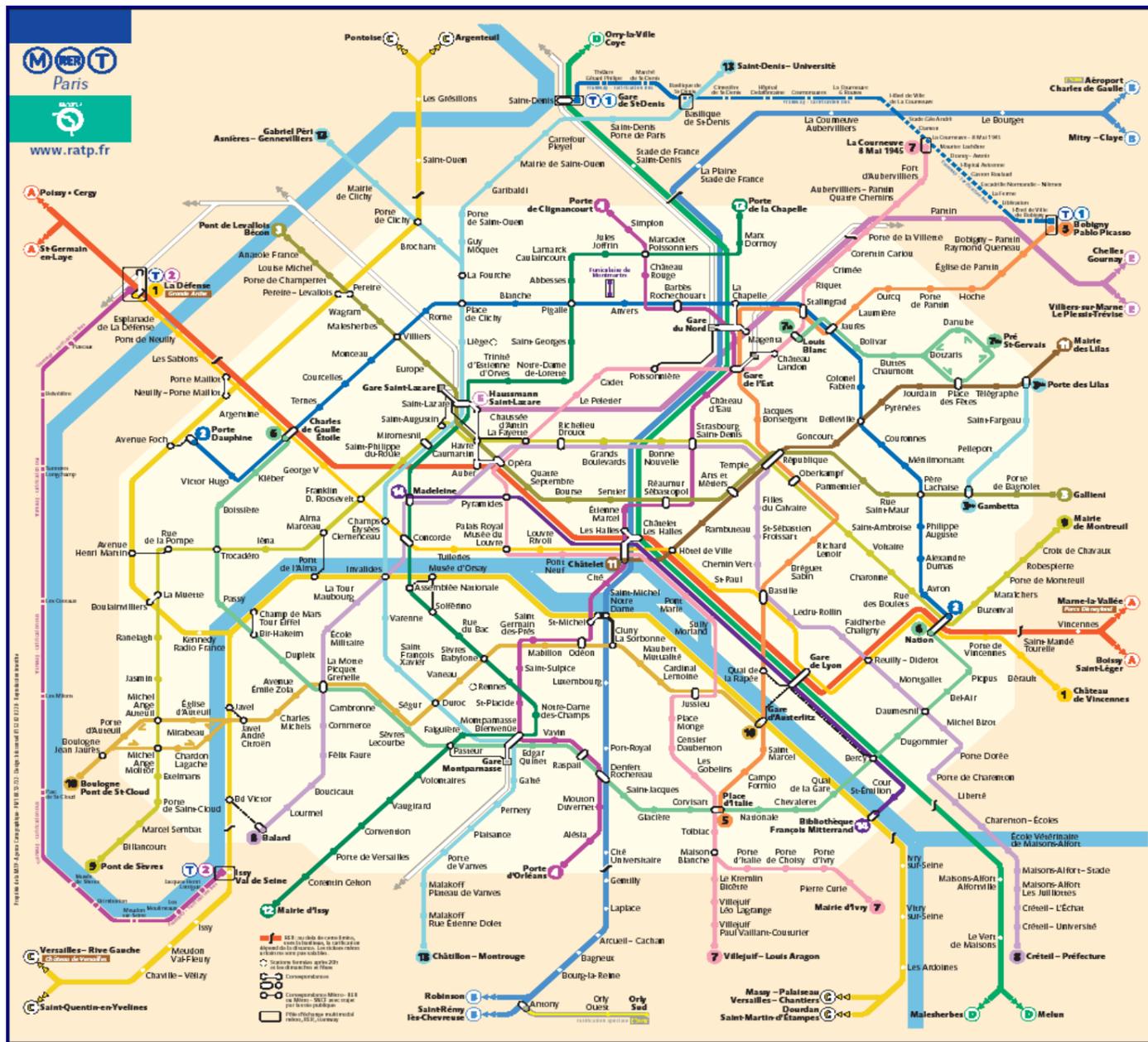


Figura 6.19, red de metro

(f. RATP⁹)

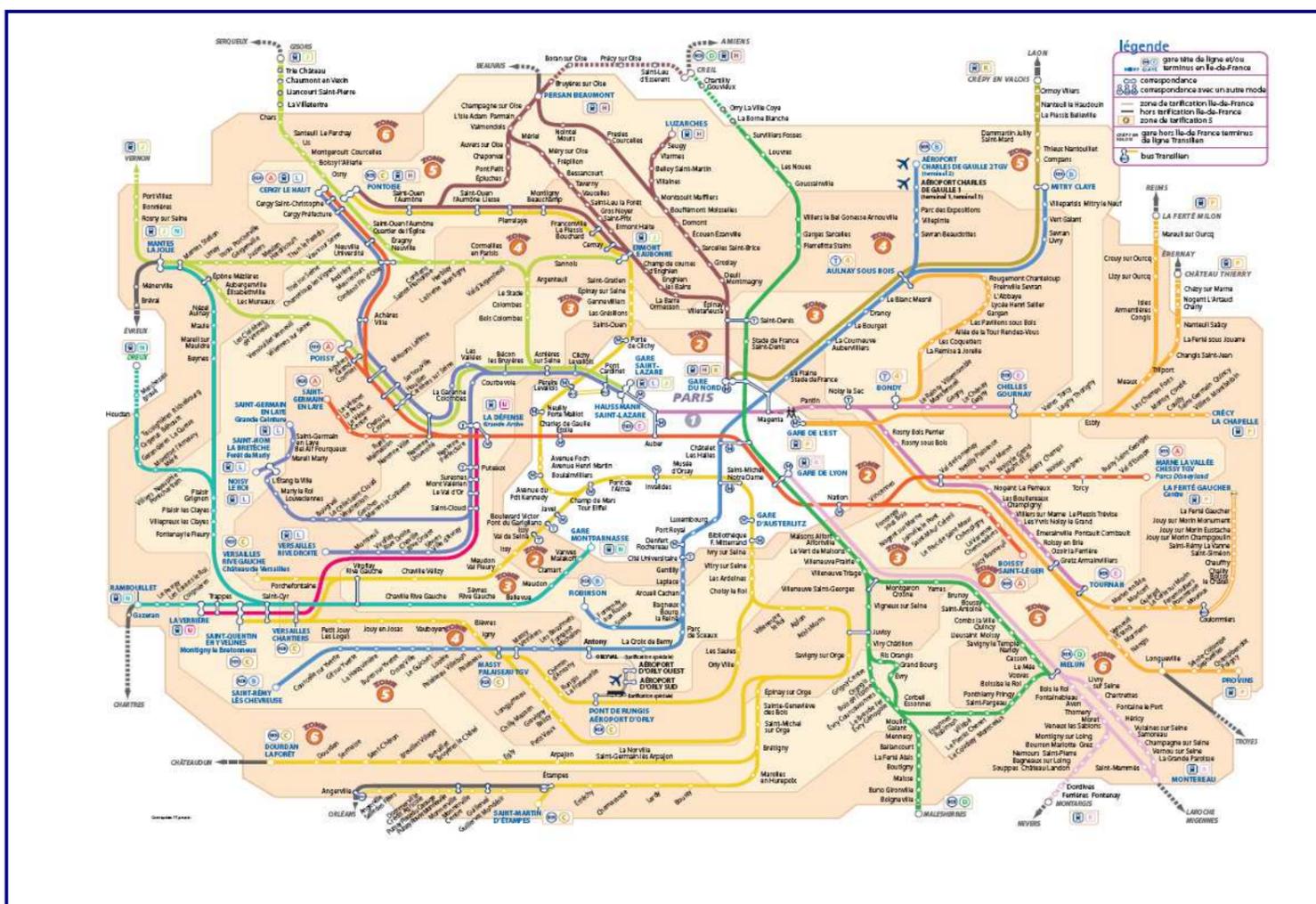


Figura 6.20, red de ferrocarril de cercanías, Transilien

(f. RATP⁹)



Figura 6.21, red de RER (f. RATP⁹)

Existe una importancia relativa de las estaciones y, por tanto, se puede establecer una diferenciación entre las mismas. Por un lado estarán las estaciones en las que es posible realizar un intercambio entre líneas y, por otro lado, estarán las simples paradas donde no es posible el intercambio de líneas. De esta manera, dentro del área metropolitana de París se encuentran el siguiente número de estaciones:

Estaciones Totales en la Red	Estaciones sin posibilidad de intercambio	Estaciones con posibilidad de intercambio
652	479	173

Tabla 6.35, jerarquización de las estaciones de la red férrea de París (f. propia)

Estos son los principales datos que se desprenden del análisis y modelización de la red pública de transporte sobre infraestructura fija de París.

6.6.3.- Definición de las relaciones de interacción entre el Área Metropolitana y su Red de Transporte Colectivo sobre Infraestructura Fija

La relación entre la red de transporte colectivo guiado y el área metropolitana sobre la que aquella se asienta produce interacciones. Esta interacción se puede evidenciar a través de dos enfoques diferentes.

En primer lugar, existen zonas del área metropolitana servida por la red de transporte y zonas del área metropolitana que no están servidas por la red. Esta lectura de la red se materializa en la existencia de superficies de ciudad útiles al transporte colectivo que pueden ser medidas alrededor de las estaciones de ferrocarril.

Atendiendo a este enfoque, se puede mostrar la cantidad de superficie cubierta efectivamente por la red dentro del área metropolitana.

Superficie Cubierta Total	713.765.030,98 m²
----------------------------------	-------------------------------------

Tabla 6.36, superficie cubierta por las paradas

(f. propia)

Este dato muestra la superficie cubierta efectivamente por el conjunto de la red del área metropolitana de París. Sin embargo, existen una serie de estaciones directamente implicadas en el cálculo, respecto de las cuales se ha determinado la superficie que individualmente cubren. El resultado detallado de todas estas estaciones se adjunta en el Anejo número 2.

En segundo lugar, la interacción se manifiesta en la distribución de las diferentes estaciones en el espacio comprendido por el área metropolitana. Esta distribución superficial, relacionada con el Indicador de Fractalidad, se muestra a través de la posición física de las distintas paradas dentro de las coronas circulares. Estas coronas definen la sucesiva parcelación del área metropolitana con un criterio basado en el alejamiento del centro urbano.

Para acometer este segundo punto de vista, se adjunta, dentro del Anejo número 1, un plano de fraccionamiento del espacio metropolitano en coronas circulares. Dentro de estas coronas circulares se inscriben las estaciones de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija.

Para la interpretación del plano se ha procedido al recuento de estaciones por coronas circulares. El resultado obtenido se desagrega según la categoría de las estaciones, de esta manera se ofrecen, dentro del Anejo número 2, resultados parciales referidos, por un lado, al número de estaciones que posibilitan el intercambio o que son fin de línea y, por otro lado, al resto de estaciones:

6.6.4.- Presentación de Resultados del área metropolitana de París

6.6.4.1.- Indicador de Accesibilidad

El Indicador de Accesibilidad, medido en minutos, de cada una de las estaciones de estudio del área metropolitana de París se encuentra expuesto dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Accesibilidad asociados al conjunto de la red presentan el siguiente resultado:

Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones (I_{A(e)})	74,62
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones (I_{A(a)})	82,35

Tabla 6.37, Indicador de Accesibilidad

(f. propia)

6.6.4.2.- Indicador de Cobertura

El Indicador de Cobertura de cada una de las estaciones en estudio del área metropolitana de París se encuentra dentro del Anejo número 2. Los Indicadores de Cobertura asociados al conjunto de la red presentan los siguientes valores:

Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	7,82
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	7,03

Tabla 6.38, Indicador de Cobertura

(f. propia)

6.6.4.3.- Indicador de Fractalidad

Los Indicadores de Fractalidad asociados al área metropolitana de París, cuyo centro se ha situado sobre la estación de Chatelet a efectos de crear las sucesivas coronas circulares, presentan los siguientes valores:

Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,4094
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,4491

Tabla 6.39, Indicador de Fractalidad

(f. propia)

6.6.4.4.- Indicador de Densidad

El Indicador de Densidad asociado a la red de transporte colectivo de infraestructura fija del área metropolitana de París es el siguiente:

Indicador de Densidad (I_D)	0,51
---	-------------

Tabla 6.40, Indicador de Densidad

(f. propia)

6.7.- Otros resultados

Para enriquecer las posibilidades de ensayo de los trabajos se van a introducir otros datos de otros autores, todo ello con el propósito de poder realizar un número mayor de comparaciones entre los diferentes Indicadores de Oferta aportados. Los principales datos, no obtenidos directamente por la metodología de cálculo, que es importante cruzar con los indicadores obtenidos son los de las cargas de tráfico. Con ellos se podrá evaluar si alguno de los parámetros obtenidos está directamente relacionado con la cantidad de viajeros que soporta la red.

Además de estos datos sobre la utilización de las redes, de compleja obtención, y que son publicados por las propias empresas que gestionan la red, se incorporarán datos sencillos sobre las características físicas de las redes como sus longitudes, paradas, etc.

Los datos ahora expuestos y que van a ser incorporados al análisis, se han obtenido del Libro de J. Julia Sort¹¹ (2.006), "Redes Metropolitanas".

Dentro del conjunto de datos, en primer lugar se pueden englobar parámetros básicos para el conocimiento de las diferentes áreas metropolitanas. Estos podrían englobarse dentro de los datos de contorno de las ciudades:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Superficie Ocupada (Km²)	3.240	10.380	2.890	2.500	12.010
Población (10⁶ hab)	4,20	11,60	4,80	4,30	10,70
Densidad (hab/Km²)	1.296,00	1.118	1.661	1.720	891

Tabla 6.41, parámetros de contorno

(f. J. Julia¹¹)

A continuación, se pueden aglutinar los datos referidos a las redes de las áreas metropolitanas, tanto en lo referido a redes de infraestructuras para transporte colectivo guiado, como a redes de infraestructuras para transporte individual. En este caso se estaría hablando de datos de oferta de la red:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Red tte colectivo guiado (Km)	551	2.138	532	415	1.609
Red tte colectivo guiado (m red / Km²)	170	206	184	166	134
Red tte colectivo guiado (m red / 1000 hab)	131	184	111	97	150
Red tte por autopista (Km)	467	945	523	305	829
Red tte por autopista (m red / Km²)	144	91	181	122	69
Red tte por autopista (m red / 1000 hab)	111	81	109	71	78

Tabla 6.42, parámetros de oferta

(f. J. Julia¹¹)

Finalmente, se pueden mostrar los datos de carga o de utilización de la red por la población, que se corresponderían con datos de demanda de transporte:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Viajes / año / habitante	107	141	143	90	208
Viajes / año / Km de red	815,9	764,9	1290,8	932,5	1382,9

Tabla 6.43, parámetros de demanda

(f. J. Julia¹¹)

Con todo este conjunto de datos, que incluye los obtenidos directamente a través de la metodología diseñada y los procedentes de otros autores, se puede dar por finalizado este capítulo, ya que en este momento se poseen todas las herramientas necesarias para abordar el ensayo de Indicadores y su posterior análisis en busca de los objetivos expuestos al inicio de estos trabajos.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 6

¹ www.tmb.net/es_ES/home.jsp

² www.fgc.cat/cat/index.asp

³ www.renfe.es

⁴ www.atm.cat/indexcat.htm

⁵ www.tfl.gov.uk

⁶ www.metromadrid.es

⁷ www.ctm-marid.es

⁸ www.atm-mi.it/atm/

⁹ www.ratp.fr

¹⁰ www.sncf.com

¹¹ JULIÀ SORT, J. (2.006): *Redes Metropolitanas*. Agencia Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.

capítulo 7

ENSAYOS REALIZADOS SOBRE LOS INDICADORES DE OFERTA

7.1.- Introducción

Si se revisa la estructura seguida hasta el momento en la redacción de los trabajos, se observa una elaboración prácticamente lineal de los mismos. Así, el análisis efectuado se ha materializado en los siguientes puntos:

- Exposición teórica de los objetivos y criterios que guiarán los trabajos, fundamentados a través del estudio detallado de la literatura existente relacionada con los mismos.
- Definición de los Indicadores de Oferta escogidos para alcanzar los objetivos propuestos.
- Exposición de la metodología empleada para poder implementar los Indicadores de Oferta definidos en los distintos ámbitos de trabajo.
- Exposición de los resultados obtenidos para los diferentes Indicadores de Oferta considerados en cada área metropolitana.

Como se puede comprobar, hasta el presente momento se han tratado los elementos más formales o con mayor posibilidad de ser planificados de los trabajos. Estos cuatro puntos expuestos son ineludibles de abordar, ya que son elementos previos necesarios para el estudio en profundidad de las relaciones entre los Indicadores de Oferta y otros parámetros. Por ello, estos elementos se predeterminaron en el momento de concebir la naturaleza de los trabajos.

Una vez realizado el proceso de creación de la metodología, modelización de los ámbitos de trabajo, integración de los indicadores y presentación de los resultados obtenidos, ya se puede proceder a buscar relaciones entre las diferentes áreas metropolitanas, representadas por los distintos indicadores hallados. Estas relaciones buscadas podían ser intuitivas desde el inicio de la elaboración de los trabajos pero, no es menos cierto, que la incertidumbre dada por el desconocimiento del grado de definición de la metodología, no permitía aventurar los resultados que finalmente se han podido obtener.

A pesar de estas incertidumbres, fruto del propio proceso metodológico, las relaciones que se han encontrado y que se describen más adelante son del todo coherentes con el planteamiento inicial de los trabajos, consistente en buscar metodologías e indicadores compatibles y en identificar comportamientos interrelacionados en diferentes redes y ámbitos urbanos.

La búsqueda de estas interrelaciones a través de las metodologías diseñadas es el **objetivo básico** de este capítulo y, a su vez, parte fundamental de los trabajos, ya que dentro de su nombre, como culminación, aparece el epígrafe "*Ensayos sobre indicadores de Oferta*". Estas interacciones y relaciones entre indicadores se van a buscar a través de los diferentes ensayos realizados sobre los resultados obtenidos.

De esta manera, la **estructura del capítulo** va a consistir en desarrollar sistemáticamente los diferentes ensayos realizados sobre los resultados obtenidos con anterioridad, exponiendo el porqué de esos ensayos, analizando las consecuencias que se pueden extraer de los mismos e identificando posibles caminos a recorrer en futuros estudios sobre los Indicadores de Oferta.

Esta estructura a su vez posee cuatro bloques de ensayos básicos:

- 1)** Un primer bloque, dedicado a los ensayos realizados para poder obtener una metodología adecuada a los fines deseados.
- 2)** Un segundo bloque, en el que se analizan las interrelaciones de los diferentes Indicadores de Oferta entre sí, con el fin de encontrar relaciones de dependencia entre ellos.

3) Un tercer bloque, dedicado a la búsqueda de interrelaciones entre los Indicadores de Oferta hallados y diferentes indicadores asociados a otros ámbitos de la planificación, del transporte y del territorio.

4) Finalmente, un último bloque de ensayos, que se adentra en la naturaleza de las formas fractales dentro de las redes del transporte colectivo guiado.

Visto el camino a recorrer, se pasan a enumerar los distintos ensayos realizados.

7.2.- Exposición de resultados

De una manera un tanto enciclopédica, y para facilitar la lectura de los trabajos, se enuncian en este segundo apartado del capítulo séptimo todos los resultados obtenidos en los estudios realizados y aquellos tomados de otras publicaciones. En primer lugar, los indicadores de elaboración propia:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	66,74	81,97	55,95	61,26	74,62
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	73,11	89,44	62,92	63,14	82,35
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	11,06	6,17	8,56	6,93	7,82
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	11,02	6,60	9,31	6,34	7,03
Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,3790	0,4705	0,2763	0,3092	0,4092
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,4363	0,4986	0,3311	0,3612	0,4491
Indicador de Densidad (I_D)	0,46	0,48	0,41	0,35	0,51

Tabla 7.1, Indicadores de Oferta obtenidos

(f. propia)

En segundo lugar, se exponen otros datos de interés hallados durante la elaboración de los Indicadores de Oferta principales:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Superficie Ocupada por el proceso urbanizador (Km^2)	395,43	2.646,98	721,19	864,47	1.394,48
Superficie urbanizada y cubierta por la red de transporte colectivo (Km^2)	181,92	1.278,59	298,68	302,81	713,77
Radio ocupado por el área metropolitana (Km)	38	69	52	57	63

Tabla 7.2, parámetros de contorno obtenidos

(f. propia)

Finalmente se utilizarán parte de los indicadores descritos dentro del libro Redes Metropolitanas de Julià¹ (2.006):

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Superficie Ocupada (Km²)	3.240	10.380	2.890	2.500	12.010
Población (10⁶ hab)	4,20	11,60	4,80	4,30	10,70
Densidad (hab/Km²)	1.296,00	1.118	1.661	1.720	891
Red tte colectivo guiado (Km)	551	2.138	532	415	1.609
Red tte colectivo guiado (m red / Km²)	170	206	184	166	134
Red tte colectivo guiado (m red / 1000 hab)	131	184	111	97	150
Red tte por autopista (Km)	467	945	523	305	829
Red tte por autopista (m red / Km²)	144	91	181	122	69
Red tte por autopista (m red / 1000 hab)	111	81	109	71	78
Viajes / año / habitante	107	141	143	90	208
Viajes / año / Km de red	815,9	764,9	1290,8	932,5	1382,9

Tabla 7.3, otros parámetros considerados

(f. J. Julia¹)

Con todos los datos anteriormente expuestos, se van a realizar una serie de ensayos tendentes a la búsqueda de interrelaciones entre los propios indicadores definidos. A continuación se exponen los resultados más relevantes del análisis realizado:

7.3.- Relación entre los tiempos de viaje del operador y los tiempos de viaje de elaboración propia

7.3.1.- Introducción

El primer ensayo relevante que se ha realizado en los trabajos es incluso anterior a la obtención de los resultados, ya que, el propio proceso metodológico seguido, ha llevado a la necesidad de adaptar el procedimiento elaborado a las posibilidades de cálculo disponibles. Esta adaptación metodológica a la disponibilidad técnica ha llevado a la disyuntiva de plantear **cual sería el mejor método para calcular los tiempos de viaje** dentro de la red de transporte colectivo guiado.

7.3.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

La primera aproximación al problema de obtener los tiempos de viaje ha sido la creación de una metodología de cálculo de tiempos ya explicada en el capítulo 5 de estos trabajos. Esta posibilidad se escogió por la autosuficiencia que presenta el no depender de ningún dato externo para la realización de los diferentes cálculos. Sin embargo, el largo proceso de obtención de tiempos conllevó la necesidad de plantear otras alternativas de cálculo.

Tras un segundo proceso de reflexión, se optó por hallar los tiempos de viaje a través de los datos elaborados y ofrecidos por los operadores de la red. Este segundo proceso de cálculo ha presentado la ventaja de tener una mayor velocidad de desarrollo de los cálculos. Por el contrario presenta la desventaja de que no se adapta enteramente a las dimensiones de las redes tratadas, además de presentar la dificultad de que, en general, todas las redes están operadas por varios agentes.

A la vista de que los puntos débiles y fuertes de ambos métodos conseguían solaparse se pensó en la posible complementariedad de los métodos. De manera que resultaba más ventajosa la utilización de un método en unos casos y de otro método en otros casos. Ahora bien, para poder utilizar indistintamente ambos métodos se ha tenido que realizar un análisis de sensibilidad, comparando

idénticas medidas de tiempos con los dos métodos. El gráfico resultante del análisis efectuado se expone a continuación.

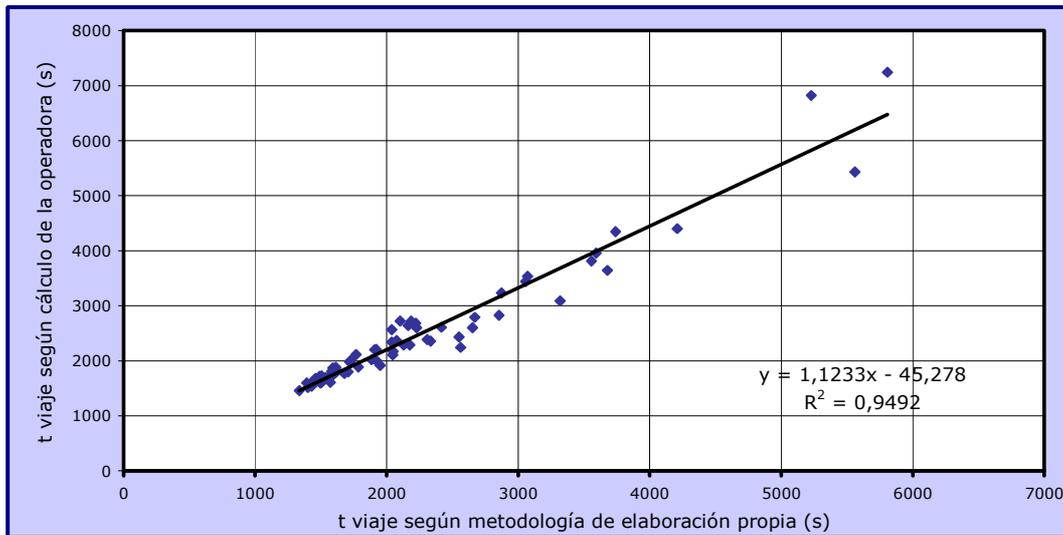


Figura 7.1, relación entre tiempos de viaje obtenidos con las dos metodologías para la red de Madrid (f. propia)

Como se puede comprobar, con el ejemplo estudiado se ha conseguido identificar una correspondencia entre tiempos bastante alta. Así, se ha obtenido una desviación media (r^2) de casi 0,95, el cual es un valor realmente elevado. Este es un primer elemento de confianza obtenido de la representación gráfica que se acaba de exponer, pero no es el único elemento que puede llevar a concluir sobre la correlación entre ambos procedimientos.

En segundo lugar, cabría atender a las diferencias existentes entre la regresión obtenida y la ecuación de la regresión que originase una correlación exacta. La expresión resultante de practicar la regresión lineal es la siguiente:

$$Y = 1,1233 \cdot X - 45,278$$

Para que ambos métodos resultasen absolutamente correlativos, la recta que debería haberse obtenido sería la siguiente:

$$Y = X$$

De las ecuaciones expuestas se pueden extraer dos nuevas conclusiones:

1) Los puntos en los que la ecuación obtenida corta a los ejes son los siguientes:

- $X=0$; $Y=-45,278$;
- $Y=0$; $X=40,308$;

Esto quiere decir que para los puntos obtenidos, cuyo valor llega hasta los 7.000 segundos, sólo se produce una desviación máxima de 45 segundos en el origen. Por lo tanto, la relación obtenida, además de presentar un valor de la desviación media elevado, puede considerarse válida en cuanto a que los puntos que se aproximan a su límite en cero son coherentes con los resultados físicos previstos.

2) Las pendientes de las rectas descritas anteriormente son las siguientes:

- $Y' = 1,1233$
- $Y' = 1$

La pendiente obtenida con la recta resultado es ligeramente superior a la pendiente de la recta dada por el resultado exacto. Esto quiere decir que a medida que la regresión va tomando valores mayores, la recta $Y=X$ no se aleja excesivamente de la recta configurada por el cruce de las

metodologías de obtención de tiempos. Por tanto, ambas rectas pueden considerarse aproximadamente equivalentes.

Con todos estos elementos de juicio puestos en juego, se posibilita la utilización de cualquiera de los métodos de cálculo de tiempos de viaje indistintamente.

7.3.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

Con la realización de este ensayo se ha podido comprobar la **validez de la metodología proyectada para el cálculo de tiempos de viaje** que se definió en un primer momento. De esta manera, contando con una estructura de personal y medios materiales más compleja, se abre la posibilidad de programar la red con totales garantías de obtener resultados fiables.

El desarrollo de esta metodología con una estructura operativa más numerosa puede permitir la obtención de herramientas de estudio de las redes más precisas y complejas que la que ahora se ha desarrollado. Estas nuevas herramientas de estudio, autosuficientes en cuanto a los datos a procesar, pueden permitir el estudio comparado de redes de transporte colectivo guiado, pero también pueden ser derivadas al estudio de otro tipo de redes de transporte, como las de autobuses metropolitanos o las de redes ferroviarias de largo recorrido, etc.

La segunda conclusión práctica extraída del análisis efectuado es la **equivalencia entre metodologías**. Esta equivalencia ayuda a completar el proceso de cálculo en casos de falta de datos y, además, se convierte en una característica de la metodología que le da versatilidad de respuesta ante problemas no advertidos inicialmente.

7.4.- Indicadores reducidos e indicadores completos

7.4.1.- Introducción

La necesidad de reducir la magnitud del proceso de cálculo se ha convertido en una oportunidad para estudiar una serie de aspectos relacionados con las redes. Así, al igual que en el apartado anterior fue necesario determinar la equivalencia entre los tiempos de viaje dados por los operadores y los tiempos de viaje hallados a través de la metodología elaborada, en este caso se plantea la necesidad de simplificar la cantidad de nodos de cálculo dentro de la red. De esta manera, será posible la obtención de una economía de trabajo sustancial, que a su vez permitirá una mayor extensión de la metodología en cuanto al número de ámbitos estudiados.

7.4.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

En la concepción de los grafos de las redes metropolitanas, en un primer momento se decidió jerarquizar y sistematizar el cálculo a los puntos básicos de la red, escogiéndose para ello los intercambiadores y los fines de línea. De esta manera, dentro de la concepción del modelo, se dejó para un segundo estadio de cálculo el resto de puntos de la red, que quedaron subordinados a los principales.

La jerarquización realizada en aquel momento del procedimiento determinó también la diferenciación de dos procedimientos de cálculo, un procedimiento complejo para la red de nodos principal y un procedimiento más simplificado, en el que el resto de las paradas se relacionaba únicamente con la estación principal de referencia condicionante de la utilidad de cada parada.

La utilización de esta estructura de cálculo ha permitido obtener dos resultados parciales para los tiempos de viaje dentro de cada Indicador considerado, uno referido únicamente a los tiempos de la red principal y otro asociado al conjunto de la red.

Por otro lado, los ámbitos escogidos han seguido tal orden de estudio que ha conllevado el cálculo inicial de Madrid y Barcelona para posteriormente continuar el cálculo con Londres. Este paso desde Madrid y Barcelona a Londres como tercera ciudad de estudio ha planteado numerosos retos metodológicos, debido al salto cuantitativo que suponen las 850 estaciones de su red de transporte colectivo guiado. De esta manera, aunque la intención inicial fue el estudio del indicador completo de la red, el cambio de magnitud experimentado en el paso dado al estudiar la ciudad de Londres, ha hecho reconsiderar la situación prevista en un inicio.

Este cambio en la orientación metodológica del cálculo de determinados Indicadores de Oferta, se acompaña por los resultados que se poseían de las ciudades en las que ya se habían hallado estos. Así, se decidió estudiar con más detalle las diferencias entre los indicadores reducidos y los indicadores completos que se poseían en ese momento, con el fin de identificar simplificaciones válidas para las ciudades con redes de tamaño máximo.

Los Indicadores de Accesibilidad calculados según los procedimientos reducidos y completos son los siguientes:

	MADRID	BARCELONA
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	55,95	66,74
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	62,92	73,11
Indicador de Accesibilidad Completo	62,96	79,33

Tabla 7.4, Indicadores de Accesibilidad calculados

(f. propia)

Los Indicadores de Cobertura calculados según los procedimientos reducidos y completos son los siguientes:

	MADRID	BARCELONA
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	8,56	11,06
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	9,31	11,02
Indicador de Cobertura Completo	7,74	8,95

Tabla 7.5, Indicadores de Cobertura calculados

(f. propia)

De las tablas se desprenden varias conclusiones:

1) En primer lugar, el orden de magnitud de los Indicadores es equivalente en todos los casos. Esto muestra la coherencia de los cálculos efectuados y la posibilidad de simplificación real que se produce.

2) En segundo lugar, las desviaciones numéricas que se producen entre los diferentes indicadores son siempre en la misma dirección. De esta manera los órdenes que se establecen son los siguientes:

- Dentro de los Indicadores de Accesibilidad, de menor a mayor son siempre el Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones, El Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones y el Indicador de Accesibilidad Completo.
- Dentro de los Indicadores de Cobertura, de mayor a menor son el Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones, El Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones y el Indicador de Cobertura Completo.

3) Se observa cómo, en cualquier caso, el Indicador Completo manifiesta un empeoramiento respecto al Indicador Reducido. Esto es debido a la dependencia de las nuevas paradas incorporadas respecto a las de la red reducida, por ello, se aumenta la accesibilidad media de la red y se disminuye la cobertura que presta la propia red.

Todos estos elementos que se desprenden de las tablas han llevado a establecer la posibilidad de basar la metodología en un cálculo simplificado asociado a los puntos más representativos de la red,

considerando como tales puntos las paradas con posibilidad de intercambio entre líneas y los fines de línea.

7.4.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

La principal conclusión obtenida con la realización de este ensayo es la constatación de la **potencialidad de los nodos con posibilidad de intercambio de las redes como punto de estudio** de las mismas, y la posibilidad de centralizar los esfuerzos de modelización de la red en una parte de tamaño menor a su totalidad.

Esta dirección tomada en el estudio de las redes es un camino interesante en el desarrollo de métodos que permitan la simplificación de redes complejas, orientados, por ejemplo, a la definición de alternativas de inversión o a la ampliación y modificación de redes.

7.5.- Delimitación del ámbito de trabajo, especialidades del caso de Barcelona

7.5.1.- Introducción

La delimitación del ámbito de trabajo se ha mostrado como el elemento crítico dentro del procedimiento. Como ya se ha comentado, la definición del ámbito determina la mayor parte de los condicionantes que formarán parte de los cálculos a efectuar a lo largo del estudio de cada caso y, por tanto, determina indirectamente muchos de los parámetros que van a ser objeto de cálculo y estudio. Se puede decir que **la definición del ámbito físico de trabajo es la condición de contorno fundamental**.

Por todo ello, merece la pena hacer mención, de manera concreta, al proceso de delimitación del ámbito de trabajo. Además, para ejemplificar las peculiaridades que se pueden esperar, se hace hincapié en el especial caso de la ciudad de Barcelona.

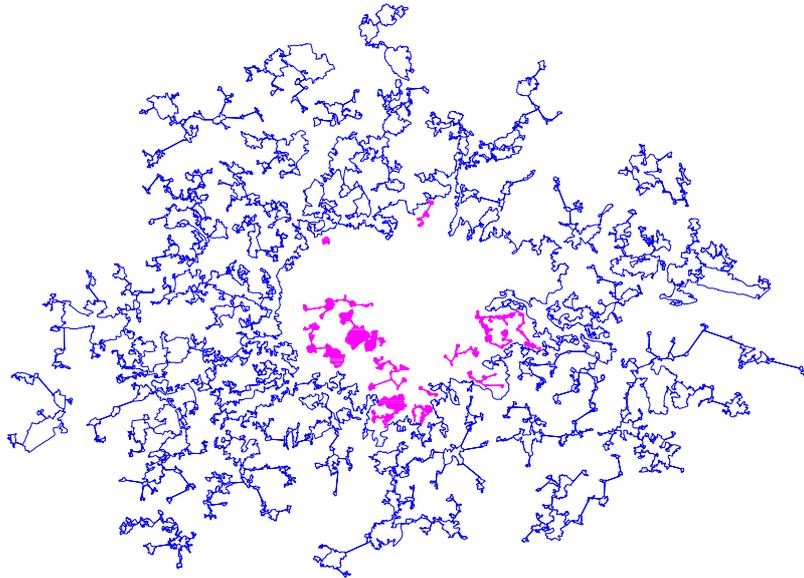
7.5.2.- Proceso seguido en la delimitación

El proceso de delimitación del ámbito de estudio de las diferentes ciudades requiere una **reflexión acerca del significado del concepto de área metropolitana**. Esta reflexión ha llevado a definir el área metropolitana como *"el espacio de ciudad construido, continuo o discontinuo, en el que se producen relaciones humanas de carácter presencial y diario, todo ello dado para un determinado instante de tiempo"*.

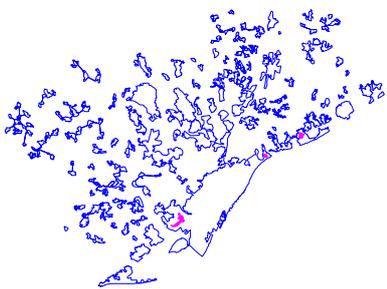
De esta definición se han podido extraer las diferentes consideraciones que han hecho viable la delimitación de las diferentes áreas metropolitanas de los trabajos. Así, se pueden obtener las siguientes determinaciones:

- 1)** La principal conclusión que se extrae es que el límite de un área metropolitana viene dado por el espacio construido. Es decir, para ser parte de un área metropolitana, el espacio tiene que haber sido sometido al proceso urbanizador, sino no se podrá considerar ciudad. De esta primera parte de la definición también se deduce que lo que realmente define a la ciudad es el límite urbanizado, sin embargo, la mayor parte de los datos se tienen según los límites administrativos.
- 2)** En segundo lugar, la edificación no necesariamente ha de darse de manera continua, es decir, puede ser discontinua. Esto quiere decir que la existencia de espacios no urbanizados entre ámbitos urbanizados no invalida la condición de área metropolitana de ninguna superficie.
- 3)** En tercer lugar, se deben producir relaciones humanas de carácter presencial y diario entre ámbitos. Esta es la circunstancia que liga en mayor medida el concepto de área metropolitana con el de movilidad y a su vez con la red de transporte. Las relaciones de carácter presencial y diario poseen unas características que las diferencian de otras relaciones, como pueden ser:

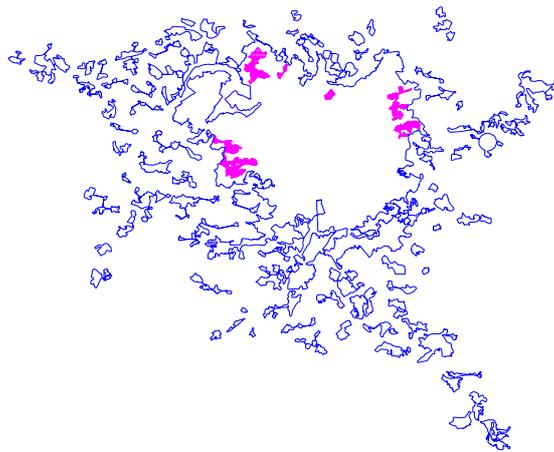
londres



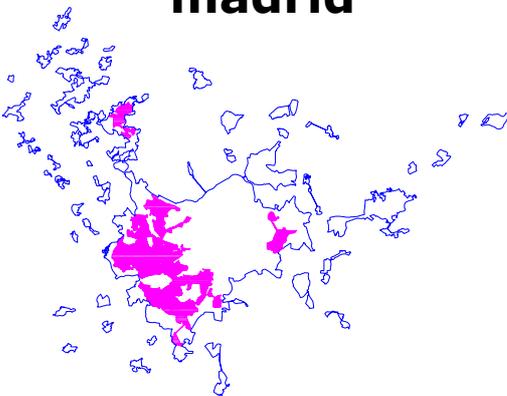
barcelona



parís



madrid



milán

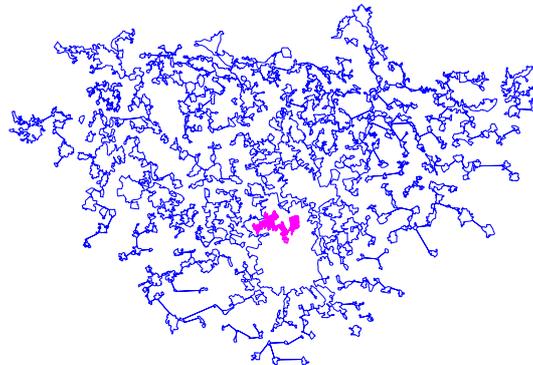


Figura 7.2, diferentes áreas metropolitanas estudiadas grafiadas a una misma escala

(f. propia)

- La proximidad necesaria de las relaciones, para que estas puedan ser diarias, requiere de unas distancias máximas, asociadas a tiempos de viaje, que imposibilitan la conexión entre determinados núcleos urbanos.
- Las relaciones diarias de proximidad llevan asociadas la existencia de asentamientos desde los que realizar estos desplazamientos y a los que volver. Estos asentamientos están íntimamente ligados al concepto de área metropolitana.

4) Finalmente, el área metropolitana debe ser determinada para un instante de tiempo determinado. Esto es debido al constante cambio morfológico que se produce en los límites del área metropolitana por el continuo proceso de urbanización.

La transposición de todos estos criterios al papel no es algo directo, ya que la casuística que se da en las diferentes áreas metropolitanas es muy variada. En cualquier caso, se pueden identificar unas líneas metodológicas más concretas que han sido seguidas como guía de la delimitación. Estas líneas metodológicas para la definición de los límites de las distintas áreas metropolitanas se han fundamentado en criterios, básicamente, físicos o morfológicos. De esta manera, se ha procurado:

- Identificar polos, infraestructuras, ejes y corredores de actividad que debieran incluirse por su densidad.
- Identificar accidentes geográficos como cadenas montañosas, ríos o el mar que en ocasiones pudieran determinar zonas de difícil avance para la ciudad.
- Incluir zonas con una densidad de urbanización similar, dejando fuera las zonas en que esta densidad construida decrece en relación con la superficie de suelo total.

Con todas estas directrices se ha conseguido delimitar las diferentes áreas metropolitanas de estudio. Así, se han identificado los ámbitos metropolitanos que son mostrados en la figura anterior, en la cual se representan las diferentes áreas metropolitanas a una misma escala, de manera que se puedan identificar los diferentes tamaños relativos de las mismas.

7.5.3.- Especificidad del caso de Barcelona

Dentro de la elección de las áreas metropolitanas, cabe tener una especial consideración con el caso de Barcelona.

En la elección de los ámbitos de estudio se han tenido en cuenta una serie de consideraciones, comentadas en el capítulo 5, que han hecho escoger las áreas metropolitanas de Barcelona, Londres, Madrid, Milán y París. Dentro de los criterios de determinación de estas ciudades no se ha considerado ninguno que tuviese en cuenta la morfología de dichas ciudades. Sin embargo, existe una circunstancia diferencial entre Barcelona y el resto de ciudades consideradas, este hecho es la presencia del mar dentro del área metropolitana de Barcelona y su configuración morfológica como ciudad costera.

Esta diferencia en la configuración territorial, representada en la siguiente figura, puede tener vinculaciones en los diferentes resultados obtenidos y se pone de manifiesto, principalmente, en dos elementos de cálculo:

1) En primer lugar, existe un desplazamiento relativo del centro de gravedad de la superficie asociada al área metropolitana. Así, si en las ciudades interiores el centro de gravedad de la superficie ocupada por el área metropolitana suele estar asociado al centro físico de la ciudad principal de dicha área metropolitana, en las ciudades costeras el centro de gravedad de la superficie asociada al área metropolitana está desplazado respecto al centro físico de la ciudad principal.

En general, el desplazamiento del centro de gravedad de la superficie asociada al área metropolitana respecto al centro de la ciudad principal, será de $4 \cdot R / 3 \cdot \pi$, siendo R el radio de la superficie asociada al área metropolitana, ya que geoméricamente se estará en un caso similar al del cálculo del centro de gravedad de un semicírculo.

2) La superficie asociada al área metropolitana, necesaria para calcular diversos parámetros, varía entre la ciudad interior y la ciudad costera. Así, la inclusión como área metropolitana de la superficie completa de las coronas circulares es bastante dudosa en el caso de las ciudades costeras.

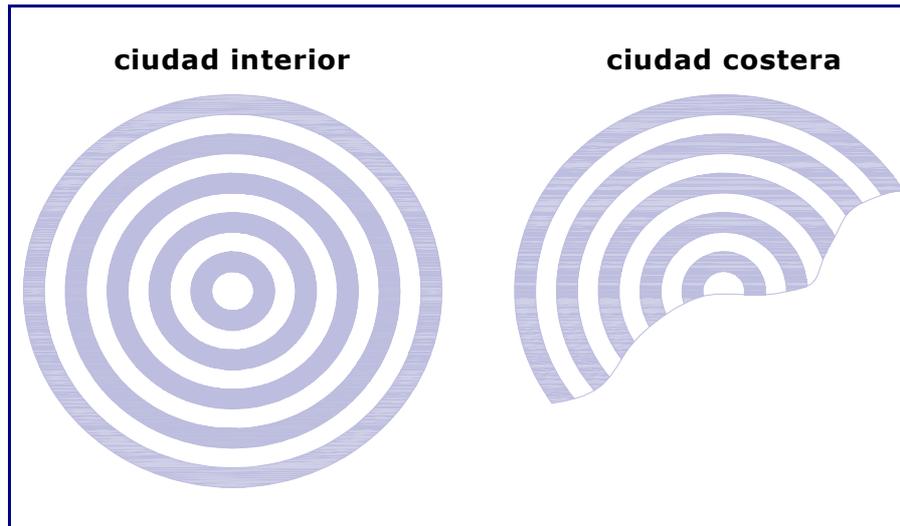


Figura 7.3, diferentes morfologías existentes

(f. propia)

Respecto al primero de los efectos indicados, se puede establecer una relación del mismo con los Indicadores de Accesibilidad obtenidos:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	66,74	81,97	55,95	61,26	74,62
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	73,11	89,44	62,92	63,14	82,35
Radio ocupado por el área metropolitana (Km)	38	69	52	57	63

Tabla 7.6, relación entre accesibilidad y superficie

(f. propia)

En primer lugar, como se puede observar, el Indicador de Accesibilidad asociado al área metropolitana de Barcelona presenta un mayor valor que el de ciudades de mayor superficie como pueden ser Milán o Madrid. De esta forma, siendo el Indicador de Accesibilidad una representación del tiempo medio de viaje entre estaciones de la red, se puede llegar a pensar que el desplazamiento del centro de gravedad asociado a las ciudades costeras repercute en el cálculo de los tiempos medios de viaje de las redes, ya que se produce un alejamiento del numeroso conjunto de estaciones de la ciudad central respecto al centro de gravedad de la ciudad y de la red.

Además de lo expuesto para el Indicador de Accesibilidad, se han identificado comportamientos relativamente apartados de la normalidad en otros ensayos realizados sobre los Indicadores de Oferta para el área metropolitana de Barcelona. A lo largo de la exposición se irán mostrando estos efectos encontrados.

En segundo lugar, respecto a los cálculos a realizar con las áreas de las superficies circulares asociadas a las áreas metropolitanas y relacionados principalmente con el Indicador de Fractalidad se ha optado por:

- 1)** No utilizar las superficies circulares completas para el caso de ciudades costeras (Barcelona únicamente en estos trabajos).
- 2)** Considerar el área de las dos primeras coronas circulares (radios de 1 y 2 kilómetros) como completamente integrantes de la definición de las superficies circulares. Este criterio se establece así debido a que el propio tamaño del centro físico de la ciudad construida hace que este se encuentre retranqueado un par de kilómetros respecto a la línea de la costa.
- 3)** Considerar el área del resto de superficies circulares al 60 % de la superficie total de las mismas (a partir del radio 3 kilómetros). Esto se realiza así por dos condicionantes básicos:

- El propio retranqueo de 2 kilómetros considerado del centro urbano hacia el interior hace que se abra el ángulo delimitado por la línea de costa por encima de los 180°, ángulo este que sería el definido por una línea diagonal de costa apoyada en el centro físico de la ciudad construida.
- El crecimiento en ejes de las redes en sus puntos más alejados del centro, debido a la menor madurez de las redes en estos ámbitos, hace difícil prever la existencia de estaciones simétricas a las ya existentes respecto a la línea de costa en un hipotético próximo eje hacia dentro del mar. En cambio, este crecimiento de la red según ejes, puede hacer considerar la simetría del eje ferroviario en cuanto a la superficie de influencia de la parada respecto al propio eje y en dirección hacia el mar. De esta forma, parece más razonable pensar en una superficie de influencia simétrica respecto a la línea de costa que en una duplicación de estaciones y, por tanto, parece adecuado el aumentar la superficie del eje en una cantidad que permita tener en cuenta este efecto de tener un eje establecido y sólo construido en uno de sus lados.

Con todo este razonamiento, para el procesamiento y cálculo de una ciudad costera (en este caso Barcelona), a efectos del cálculo fractal se ha considerado la superficie del conjunto de las coronas circulares para los 2 primeros kilómetros de ciudad, y del 60% de la superficie del resto de las coronas circulares.

7.5.4.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

Las conclusiones obtenidas con este ensayo pueden dividirse en dos planos, uno que aborda el punto de vista metodológico de la definición de los límites de la ciudad y otro que tiene en cuenta el punto de vista de la excepción que supone el haber analizado el caso de una ciudad costera.

Desde el punto de vista de la definición del ámbito, la primera conclusión que se obtiene es la tremenda **dificultad que supone delimitar un área metropolitana**. La inicial definición y la siguiente materialización de lo definido en líneas sobre el territorio se configuran como tareas interpretativas de la configuración física del territorio. Todo ello hace que la definición y la aplicación práctica de la definición sean susceptibles de ser rebatidas y alteradas por sucesivas interpretaciones. Sin embargo, con los elementos de juicio y criterio que se han introducido en los trabajos se ha pretendido configurar una herramienta lo suficientemente fiable para el estudio de esta delimitación física.

A través de los datos extraídos del estudio diferencial del área metropolitana de Barcelona se puede decir que **la propia morfología del área metropolitana puede llegar a modificar los resultados en el cálculo de los Indicadores de Oferta**. Esta afirmación, en cualquier caso, debe ser desarrollada a través del estudio de diferentes casuísticas de áreas metropolitanas de límites morfológicos comparables.

Así, una propuesta interesante de desarrollo de los trabajos sería escoger para el estudio una serie de ciudades interiores y otra serie de ciudades costeras, e intentar cruzar resultados entre ellas. De esta manera, se podría determinar si existen diferentes familias de rectas de regresión independientes según la morfología estudiada.

7.6.- Correlación entre los indicadores similares obtenidos

7.6.1.- Introducción

El desarrollo metodológico de los trabajos ha llevado a la definición de pares de indicadores similares sobre idénticos conceptos. Así, para los Indicadores de Accesibilidad y Cobertura, se han definido dos aproximaciones en ambos casos. Una primera, asociada al número de estaciones de la red y, una segunda, asociada a la superficie cubierta por las estaciones de la red.

Igualmente, para el Indicador de Fractalidad se han definido otras dos interpretaciones del mismo. Una primera asociando el valor de cero al logaritmo de cero, lo cual supone otorgar igual utilidad a la

existencia de una y de ninguna estación dentro de la corona circular en estudio. La segunda interpretación se ha hecho incrementando en uno el valor del número de paradas de cada corona circular, lo cual conlleva incrementar logarítmicamente la utilidad de las coronas con menos estaciones.

En último lugar, se ha realizado una interpretación unívoca de los resultados del Indicador de Densidad.

7.6.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

Para la determinación del grado de equivalencia existen entre los indicadores similares estudiados se han relacionado estos dos a dos. Para ello se han identificado los resultados por ciudades y se han comparado según los diferentes gráficos expuestos.

Para el Indicador de Accesibilidad se obtienen los siguientes resultados:

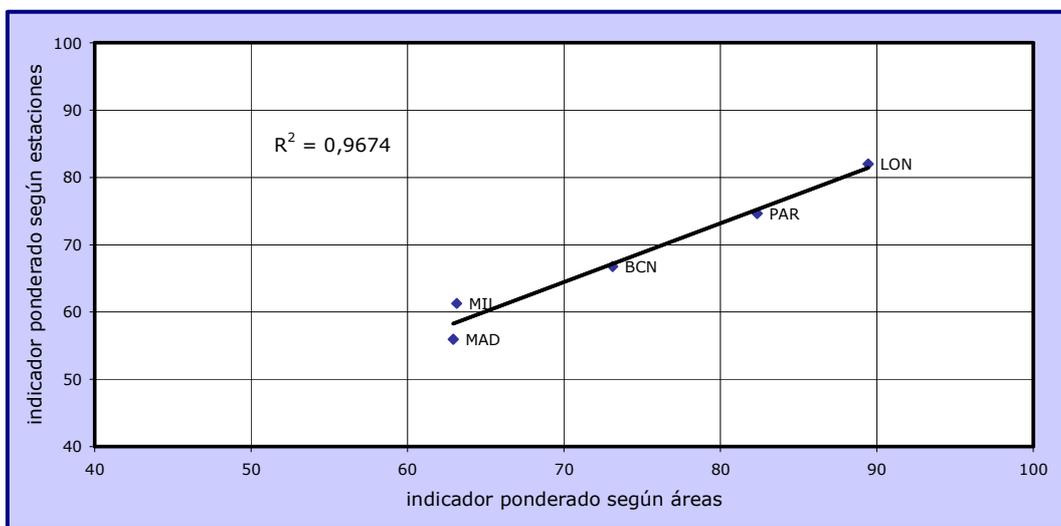


Figura 7.4, relación entre Indicadores de Accesibilidad similares

(f. propia)

Siendo los parámetros usados para representar la accesibilidad los siguientes:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{A(e)}$)	66,74	81,97	55,95	61,26	74,62
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	73,11	89,44	62,92	63,14	82,35

Tabla 7.7, Indicadores de Accesibilidad obtenidos

(f. propia)

Para el estudio de los Indicadores de Cobertura se obtienen los siguientes valores:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	11,06	6,17	8,56	6,93	7,82
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	11,02	6,60	9,31	6,34	7,03

Tabla 7.8, Indicadores de Cobertura obtenidos

(f. propia)

La representación gráfica de dichos valores es la mostrada en la siguiente figura:

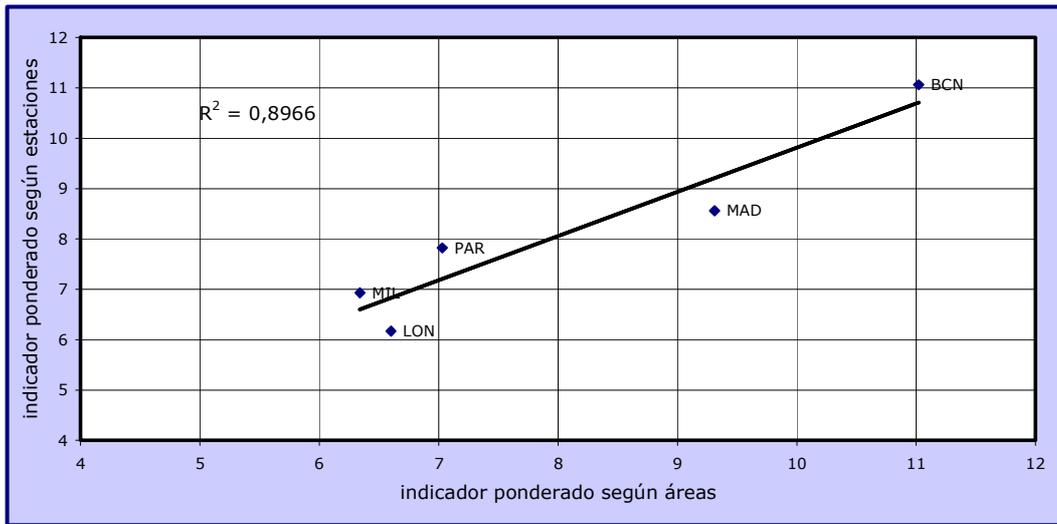


Figura 7.5, relación entre Indicadores de Cobertura similares

(f. propia)

Siendo los parámetros representados los siguientes:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado al Número de Estaciones ($I_{C(e)}$)	11,06	6,17	8,56	6,93	7,82
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	11,02	6,60	9,31	6,34	7,03

Tabla 7.9, Indicadores de Cobertura obtenidos

(f. propia)

Finalmente, en la representación de la fractalidad, la representación gráfica obtenida es la mostrada a continuación:

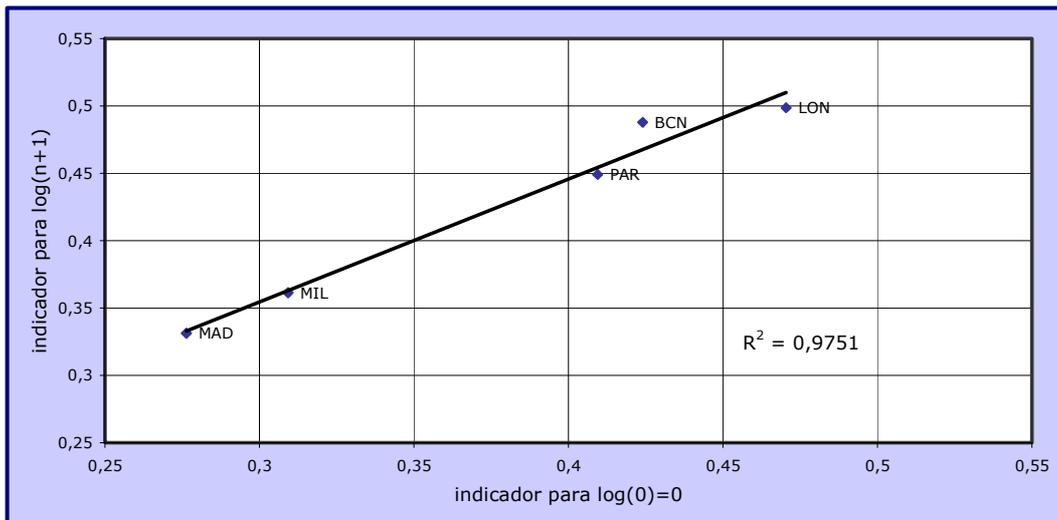


Figura 7.6, relación entre Indicadores de Fractalidad

(f. propia)

Los indicadores calibrados han sido los siguientes:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,3790	0,4705	0,2763	0,3092	0,4092
Indicador de Fractalidad tras añadir una parada en cada corona circular ($I_{F(1)}$)	0,4363	0,4986	0,3311	0,3612	0,4491

Tabla 7.10, Indicadores de Fractalidad obtenidos

(f. propia)

Como se puede observar, existe dependencia lineal entre los indicadores comparados. Ésta se demuestra gracias al alto grado de correlación que se aprecia en la desviación media de las muestras representadas:

- Indicadores de Accesibilidad: $r^2=0,9674$.
- Indicadores de Cobertura: $r^2=0,8966$.
- Indicadores de Fractalidad: $r^2= 0,9751$.

Con estas desviaciones medias se demuestra la inalterabilidad en los resultados que se pueden obtener, independientemente del indicador escogido entre el par de ellos disponibles. Sin embargo, estos resultados no quieren decir que se vayan a utilizar ambos indicadores indistintamente. Desde el ámbito de estos trabajos, y dado que uno de los objetos buscados es la determinación de los efectos de las redes sobre el territorio, se van a utilizar, salvo justificación contraria en casos especiales, aquellos indicadores que mayor relación teórica presentan en su interacción con el territorio. De esta manera:

1) Para los indicadores de accesibilidad y cobertura se van a utilizar los indicadores ponderados según el área de cobertura de las estaciones. Con esta elección se pone en relación la red con la superficie de ciudad que interactúa con ella y, de esta manera, se consiguen introducir en el modelo, en mayor medida, los efectos territoriales.

2) Dentro de los indicadores de fractalidad seleccionados se elegirá aquel que otorga la misma utilidad a la existencia de ninguna y una paradas dentro de una corona circular. De esta manera, se distorsionará en menor medida el número total de paradas de la red al proceder a su análisis por coronas. Además, se considera más válido el asignar igual utilidad a la existencia de una o ninguna parada dentro de una corona circular, que el deformar logarítmicamente todas las coronas al añadir una parada.

De esta manera, tras la calibración de los diferentes indicadores semejantes calculados, se tienen identificados los indicadores que van a ser utilizados para la realización de ensayos a lo largo de los apartados siguientes.

7.6.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

La principal conclusión de esta primera aproximación a los indicadores calculados es la correlación existente entre la ponderación realizada con el número de estaciones y la ponderación realizada con el área servida por las paradas de la red.

Esta **correlación entre los indicadores semejantes calculados** puede permitir la utilización de una u otra aproximación al indicador, en el caso de que existiera dificultad en el cálculo de alguno de los parámetros que los conforman. En concreto, puede permitir el desembarazarse de los cálculos relativos a las áreas de cobertura de las estaciones, cálculos estos que pueden ser de más difícil cuantificación en la mayoría de los casos que el del número de estaciones.

7.7.- Relación entre los indicadores calculados

7.7.1.- Introducción

El presente capítulo ha abordado hasta este apartado o el anterior, según la interpretación que se haga, lo que podría ser el primer grupo de ensayos realizados sobre los indicadores, basados principalmente en la calibración y puesta a punto de la metodología. Una vez se ha realizado esta tarea inicial se puede pasar al **segundo bloque de ensayos**, dedicado a estudiar las diferentes relaciones que se plantean entre los indicadores de oferta elaborados. Dentro de este segundo bloque a desarrollar, la primera cuestión que cabe plantearse es la posible existencia de relaciones entre los distintos indicadores escogidos y definidos en el capítulo cuarto. De esta manera, se va a proceder a buscar relaciones que permitan esclarecer la posible dependencia entre los mismos.

7.7.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

Para la determinación de las posibles equivalencias entre los distintos indicadores, se van a representar los mismos dos a dos. Así, a través de la representación gráfica y de la determinación de la desviación media de dicha relación, se podrá identificar si existen indicadores interrelacionados. Para facilitar la comprensión del proceso, se recuerdan los indicadores de oferta definidos que van a ser objeto de estudio:

	BARCELONA	LONDRES	MADRID	MILÁN	PARÍS
Indicador de Accesibilidad Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{A(a)}$)	73,11	89,44	62,92	63,14	82,35
Indicador de Cobertura Reducido Ponderado según el Área de Cobertura de las Estaciones ($I_{C(a)}$)	11,02	6,60	9,31	6,34	7,03
Indicador de Fractalidad tras aplicar el valor de 0 al logaritmo de 0 ($I_{F(0)}$)	0,3790	0,4705	0,2763	0,3092	0,4092
Indicador de Densidad (I_D)	0,46	0,48	0,41	0,35	0,51

Tabla 7.11, Indicadores de Oferta a ensayar

(f. propia)

A continuación se muestran las correlaciones efectuadas:

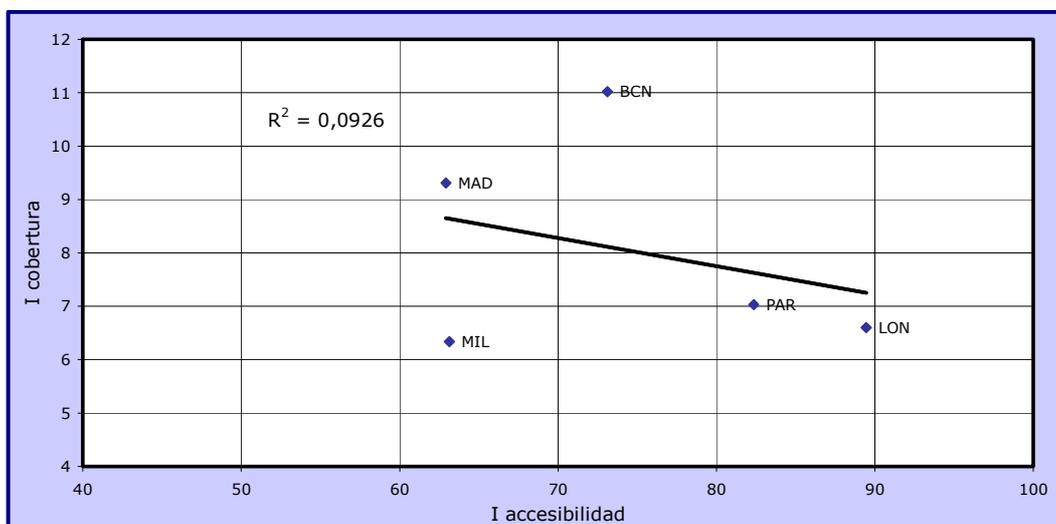


Figura 7.7, relación entre el Indicador de Accesibilidad y el de Cobertura

(f. propia)

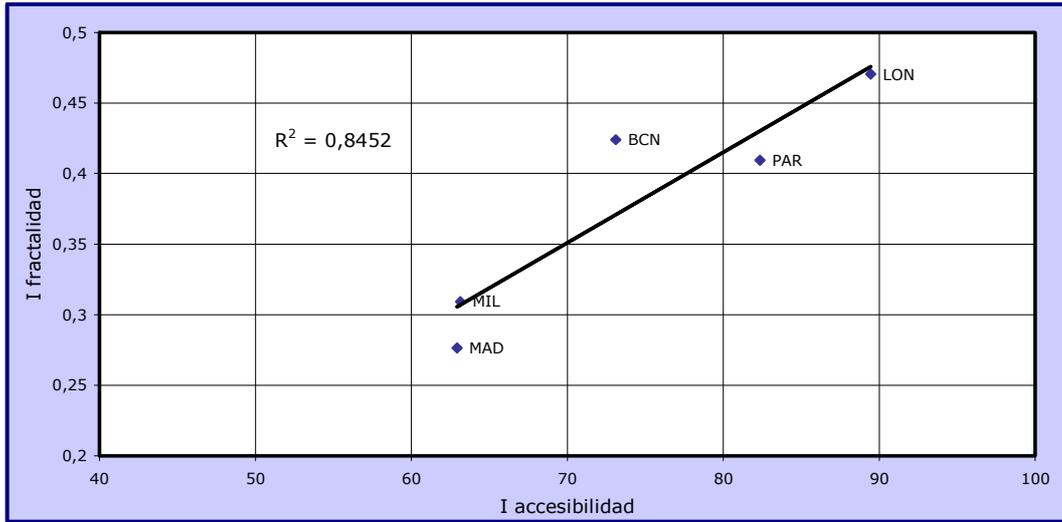


Figura 7.8, relación entre el Indicador de Accesibilidad y el de Fractalidad (f. propia)

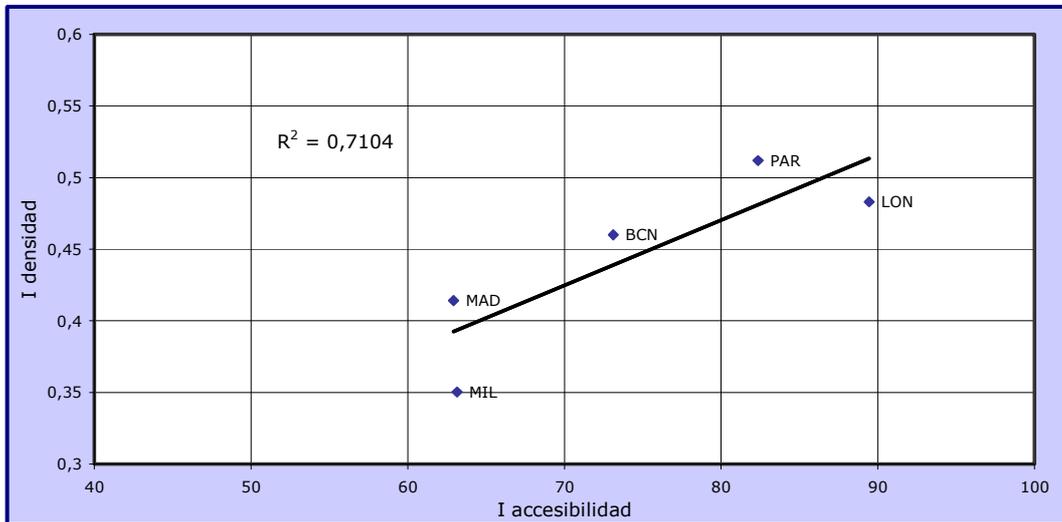


Figura 7.9, relación entre el Indicador de Accesibilidad y el de Densidad (f. propia)

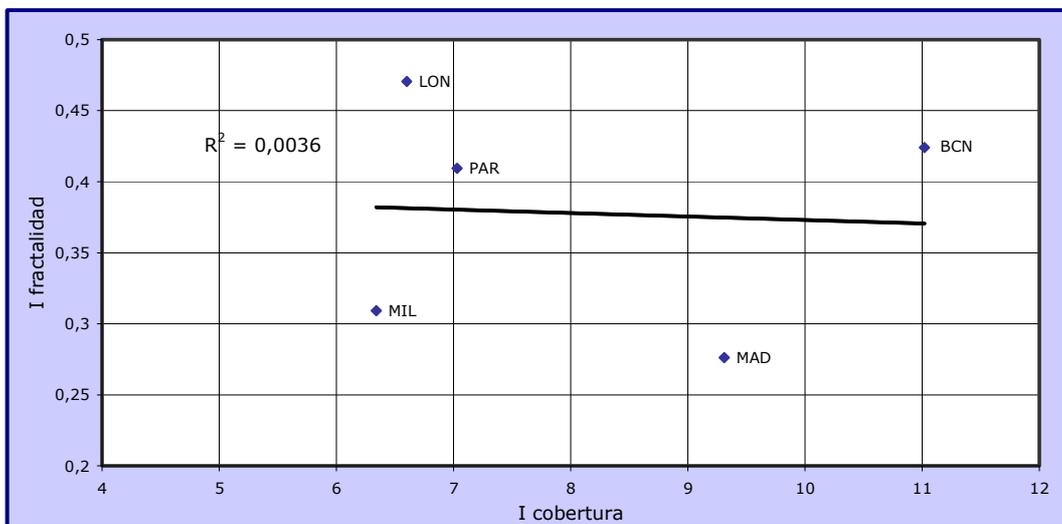


Figura 7.10, relación entre el Indicador de Cobertura y el de Fractalidad (f. propia)

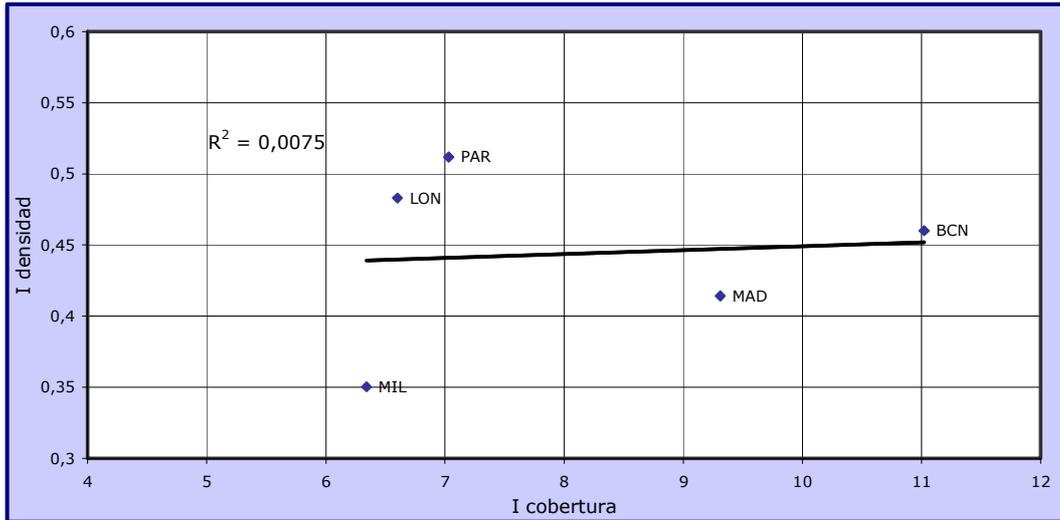


Figura 7.11, relación entre el Indicador de Cobertura y el de Densidad

(f. propia)

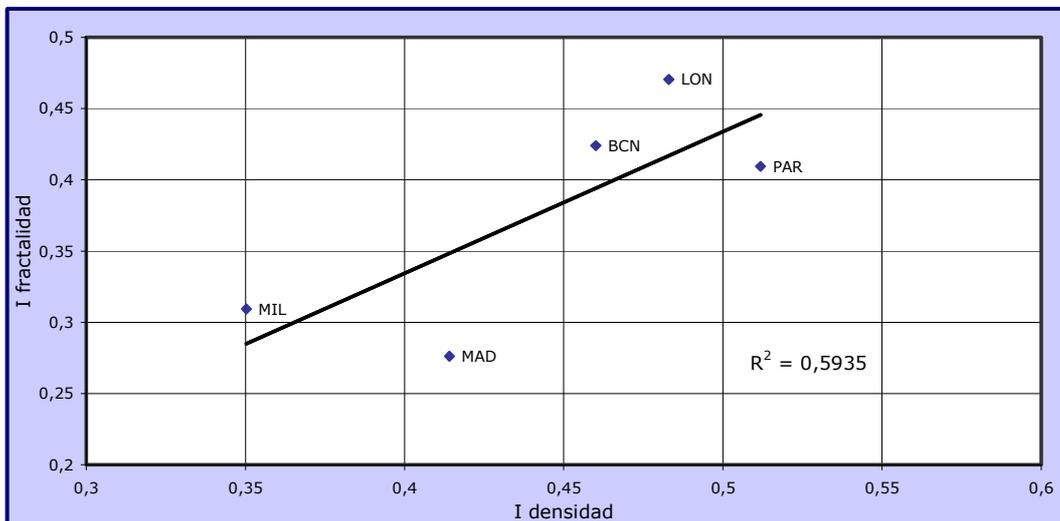


Figura 7.12, relación entre el Indicador de Densidad y el de Fractalidad

(f. propia)

De la observación de los gráficos se pueden extraer diferentes conclusiones. En primer lugar, se puede establecer que existen relaciones dependientes y relaciones independientes entre los diferentes indicadores analizados. Así, a través del estudio de la desviación media se puede determinar que **existe una relación entre los indicadores de accesibilidad, fractalidad y densidad**, ya que:

- Para la relación I_A-I_F , $r^2=0,8452$.
- Para la relación I_A-I_D , $r^2=0,7104$.
- Para la relación I_F-I_D , $r^2=0,5935$.

En segundo lugar, **respecto al indicador de cobertura**, se puede extraer a través de las desviaciones medias obtenidas, que **no existe interrelación** del mismo con el resto de indicadores:

- Para la relación I_C-I_A , $r^2=0,0926$.
- Para la relación I_C-I_F , $r^2=0,0036$.
- Para la relación I_C-I_D , $r^2=0,0075$.

El análisis de los resultados obtenidos proporciona una visión sobre los indicadores muy interesante, ya que el proceso metodológico de cálculo de los indicadores de accesibilidad, fractalidad y densidad

es independiente. De esta forma, para su cálculo se han utilizado procedimientos diferentes basados en la determinación de parámetros distintos, que son los ahora expuestos de manera resumida:

- 1) Para el cálculo del Indicador de Accesibilidad se han utilizado, básicamente, los tiempos de viaje entre las diferentes estaciones.
- 2) Para el cálculo del Indicador de Fractalidad se han utilizado como parámetros el número de estaciones y una superficie asociada a coronas circulares de radio creciente. Estos parámetros no han sido utilizados en la elaboración de ningún otro indicador.
- 3) Para el cálculo del Indicador de Densidad se han utilizado las superficies urbanizadas y las superficies cubiertas por la red de transporte.

La **independencia de los parámetros de cálculo entre los indicadores** es el elemento básico que aporta la debida confianza en la bondad de los resultados obtenidos.

Así, esta independencia entre los parámetros de cálculo de los Indicadores dependientes se hace más evidente cuando se compara con la relativa similitud existente entre los parámetros usados para la definición del Indicador de Accesibilidad y del Indicador de Cobertura. En ambos indicadores se encuentran incluidos los tiempos de viaje y, por tanto, se podía esperar la existencia de cierta correlación al establecer su recta de regresión.

Con estos resultados se pueden crear dos grupos de Indicadores independientes, que reflejarán relaciones diferentes con las infraestructuras del transporte y con el territorio. Así, por un lado existirá el grupo formado por los Indicadores de Accesibilidad, Fractalidad y Densidad y, por otro lado, el grupo formado por el Indicador de Cobertura.

7.7.3.- Consideraciones asociadas al caso especial de Barcelona

A lo largo del apartado 7.5 se ha hecho una reflexión sobre el caso específico de Barcelona, en concreto se ha hablado sobre las implicaciones de su condición de ciudad costera en la geometría del ámbito de trabajo. Dentro de estas implicaciones, se establecía un paréntesis en el que se abordaba la posibilidad de estudiar por un lado las ciudades costeras y por otro lado las ciudades interiores.

Debido a ello, dentro de este capítulo se han ensayado los resultados anteriores eliminando el área metropolitana de Barcelona de los cálculos. Los resultados obtenidos de esta manera, mostrados en clave de desviaciones medias, son los siguientes:

	CONJUNTO DE TODAS LAS CIUDADES	SÓLO CIUDADES INTERIORES
r² para la relación de I_A-I_C	0,0926	0,2056
r² para la relación de I_A-I_F	0,8452	0,9747
r² para la relación de I_A-I_D	0,7104	0,7399
r² para la relación de I_C-I_F	0,0036	0,3338
r² para la relación de I_C-I_D	0,0075	0,0027
r² para la relación de I_F-I_D	0,5935	0,5965

Tabla 7.12, desviaciones medias entre los Indicadores de Oferta a ensayados

(f. propia)

Gracias a estos resultados, se puede decir que las relaciones establecidas considerando solamente las ciudades interiores vienen a reafirmar las conclusiones establecidas con anterioridad. Así, aún con la disminución de un punto y teniendo en cuenta la pequeña muestra de ciudades considerada, se pueden establecer dos consecuencias fundamentales de la extracción de la ciudad de Barcelona del análisis:

- 1) Los indicadores interrelacionados, accesibilidad, fractalidad y densidad, mejoran sus desviaciones medias, lo cual a su vez determina otras dos consecuencias:
 - Se reafirma el hecho de que existe dependencia entre determinados indicadores.

- La dependencia entre indicadores es mayor al extraer del análisis la ciudad de Barcelona.

2) El indicador no interrelacionado mejora en dos de las comparativas realizadas y empeora en una tercera, de este punto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El indicador de cobertura es divergente en sus relaciones en cuanto a las ciudades con las que se establecen las comparaciones.
- Las relaciones que mejoran su desviación media no llegan a alcanzar unos valores que permitan hablar de relación entre los indicadores comparados.

Con estas determinaciones se puede establecer que las conclusiones obtenidas hasta este momento siguen siendo válidas, incluidas las procedentes del ensayo de considerar únicamente las ciudades interiores dentro del análisis.

7.7.4.- Primeras conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

La principal conclusión que se extrae de este ensayo es la **relación existente entre determinados indicadores de oferta**. Esta relación tiene una repercusión inmediata sobre la investigación de la planificación, del transporte y del territorio a través de los indicadores de oferta, y es la **posibilidad de utilizar unos u otros indicadores, según la facilidad de obtención de los mismos** que se tenga en cada situación concreta.

Analizando los resultados más detalladamente, **el Indicador de Fractalidad se puede configurar como una herramienta muy potente, debido a su facilidad de cálculo**. A través del análisis de la fractalidad de las redes de transporte se pueden realizar unas primeras aproximaciones bien para identificar la accesibilidad ofrecida por la misma o bien para determinar el grado de consolidación, o densidad, que el territorio presenta a través de su interrelación con la cobertura ofrecida por la red de transporte colectivo guiado.

La teoría fractal, a través de la propiedad de la autosimilitud, indica que las redes maduras presentan iguales relaciones fractales si se toman como un todo o como una parte. Esta lectura del indicador puede servir a la hora de ayudar a identificar qué zonas del territorio cubierto por la red presentan unas mayores necesidades de inversión en infraestructura, de esta manera, y a través de una sencilla modelización, se puede estudiar la distribución equitativa de inversiones públicas en el campo de las infraestructuras del transporte.

Evidentemente, a raíz de estas determinaciones, se abren numerosas vías de investigación sobre proyectos de planificación y de inversión, ya que la tenencia de nuevas herramientas de estudio siempre puede ayudar a la mejor comprensión de los ámbitos sobre los que se trabaja.

7.8.- Interpretación teórica de la relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad y conclusiones que se extraen de dicha relación

7.8.1.- Introducción

De las equivalencias obtenidas entre los indicadores estudiados se pueden deducir numerosas aplicaciones y vías de estudio. Dado que de los indicadores estudiados, el que hace referencia a la fractalidad es aquel de más fácil cálculo y el que puede permitir unas interpretaciones más novedosas de las redes, se va a hacer una interpretación del mismo en relación con el resto de indicadores relacionados que han sido estudiados.

En este primer caso, se va a realizar una interpretación teórica de la relación existente entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad.

7.8.2.- Interpretación de la relación encontrada entre los Indicadores de Fractalidad y Densidad

Para realizar una interpretación teórica de la relación existente entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad, merece la pena refrescar los conceptos asociados a los mismos individualmente:

- 1) En primer lugar, la fractalidad representa una característica morfológica de las redes, que asocia la longitud de estas redes con la superficie cubierta por las mismas, apareciendo esta relación en numerosas formas naturales.
- 2) En segundo lugar, el Indicador de Densidad es una relación entre superficies, en concreto entre la superficie eficazmente servida por la red de transporte (consideración esta efectuada en virtud de criterios puramente morfológicos y no de servicio del transporte), y la superficie urbanizada en un área metropolitana.

De la unión de estos dos conceptos se desprende que la relación entre la superficie servida por la red y la superficie urbanizada está relacionada con una característica natural de las redes. Además no sólo existe esta relación, sino que es una relación directa, por tanto para relaciones fractales más complejas se presentan indicadores de densidad más elevados.

Toda esta argumentación conduce a que las redes con mejores relaciones fractales son capaces de cubrir el espacio urbanizado de mejor manera y, por tanto, sirven mejor al territorio, ya que generan menos porcentaje de superficie no cubierta por el transporte público.

Por tanto, **las redes con mayor índice de fractalidad** sirven mejor al habitante de las áreas metropolitanas, ya que **generan menos áreas carentes de servicio público de transporte colectivo guiado**.

7.9.- Interpretación de la relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad y conclusiones que se extraen de dicha relación

7.9.1.- Introducción

En este ensayo se va a buscar la relación que une físicamente el significado del Indicador de Accesibilidad con el del Indicador de Fractalidad. Dada la importancia que tiene el establecer un nexo teórico entre ambas magnitudes, este apartado se convierte en relevante dentro de los trabajos elaborados.

7.9.2.- Interpretación de la relación encontrada

Como ya se ha mostrado en las regresiones graficadas en el capítulo 7.7, existe una relación lineal entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Fractalidad. Esta relación viene a decir que a medida que aumenta el grado de fractalidad de la red, aumenta el Indicador de Accesibilidad de esta, o lo que es lo mismo, el tiempo medio de viaje de la red.

Esta relación tiene sentido físico desde el punto de vista de que las redes con mayor índice de fractalidad son las más maduras y éstas, a su vez, son las que se encuentran sobre áreas metropolitanas de mayor superficie. Esta mayor superficie es a su vez el motivo que supone un aumento en los tiempos medios de viaje entre estaciones.

Sin embargo, aunque esta relación hallada tenga sentido físico, constatando una realidad dentro de las áreas metropolitanas, se pueden establecer otras interpretaciones más reveladoras. Por eso, en este momento se considera adecuado el analizar la relatividad de los indicadores respecto a las distintas ciudades. De esta manera, el Indicador de Accesibilidad es un indicador relativo, en cuanto que el tamaño de la ciudad influye en el tiempo medio de viaje de los ciudadanos. Ante esto cabe

establecer que, sin embargo, el Indicador de Fractalidad es un indicador aséptico en cuanto a su afección por el tamaño de la ciudad sobre la que se asienta la red, es más, la teoría fractal estima que la relación fractal se repite tanto en la parte como en el todo dentro de las formas fractales.

Determinado esto surge la idea de establecer un indicador sintético respecto a la superficie de las áreas metropolitanas y que englobe al Indicador de Accesibilidad. De esta manera se plantea el siguiente ensayo, que consiste en establecer este Indicador de Accesibilidad Sintético de la Superficie, y que se formula dividiendo el Indicador de Accesibilidad entre la superficie del área metropolitana a la que se refiere dicho Indicador de Accesibilidad.

$$I_{A'} = I_A/S$$

Siendo:

- $I_{A'}$: Indicador de Accesibilidad sintético de la superficie del área metropolitana.
- I_A : Indicador de Accesibilidad.
- S: Superficie del área metropolitana en estudio.

Si se comparan los resultados de este nuevo indicador con el Indicador de Fractalidad se obtiene la siguiente representación gráfica:

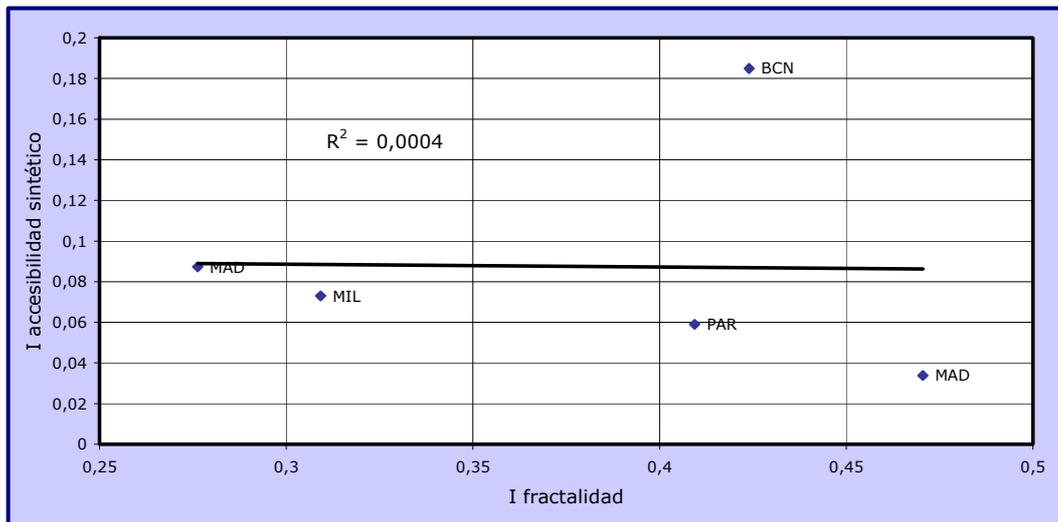


Figura 7.13, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el de Fractalidad en todo ámbito (f. propia)

Como se puede comprobar con la gráfica representada, este ensayo no parece mostrar una correlación clara, ya que el valor de la desviación media desciende hasta $r^2 = 0,0004$. Este resultado podría hacer desistir de la interrelación ensayada, sin embargo, de la observación de la gráfica se comprueba que el punto correspondiente a la ciudad de Barcelona altera los resultados de manera significativa.

Esta forma en que el área metropolitana de Barcelona puede alterar determinados resultados ya ha sido ampliamente comentada en el apartado 7.5 y otros de los presentes trabajos. Debido a todo lo explicado, se ha procedido a realizar el mismo ensayo eliminando del mismo los datos pertenecientes a dicha área metropolitana de Barcelona. La relación gráfica obtenida es la mostrada en la figura siguiente.

Esta regresión presenta un grado de correlación mucho más interesante, con una desviación media de $r^2 = 0,9504$, por ello, se pasa a interpretar este resultado.

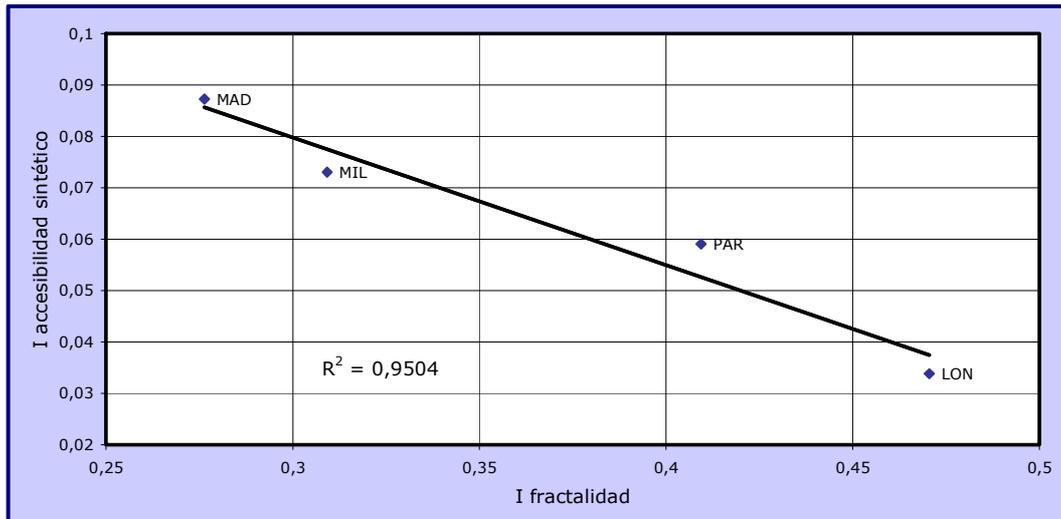


Figura 7.14, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el de Fractalidad sin Barcelona (f. propia)

Dado por bueno este supuesto previo, se observa que para mantener constante la relación entre I_f e $I_{A'}$, a valores más altos del Indicador de Fractalidad se requieren valores más bajos del Indicador de Accesibilidad Sintético. Esto quiere decir que a medida que va aumentando el Indicador de Fractalidad de la red van disminuyendo los valores del índice de Accesibilidad Sintético, o lo que es lo mismo, va disminuyendo la media de los tiempos que se requieren para desplazarse desde un punto al resto de los de la red.

Por tanto, **a medida que va aumentando la fractalidad de la red, ésta va teniendo una mayor utilidad para el usuario de la misma**. Además, cuando se habla del concepto de red, éste se puede extender al de área metropolitana en general, ya que como se ha explicado anteriormente, se está trabajando con el Indicador de Accesibilidad ponderado por las áreas de cobertura de las diferentes estaciones o nodos de conexión.

Con este ensayo se ha visto que el aumento del Indicador de Fractalidad hace mejorar los tiempos medios de viaje dentro de las ciudades, consideradas éstas como superficie urbanizada. Pero cabe preguntarse qué ocurre si en vez de superficie urbanizada se pondera el ensayo con la superficie realmente cubierta por la red de transporte, o sea, si se emplea el indicador establecido por la siguiente expresión:

$$I_{A''} = I_A / (\sum_{(i:1...N)} A_i)$$

Siendo:

- $I_{A''}$: Indicador de Accesibilidad sintético de la superficie cubierta por la red.
- I_A : Indicador de Accesibilidad.
- A : Área de cobertura de cada estación.
- N : Número de paradas consideradas dentro del análisis pormenorizado.

De esta forma, el gráfico obtenido para el caso consistente en la incorporación de la totalidad de las estaciones que han sido estudiadas es el mostrado en la figura siguiente.

Como se puede observar, se obtiene una gráfica muy similar para el caso de la superficie servida por la red a la obtenida anteriormente con superficie ocupada por el conjunto del área metropolitana. En este ensayo, igualmente, se obtiene una desviación media muy baja, siendo $r^2=0,0288$, valor éste tan pequeño como el anteriormente obtenido.

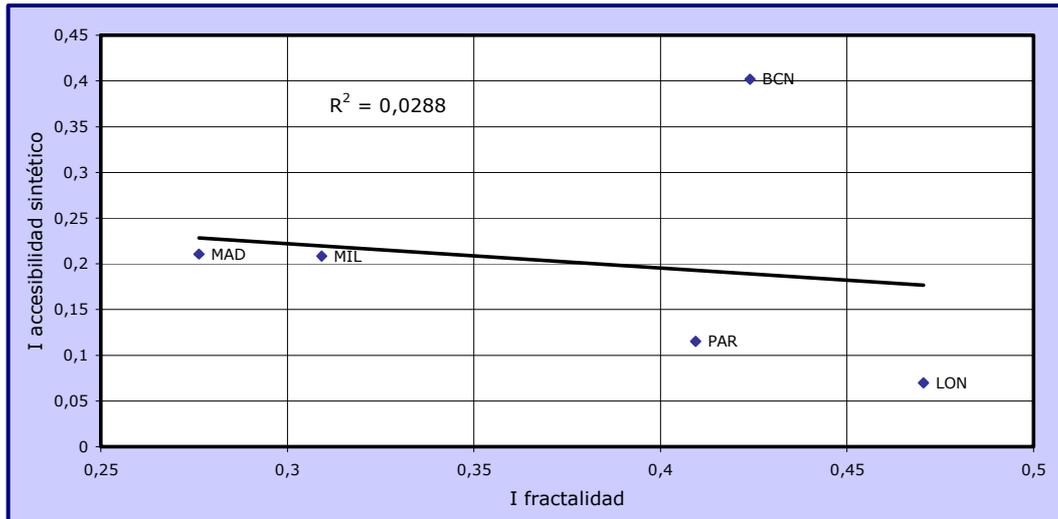


Figura 7.15, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético ' y el de Fractalidad en todo ámbito (f. propia)

Sin embargo, de la revisión de la gráfica, se intuye igualmente un resultado más interesante al extraer Barcelona del conjunto de puntos representados, así se obtiene:

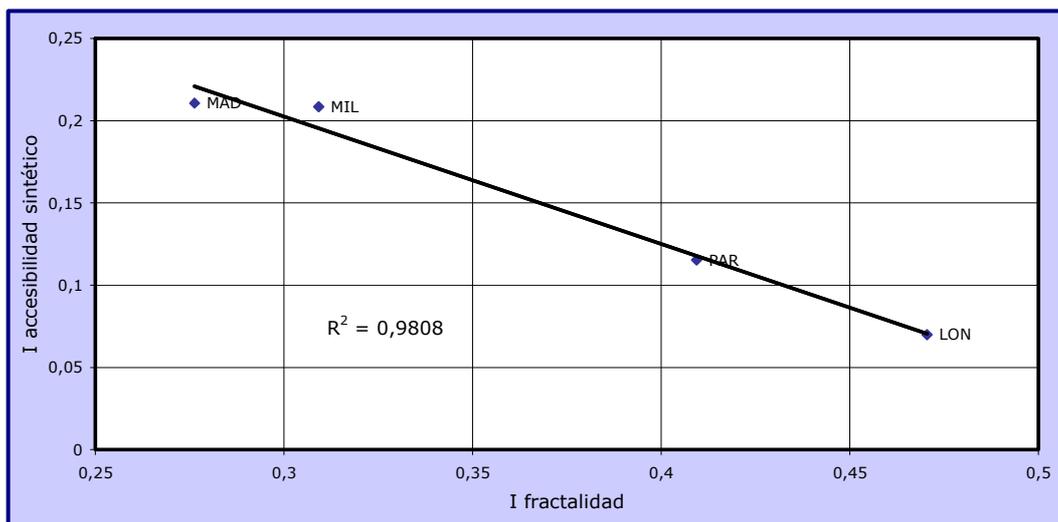


Figura 7.16, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético ' y el de Fractalidad sin Barcelona (f. propia)

De nuevo con este ensayo se consigue una altísima correlación entre los diferentes puntos de estudio, en este caso $r^2 = 0,9808$.

La correlación de este resultado muestra cómo no sólo dentro de las áreas urbanizadas, sino también dentro de las propias áreas servidas por el transporte colectivo de infraestructura fija, **mejora la utilidad de la red para los usuarios a medida que mejora el grado de fractalidad de la red.**

7.9.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

Las conclusiones que se obtienen de este ensayo son importantes y se podrían resumir en la correlación entre los Indicadores de Fractalidad y de Accesibilidad Sintético que se ha demostrado. Esta correlación lleva a establecer un grado de identificación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad Sintético, que puede tener especial relevancia a la hora de enfocar la planificación de la utilidad de las redes para los usuarios.

De esta manera, un indicador de sencillo cálculo, como es el de Fractalidad, puede ofrecer una primera referencia sobre el grado de utilidad que las redes ofrecen a los usuarios de las mismas, **correlacionando fractalidad y disminución de los tiempos relativos de viaje entre los diferentes puntos del área metropolitana**. Así, el enfoque del estudio de las diferentes ciudades puede centrarse de una manera mucho más rápida y con menores costes para la sociedad.

En cuanto a las líneas abiertas de estudio, queda clara la necesidad de establecer el estudio de un conjunto de ciudades costeras con características similares a Barcelona. De la realización de este estudio se puede esperar una regresión en los mismos términos que la aparecida entre las ciudades interiores. Si esto fuese así, quedaría demostrada la correlación entre los parámetros ahora estudiados.

7.10.- Nuevas consideraciones sobre la interrelación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Fractalidad

7.10.1.- Introducción

Dentro de las interrelaciones que se están demostrando entre estos dos indicadores estudiados, a continuación se van a exponer las conclusiones obtenidas de los nuevos ensayos efectuados para procurar una mejor comprensión del porqué de las correlaciones encontradas.

En este caso se **va a ensayar la dependencia entre la forma y la gestión operativa de las redes** a través de los indicadores desarrollados. La actuación dentro de este nuevo campo se debe a que, dentro del concepto de accesibilidad, existe una componente de operación de la red que hasta ahora no se ha tenido en cuenta y que, de alguna manera, se quiere poner de manifiesto. La intención de relacionar el concepto de operación de red con los indicadores de oferta se debe a la importancia que los tiempos de viaje tienen dentro de la percepción que el usuario posee sobre el transporte, más aún cuando éste es público.

La búsqueda de la comprensión profunda de los indicadores de oferta analizados ha hecho que se estudien bajo un nuevo enfoque, de forma que a su vez se posibilite la ampliación de los elementos de reflexión incluidos en los trabajos. De esta manera, para centrar inicialmente este nuevo ensayo, cabe recordar que los conceptos de fractalidad y accesibilidad en su definición contienen los siguientes elementos de reflexión:

1) La accesibilidad determina el tiempo medio de viaje desde un punto de la red a otro cualquiera. Este concepto de tiempo de viaje está directamente relacionado con la velocidad comercial que alcanzan los diferentes servicios y, por tanto, es uno de los elementos que definen la eficacia en la gestión del servicio de transporte colectivo guiado.

2) La fractalidad es un concepto unido a la morfología de la red y, por tanto, una característica de la red. Esta característica de la morfología de la red, finalmente, se ha formulado matemáticamente en función del número de paradas de la red, sin embargo, inicialmente, la definición parte de la longitud de la red. Además de por la longitud de la red, la fractalidad está definida por una superficie contabilizada a través de coronas circulares.

A través de la primera definición se puede comprobar cómo la gestión y la velocidad comercial están incluidas dentro del concepto elaborado a través del Indicador de Accesibilidad y cómo la morfología y la longitud de la red están dentro del concepto elaborado a través del Indicador de Fractalidad. Teniendo en cuenta que la longitud de la red es un parámetro que está directamente relacionado con el tiempo de viaje y, por tanto, con la velocidad comercial que se puede desarrollar, se puede establecer que debe existir una relación entre la gestión de la red (velocidad comercial) y la morfología de la misma (longitud de las líneas).

A través del ensayo que se va a realizar se va a intentar demostrar si se manifiesta de alguna manera esta relación entre gestión de red y morfología de la misma.

7.10.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

El Indicador de Fractalidad desarrollado viene dado por la siguiente expresión:

$$I_F = \log (N) / \log (O)$$

Siendo:

- I_F : indicador de fractalidad.
- N: número de paradas a considerar.
- O: área ocupada por las estaciones.

El parámetro a través del que se puede estudiar la relación entre red y gestión de la red es el número de paradas. Este número de paradas es una concreción efectuada respecto al parámetro inicial, que es la longitud de la red. Esta longitud de la red es el parámetro fundamental para el cálculo de las velocidades comerciales de la red de transporte y por tanto para el cálculo de los tiempos de viaje. Finalmente, si se observa que conceptualmente el Indicador de Accesibilidad es un tiempo de viaje, se puede proceder a realizar el ensayo de **sustituir el número de estaciones por el Indicador de Accesibilidad**.

De esta manera, se obtendrá una nueva expresión, asociada a la gestión de la red y que presenta la siguiente formulación:

$$I_G = \log (I_A) / \log (O)$$

Siendo:

- I_G : indicador de gestión de la red.
- I_A : indicador de accesibilidad.
- O: área ocupada por las estaciones.

La comparación del Indicador de Fractalidad con el Indicador de Gestión va a permitir establecer una relación entre la morfología de la red y la gestión de la red. A través de esta relación se debe poder identificar qué redes están mejor y peor gestionadas.

El gráfico resultante de la correlación es el siguiente:

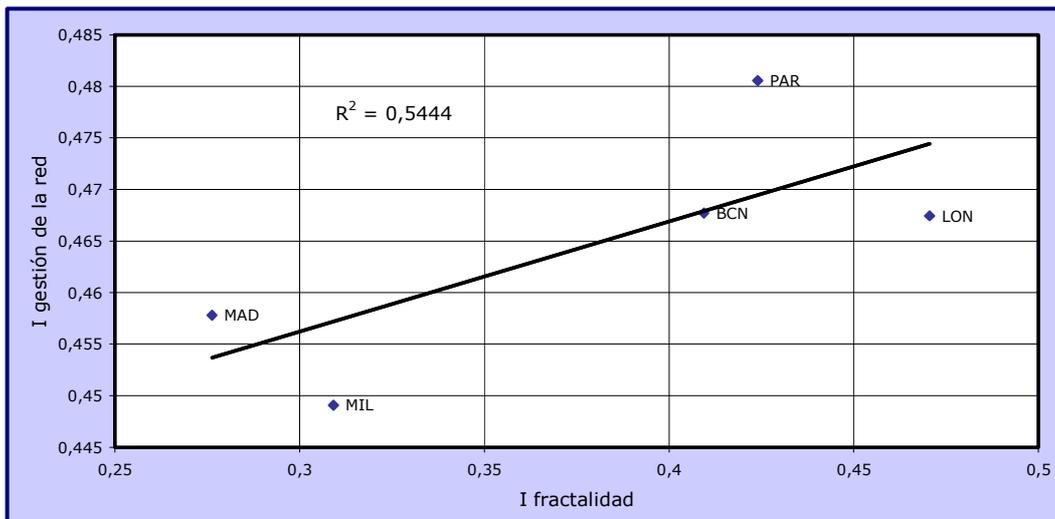


Figura 7.17, relación entre el Indicador de Fractalidad y el de Gestión de la Red

(f. propia)

Vamos a pasar a analizar la información que se desprende de esta gráfica.

1) En primer lugar, cabe preguntarse por el lugar que ocupa Barcelona dentro de la gráfica. Como se observa no es de los puntos que mayor desviación tenga respecto a la recta de regresión. Este hecho no es incoherente con el resto de resultados y se debe a que los indicadores representados en ambos casos poseen la misma superficie dentro de sus expresiones y, por tanto, la relación es independiente de dicha superficie.

2) El segundo elemento a considerar es el valor de la desviación media: $r^2=0,5444$, el cual es un valor intermedio, ni muy alto ni muy bajo. Dicho resultado se puede interpretar como que las redes están operadas en todos los casos de una manera muy similar.

Esta interpretación es coherente con la realidad, ya que las operadoras de las redes de transporte colectivo de infraestructura fija están operadas de forma similar, con modelizaciones de la red parecidas y con algoritmos de optimización de viajes y de tiempos de esos viajes también parecidos en todos los casos.

3) Finalmente, con todo lo dicho es necesario interpretar qué redes estarían bien gestionadas y qué redes estarían mal gestionadas. Del análisis del gráfico se puede extraer que:

- Aquellas redes cuyo punto se encuentre entre la recta de regresión y el Indicador de Gestión de la red estarán mejor gestionadas que la media de las redes representadas.
- Aquellas redes cuyo punto se encuentre entre la recta de regresión y el Indicador de Fractalidad estarán peor gestionadas que la media de las redes representadas.

Si se entra a valorar en detalle cuáles son las ciudades mejor y peor gestionadas se encuentran más elementos de interés. Así, se podrían identificar los siguientes grupos de ciudades:

- Ciudades mejor gestionadas: París y Madrid.
- Ciudades en la media establecida por la regresión: Barcelona.
- Ciudades peor gestionadas: Milán y Londres.

La diferenciación de estos ámbitos de ciudades permite observar otro hecho interesante y relevante en cuanto a la interrelación entre gestión y morfología de red. Las ciudades que aparecen como mejor gestionadas, Madrid y París, son las que presentan una mayor proporción de longitud de red de metro (y RER en el caso de París) respecto a la longitud de ferrocarril convencional. En cambio las ciudades que aparecen como peor gestionadas, Milán y Londres, son las que presentan una mayor proporción de longitud de ferrocarril convencional respecto a la longitud de metro que poseen.

Este hecho tiene tanto sentido morfológico como de gestión de red, ya que las diferencias entre las redes de metro y las redes de ferrocarril convencional utilizado como cercanías son numerosas, entre otras se pueden mencionar:

- Operación de la Red: La operación de la red de metro suele ser llevada por entidades especializadas en el transporte de cercanías en entornos urbanos. Mientras tanto, las redes de ferrocarril de cercanías suelen estar operadas por empresas nacionales, cuya gestión se refiere ámbitos mayores.
- Forma de Explotación: La forma de explotación también suele ser diferente, mientras que las redes de metro se explotan básicamente por frecuencia, las redes de ferrocarril se suelen explotar por horario.
- Formación de la red: La red ferroviaria convencional se realiza a mediados del siglo XIX, mientras que la morfología de la red de metro se gesta en el siglo XX.
- Territorios servidos: La red de metro sirve a la zona central del área metropolitana, siendo ésta la de red y población más densas. Sin embargo, la red ferroviaria convencional sirve a los usuarios más periféricos, asentados sobre redes y poblaciones menos densas.

A través del ensayo realizado se han podido identificar una serie de relaciones entre morfología de la red y gestión de la misma que ofrecen una nueva visión sobre estos conceptos.

7.10.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

Las conclusiones extraídas del ensayo realizado son varias, en primer lugar se observa la coherente gestión de todas las redes por parte de las empresas explotadoras. En segundo lugar, y como conclusión fundamental, se ha identificado cómo **las redes de metro presentan una mejor gestión que las redes de ferrocarril de cercanías en cuanto a la utilidad para el usuario.**

Este segundo hecho es relevante a la hora de plantear nuevas inversiones en sistemas de transporte colectivo sobre infraestructura fija, y demuestra cómo unos sistemas son más eficientes que otros de cara al usuario final del servicio.

En cuanto a futuras líneas de estudio a seguir, parece interesante el tratar de identificar cuáles son los motivos fundamentales que hacen que las redes de metro estén mejor gestionadas que las de ferrocarril y qué otras diferencias existentes entre estas clases de redes no tienen una relación final con la gestión de la red.

7.11.- Relaciones entre los indicadores de oferta y la carga real transportada por las redes

7.11.1.- Introducción

Uno de los objetivos fundamentales con el que se configuraron inicialmente los trabajos fue con el de establecer estudios comparados entre varias redes de transporte. Dentro de este interés por establecer estudios comparados, la posibilidad de analizar diversos indicadores de oferta y de relacionarlos con las cargas transportadas por las redes, se configuró como uno de los aspectos básicos del desarrollo de los trabajos. Por ello, se va a pasar a estudiar las relaciones existentes entre los indicadores de oferta obtenidos y las cargas de tráfico de las distintas redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija.

7.11.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

7.11.2.1. Aplicación del ensayo al conjunto de ciudades estudiadas

En el siguiente ensayo se comparan los cuatro indicadores de oferta obtenidos con los datos de tráfico de las diferentes redes. Respecto a los datos de cargas de tráfico que se van a emplear, serán los contenidos en el libro "Redes Metropolitanas" de Julià¹ (2.006).

Dentro del estudio de las cargas de tráfico, se han estudiado varias formas de considerar el volumen transportado por las redes. Tras repasar los datos disponibles, se ha optado por la representación de los resultados a través de los siguientes indicadores complementarios, Viajes/Año/Habitante y Viajes/Año/Km de red. De esta manera, será posible valorar la carga de las redes en función de la utilidad para los usuarios, materializada según los habitantes que la usan, y en función de la inversión realizada, materializada por los kilómetros de red. Las gráficas resultantes de cruzar los viajes por año y por habitante y los viajes por año y por kilómetro de red con los diferentes indicadores se adjuntan en el Anejo número 3

De la observación de la **relación entre los viajes por año y por habitante** con los tres indicadores dependientes (Accesibilidad, Fractalidad y Densidad), se puede adivinar una misma tendencia en los resultados. Sin embargo, las desviaciones medias obtenidas no son todo lo precisas que se pudiera desear. Así, se obtiene:

- Para la relación del I_A , $r^2=0,2807$.
- Para la relación del I_F , $r^2=0,0674$.
- Para la relación del I_D , $r^2=0,5772$.

Igualmente, para el indicador de cobertura se obtiene una desviación media que no otorga gran fiabilidad a los resultados. Así, se obtiene:

- Para la relación del I_c , $r^2=0,0467$.

En cualquier caso, de todos los resultados obtenidos, sí que se puede identificar que el Indicador de Densidad presenta una desviación media relativamente aceptable. La relación que se establece es que, a medida que va creciendo el Indicador de Densidad, van aumentando el número de viajes por año y por habitante de las distintas ciudades comparadas.

Recordando que el Indicador de Densidad representa la cantidad de superficie urbanizada que está servida por el transporte colectivo guiado, el aumento de la superficie servida por el ferrocarril respecto a la superficie total urbanizada hace que aumente la cantidad de viajes por año que hace cada habitante. Por tanto, se puede decir que si la población está servida por el transporte colectivo guiado, ésta lo utiliza aumentando su cantidad de viajes anual.

Este es un argumento que apunta en la dirección seguida por los métodos de oferta, de manera que es la propia oferta de servicios ferroviarios y la morfología de la red las que generan la utilización del transporte ferroviario.

Otro elemento de interés que se desprende de la gráfica de relación entre el Indicador de Densidad y la carga de la red es el que a continuación se explica. El análisis de la pendiente de la recta de regresión muestra un hecho significativo, aumentos leves del Indicador de Densidad representan aumentos sustanciales del número de viajes por año y por habitante dentro de las redes de transporte. Por ejemplo, un incremento de 0,40 a 0,50 del valor del Indicador de Densidad (lo que significa incrementar la cobertura de la red a otro 10% de la superficie urbanizada) supone doblar el número de viajes, pasando de 100 a 200 viajes por habitante y por año.

Esta lectura de las redes pone de manifiesto que políticas tendentes a aumentar el grado de cobertura de la red de transporte conducen a un aumento significativo de su uso y, por tanto, a la posibilidad de rentabilización de las inversiones y de satisfacción de las demandas de movilidad a través del transporte público.

A continuación se pasan a exponer los resultados extraídos de cruzar los indicadores de oferta con los **viajes realizados por año y por kilómetro de red** construida, dando por concluida la interpretación asociada a la relación entre el Indicador de Densidad y los viajes por año y por habitante.

Los resultados en este campo son menos reveladores, no habiéndose encontrado ninguna correlación entre indicadores y carga de la red por kilómetro de la misma. A este respecto se han obtenido las siguientes desviaciones medias:

- Para la relación del I_A con la carga por kilómetro, $r^2=0,0447$.
- Para la relación del I_c con la carga por kilómetro, $r^2=0,0026$.
- Para la relación del I_F con la carga por kilómetro, $r^2=0,2186$.
- Para la relación del I_D con la carga por kilómetro, $r^2=0,0260$.

Como se observa, no se puede considerar ninguna regresión como adecuada a los fines perseguidos. Por tanto, se puede concluir que no se ha encontrado una correlación entre los indicadores de oferta ensayados y la carga anual por kilómetro de red construido.

7.11.2.2.- Aplicación del ensayo únicamente a las ciudades interiores

De la revisión del resto de apartados desarrollados en este capítulo, se impone la revisión de las correlaciones que se establecen del estudio únicamente de las ciudades interiores. Es decir, con la exclusión de Barcelona de las regresiones establecidas en el apartado anterior.

En este caso, las correlaciones obtenidas son relativamente similares a las anteriormente halladas, a continuación se muestra una tabla con las desviaciones medias comparadas en ambos casos:

	CONJUNTO DE TODAS LAS CIUDADES	SÓLO CIUDADES INTERIORES
r² para la relación I_A-viaj/año/hab	0,2807	0,3051
r² para la relación I_C-viaj/año/hab	0,0467	0,0308
r² para la relación I_F-viaj/año/hab	0,0674	0,1870
r² para la relación I_D-viaj/año/hab	0,5772	0,7908
r² para la relación I_A-viaj/año/km	0,0447	0,0681
r² para la relación I_C-viaj/año/km	0,0026	0,3488
r² para la relación I_F-viaj/año/km	0,2186	0,1489
r² para la relación I_D-viaj/año/km	0,0260	0,0634

Tabla 7.13, desviaciones medias para el Indicador de Carga

(f. propia)

De la tabla se desprende que de la relación entre los viajes por año y por kilómetro de red y los indicadores de oferta no se puede extraer ninguna correlación. Sin embargo, las regresiones realizadas sobre el indicador de viajes por año y por habitante sigue manteniendo la estructura ya establecida dentro del ensayo realizado sobre todas las ciudades. Además, se mejoran en todo caso las desviaciones medias para los Indicadores de Accesibilidad, Fractalidad y Densidad.

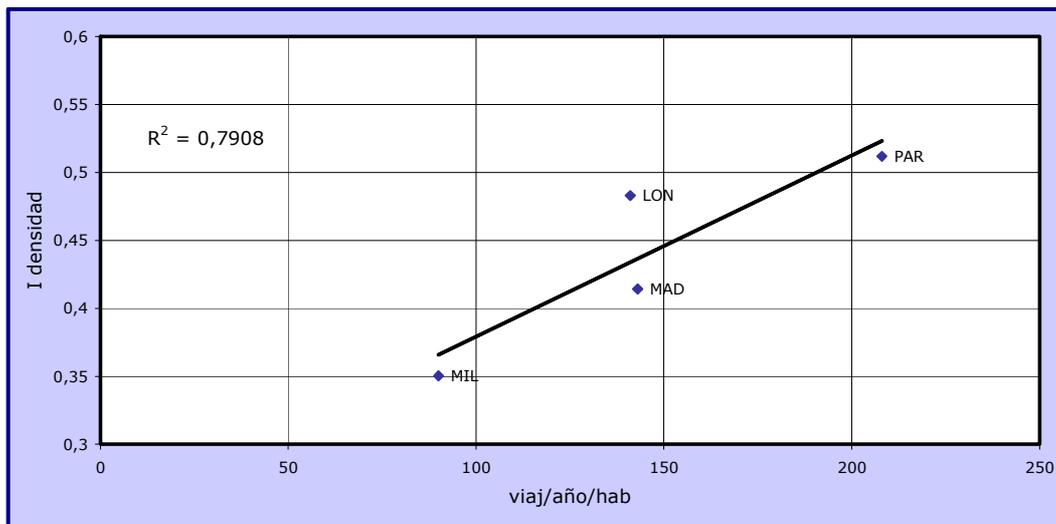


Figura 7.18, relación entre el Indicador de Densidad y el de Carga de Red

(f. propia)

En el caso del Indicador de Densidad se obtiene una buena desviación media, que alcanza el valor de 0,79. La representación gráfica obtenida para esa regresión es la anterior.

Todos los resultados mostrados ayudan a fundamentar lo establecido previamente, tanto dentro de este apartado como en apartados precedentes.

7.11.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

Las conclusiones obtenidas con este ensayo son varias. En primer lugar, es necesario apuntar la **dificultad de correlacionar la carga real de las redes con los indicadores de oferta** desarrollados, habiéndose encontrado cierta correlación únicamente a través del Indicador de

Densidad y la carga anual por habitante. Este hecho lleva inevitablemente a la necesidad de seguir avanzando en el estudio comparado de otros indicadores y de otras ciudades.

En segundo lugar, respecto al estudio del Indicador de Densidad y a las cargas transportadas por habitante, se puede decir que **el incremento de superficies servidas por el transporte colectivo conlleva el aumento del número de desplazamientos** que realiza la población anualmente en este modo. Además, **pequeños aumentos del Indicador de Densidad conllevan grandes aumentos de la cantidad de viajes realizados** por los usuarios de la red.

Esta conclusión es solidaria con el argumentario de los métodos de oferta, según los cuales, racionalizando la oferta de modos de transporte y generando un servicio eficiente por parte de los mismos, se puede modelar la demanda de transporte.

7.12.- Relación entre los indicadores de oferta y la inversión relativa en modos de transporte colectivo guiado

7.12.1.- Introducción

El estudio teórico de indicadores de oferta del transporte se configura como una herramienta que debe buscar conclusiones prácticas que permitan una mejor gestión del transporte. Así, tras los resultados expuestos en el apartado anterior, relacionados con la carga de viajeros de las redes, parece adecuado establecer nuevos ensayos considerando otros elementos de la planificación de los modos de transporte.

Por ello, en este apartado se aborda la relación entre los indicadores de oferta y la longitud relativa de la red de ferrocarril. De esta manera, se estudiarán indirectamente aspectos económicos asociados a los tamaños de las redes de transporte existentes.

7.12.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

7.12.2.1.- Primeros pasos del ensayo

Dentro del estudio de la eficacia espacial de las redes de transporte y de las implicaciones económicas de la construcción de las mismas, es necesario encontrar un indicador para correlacionar estos aspectos con los indicadores hasta ahora desarrollados.

El componente económico y financiero que tiene la construcción de las redes es un elemento fundamental a la hora de decidir su ejecución. Así, debido a la escasez de recursos económicos, la decisión de invertir en un modo de transporte suele condicionar la construcción de infraestructuras para otros modos de transporte. Por tanto, se puede decir que la inversión en las redes de los diferentes modos de cada área metropolitana está condicionada por la inversión en las demás redes de transporte y por la capacidad económica existente en el ámbito del gasto en redes.

Considerando que las dos redes de transporte fundamentales a la hora de satisfacer las necesidades de movilidad son las redes de ferrocarril y las redes de autopistas, se puede interpretar que su relación es el parámetro fundamental en cuanto a las decisiones adoptadas para planificar la movilidad de las áreas metropolitanas y que, a su vez, está relacionado con las disponibilidades económicas existentes. Por ello, el parámetro que se va a ensayar con el resto de indicadores de oferta obtenidos es la **relación entre la longitud de la red de infraestructuras colectivas guiadas y la longitud de la red de autopistas y autovías** existentes.

De esta manera, se va a correlacionar el Indicador de Inversión Relativa, representado por la relación de los kilómetros de ferrocarril y los kilómetros de autopista, con los indicadores de cobertura, sintético de accesibilidad, de fractalidad y de Densidad.

Del ensayo efectuado se obtienen las gráficas que se muestran en el Anejo número 3, y de las cuales se desprenden las siguientes desviaciones medias:

- Para la relación del I_A con la inversión relativa, $r^2=0,4558$.
- Para la relación del I_C con la inversión relativa, $r^2=0,4503$.
- Para la relación del I_F con la inversión relativa, $r^2=0,5517$.
- Para la relación del I_D con la inversión relativa, $r^2=0,3752$.

Las desviaciones medias en este ensayo son muy similares en todos los casos, no llegando a alcanzar unos valores mínimos que permitan la extracción de conclusiones. Sin embargo, de la revisión de las gráficas sí que se puede observar cómo existe una distorsión entre las ciudades interiores y Barcelona. De esta manera, si se vuelve a repetir el ensayo obviando los resultados obtenidos para el caso de Barcelona se obtienen unas nuevas gráficas adjuntadas también en el Anejo 3.

Como en anteriores apartados, para el Indicador de Cobertura, los sucesivos ensayos realizados no ofrecen resultados concluyentes, además, en este caso la variación de la desviación media es negativa, pasando de $r^2=0,4503$ a $r^2=0,4322$. Se compara ahora el indicador de inversión relativa con el resto de indicadores:

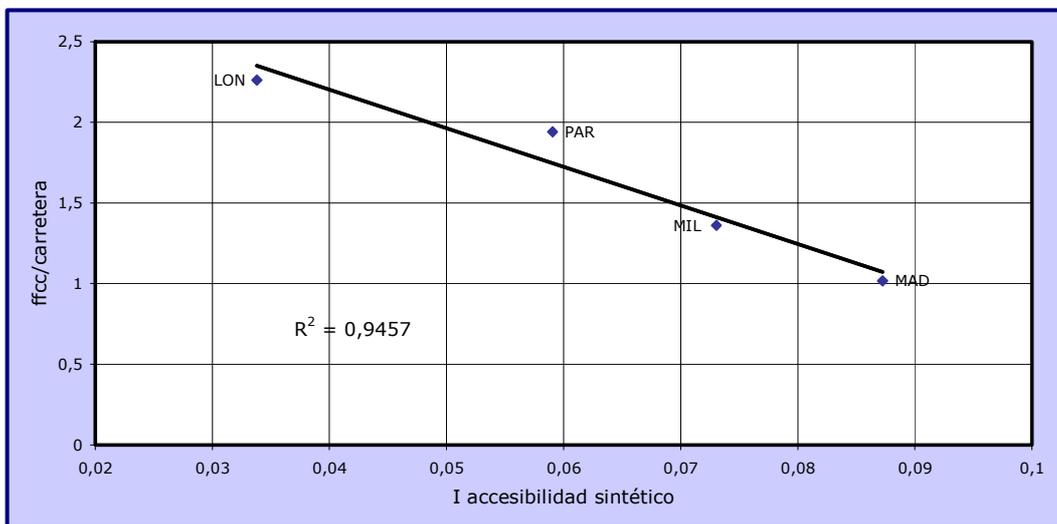


Figura 7.19, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintética y el de Inversión Relativa (f. propia)

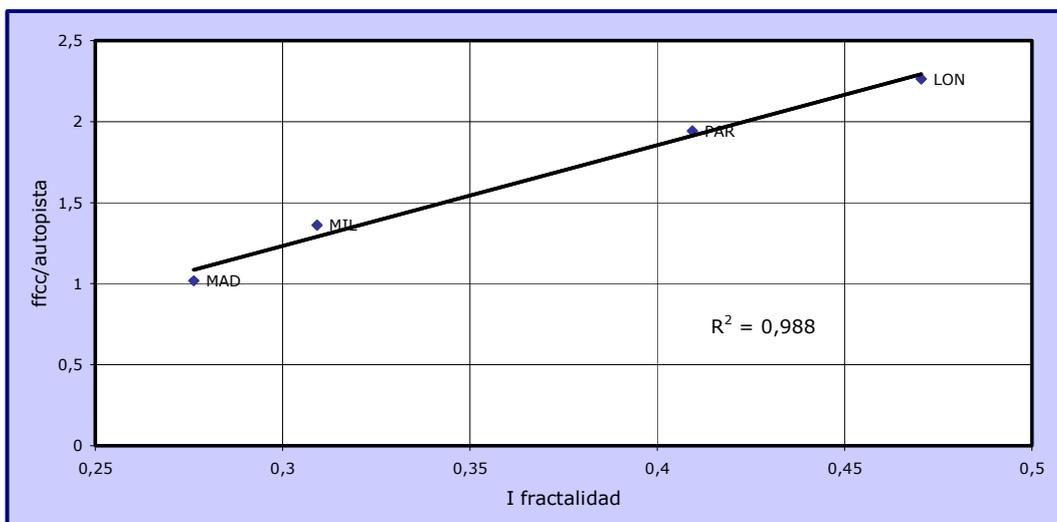


Figura 7.20, relación entre el Indicador de Fractalidad y el de Inversión Relativa (f. propia)

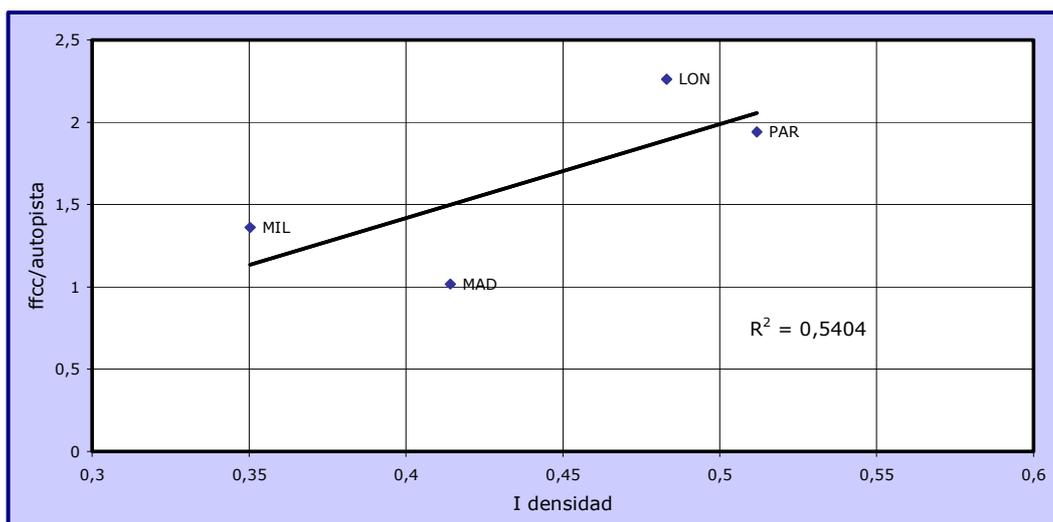


Figura 7.21, relación entre el Indicador de Densidad y el de Inversión Relativa

(f. propia)

En este caso, si que se observa una clara mejora de las desviaciones medias obtenidas entre ambos ensayos:

	CONJUNTO DE TODAS LAS CIUDADES	SÓLO CIUDADES INTERIORES
r² para la relación I_A- Indicador de inversión relativo	0,4558	0,9457
r² para la relación I_F- Indicador de inversión relativo	0,5517	0,9880
r² para la relación I_D- Indicador de inversión relativo	0,3752	0,5404

Tabla 7.14, desviaciones medias para el Indicador de Inversión Relativa

(f. propia)

7.12.2.2.- Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Inversión Relativo

Los resultados expuestos se van a interpretar inicialmente a través de la relación existente entre el Indicador de Accesibilidad Sintético de la superficie del área metropolitana y el Indicador de Inversión Relativa. Así, como se observa en la primera de las tres gráficas, el Indicador de Accesibilidad Sintético está relacionado con la cantidad relativa de red de ferrocarril que existe respecto a la red de autopistas.

La relación hallada muestra que el Indicador de Accesibilidad Sintético aumenta a medida que disminuye la longitud relativa de red ferroviaria respecto a la viaria. Este hecho tiene la trascendencia que a continuación se expone.

Según la gráfica obtenida, si se mantiene constante la relación entre la red ferroviaria y la red de autopistas, no mejora el valor del Indicador de Accesibilidad Sintético. Esto quiere decir que el Indicador de Accesibilidad Sintético devuelve el mismo resultado para los siguientes valores de la relación entre longitudes de redes:

$$4 \text{ Km ffcc}/4 \text{ Km aut} = 8 \text{ Km ffcc}/8 \text{ Km aut} = 16 \text{ Km ffcc}/16 \text{ Km aut} \dots$$

En principio, puede parecer un elemento algo sorprendente el hecho de que si se invierte en el aumento de la longitud de la red de ferrocarril tanto como en el aumento de la longitud de la red de

autopistas, no se obtenga un aumento de la accesibilidad sintética. Es decir, una proporción constante en la relación entre la longitud de la red de ferrocarril y la longitud de la red de autopistas (lo mismo representa 1Km/1Km que 1000Km/1000Km) devuelve un resultado unívoco de la accesibilidad sintética.

A continuación se interpreta este hecho. Así, en un principio, parece claro que si existe un aumento de la longitud de la red ferroviaria debe existir una mejora de la accesibilidad, ya que se contará con un mayor número de infraestructuras que permitan viajes directos entre puntos que anteriormente no tenían esta posibilidad, además de existir una mayor interconexión dentro de la red que posibilite un mejor intercambio entre líneas. Por tanto, un incremento de las redes de transporte colectivo guiado supone una disminución de los tiempos de viaje y por tanto una mejora de la accesibilidad sintética.

Sin embargo, este hecho no se ve corroborado en el ensayo efectuado, ya que la relación entre longitudes permanece constante respecto a la accesibilidad sintética. De esta manera, para poder evaluar la afirmación realizada en el párrafo anterior se ha realizado un nuevo ensayo. En este caso se han cruzado los datos de la longitud de la red ferroviaria y del Indicador de Accesibilidad Sintético respecto a la superficie urbanizada.

Dicho ensayo debería devolver una gráfica decreciente en la que, a medida que se aumentase la longitud total de la red de transporte colectivo de infraestructura fija, se fuese disminuyendo la accesibilidad sintética, debido a la posibilidad de ir contando cada vez con una mejor red.

Como se muestra a continuación, el ensayo efectuado muestra la veracidad de la hipótesis efectuada. Así se obtiene una gráfica tal y como se había previsto desde el entendimiento del comportamiento físico, morfológico y real que se había supuesto en los párrafos anteriores. Exactamente, la correlación entre los indicadores considerados, se muestra en la siguiente figura expuesta.

Así, la veracidad de la hipótesis se confirma a través de la obtención de una desviación media de valor $r^2=0,8582$.

Del desarrollo argumental realizado y del hecho de que exista esta última correlación se desprende que debe existir igualmente una correlación entre la longitud de la red de autopistas y el Indicador de Accesibilidad Sintético. Si esto no fuese así, no podría existir la correlación inicialmente hallada entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Inversión Relativo.

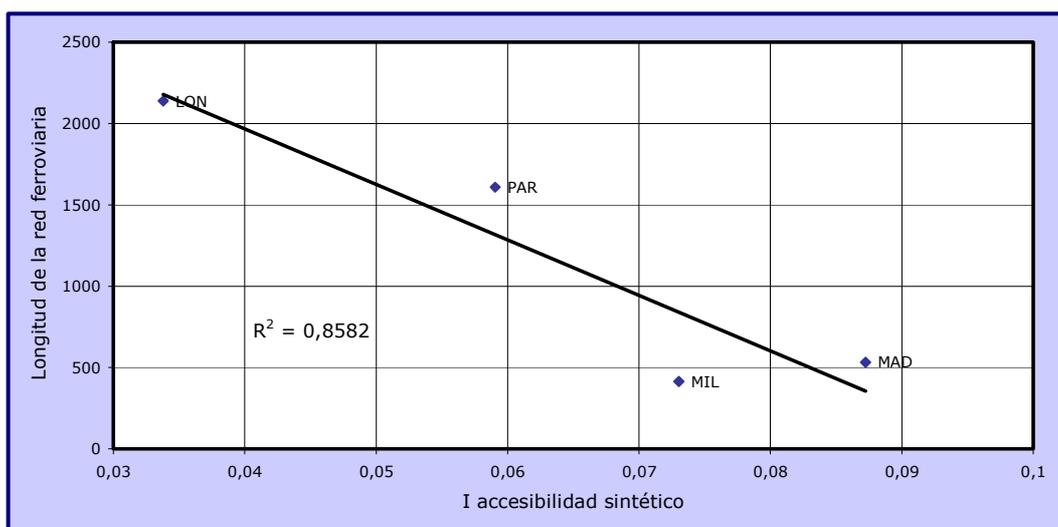


Figura 7.22, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y la longitud ferroviaria

(f. propia)

Como se dispone de los datos de las longitudes de la red de autopistas y del Indicador de Accesibilidad Sintético, se ha procedido a efectuar este nuevo ensayo, con el convencimiento de que

debe existir una relación entre kilómetros de autopista y accesibilidad sintética. El gráfico procedente de dicho ensayo se muestra a continuación.

El valor de la desviación media en este caso es menor que en otras relaciones, $r^2=0,6360$. Sin embargo, se puede dar por bueno dentro del conjunto de los resultados obtenidos. Con la comprobación de la existencia de esta relación se demuestra que la longitud de la red de autopistas está relacionada con la accesibilidad sintética, es decir, con el tiempo medio de viaje dentro de la red de transporte colectivo guiado. Concretamente, de la gráfica se extrae que el aumento de la red de autopista disminuye el valor de la accesibilidad sintética.

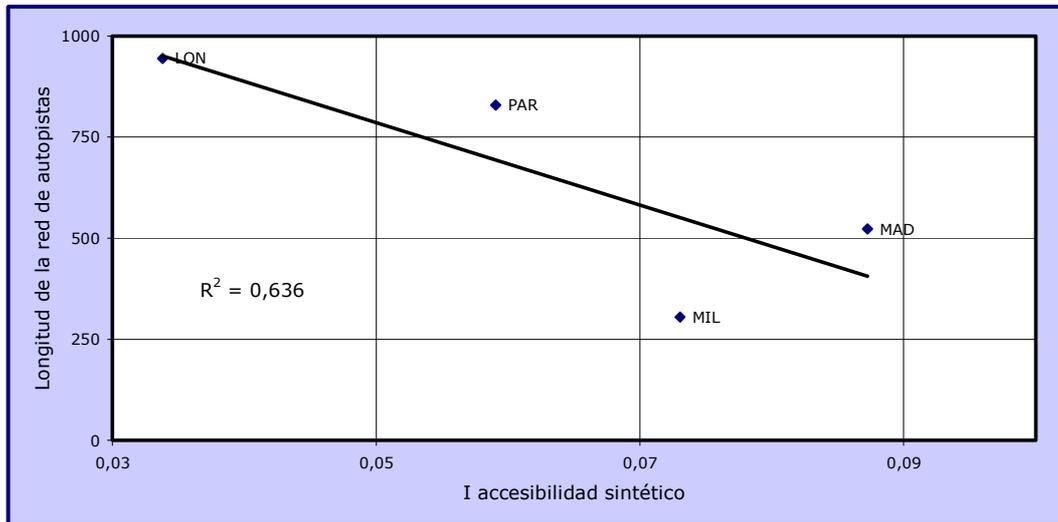


Figura 7.23, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y la longitud viaria

(f. propia)

Determinadas todas estas relaciones, cabría recapitular sobre el significado del Indicador de Accesibilidad Sintético. Para ello se recuerda que su definición tiene la siguiente expresión:

$$I_{A'} = I_A/S$$

Siendo:

- $I_{A'}$: Indicador de Accesibilidad sintético de la superficie del área metropolitana.
- I_A : Indicador de Accesibilidad.
- S: Superficie del área metropolitana en estudio.

Si se ha deducido que un incremento de la longitud de la red de autopistas supone una disminución del Indicador de Accesibilidad Sintético, se deduce de la expresión anterior que esto se puede producir a través de dos mecanismos:

- 1) A través de una disminución del Indicador de Accesibilidad.
- 2) A través de un aumento de la Superficie Urbanizada.

Si se analiza físicamente el significado de estos dos parámetros y su relación con la red de autopistas se puede advertir que, en el primero de los casos, la longitud de la red de autopistas no está relacionada con el tiempo medio de viaje dentro de la red de ferrocarriles. Es decir, son dos parámetros que no tienen una interacción directa, ya que la accesibilidad entendida como el tiempo medio de viaje que se obtiene de internalizar unas velocidades comerciales dentro de la red de ferrocarriles no está relacionada ni condicionada por la longitud de otra red diferente, en este caso la de autopistas.

Sin embargo, desde el punto de vista físico y de funcionamiento territorial de las redes, la longitud de las autopistas sí que está directamente relacionada con la superficie urbanizada. Fundamentalmente a lo largo de los últimos años, se ha podido identificar cómo las nuevas

superficies urbanizadas han ido conectándose a las redes de autopistas, poniéndose en valor territorios cada vez más alejados de los centros urbanos, pero conectados con estos a través de estas redes de autopistas.

De esta manera, se puede afirmar que **el incremento de la longitud de la red de autopistas genera dos efectos indeseables, un primero sobre el territorio y un segundo sobre el transporte** público colectivo guiado:

- 1) Por un lado, aumenta la superficie urbanizada de las áreas metropolitanas. Gracias a este ensayo se ha podido demostrar de manera empírica la relación existente entre la longitud de las redes de autopistas y el incremento de las superficies urbanizadas.
- 2) Por otro lado, hace que haya que invertir de manera proporcional en la longitud de las redes de transporte público para que éstas no pierdan eficiencia (desde el punto de vista del tiempo medio de viaje relativo).

7.12.2.3.- Relación entre el resto de indicadores y el Indicador de Inversión Relativo

Además de la relación establecida entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Inversión Relativa, también se han encontrado otras entre este último y el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad.

- 1) Si se toma como referencia el Indicador de Fractalidad, se aprecia que existe una correlación realmente alta con el Indicador de Inversión Relativa, determinada por una desviación media de valor $r^2=0,9880$. De esta manera, se comprueba que más allá del tamaño de la red de ferrocarril, existe una relación directa del Indicador de Fractalidad con la relación entre la longitud de la red ferroviaria y la longitud de la red de autopistas.

Esta correlación tiene la implicación de que una disminución relativa de la cantidad de autopistas dentro de un área metropolitana se traduce en un incremento del Indicador de Fractalidad. Esta consecuencia no es un hecho de inmediata percepción dentro del estudio de las redes. De esta manera, si se considera que las formas fractales y el aumento del grado de fractalidad de las redes metropolitanas es beneficioso dentro de la planificación del transporte debido, entre otras causas, a su correlación con la disminución de los tiempos medios de viaje, se deduce que **la construcción de nuevas infraestructuras viarias perjudica la eficacia de las redes de transporte público guiado**.

- 2) Finalmente, se puede establecer una lectura respecto al Indicador de Densidad en términos similares a las establecidas anteriormente dentro de este apartado. Lo primero que cabe establecer respecto a esta interpretación es que la correlación no es tan alta como para los Indicadores de Accesibilidad Sintética y Fractalidad, obteniéndose una desviación media de $r^2=0,5404$.

Teniendo en cuenta el valor de la desviación media, parece necesario analizar la correlación efectuada, ya que ayuda a comprender el resto de conclusiones establecidas y a completar los conceptos expuestos en este apartado. Así, se puede establecer que cuanto mayor es la relación entre la longitud de red ferroviaria respecto a la longitud de la red de autopistas, mayor es el Indicador de Densidad, o lo que es lo mismo, mayor es la cantidad de superficie edificada cubierta por el ferrocarril.

Este aspecto también tiene consecuencias territoriales, ya que si la inversión en infraestructuras se dedica a la construcción de redes de ferrocarril, en vez de dedicarse a la construcción de redes de autopistas, el resultado es que se conseguirá que se urbanicen las zonas cubiertas por el ferrocarril. Es decir, **la oferta relativa de transporte colectivo guiado modifica la estructura de las superficies urbanizadas**.

De esta manera, fomentando la sobreconstrucción de redes de ferrocarril respecto a la de las redes de autopistas se puede planificar la estructura de asentamientos e intentar luchar, de alguna manera, contra la urbanización dispersa o *urban sprawl*.

Dicho esto, cabe preguntarse como ha de ser la inversión en infraestructuras de transporte colectivo guiado para conseguir un aumento de las zonas cubiertas por estas infraestructuras. La respuesta

viene dada por la pendiente de la recta de regresión obtenida. Como se observa, dicha recta es bastante tendida, lo cual conlleva una inversión de grandes dimensiones para poder percibir cambios en el sistema de asentamientos.

Concretando respecto al párrafo anterior, para obtener un incremento en el Indicador de Densidad de 0,20 (paso de $I_D=0,3$ a $I_D=0,5$) se necesita incrementar la proporción de red de ferrocarril respecto a la red de autopistas en 2,5 (paso de $ffcc/aut=0,8$ a $ffcc/aut=2$). Esto quiere decir que la inversión en infraestructuras colectivas guiadas del transporte ha de ser importante para poder obtener cambios sustanciales, tanto en la estructura de la cobertura del territorio por el transporte, como en el modelado del propio territorio a través de la inversión en nuevas estructuras.

7.12.2.3.- Integración de las conclusiones extraídas del análisis de los distintos indicadores de oferta a través del Indicador de Inversión Relativa y valoración final

Todas las conclusiones que se han ido obteniendo al realizar el estudio de los tres indicadores de oferta ensayados en contraposición con el Indicador de Inversión Relativa giran en torno a dos aspectos principales.

En primer lugar, se ha demostrado la **incidencia que tiene el Indicador de Inversión Relativo respecto a la modelación del territorio**. Esta afección sobre el territorio se puede observar, a su vez, desde dos puntos de vista:

- 1) En primer lugar, si se consideran incrementos relativos de la inversión en redes de autopistas, estas mayores longitudes de red provocan un aumento de la Superficie Urbanizada.
- 2) En segundo lugar, si se consideran incrementos relativos de la inversión en redes de transporte colectivo guiado, estos pueden permitir la planificación para la creación de nuevas superficies edificadas según condicionantes de posición conocidos.

En segundo lugar, se ha visto que existe una **vinculación entre la eficiencia del transporte colectivo guiado y la relación entre la longitud de las diferentes redes de transporte**. De esta manera, el aumento en el Indicador de Inversión Relativo mejora la eficiencia del transporte público guiado a través de una disminución de los tiempos medios de acceso ponderados de los usuarios del transporte.

Estas conclusiones muestran la importancia de la inversión relativa en las diferentes redes de infraestructuras y cómo la elección de uno u otro modo de transporte condiciona el funcionamiento del resto de modos y las propias actividades sobre el territorio.

7.13.- Estudio de la ciudad dispersa a través de los indicadores de oferta desarrollados

7.13.1.- Introducción

A raíz del apartado anterior, se ha dado pie para abordar una nueva interpretación acerca del desarrollo de la ciudad dispersa. En el mismo se exponía y concluía que el incremento de la planificación y de la construcción de redes de ferrocarril puede ser beneficioso para evitar la ciudad dispersa. Este campo de análisis, en el que se relacionan los indicadores de oferta con el *urban sprawl*, puede tener repercusiones de interés. Por ello, en este apartado se va a proceder a realizar un estudio más pormenorizado de las relaciones que se pueden encontrar.

Con el objetivo puesto en la determinación de algunas causas que pueden provocar el *urban sprawl* o, al menos, en la identificación de posibles variables asociadas a la ciudad dispersa, se enfoca el siguiente apartado de los trabajos.

7.13.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

Para la elaboración de este ensayo, el primer elemento que se ha abordado es la determinación de una forma de medir la dispersión de las diferentes ciudades. De esta manera, ha sido necesaria la elaboración de un nuevo indicador que tenga en cuenta parámetros que definan la ciudad dispersa.

La elaboración de este nuevo indicador, asociado a la dispersión de las ciudades, ha requerido de una nueva reflexión conceptual para definir el indicador que se denominará de *Urban Sprawl*. Así, se han tenido que identificar ciertos efectos propios de la dispersión asociada a las áreas metropolitanas y que, aún siendo conocidos, no han sido manipulados de forma sistemática por los indicadores.

Dentro de la concepción teórica que se posee de la ciudad dispersa, se pueden considerar varios parámetros a la hora de afrontar la medida del grado de dispersión que presentan las ciudades. Así, se podría atender a:

- Identificar el tamaño medio de las diferentes zonas urbanizadas dispersas.
- Relacionar el tamaño de la parte de la ciudad compacta con la parte de la ciudad periférica y dispersa.
- Identificar el tamaño realmente urbanizado dentro de las áreas metropolitanas.
- Otros métodos en general asociados a las diferentes superficies de la ciudad.

Después de considerar varios de los condicionantes que definen la dispersión, y teniendo en cuenta las posibilidades de cálculo que se poseen por el propio discurrir de los trabajos, se ha optado por considerar un indicador que relacione la superficie ocupada con la superficie edificada. Este indicador será representativo de la ciudad dispersa porque, a cantidades iguales de urbanización, el área metropolitana que ocupe mayor superficie será mas dispersa que la que ocupe menor superficie. La fórmula que expresa el Indicador de *Urban Sprawl* es la siguiente:

$$I_{US} = O/S$$

Siendo:

- O: Área ocupada.
- S: Superficie urbanizada del área metropolitana en estudio.

El valor del área ocupada (O) se tomará igual al del área definida para la fractalidad, es decir, será el área del círculo definido por un radio con origen en el centro del área metropolitana en estudio y final en la estación ferroviaria más alejada de ese centro, redondeada al alza en fracciones de un kilómetro.

Por su parte, el valor de la superficie urbanizada del área metropolitana en estudio (S), será el ya utilizado en otros Indicadores definidos anteriormente. El cálculo de dicho parámetro se realizó a través de la medición directa de las áreas urbanizadas dentro de los planos obtenidos de las áreas metropolitanas.

Los valores de dicho Indicador de Dispersión, así como de los parámetros empleados para su cálculo son los siguientes:

	Área Ocupada km² (radio asociado km)	Superficie Urbanizada km²	Indicador de Dispersión (I_{US})
Barcelona	2.722 (38)	395,43	6,8836
Londres	14.957 (69)	2.646,98	5,6506
Madrid	8.495 (52)	721,19	11,7791
Milán	10.207 (57)	864,47	11,8072
París	12.469 (63)	1.394,48	8,9417

Tabla 7.15, valores del Indicador de Dispersión

(f. propia)

Cabe comentar que, para determinar el área ocupada, el cálculo que se ha realizado es el proveniente de hallar la superficie asociada al círculo cuyo radio es el expuesto entre paréntesis. Esto ha sido así para todas las ciudades excepto para Barcelona, dada su condición de ciudad costera. En este caso, lo que se ha hecho es restringir la superficie del círculo al 60% de su valor, para tener en cuenta el efecto del mar alrededor de la ciudad.

Por su parte, las Superficies urbanizadas son las mismas que se identificaron y utilizaron para anteriores supuestos desarrollados y analizados a lo largo de los trabajos.

Del cruce de los resultados obtenidos para el Indicador de Dispersión con el resto de Indicadores de Oferta anteriormente obtenidos, surgen diferentes representaciones gráficas que se adjuntan en el Anejo número 3. De igual manera, del ensayo efectuado, se obtienen las siguientes desviaciones medias:

- Para la relación del $I_{A'}$ con el I_{US} , $r^2=0,0104$.
- Para la relación del I_C con el I_{US} , $r^2=0,0139$.
- Para la relación del I_F con el I_{US} , $r^2=0,9353$.
- Para la relación del I_D con el I_{US} , $r^2=0,5270$.

El primer elemento a analizar es la variedad que se encuentra dentro de los valores de las desviaciones medias halladas, sin embargo, los resultados poseen la lógica siguiente:

1) En primer lugar, en cuanto al Indicador de Cobertura, se puede observar que la desviación media no demuestra ninguna correlación con el nuevo indicador en estudio, tal y como viene siendo habitual en el desarrollo de los trabajos.

2) En segundo lugar, el Indicador de Accesibilidad Sintético marca una escasa correlación con el Indicador de Dispersión. Sin embargo, si se observa la gráfica, se puede ver cómo el punto que genera una distorsión en la correlación es el de la ciudad de Barcelona, algo habitual a lo largo de los ensayos.

3) En tercer lugar, respecto al Indicador de Fractalidad, éste muestra una gran correlación con el indicador en estudio, esto es debido a que en este caso, a la hora de definir ambos Indicadores (Fractalidad y Dispersión), se ha tenido en cuenta el hecho de que Barcelona es una ciudad costera, y se han eliminado de la definición de los mismos los elementos distorsionadores ya comentados a lo largo de otros apartados.

4) Finalmente, el Indicador de Densidad viene presentado continuamente correlaciones favorables con la mayoría de los indicadores, pero de manera más débil que los Indicadores de Fractalidad y de Accesibilidad Sintética. Por tanto, estaría dentro de los valores usuales que se han ido barajando en los trabajos.

Viendo todos estos antecedentes, parece adecuado el volver a obtener todas las gráficas, representando en este caso únicamente los valores de las ciudades interiores.

En primer lugar, se obtiene la correlación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Dispersión, para obtener el resto de gráficas en un segundo momento.

Para el ensayo de correlación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de *Urban Sprawl*, existe un leve aumento de la desviación media, pasándose en el ensayo inicial de $r^2=0,0139$ a $r^2=0,1915$ en el segundo ensayo realizado. Sin embargo, a la vista de otras correlaciones efectuadas, estos valores no son lo suficientemente elevados como para considerar que exista una correlación entre ambos.

El gráfico de correlación entre Cobertura y Dispersión se muestra en el Anejo 3, el resto de correlaciones entre los Indicadores de Oferta y el Indicador de Dispersión se muestran a continuación:

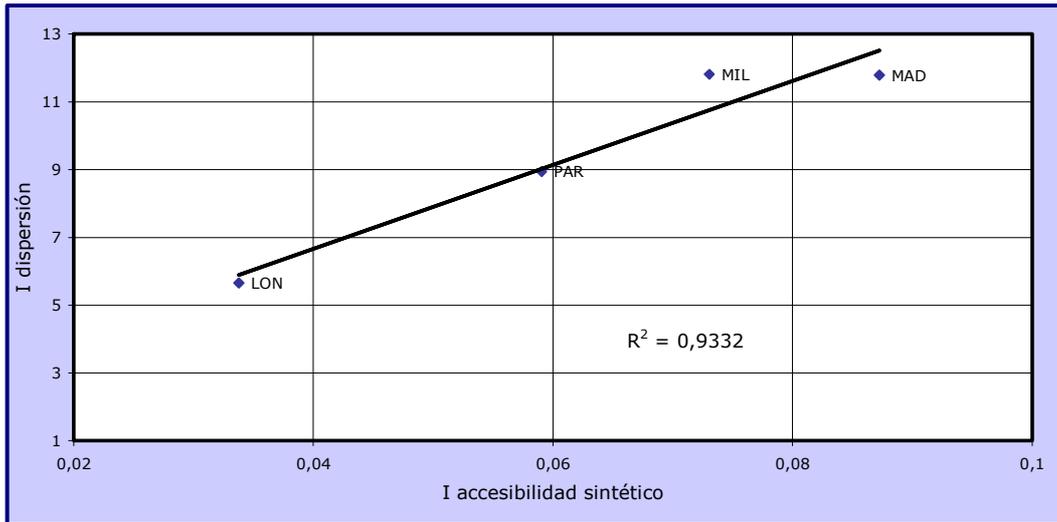


Figura 7.24, relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el de Dispersión (f. propia)

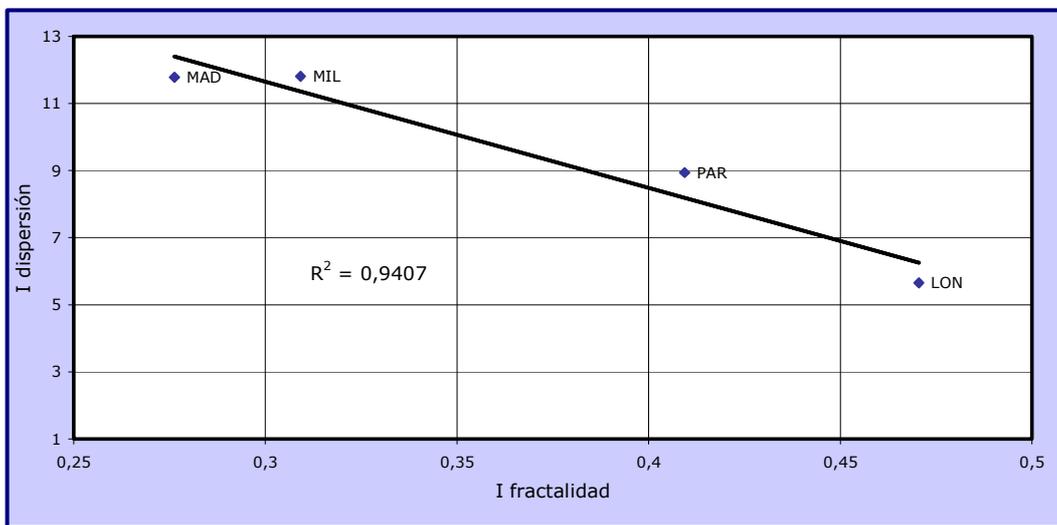


Figura 7.25, relación entre el Indicador de Fractalidad y el de Dispersión (f. propia)

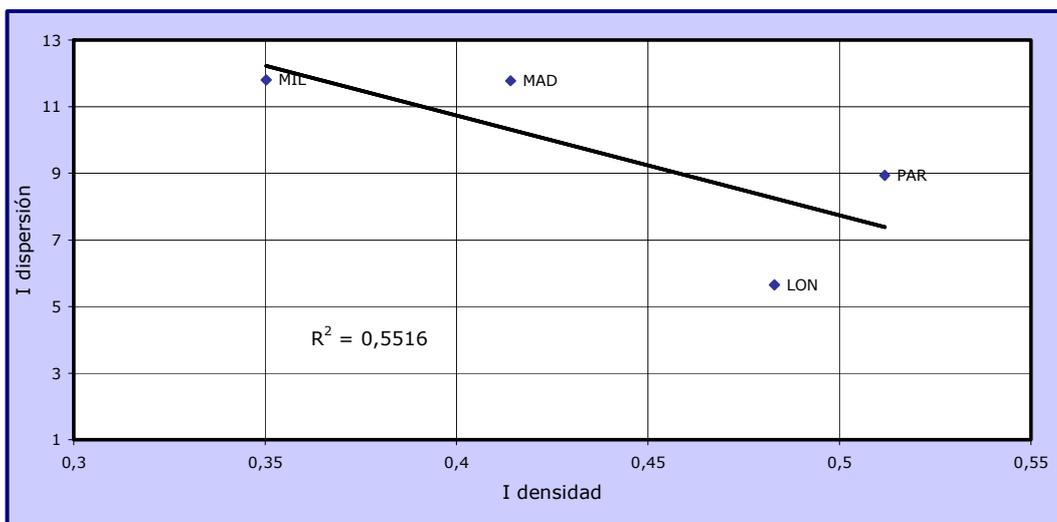


Figura 7.26, relación entre el Indicador de Densidad y el de Dispersión (f. propia)

Como se puede apreciar, las desviaciones medias de las correlaciones obtienen valores muy elevados en algunos casos, alcanzándose los valores que se preveían en los comentarios realizados en las páginas anteriores. Las desviaciones medias alcanzadas son las siguientes:

	CONJUNTO DE TODAS LAS CIUDADES	SÓLO CIUDADES INTERIORES
r² para la relación I_A - I_{US}	0,0104	0,9332
r² para la relación I_F - I_{US}	0,9353	0,9407
r² para la relación I_D - I_{US}	0,5270	0,5516

Tabla 7.16, desviaciones medias para el Indicador de Dispersión

(f. propia)

En todos los casos se mejora la desviación media de los resultados. A continuación se pasa a analizar las consecuencias de estos resultados obtenidos.

1) Si se inicia el análisis de los resultados a través del Indicador de Fractalidad, se puede observar que existe una gran correlación entre este indicador y el indicador definido para establecer el grado de dispersión de la población.

La gráfica obtenida muestra que a medida que aumenta el Indicador de Fractalidad disminuye el Indicador de Dispersión, es decir, para una misma superficie urbanizada disminuye la superficie que esta ocupa en el espacio. Concretamente, el aumento del Indicador de Fractalidad de 0,35 a 0,45 hace que la dispersión se rebaje aproximadamente de 10 a 6,9. Es decir, el aumento del Indicador de Fractalidad en 0,10 puntos supone disminuir la dispersión hasta el 69% de su valor original.

2) En segundo lugar, si se valora el ensayo desde el punto de vista de la accesibilidad sintética, también se puede comprobar la fuerte correlación entre los resultados obtenidos.

En este caso, un aumento del Indicador de Dispersión lleva aparejado un aumento en el Indicador de Accesibilidad Sintético. Esto quiere decir que a medida que aumenta el Indicador que mide la dispersión de la ciudad aumenta el tiempo medio de viaje relativo de los usuarios de la red de transporte colectivo. Esta afirmación es perceptible desde la comprensión del funcionamiento físico de las redes de transporte en relación con las distintas formas de los asentamientos de población, sin embargo aquí se ha podido demostrar empíricamente.

3) Finalmente, se obtiene una más débil relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Dispersión.

En este caso, la disminución del Indicador de *Urban Sprawl* lleva aparejada un aumento en el Indicador de Densidad. La traducción de este hecho a un fenómeno físico conduce a discriminar que a medida que la ciudad se va haciendo más compacta, la superficie urbanizada servida por el transporte público va aumentando en relación con el conjunto de la superficie urbanizada. Es decir, la ciudad compacta facilita la creación de sistemas de transporte ferroviario más eficaces en cuanto a la superficie cubierta por los mismos.

7.13.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo

De todo el ensayo efectuado se han obtenido varias conclusiones que pueden ser concatenadas entre sí, ya que se ha podido comprobar que existe una relación entre la urbanización dispersa y los indicadores de oferta tratados.

Dado que la red de transporte es un elemento que, debido a su momento de generación, posee un grado de madurez importante que le permite haber manifestado sus efectos, y que la morfología de la red define por completo el Indicador de Fractalidad, se puede decir que la morfología de la red de transporte define el grado de dispersión de la ciudad, ya que éste está directamente correlacionado con el Indicador de Fractalidad.

A su vez, esta dispersión tiene implicaciones sobre el tiempo medio de viaje de los usuarios, esto significa que a mayor dispersión, peor calidad del servicio de transporte público colectivo sobre infraestructura guiada. Igualmente, la dispersión de la ciudad afecta al Indicador de Densidad, generándose una peor cobertura del transporte en ferrocarril sobre los asentamientos urbanizados.

En resumen, se puede concluir que **el concepto de ciudad dispersa está ligado con las redes de transporte colectivo guiado** que poseen las áreas metropolitanas, según las consideraciones hechas en este apartado.

7.14.- Ampliación conceptual de la Fractalidad I

7.14.1.- Introducción

El valor analítico que se ha encontrado al Indicador de Fractalidad a lo largo de los ensayos realizados ha sido mayor del inicialmente esperado en la planificación de los aspectos a estudiar. Aunque se podía haber intuido una cierta correlación entre estas formas fractales y la manera de ocupación del suelo que la red ocasiona, la correlación existente entre el Indicador de Fractalidad y los tiempos medios de viaje de los usuarios, la carga de la red de transporte, los efectos diferidos sobre la planificación y los mencionados efectos sobre el territorio, hacen pertinente una mayor profundización en los elementos que forman parte del concepto de fractalidad.

De esta manera, se va a concluir el capítulo séptimo de los trabajos, referido a los ensayos efectuados sobre los indicadores de oferta, con dos acercamientos al concepto de fractalidad asociado a las redes de transporte y al territorio que éstas ocupan. Así, en este apartado 14 se va a repasar la forma en la que se introduce físicamente dentro de la formulación el concepto de fractalidad. Es decir, se van a exponer los **fenómenos morfológicos que hacen que las redes sean fractales**.

7.14.2.- Disposición de la red según distintos niveles de utilización

Desde el momento en que se ha considerado la introducción de un Indicador de Fractalidad en el análisis efectuado, se ha presupuesto cierto comportamiento fractal dentro las redes de transporte colectivo guiado metropolitano. Para ello, en primer lugar, hay que recordar que estos fenómenos fractales tienen su referencia en elementos que se dan en la propia naturaleza y que vinculan la longitud de determinadas formaciones con la superficie que estas formas abarcan.

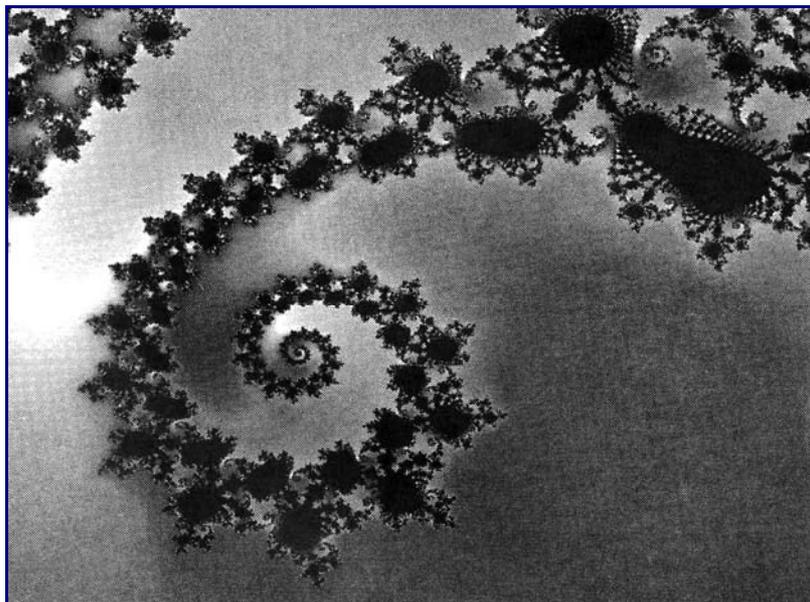


Figura 7.27, formas fractales

(f. Mandelbrot²)



Figura 7.28, formas fractales

(f. Mandelbrot²)

La suposición de la fractalidad de las redes de infraestructuras se asienta sobre los trabajos realizados previamente para incorporar esta concepción del espacio. Entre otros, figuran los trabajos realizados por Genre-GrandPierre³ (1.999) sobre las redes de carreteras o los trabajos de Dupuy⁴ (2.003) sobre la red ferroviaria de París. De ambos se exponen unos gráficos representativos:

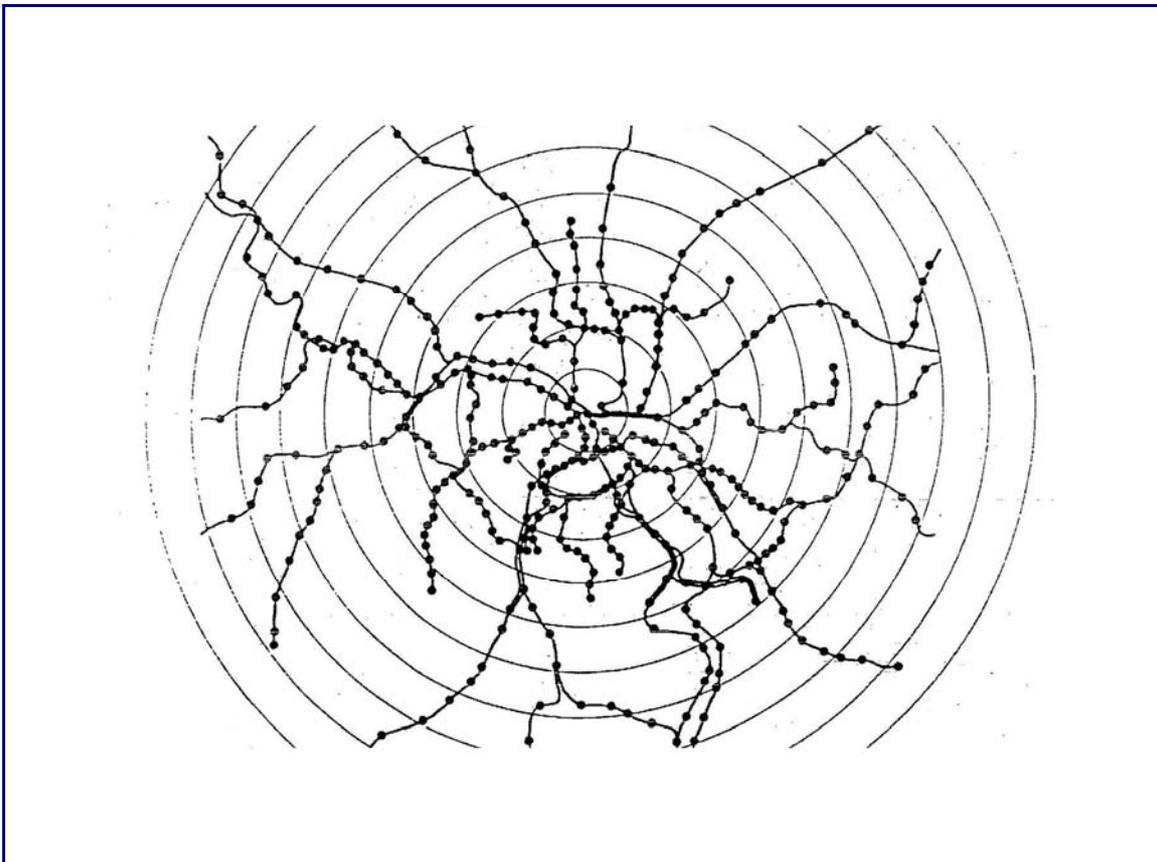


Figura 7.29, red ferroviaria de Paris

(f. Dupuy⁴)

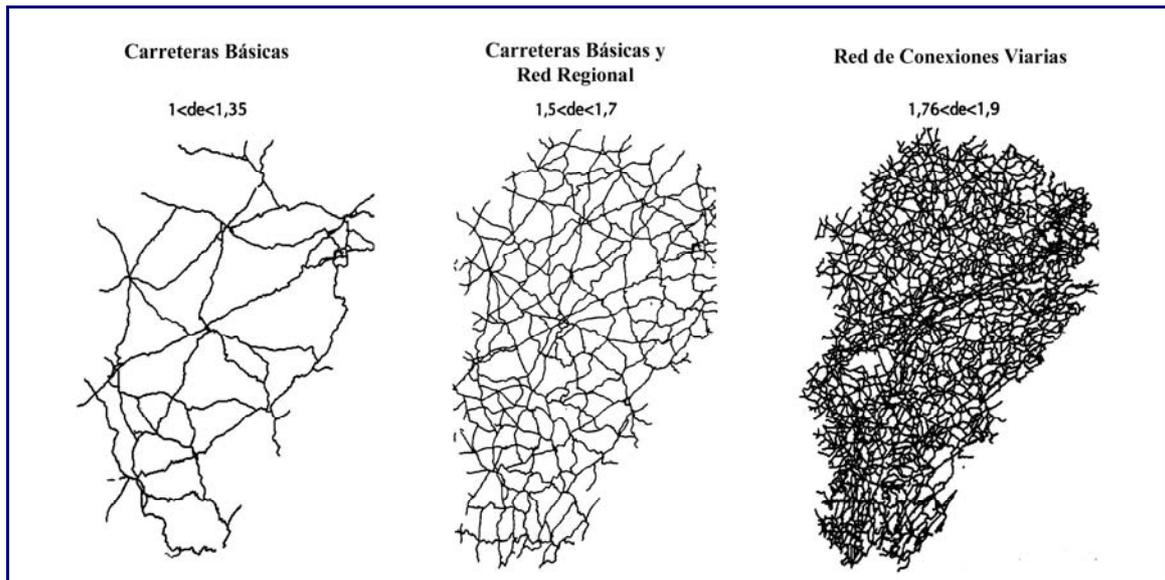


Figura 7.30, red de carreteras del Francondado

(f. GrandPierre³)

Desde estos puntos de vista expuestos y bajo la concepción de las redes mostradas en estudios anteriores, parece justificado el haber entendido que las redes de transporte colectivo guiado siguen determinados patrones asociados a las formas fractales. Además, de la propia observación de los grafos se puede desprender esta fractalidad:

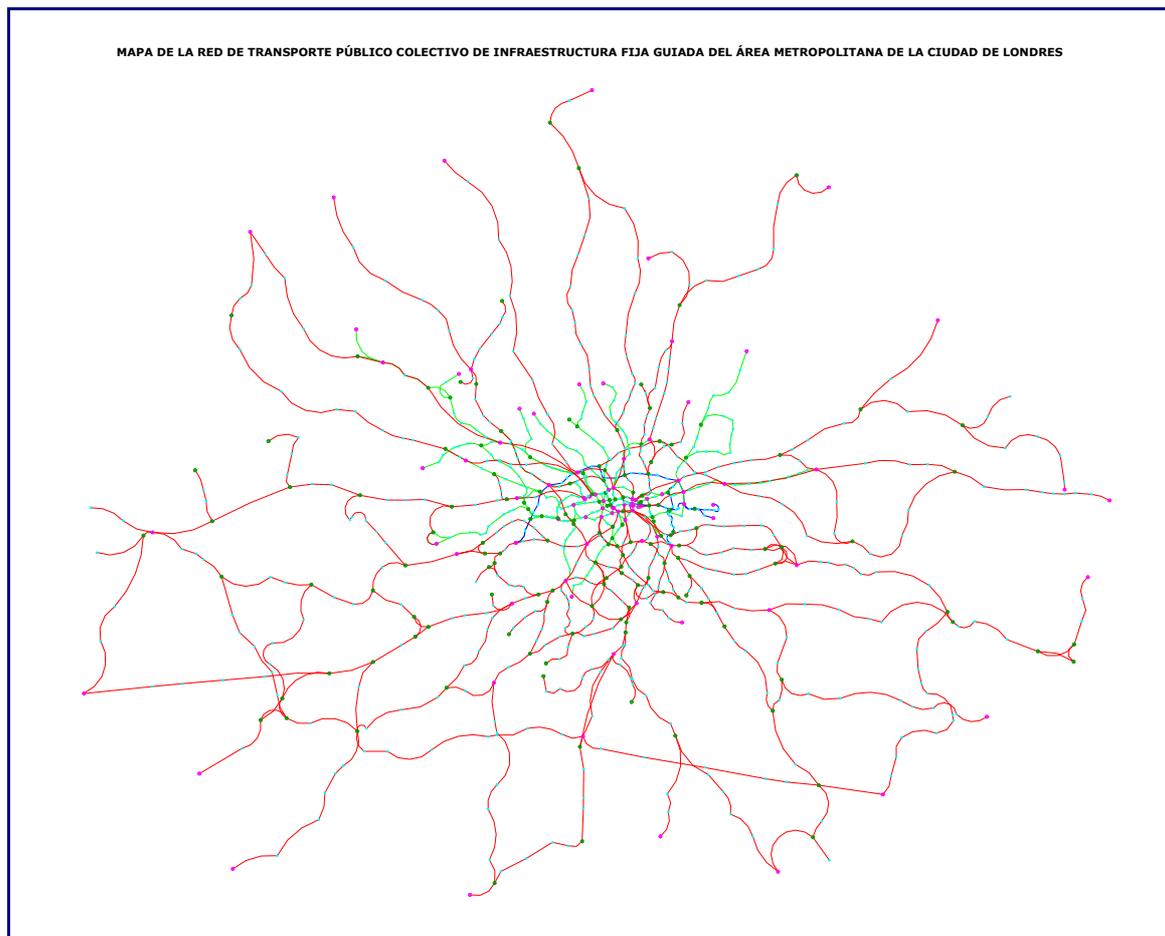


Figura 7.31, red de transporte colectivo guiado del área metropolitana de Londres

(f. propia)

Desde la concepción global de la fractalidad como una relación entre la longitud de las redes y la superficie ocupada por las mismas, está estudiado el comportamiento de diferentes redes como las de carreteras, ferrocarriles o saneamiento como formas fractales. Sin embargo, la concepción del transporte, de la movilidad global y del territorio va más allá de la consideración de la infraestructura del transporte únicamente.

De esta manera, la red de transporte está integrada dentro de un territorio, al cual articula y el cual es la plataforma física de las actividades humanas. Dejando al margen las implicaciones que sobre el territorio tiene la planificación de las redes, garantizar la movilidad es uno de los objetivos fundamentales de las redes de transporte. Pero esta movilidad, asegurada por las infraestructuras del transporte, tiene unas derivaciones externas a las mismas que muchas veces no son consideradas. Así, se puede asegurar que sin los viajes de acceso y salida de la red no se podría asegurar ninguna movilidad ni se podrían desarrollar las actividades de los ciudadanos sobre el territorio.

Llegado a este punto, se plantea la cuestión de la integración de la concepción fractal de la red dentro de los diferentes desplazamientos de salida y acceso a la red de transporte, que se realizan por los usuarios de la misma, y que son parte indisoluble dentro del proceso del viaje. Además, es necesario recordar que, estos desplazamientos de acceso y salida, no son simplemente necesarios para el viaje físico, sino que, metodológicamente, en la elaboración de los trabajos se han introducido dentro de los diferentes tiempos de viaje.

Con lo explicado anteriormente, se puede llegar a la paradoja de pensar cómo es posible la correlación existente entre el Indicador de Fractalidad y el de Accesibilidad ($r^2=0,8452$ para todas las ciudades; $r^2=0,9747$ para las ciudades interiores), siendo que el Indicador de Accesibilidad contiene unos tiempos de entrada y salida en la red que no presentan ninguna relación física con la fractalidad de las redes.

Esta paradoja propuesta en el párrafo anterior no es cierta tal cual se expone. Así, tanto dentro del concepto de accesibilidad como del de los tiempos de viaje para el acceso y salida de la red, están incluidos fenómenos fractales similares a los que relacionan red de transporte y tiempo de viaje dentro de la red.

En la figura 7.32, se muestran una serie de croquis que ayudan a comprender esta relación física entre tiempos de acceso y salida de la red y fractalidad.

Como se puede observar en dicha figura, existe una relación física o real que relaciona el acceso, o la salida, a las estaciones de ferrocarril con el concepto de red y con las relaciones fractales. Del gráfico en tres fases expuesto anteriormente, se puede deducir las siguientes consideraciones:

- 1)** En el primer croquis se observan, dentro de una ciudad con una tipología edificatoria cualquiera, los diferentes recorridos que los distintos usuarios de la red de transporte utilizan para acceder al ferrocarril. Este croquis tiene una visión territorial, en cuanto que muestra la ciudad construida.
- 2)** En el segundo croquis se elimina la ciudad construida y se visualizan únicamente los recorridos de los usuarios del transporte. Este croquis muestra una visión asociada al transporte, ya que se enseñan los recorridos de los usuarios asociados a unos tiempos de viaje para acceder al servicio de transporte.
- 3)** En el tercer croquis se integran los recorridos de los usuarios dentro de caminos equivalentes, mostrándose los segmentos de cada recorrido y los nodos en los que se van agrupando los recorridos. En este caso, el croquis muestra una visión asociada a las redes. Esta visión de la red no sólo es física sino que, además, gráfica y matemáticamente se puede modelizar con los elementos habituales de las redes, es decir nodos de unión y ramales de conexión entre los mismos.

De esta forma, se ha visto cómo existe una relación física entre territorio, tiempos de acceso a la red y formas fractales. Ahora, queda relacionar estos tres conceptos dentro de la formulación y la metodología que se ha desarrollado.

- 1)** Respecto a la relación de la metodología con el territorio, ésta es inmediata, ya que el primer paso de todo el proceso fue la modelización de las ciudades de estudio a partir de planos reales de cada área metropolitana.

2) Respecto al modelo de transporte esta relación también es inmediata, ya que los tiempos de acceso a la red y de salida de la misma hasta los puntos de destino también ha sido incluida dentro de los indicadores.

3) Finalmente, queda la introducción del efecto de las formas fractales dentro de las formulaciones de tiempos de acceso y salida considerados en el Indicador de Accesibilidad. Este elemento, todavía no comentado, se explica en los párrafos siguientes.

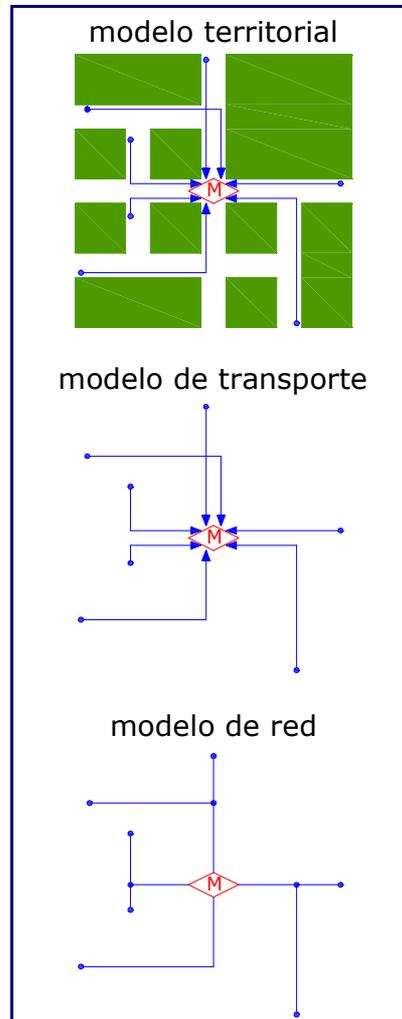


Figura 7.32, modelos de concepción
(f. propia)

Como ya se ha explicado, las formas fractales son aquellas en las que se guarda una relación entre la longitud de la forma y la superficie que esta forma cubre en el espacio. Transponiendo esta definición al caso del acceso hasta las estaciones de las redes de transporte ferroviario, se tiene que la longitud es la proveniente de cada uno de los desplazamientos de los diferentes usuarios del servicio de transporte, y que la superficie asociada a esos desplazamientos es el área de cobertura que tiene cada estación, considerada ésta como la superficie desde la cual existirán desplazamientos de usuarios hasta la parada de la red de transporte ferroviario.

Entonces, para identificar un comportamiento fractal debería de existir y de haberse incorporado a la formulación un parámetro que relacionase la longitud del desplazamiento de los viajeros y la superficie cubierta por la estación. Este parámetro debe de existir, según se ha mostrado a través del croquis anterior, sin embargo hasta ahora no se ha determinado explícitamente. Pero el parámetro que relaciona longitud con superficie y que, intuitivamente, si ha sido incorporado en la formulación es el Índice de Rodeo.

En el capítulo dedicado a explicar la metodología empleada, se ha dicho que se incorporaba un Índice de Rodeo de 1,2, que es el habitual en las ciudades que presentan una tipología aproximada a la

cuadrícula. Ahora bien, si se analiza qué es el índice de rodeo, este es el porcentaje de incremento de longitud que debe recorrer un usuario de la red de transporte debido a la forma de la ciudad y a la imposibilidad existente, en general, para acudir en línea recta a la estación. Así, el Índice de Rodeo tiene en cuenta la relación entre la longitud del recorrido y la superficie definida por esta longitud, y esto es en sí mismo una relación fractal.

Debido a la imposibilidad de calcular el Índice de Rodeo para cada parada, se ha tomado simplificada e igualmente a 1,2. Sin embargo, esto no es óbice para que de hecho se haya incorporado dentro de la formulación relativa a los tiempos de acceso a la red (Indicador de Accesibilidad e Indicador de Cobertura) un parámetro que tiene en cuenta la estructura fractal en los recorridos de acceso y salida a las paradas, tal y como se ha visto que existe a través del croquis presentado.

Esta deducción realizada puede tener consecuencias importantes respecto a la comprensión de los conceptos de fractalidad y accesibilidad asociados al territorio y a la movilidad en general, más allá de su aplicación a las redes de transporte colectivo guiado.

7.14.3.- Conclusiones obtenidas del ensayo

Del desarrollo de este ensayo se deducen las siguientes conclusiones. En primer lugar, se extiende el concepto de fractalidad de la red más allá de la mera consideración de la infraestructura del transporte, es decir, se puede pensar en la **existencia de un comportamiento fractal en la estructura del desplazamiento de los ciudadanos de punto a punto dentro de las ciudades**. De esta manera, todos los ensayos elaborados con anterioridad y que se han interpretado de forma más amplia que por su relación con el transporte, pueden considerarse válidos y coherentes con esta deducción, en cuanto a la aplicación al territorio en general de la teoría fractal respecto a los desplazamientos de la población.

En segundo lugar y como consecuencia de la primera conclusión, se **liga integralmente el concepto de fractalidad con el de tiempo de viaje de todo el trayecto**. El reconocimiento físico del comportamiento fractal en los accesos y salidas a las estaciones de transporte, permite equiparar los conceptos de accesibilidad y fractalidad manejados a lo largo de todos los trabajos. De esta manera, entre ambos conceptos se establece la existencia de una equivalencia física traducida en una formulación coherente y en unos resultados empíricos que corroboran lo expuesto.

7.15.- Ampliación conceptual de la Fractalidad II

7.15.1.- Introducción

En este segundo apartado dedicado a desarrollar el concepto de fractalidad, los trabajos se van a adentrar en explorar el comportamiento fractal de las redes de una forma más minuciosa. Así, si hasta este instante se ha contemplado la red como un elemento único, en este ensayo se va a desagregar la red en diferentes ámbitos de características semejantes. Todo ello con el objetivo de propiciar una mejor comprensión del porqué de los distintos fenómenos observados en el resto de ensayos realizados sobre los indicadores de oferta.

En este caso, el estudio pormenorizado de las estructuras fractales, y su concreción sobre las redes de transporte colectivo guiado, va a venir dado por el estudio de una de sus propiedades básicas. Esta propiedad a investigar va a ser la autosimilitud, ya que es una de las propiedades que mejor se ha documentado y estudiado dentro de la teoría de objetos fractales y de las aplicaciones de la misma.

7.15.2.- Proceso seguido en la elaboración del ensayo

El mejor conocimiento de la morfología de las redes, así como de los parámetros asociados al concepto de fractalidad, fomenta la revisión de algunas propiedades de las redes de transporte analizadas a lo largo de los ensayos. Este intento por mejorar la interpretación de los fenómenos

asociados a las redes de transporte colectivo guiado, ha llevado a analizar el comportamiento fractal desde una nueva óptica.

Según la teoría fractal, la configuración morfológica característica de los objetos fractales, tiene una propiedad hasta ahora no analizada dentro de la documentación aportada, la autosimilitud o autosemejanza. Esta propiedad asegura que la relación fractal patrón se repite tanto en el todo como en la parte, es decir, el orden de fractalidad del conjunto de la red es un invariante que se repite si se eligen partes aisladas de la propia red.

Esta propiedad, sin embargo, presenta una serie de categorías según el grado de exactitud con que se dé:

- La autosimilitud exacta, que sería la propiedad anteriormente definida.
- La cuasiautosimilitud y la autosimilitud estadística, que serían modos aproximados de la propiedad descrita.

Al observar la morfología física de las redes de transporte, parece evidenciarse que a medida que existe un alejamiento del centro urbano se va produciendo, paralelamente, una disminución en la densidad de la red de transporte colectivo guiado. De esta manera, la propiedad de las formas fractales anteriormente expuesta parece no cumplirse, al menos en su formulación más restrictiva. Con esta hipótesis de partida, se ha procedido a graficar la relación sobre la que se asienta el Indicador de Fractalidad, dada por el logaritmo del número de paradas y por el logaritmo de la superficie de las mismas. Así, atendiendo a la representación, e intuyendo la existencia de la propiedad de la autosimilitud en sus modos menos exactos, se pretende identificar el comportamiento de las redes de transporte a medida que existe un alejamiento del centro urbano. Para ello, se han desarrollado una serie de figuras que se adjuntan dentro del Anejo número 3 y que, a modo de ejemplo, en este apartado se representan a través de las gráficas resultantes para el área metropolitana asociada a la ciudad de Madrid.

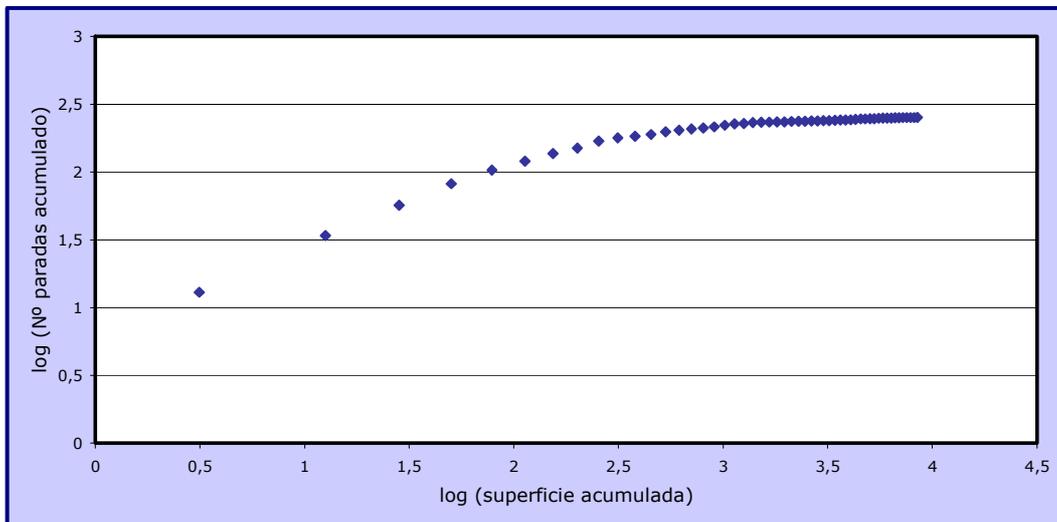


Figura 7.33, representación gráfica de la relación fractal de la ciudad de Madrid

(f. propia)

Antes de entrar a analizar las gráficas obtenidas, cabe establecer que las relaciones aquí consideradas no son exactamente las que definen el Indicador de Fractalidad expuesto en el desarrollo de los trabajos. Sin embargo, esta representación tiene la ventaja de que muestra con mayor claridad la propiedad de la autosimilitud, que es el objeto que se quiere estudiar dentro de las redes de transporte colectivo guiado en este apartado. Además, el hecho de que la relación no responda por completo a la definición dada por el Indicador de Fractalidad, no significa que la representación de los diferentes cambios de tendencia de la relación fractal no sean los mismos en ambos casos, ya que estos cambios de tendencia si son semejantes.

Entrando en la valoración de las gráficas obtenidas, se puede identificar como, en los casos de las cinco ciudades, la representación hallada se puede asimilar a parábolas más o menos asintóticas formadas por tramos aproximadamente rectos. Esta posibilidad de reformulación de las figuras a

través de unas pocas líneas rectas es importante, ya que acerca los resultados obtenidos a las formas fractales que presentan cuasiautosimilitud, dado que esta propiedad se manifiesta cuando los fractales de este tipo contienen copias menores y distorsionadas de si mismos.

Esta propiedad descrita, está íntimamente relacionada con la propia concepción territorial de las redes, que presentan unos mayores grados de densidad en los centros urbanos debido a la histórica mayor inversión en estas zonas en detrimento de los lugares alejados del centro. Para el estudio de estos fenómenos se adjuntan, en el Anejo 3, gráficos de las diferentes ciudades desglosados por tramos asimilados a rectas.

A efectos metodológicos, cabe establecer que la diferenciación de la red en diferentes tramos se ha realizado a través de la maximización de las desviaciones medias arriba mostradas. Esto quiere decir que se han ido escogiendo tramos de puntos de forma que se aumentase la desviación media conjunta de los tramos rectos consecutivos escogidos. Con esta metodología se ha pretendido impedir la manipulación de los resultados obtenidos y aumentar la confianza en el procedimiento. A su vez, se ha avanzado en la determinación de una forma de manipulación de las gráficas que devuelva resultados de forma unívoca.

A continuación, y a modo de ejemplo, se incluyen los resultados gráficos obtenidos en el ensayo efectuado sobre el área metropolitana de Madrid:

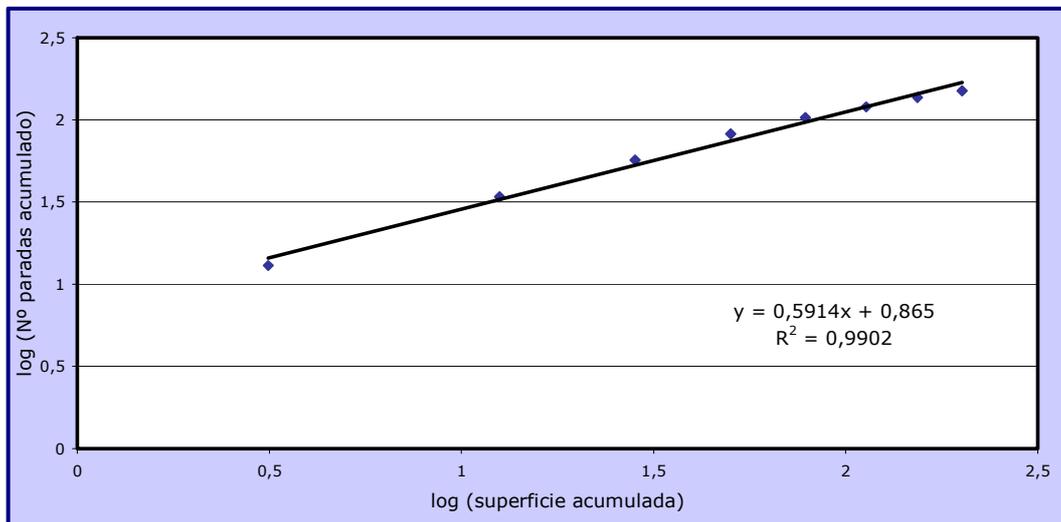


Figura 7.34, relación fractal de Madrid para las coronas de radio 1 a 8 km

(f. propia)

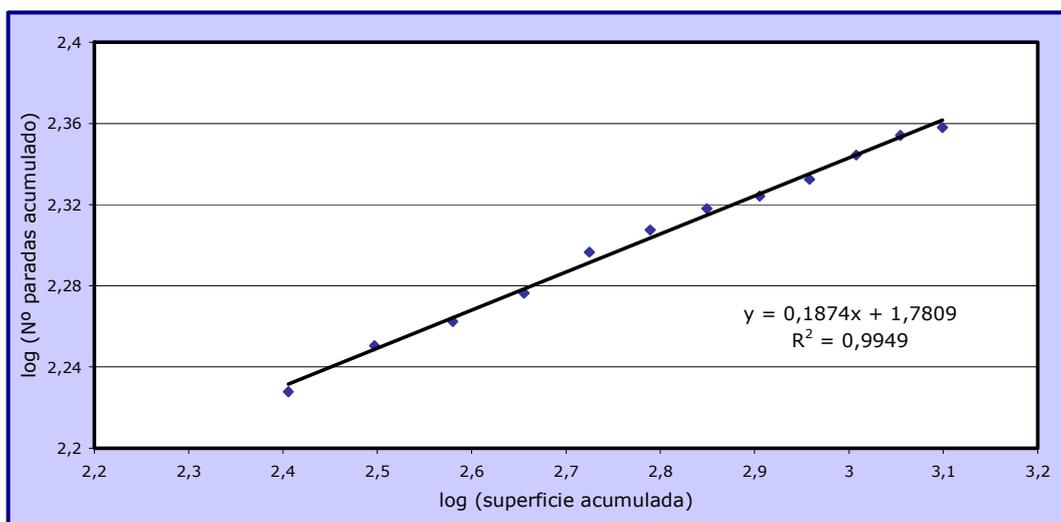


Figura 7.35, relación fractal de Madrid para las coronas de radio 9 a 20 km

(f. propia)

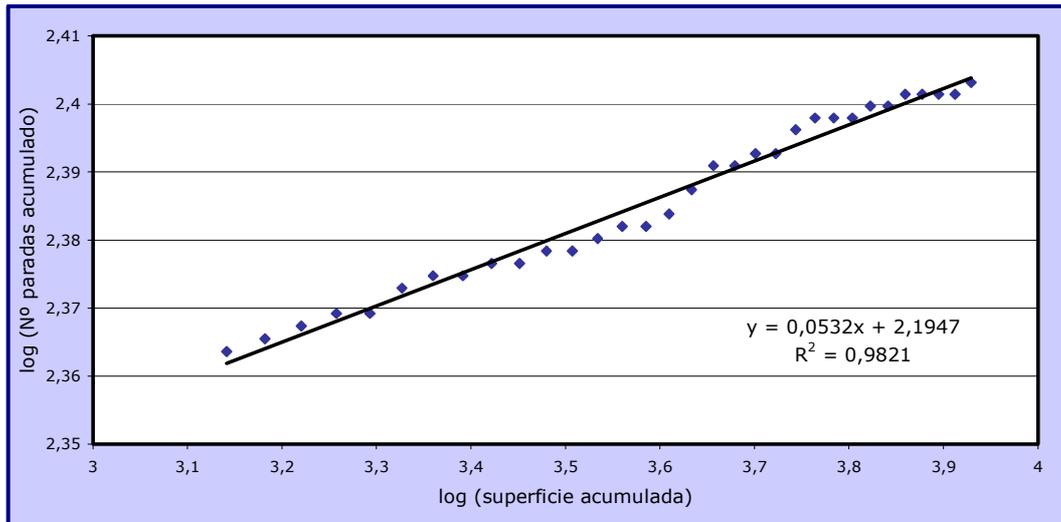


Figura 7.36, relación fractal de Madrid para las coronas de radio 21 a 52 km

(f. propia)

Todas las relaciones determinadas a lo largo de las gráficas obtenidas se pueden resumir en la siguiente tabla:

		INTERVALO (Km)	PENDIENTE	DESVIACIÓN MEDIA
BCN	Tramo 1	1-6	0,6698	0,9967
	Tramo 2	7-15	0,2498	0,9913
	Tramo 3	16-38	0,1619	0,9943
LON	Tramo 1	1-8	0,7689	0,9978
	Tramo 2	9-18	0,5407	0,9944
	Tramo 3	19-51	0,2202	0,9972
	Tramo 4	52-69	0,0786	0,9409
MAD	Tramo 1	1-8	0,5914	0,9902
	Tramo 2	9-20	0,1874	0,9949
	Tramo 3	21-52	0,0532	0,9821
MIL	Tramo 1	1-6	0,6412	0,9914
	Tramo 2	7-57	0,3059	0,9954
PAR	Tramo 1	1-6	0,8138	0,9876
	Tramo 2	7-40	0,2242	0,9932
	Tramo 3	41-63	0,0360	0,9760

Tabla 7.17, desviaciones medias, pendientes e intervalos asociados a la fractalidad de las ciudades (f. propia)

7.15.3.- Resultados deducidos del ensayo

Una vez dada esta breve explicación sobre el proceso de tramificación de las áreas metropolitanas, se puede pasar a estudiar los resultados obtenidos. De esta forma, cabe identificar una serie de coincidencias en todas las redes, de las que se pueden extraer una serie de conclusiones.

Así, en primer lugar, cabe reseñar la coincidencia en los tramos identificados. Existe una tramificación constante de la red más o menos independiente del resto de parámetros como puedan ser longitudes y densidades, que se manifiesta en los siguientes bloques de tramos:

- Bloque 1: Tramo desde el centro del área metropolitana hasta las coronas circulares de radio comprendido entre 6 y 8 Km aproximadamente.
- Bloque 2: Dentro de este segundo bloque se pueden distinguir dos subbloques de resultados, de manera que pueden aparecer ambos, o uno que abarca el conjunto del intervalo de los dos subgrupos juntos:
 - Subbloque 2.1: Tramo desde el bloque 1 hasta las coronas circulares de radio comprendido entre 16 y 20 Km aproximadamente.
 - Subbloque 2.2: Tramo desde el bloque 2.1 hasta las coronas circulares de radio comprendido entre 40 y 50 Km aproximadamente.
- Bloque 3: Tramo comprendido desde el bloque 2 hasta las coronas circulares de radio máximo en caso de existir tales dimensiones.

Dentro de la clasificación realizada, es importante identificar cómo las áreas metropolitanas presentan un nivel de servicio constante para los primeros 6-8 kilómetros y cómo presentan otro nivel de servicio constante a partir de los 40-50 kilómetros, identificando este nivel de servicio a través de la pendiente de la relación fractal mostrada. Parece claro, por tanto, que la zona de la ciudad compacta y continua sigue conservando ciertos privilegios derivados de una mayor inversión en redes de infraestructura colectiva guiada y que, por otro lado, la zona más alejada de esta ciudad central sigue teniendo unos parámetros de inversión más marginales.

Entre estas dos zonas existe una zona intermedia no tratada igual por los planificadores de las redes, pero que básicamente se engloba dentro de dos posibilidades:

- 1)** Identificar dentro de esta área dos ámbitos diferentes, una parte del área metropolitana más cercana a la ciudad principal con mejores características en su red de transporte colectivo guiado y otra parte más alejada con unos parámetros definidores de la red de peores características; (Barcelona, Londres, Madrid).
- 2)** Identificar una única zona con un tratamiento de red similar; (Milán, París).

Esta diferenciación que se puede extraer de los datos calculados se evidencia estudiando el sistema de transporte de dichas ciudades. Así, Milán y París tienen una red bastante homogénea entre metro y ferrocarril de cercanías, mientras que Barcelona y Madrid son ciudades con una importancia mayor de la red de metro. Finalmente, Londres se incluiría dentro de este último grupo debido a que el gran mallado de su red de ferrocarril la sitúa al nivel de un metro en los tramos contiguos a la ciudad compacta tradicional, esta afirmación se extrae del estudio de las pendientes de las redes obtenidas en los diferentes tramos.

En segundo lugar, existe otro hecho singular en los resultados del cuadro anterior. Así, en cada ciudad analizada, cada tramo definido va disminuyendo su pendiente respecto al anterior a medida que existe un alejamiento del centro urbano, siendo esto una muestra inequívoca de una menor densidad de la red y de unas peores características fractales de la misma. Sin embargo, el parámetro de la desviación media permanece prácticamente inalterado dentro de todos los tramos de red, con unas correlaciones que rondan el 0,99 en cualquiera de los casos.

Este hecho viene a apoyar la teoría de la existencia de cuasiautosimilitud dentro de las redes de transporte colectivo guiado, ya que la relación fractal permanece firme en toda la tramificación efectuada, en cuanto a que la desviación media sigue siendo elevada.

Sin embargo, cada bloque analizado presenta una menor componente fractal a medida que existe un alejamiento del centro, determinado por la pendiente de la recta de regresión de cada tramo. Este hecho es relevante, ya que a través de él se puede interpretar que el fractal principal es el que se presenta en el centro de las ciudades en el tramo 1 (hasta 6-8 kilómetros respecto al centro de la ciudad), y que los fractales copias son las diferentes configuraciones que se van mostrando a medida que la red se separa del centro urbano, y que se caracterizan por una menor densidad de la red.

7.15.4.- Conclusiones obtenidas del ensayo y líneas abiertas

De la realización de este ensayo se han podido determinar varias conclusiones. Una primera es la **similar percepción de las ciudades que se tiene en la planificación de las redes de transporte**, materializada en la definición de:

- Una zona de gran importancia, definida por el centro de las ciudades y un radio de tamaño aproximado a 8 kilómetros.
- Una zona residual, definida por las partes más alejadas del centro urbano y definida aproximadamente a partir de los 45 kilómetros de radio.
- Un área de importancia media entre las anteriores zonas y que recibe distintos tratamientos de planificación.

Este entendimiento de las áreas metropolitanas de manera semejante en todos los casos se manifiesta en la **existencia de la propiedad de la cuasiautosimilitud dentro de las diferentes ciudades**. Propiedad reflejada a través de un patrón definido por la ciudad compacta y unas copias deformadas o menores definidas por cada uno del resto de bloques definidos en el anterior apartado.

A su vez, estos umbrales encontrados pueden estar relacionados con el **agotamiento de los diferentes modos ferroviarios, metro y ferrocarril de cercanías, para satisfacer la movilidad de los ciudadanos**. Este hecho, además, es importante porque puede definir el **tamaño máximo de la ciudad compacta y continua (6-8 Km)** y el **tamaño máximo del área metropolitana (40-50 Km)** con los actuales modos de transporte ferroviario

Como líneas abiertas para futuros ensayos cabría investigar las variaciones existentes entre los grados de fractalidad de los diferentes tramos de pendiente homogénea y su relación con los indicadores de oferta y otros indicadores territoriales y de transporte definidos. Así, estas variaciones de pendiente entre tramos de red pueden llevar aparejadas umbrales de percepción por el usuario, que conlleven mayores o menores utilidades y por tanto mayor o menor utilización relativa de las redes por el usuario final del transporte.

7.16.- Resumen de ensayos efectuados

A lo largo del presente capítulo se han expuesto el conjunto de ensayos que se han efectuado sobre los diferentes indicadores de oferta definidos y sobre los indicadores prestados desde otras publicaciones. Si la concepción de los indicadores a utilizar en el conjunto de los trabajos ha sido el momento conceptualmente más importante y el desarrollo de la metodología de obtención de los indicadores ha sido el trabajo más laborioso de los efectuados, se puede decir que el ensayo de indicadores y la comprobación de las interrelaciones que se han expuesto ha sido el elemento que ha permitido cohesionar una serie de fundamentos que intuitivamente se poseían antes de comenzar el desarrollo de los trabajos.

Los ensayos efectuados han demostrado ser útiles y han conseguido aunar, a través de la consideración del espacio de las redes, una serie de conceptos asociados a la planificación, al territorio y al transporte que anteriormente se presentaban de manera inconexa. Por ello, el capítulo noveno de desarrollo de los trabajos se presentará como una Teoría completa e incluyente de todos los resultados que en este apartado del capítulo séptimo se reseñan de forma mas o menos individualizada y con una vocación únicamente de resumen de los trabajos realizados.

En cuanto a los ensayos efectuados, se pueden dividir en cuatro bloques fundamentales y coherentes por sí mismos dentro del conjunto de trabajos realizados:

1) El primer bloque se constituye para garantizar la bondad de la metodología empleada. Así, en este primer momento se han ensayado todos los procedimientos que han presentado dudas sobre su validez, así como aquellos parámetros que han sido fruto de simplificaciones. En concreto, se han realizado los siguientes ensayos:

- Relación entre los tiempos de viaje de los operadores y los de elaboración propia.
- Relación entre los indicadores reducidos y los indicadores completos.
- Delimitación del ámbito de trabajo.

- Especificidad del caso de Barcelona.

2) El segundo bloque de ensayos ha consistido en la puesta a punto de los indicadores y en la determinación de las correlaciones entre los mismos. De esta manera, se han intentado averiguar las relaciones existentes entre los indicadores de oferta considerados, así como dar la explicación teórica a estas relaciones empíricas. De esta manera, se han realizado los siguientes ensayos:

- Correlación entre los pares de indicadores similares obtenidos.
- Correlación entre indicadores con metodología de cálculo no similar.
- Consideraciones teóricas sobre la relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad.
- Consideraciones teóricas sobre la relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad.

3) El tercer bloque de ensayos se ha centrado en la interrelación de los diferentes indicadores de oferta considerados con aspectos relativos a la planificación, al territorio y al transporte. Estos ensayos se configuran como el núcleo central de aportaciones de los trabajos, logrando integrar un conjunto de aspectos que anteriormente estaban dispersos por la literatura existente. En concreto se realizan los siguientes ensayos:

- Relación entre los indicadores de oferta y la carga transportada por las redes de transporte.
- Relación entre los indicadores de oferta y la inversión en modos de transporte.
- Relación entre los indicadores de oferta y los asentamientos en el territorio. Estudio de la ciudad dispersa.

4) Finalmente, se ha establecido un último bloque de ensayos centrados en el Indicador de Fractalidad. Debido a los buenos resultados que este indicador ha proporcionado y a la relativa facilidad de cálculo del mismo, se ha considerado adecuado el profundizar en el conocimiento de la lógica fractal dentro de las redes de infraestructuras del transporte. De esta manera, se han realizado dos ensayos de ampliación conceptual dentro del campo de la fractalidad, a saber:

- Ampliación del concepto de fractalidad al conjunto del territorio.
- Identificación de propiedades fractales dentro de las redes de transporte ferroviario.

Con la realización de estos ensayos se considera que se ha abarcado el conjunto de objetivos que se propusieron en la definición de los trabajos de manera más que amplia. De esta forma, en el siguiente capítulo se expone un caso práctico de implementación de la metodología. Finalmente, en el capítulo noveno, se pasa a comentar de forma hilada y conjunta las conclusiones obtenidas del estudio de las características de las redes, así como las consecuencias que los resultados hallados tienen sobre la planificación de las infraestructuras, sobre el territorio y sobre la utilidad de las redes para los usuarios de los servicios del transporte colectivo guiado.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 7

¹ JULIÀ SORT, J. (2.006): *Redes Metropolitanas*. Agencia Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.

² MANDELBROT, B. (1.982): *La geometría fractal de la naturaleza*. Tusquets Editores, ISBN 84-8310-549-7.

³ GENRE-GRANDPIERRE, C. (1.999): *La desserte spatiale des réseaux de transport routier: une approche fractale*. Rev. Flux nº38, París.

⁴ DUPUY, G.; CURIEN, N. (2.003): *Réseaux de communication, marchés et territoires*; Presses de Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Conferencia "Territorio en Redes", Barcelona.

capítulo 8

APLICACIÓN NUMÉRICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A UN CASO PRÁCTICO

8.1.- Introducción

En este capítulo octavo, a modo de aplicación práctica, se pretenden introducir dentro de ejemplos los distintos gráficos, resultados y conclusiones extraídas a lo largo de los trabajos. De esta manera, a partir de la definición de la hipotética situación de partida de una ciudad cualquiera, se van a ir aplicando sucesivamente los diferentes elementos de juicio establecidos a lo largo de los trabajos. De esta forma, se conseguirá una situación final de la red de infraestructuras que ofrezca unos mejores niveles de servicio globales.

Una vez establecida la situación inicial de la ciudad de estudio, se van a establecer una serie de ejemplos que permitirán visualizar situaciones reales de planificación, basados en la consecución de los siguientes objetivos:

- 1) Mejora de la carga media de viajeros transportada por la red de transporte público colectivo sobre infraestructura fija.
- 2) Control del grado de dispersión de un área metropolitana.
- 3) Determinación de los efectos de la aplicación de un plan de inversiones en infraestructuras.

A través de estos tres ejemplos se pretenden poner de manifiesto las interrelaciones existentes entre los parámetros manejados y las consecuencias que la modificación de uno de ellos tiene sobre el resto. Para ser coherente con los resultados obtenidos a lo largo de los trabajos, la aplicación práctica se va a suponer que se desarrolla sobre una ciudad interior.

8.2.- Definición de la hipotética situación de partida de la ciudad de estudio

Para la aplicación práctica de la metodología se va a partir de una situación hipotética de partida. Para ello se establecen los siguientes parámetros físicos iniciales del área metropolitana en estudio:

- Longitud de la red de autopistas: 800 Km.
- Longitud de la red ferroviaria: 1.200 Km.

Con estos dos datos se pueden extraer el resto de parámetros básicos manejados a lo largo de los trabajos. A través de las longitudes de la red de carreteras y de la red de ferrocarriles se define el Indicador de Inversión Relativa:

$$I_{IR} = L \text{ red ferroviaria} / L \text{ red autopistas}$$

De esta forma se tiene que:

$$I_{IR} = 1.200/800 = 1,5$$

De las gráficas asociadas al Indicador de Inversión Relativa se obtienen las rectas de regresión que permiten hallar los Indicadores de Accesibilidad Sintética, de Fractalidad y de Densidad. Sus ecuaciones son:

$$I_{IR} = -23,941 \cdot I_A + 3,1603$$

$$I_{IR} = 6,2232 \cdot I_F - 0,6346$$

$$I_{IR} = 5,6935 \cdot I_D - 0,8589$$

Para el valor de $I_{IR} = 1,5$, se obtienen los siguientes valores:

$$I_{A'} = 0,0693$$

$$I_F = 0,3430$$

$$I_D = 0,4143$$

Para comprobar que los resultados obtenidos son coherentes con el conjunto de la metodología establecida, estos se han contrastado a través de las correlaciones inicialmente obtenidas entre Indicadores de Oferta. Las ecuaciones de regresión son las siguientes:

$$I_{A'} = -0,2479 \cdot I_F + 0,1541$$

$$I_F = 0,9554 \cdot I_D - 0,0539$$

Partiendo del valor del Indicador de Fractalidad, $I_F = 0,3430$, se obtienen los siguientes valores del resto de Indicadores de Oferta:

$$I_{A'} = 0,0691$$

$$I_D = 0,4154$$

Como se observa, los resultados apenas difieren con la utilización de ambas regresiones. Debido a que los primeros valores dados de los Indicadores de Oferta son directos, y los segundos valores necesitan dos regresiones para su cálculo, se van a considerar como válidos aquellos primeros valores obtenidos.

Una vez obtenidos los Indicadores de Oferta, y para conocer el estado inicial del área metropolitana, se calculan los Indicadores de Dispersión y de Carga de la red.

$$I_D = 0,0013 \cdot I_{CG} + 0,246$$

$$I_{US} = -31,651 \cdot I_F + 21,14$$

De esta manera se obtienen los siguientes resultados:

$$I_{CG} = 129,5$$

$$I_{US} = 10,28$$

Con todos estos datos, se tendría la siguiente situación inicial del área metropolitana:

	VALOR DE LOS INDICADORES
Longitud red autopistas (km)	800
Longitud red ferroviaria (km)	1.200
$I_{A'}$	0,0693
I_F	0,3430
I_D	0,4143
I_{IR}	1,5
I_{CG}	129,5
I_{US}	10,28

Tabla 8.1, datos de partida

(f. propia)

Como se observa, se pueden identificar todos los Indicadores definidos a partir del conocimiento de la longitud de las redes de transporte viario y ferroviario, que se corresponden con los parámetros

que definen la oferta real de infraestructuras del área metropolitana. A partir de aquí, ya se pueden plantear los tres supuestos indicados en la introducción.

8.3.- Aplicación de la metodología a la mejora de la carga media de viajeros transportada por la red de transporte público colectivo sobre infraestructura fija

Analizando la situación de partida, el planificador de la red ha expuesto su intención de incrementar la carga transportada por la red. Tras la realización de la prognosis correspondiente, el planificador ha llegado a la conclusión de que con una carga de 160 viajes por habitante y por año podrá reducir sus costes y mejorar su servicio de forma significativa.

A través de la metodología desarrollada se puede determinar como ha de ser la oferta en infraestructuras para poder llegar a los objetivos planteados.

1) El primer paso a dar se produce a través de la correlación entre el Indicador de Carga (160 en este caso) y el Indicador de Densidad:

$$I_D = 0,0013 \cdot I_{CG} + 0,246$$

$$I_D = 0,4540$$

Este sería el Indicador de Densidad necesario para alcanzar la carga objetivo.

2) Con el Indicador de Densidad se pueden determinar el resto de Indicadores de Oferta definidos:

$$I_{A'} = -0,2479 \cdot I_F + 0,1541$$

$$I_F = 0,9554 \cdot I_D - 0,0539$$

$$I_{A'} = 0,0599$$

$$I_F = 0,3799$$

3) A través del Indicador de Fractalidad se determina el nuevo Indicador de Inversión Relativa, que ha de ser el parámetro que defina la nueva política de planificación.

$$I_{IR} = -23,941 \cdot I_{A'} + 3,1603$$

$$I_{IR} = 6,2232 \cdot I_F - 0,6346$$

$$I_{IR} = 5,6935 \cdot I_D - 0,8589$$

$$I_{IR} = 1,7296$$

Si se obtiene este Indicador a través de las correlaciones establecidas con el resto de Indicadores de Oferta no se obtiene diferencias sustanciales, comenzando las mismas a partir del tercer decimal.

4) Si se supone que existe un plan de inversiones con un determinado periodo de aplicación, en el que se van a ejecutar 200 Km de autopistas, la construcción de infraestructuras ferroviarias deberá ser de:

$$((800 + 200) \cdot I_{IR}) - 1.200 = 529,6 \text{ Km}$$

Se deberán construir 529,6 Km de ferrocarril a lo largo del periodo de inversión del plan de carreteras para incrementar la carga transportada hasta los 160 viajes/hab/año.

5) Aparte del aumento de la carga de transporte, la nueva oferta de infraestructuras provoca otros efectos:

- Existe un cambio de la accesibilidad sintética:

$$(0,0599/0,0693) \cdot 100 = 86,44\%$$

Se mejoran la accesibilidad sintética hasta reducirla al **86,44%** de su valor original.

- Existe un cambio de la superficie urbanizada cubierta por la red ferroviaria:

$$(0,4540/0,4154) \cdot 100 = 109,29\%$$

Se mejora el porcentaje de superficie urbanizada y cubierta por el ferrocarril hasta aumentarla al **109,29%** del valor original.

- Existe un cambio de la dispersión de la urbanización:

Se calcula el nuevo valor del Indicador de Dispersión,

$$I_{US} = -31,651 \cdot I_F + 21,14$$

$$I_{US} = 9,12$$

$$(9,12/10,28) \cdot 100 = 88,72\%$$

La oferta de infraestructuras realizada supone la disminución de la dispersión de la urbanización hasta reducirla a un **88,72%** del valor original.

8.4.- Aplicación de la metodología al control del grado de dispersión de un área metropolitana

Analizando la distribución de la urbanización, un área metropolitana se plantea la disminución de la dispersión de los asentamientos. Desde los órganos competentes se considera que una reducción de dicha dispersión hasta el 75% de su valor original sería aceptable dentro del objetivo perseguido. Con este objetivo se necesita elaborar una política de intervención.

A través de la oferta de infraestructuras y con el método elaborado se puede ofrecer una respuesta al problema planteado.

1) Con el dato de dispersión objetivo, se calcula el nuevo valor a alcanzar por el Indicador de Dispersión:

$$I_{US} = 0,75 \cdot 10,28 = 7,71$$

2) A través del Indicador de Dispersión se calcula el nuevo Indicador de Fractalidad, y con este los nuevos Indicadores de Accesibilidad Sintética y Densidad:

$$I_{US} = -31,651 \cdot I_F + 21,14$$

$$I_F = 0,4243$$

$$I_{A'} = -0,2479 \cdot I_F + 0,1541$$

$$I_F = 0,9554 \cdot I_D - 0,0539$$

$$I_{A'} = 0,0489$$

$$I_D = 0,5005$$

3) A través del Indicador de Fractalidad se obtiene el Indicador de Inversión Relativa:

$$I_{IR} = 6,2232 \cdot I_F - 0,6346$$

$$I_{IR} = 2,0059$$

4) Se supone, al igual que en el ejemplo anterior, que existe un Plan de inversión para un determinado periodo de tiempo por el que se van a ejecutar 200 Km de autopista dentro del área metropolitana. En este caso, la inversión en infraestructura ferroviaria deberá ser de:

$$((800 + 200) \cdot I_{IR}) - 1.200 = 805,9 \text{ Km}$$

Para disminuir el grado de dispersión hasta el 75% de su valor original, y según el plan de inversión viaria previsto, será necesario construir 805,9 Km de infraestructuras ferroviarias.

5) Aparte de la disminución de la dispersión, la nueva oferta de infraestructuras provoca otros efectos:

- Existe un cambio de la accesibilidad sintética:

$$(0,0489/0,0693) \cdot 100 = 70,56\%$$

Se mejoran la accesibilidad sintética hasta reducirla al **70,56%** de su valor original.

- Existe un cambio de la superficie urbanizada cubierta por la red ferroviaria:

$$(0,5005/0,4154) \cdot 100 = 120,49\%$$

Se mejora el porcentaje de superficie urbanizada y cubierta por el ferrocarril hasta aumentarla al **120,49%** del valor original.

- Existe un cambio de la carga de viajeros transportada por la red ferroviaria:

El nuevo Indicador de Carga es el siguiente,

$$I_D = 0,0013 \cdot I_{CG} + 0,246$$

$$I_{CG} = 195,8$$

Se aumenta la carga de viajeros de la red hasta 195,8 viajes/hab/año, lo que supone el siguiente incremento

$$(195,8/129,5) \cdot 100 = 151,20\%$$

Se mejora el porcentaje de viajeros transportados por la red ferroviaria hasta aumentarlo al **151,20%** del valor original.

8.5.- Aplicación de la metodología a la determinación de los efectos de la implantación de un plan de inversiones en infraestructuras

Se quieren analizar los efectos que va a causar un plan de inversión en infraestructuras sobre el área metropolitana en estudio. El plan consiste en la construcción de 200 Km de autopistas y de 200 Km de infraestructuras ferroviarias en un determinado periodo de tiempo.

Para la determinación de los efectos del plan de infraestructuras descrito se aplica la metodología elaborada.

1) El primer paso es determinar el valor del nuevo Indicador de Inversión Relativa:

$$I_{IR} = (1.200+200) / (800+200) = 1,4$$

2) A través del Indicador de Inversión relativa se pueden obtener los Indicadores de Oferta definidos:

$$I_{IR} = 6,2232 \cdot I_F - 0,6346$$

$$I_F = 0,3269$$

$$I_{A'} = -0,2479 \cdot I_F + 0,1541$$

$$I_F = 0,9554 \cdot I_D - 0,0539$$

$$I_{A'} = 0,0731$$

$$I_D = 0,3986$$

3) Con los Indicadores de Oferta se pueden obtener los Indicador de Carga y de Dispersión,

$$I_D = 0,0013 \cdot I_{CG} + 0,246$$

$$I_{US} = -31,651 \cdot I_F + 21,14$$

$$I_{CG} = 117,4$$

$$I_{US} = 10,79$$

4) Con todos los datos obtenidos ya se pueden establecer las consecuencias de la actuación:

- Existe un cambio de la accesibilidad sintética:

$$(0,0731/0,0693) \cdot 100 = 105,48\%$$

Se empeora la accesibilidad sintética del transporte ferroviario aumentándola hasta el **105,48%** de su valor original.

- Existe un cambio de la superficie urbanizada cubierta por la red ferroviaria:

$$(0,3986/0,4154) \cdot 100 = 95,96\%$$

Se empeora el porcentaje de superficie urbanizada y cubierta por el ferrocarril reduciéndola hasta el **95,96%** del valor original.

- Existe un cambio de la carga de viajeros transportada por la red ferroviaria:

$$(117,4/129,5) \cdot 100 = 90,66\%$$

Se empeora el porcentaje de viajeros transportados por la red ferroviaria disminuyéndolo hasta el **90,66%** del valor original.

- Existe un cambio de la dispersión de la urbanización:

$$(10,79/10,28) \cdot 100 = 104,96\%$$

Se empeora la dispersión de la urbanización aumentándola hasta el **104,96%** del valor original.

8.6.- Consideraciones finales de la aplicación numérica de la metodología

A través de los ejemplos expuestos se ha conseguido aplicar la metodología de cálculo al caso diseñado. Lo primero que cabe comentar es que, aunque se den resultados exactos sobre las inversiones a realizar y sobre los efectos de estas, más bien se trata de una puesta en **perspectiva de las directrices que han de seguir las inversiones para alcanzar los resultados perseguidos.**

Todo ello deriva del hecho de que la metodología de cálculo no es determinística, es decir, las rectas de regresión sobre las que se ha trabajado presentan unas dispersiones sobre la realidad, que vienen dadas por la diferencia entre la desviación media y el valor unidad. Aún con ello, si que se pueden determinar claramente las políticas de inversión en oferta de infraestructuras que han de seguir las áreas metropolitanas para avanzar en la mejora de la eficiencia del transporte y en la reducción de la dispersión de las áreas urbanizadas.

Dentro de estas políticas de oferta de infraestructuras, se ha visto como a través del Indicador de Inversión Relativa y de su modificación se pueden llegar a determinar y a variar la práctica totalidad de los parámetros que se han ido definiendo a lo largo de los trabajos. De esta forma, se pone en valor la **necesidad de plantear el desarrollo urbano y el reforzamiento de la eficiencia de las redes de transporte colectivo guiado en función de la oferta de infraestructuras del transporte.**

Además del **Indicador de Inversión Relativa**, el **Indicador de Fractalidad** se muestra como el otro **elemento central para la aplicación de la metodología.** Debido a su alto grado de correlación con la mayoría de los indicadores manejados y como forma de asegurar la mayor precisión de los resultados finales, las diferentes correlaciones que se han utilizado se han realizado a través de este Indicador de Fractalidad.

El único elemento sustancial que no se ha introducido dentro de los ejemplos expuestos ha sido el de la superficie urbanizada dentro del área metropolitana. A lo largo de los trabajos ya se ha determinado que este parámetro está directamente vinculado a longitud de la red viaria, además de formar parte de la formulación de gran número de indicadores. Sin embargo, los grados de correlación obtenidos no han sido lo suficientemente elevados como para considerar que dicha superficie urbanizada sea linealmente dependiente, individualmente considerada, con alguno de los Indicadores obtenidos.

De esta manera, la **superficie urbanizada se configura como un parámetro dependiente del resto** ya que, según las relaciones obtenidas, conociendo determinadas magnitudes físicas del territorio y de las infraestructuras del transporte se puede acotar el valor de la superficie urbanizada. Sin embargo, no se ha encontrado una correlación lo suficientemente buena para ser aplicada numéricamente a este parámetro. De esta manera, la concreción de las relaciones entre la superficie urbanizada con la oferta de infraestructuras del transporte es uno de los elementos que deben de seguir siendo fruto de análisis en un futuro.

Con todo lo expuesto a lo largo de estos trabajos, se consigue crear un marco conceptual en el que **la ocupación del territorio, la eficiencia de los transportes y la planificación de las inversiones quedan ligadas a través de las características de la oferta de las redes de infraestructuras del transporte.** Así, la unión de todos estos campos queda establecida gracias a

la concreción de la metodología de cálculo y representación desarrollada y a la construcción de diversas herramientas de control a través de los distintos Indicadores de Oferta ensayados.

capítulo 9

CONCLUSIONES EXTRAIDAS DEL DESARROLLO DE LOS TRABAJOS

9.1.- Introducción

El presente capítulo noveno de los trabajos sirve como elemento de culminación y resumen a todo el proceso seguido en el desarrollo de los mismos. Llegar hasta este punto supone la comprensión y capitulación, tanto conceptual como metodológica, de todos los elementos que se han ido barajando a lo largo del proceso de armado de la estructura de los trabajos. Así, si se comienza por resumir los pasos dados, se pueden encontrar ciertos escalones conceptuales bastante identificables:

- Establecimiento de objetivos y líneas directrices de los trabajos.
- Estudio de los trabajos ya realizados por otros autores.
- Identificación de los Indicadores de Oferta a considerar.
- Desarrollo de una metodología de modelización.
- Implementación de los Indicadores de Oferta dentro de los modelos realizados y obtención de resultados.
- Realización de ensayos sobre los Indicadores de Oferta obtenidos, así como sobre otros Indicadores relacionados con la planificación, el territorio y el transporte.
- Aplicación de los resultados obtenidos a un caso práctico.

Tras la superación de todos estos hitos parciales de los trabajos se llega a este capítulo noveno, que sirve como aglutinador de los resultados obtenidos y como marco para mostrar, ordenadamente, las conclusiones obtenidas en el desarrollo de los trabajos.

Pasando a abordar la estructura de este capítulo de conclusiones, se va a seguir un patrón muy similar al seguido en el capítulo séptimo, de manera que existirán dos grandes bloques de conclusiones y un tercer capítulo dedicado al desarrollo conceptual de la lógica fractal dentro del territorio. De esta manera, se tendrán los siguientes bloques:

- Exposición de las conclusiones asociadas a la concepción de la metodología de modelización.
- Exposición de las conclusiones asociadas al estudio de las características de las redes ferroviarias, a través de los Indicadores de Oferta desarrollados, y a sus relaciones con la planificación, el territorio y el transporte.
- Desarrollo conceptual de los elementos de la teoría de formas fractales dentro del territorio cubierto por las redes de transporte ferroviario.

Como se puede observar, existe una similitud entre esta presentación de conclusiones y el desarrollo efectuado en el capítulo séptimo, referido a los ensayos sobre los Indicadores de Oferta. Sin embargo, la diferencia fundamental, es que en este capítulo se va a realizar un desarrollo basado en los elementos conceptuales que emanan de los ensayos realizados. Este nuevo punto de vista, aglutinador de todos los resultados obtenidos, va a permitir exponer una argumentación en la que se da una visión de conjunto sobre cada uno de los tres puntos básicos enunciados anteriormente. De esta forma, se obtendrá un conjunto compacto e integrador de conceptos que permitan ampliar la comprensión que se tiene sobre las redes de transporte, sobre el territorio, sobre la planificación de la ciudad y sobre el elemento fundamental, que es la interrelación encontrada entre todos estos campos de trabajo.

9.2.- Exposición de las conclusiones asociadas a la concepción de la metodología de modelización

9.2.1.- Introducción

La formulación de una metodología propia, extrapolable entre ámbitos de actuación y coherente con los métodos de estudio que se han desarrollado, ha sido el primer pilar fundamental que se ha pretendido desarrollar en la formulación de estos trabajos. Debido a ello, a lo largo de este epígrafe 9.2, se van a mostrar las principales conclusiones obtenidas en la implantación de la metodología de análisis sobre las diferentes ciudades de estudio.

El desarrollo de este epígrafe se centrará en los aspectos más relevantes que se han puesto de manifiesto en el desarrollo teórico y material de la metodología de análisis. Para ello, se van a rescatar, del capítulo dedicado a la metodología y del capítulo sobre ensayos realizados, aquellos aspectos más importantes o novedosos que se desprenden de los mismos y que requieren de una puesta en valor a través de un capítulo de conclusiones.

9.2.2.- Planteamiento del problema de la modelización de los ámbitos de estudio

Desde el primer momento de concepción de los trabajos se ha considerado imprescindible la utilización de un método propio de modelización de los ámbitos de estudio. Este condicionante se ha establecido para tener la posibilidad de manejar, dentro de distintos ámbitos de trabajo, un mismo sistema de representación y de obtención de parámetros asociados a los Indicadores de Oferta estudiados. Todo ello hecho con el fin último de conseguir la homogeneidad en el análisis de las ciudades tomadas en consideración.

A la vista de lo expuesto en el párrafo anterior, se ha tenido que desarrollar un proceso metodológico. Para ello, ha sido necesario recapacitar sobre diversos conceptos importantes que giran, en general, en torno a un mismo problema. Este elemento central de reflexión es que **el aumento de precisión en el desarrollo metodológico conlleva, irremediablemente, un aumento de tiempo en los procesos de cálculo.**

El problema así planteado es irresoluble, lo que finalmente lleva a la búsqueda de una solución de compromiso entre precisión y tiempo. Es decir, se necesita llegar a un punto de equilibrio en el que el método sea lo suficientemente complejo como para devolver resultados con un grado de precisión elevado, y en el que, además, exista una economía de cálculo tal que permita desarrollar la metodología en tiempos que no sean excesivos.

Esta dicotomía se ha puesto de manifiesto a la hora de analizar todas las decisiones fundamentales que se han dado a lo largo del desarrollo de la metodología. De esta forma, al haber realizado, por un lado, el esfuerzo conceptual para la determinación de soluciones precisas y temporalmente eficientes y, por otro lado, ensayos empíricos encaminados al reforzamiento y validación de las decisiones tomadas, se puede decir que **se han obtenido unos resultados que deben servir para la futura elaboración de herramientas de análisis de las redes ferroviarias.**

9.2.3.- Elementos críticos en la modelización de los ámbitos y soluciones adoptadas para el desarrollo de la metodología

9.2.3.1.- Introducción

A continuación se muestran los principales momentos críticos que se han presentado en el desarrollo de la metodología, así como las soluciones que se han adoptado para conseguir ese compromiso expuesto entre precisión y economía de cálculo.

Cabe establecer que, dentro de la modelización realizada, se ha articulado una metodología basada en la teoría de grafos y otra metodología basada en la teoría de objetos fractales. Aunque ambas metodologías presentan numerosos elementos de modelización comunes, la modelización en grafos resulta más compleja que la realizada para la teoría de objetos fractales. Así, los problemas que presenta la primera de las metodologías, incorpora todos los problemas fundamentales de la metodología de objetos fractales y alguno más. Debido a ello, la descripción de los problemas metodológicos se refiere fundamentalmente a los relacionados con la teoría de grafos.

9.2.3.2.- Determinación del límite urbano

La determinación del espacio de trabajo es, sin lugar a dudas, el principal problema que se ha planteado a la hora de desarrollar la metodología de trabajo. La propia indefinición del concepto de límite urbano ha llevado a la necesidad de proceder a su definición para poder trabajar sobre un concepto no sujeto a interpretación. De esta forma, la definición dada a lo largo de los trabajos al **área metropolitana** ha sido la siguiente: **"es el espacio de ciudad construido, continuo o discontinuo, en el que se producen relaciones de carácter diario y dado para un determinado instante de tiempo"**.

Esta definición es una conclusión en sí misma, ya que refleja la reflexión conceptual realizada en torno a los aspectos que determinan qué es una ciudad dentro del estudio del territorio y de la movilidad. Así, los trabajos se han enfocado en las zonas que la definición de área metropolitana apunta como delimitadoras de las ciudades:

- Espacio construido.
- Espacio continuo o discontinuo.
- Espacio con relaciones de carácter diario.
- Espacio delimitado en un instante de tiempo.

Estas propiedades son las que determinan que un espacio sea ciudad o no lo sea y, por tanto, son los elementos que condicionan la inclusión de las diferentes superficies de suelo dentro del estudio realizado. De esta forma, las superficies que cumplen estas propiedades y ninguna otra más han sido las introducidas dentro de los ámbitos de estudio de las áreas metropolitanas consideradas.

Aún con el establecimiento de una definición, una vez que se trabaja sobre los planos resulta difícil determinar de forma unívoca si determinadas superficies de suelo forman parte del área metropolitana o no. Así, las superficies centrales presentan propiedades que permiten incorporarlas al ámbito de las áreas metropolitanas de forma inmediata, sin embargo, las zonas más periféricas no siempre presentan una clara pertenencia al área metropolitana. Para poder abordar la delimitación física final **se ha concluido necesario el establecimiento de criterios de delimitación para las zonas periféricas dudosas en cuanto a su inclusión en el concepto de área metropolitana.**

De esta manera, se han establecido los siguientes criterios, basados en propiedades físicas, y tendentes a la mejor comprensión de los límites de la ciudad. Así, se propone:

- Identificar polos, infraestructuras, ejes y corredores de actividad que debieran incluirse por su densidad.
- Identificar accidentes geográficos como cadenas montañosas, ríos o el mar que en ocasiones pudieran determinar zonas de difícil avance para la ciudad.
- Incluir zonas con una densidad de urbanización similar, dejando fuera las zonas en que esta superficie construida decrece en relación con la superficie de suelo total.

Con el establecimiento de estos criterios de inclusión de ámbitos se ha tratado de simplificar el proceso de toma de decisiones a la hora de valorar la pertenencia de suelos a las áreas metropolitanas sin olvidar, en ningún caso, que todas las superficies deben cumplir la definición dada de área metropolitana.

9.2.3.3.- Determinación de los puntos de cálculo dentro de la red de transporte colectivo guiado

La red de transporte colectivo guiado y su relación con los ámbitos de los que forma parte, son los elementos fundamentales que se han pretendido estudiar en el desarrollo de los trabajos. Dicha red de transporte está compuesta por una serie de nodos de relación entre la red y el territorio y por unos arcos de conexión entre nodos.

Dado que los nodos de conexión son los elementos fundamentales de la red de ferrocarril, ya que permiten la relación de los usuarios con el transporte, es sobre estos elementos sobre los que se ha prestado especial atención en el desarrollo de la metodología. El nodo de relación entre red y territorio se ha reflejado con el mayor grado de precisión posible dentro de los modelos de las áreas metropolitanas, ya que tanto para desarrollar el modelo de la teoría de grafos, como para desarrollar el modelo de la teoría de objetos fractales, la estación se ha configurado como el elemento fundamental.

A partir de esta exposición de principios y, atendiendo al modelo sobre el que se quiera actuar, para modelizar las distintas redes de transporte colectivo surgen dos concepciones diferentes. Todo ello partiendo de que, previamente, se han identificado y grafiado sobre planos todas las estaciones existentes dentro de los ámbitos de estudio considerados.

1) En primer lugar, **desde la teoría de objetos fractales**, se entiende que el análisis de la red ha de ser topológico y, por ello, **se han considerado todas las estaciones existentes en cada ámbito de estudio**.

2) En segundo lugar, desde la configuración de la teoría de grafos ha sido necesario determinar las interacciones entre las diferentes paradas a modo de tiempos de viaje. El número de estas interacciones dependerá, por tanto, de la cantidad de paradas consideradas. Este simple planteamiento lleva a la evidencia de que el aumento en el número de estaciones de cálculo de una unidad supone un incremento de interacciones igual al número total de estaciones existentes.

Ante este fenómeno asociado a la metodología se ha establecido una doble reflexión. Por un lado, aquella encaminada a la integración del principio de conjugación de la precisión del proceso y de la economía de cálculo. Por otro lado, la certeza de que las estaciones influyentes en el proceso de cálculo de tiempos de viaje eran aquellas que posibilitaban el proceso de intercambio entre las líneas de la red, así como aquellas otras que determinaban la superficie ocupada por la red.

A la luz de estas reflexiones, se han utilizado únicamente las estaciones con posibilidad de intercambio y las estaciones fin de línea. Esta decisión adoptada ha sido corroborada por los ensayos realizados y que han sido comentados a lo largo del apartado 7.4 de los trabajos. Estos ensayos, básicamente, han consistido en comparar los indicadores de oferta para redes completas y para redes reducidas a los puntos de interés. De esta forma, a través de las consideraciones realizadas y de los ensayos efectuados, se ha podido concluir que para la obtención de los resultados necesarios dentro de este estudio, asociados a la modelización de los grafos de las redes, **la modelización realizada únicamente a partir de los puntos de intercambio entre las líneas de una red y los puntos que definen los fines de línea es válida**.

Esta conclusión conduce a la **valoración de la importancia y de la potencialidad de los puntos de intercambio dentro de la red de transporte como auténticos catalizadores de la utilidad de la propia red**, configurándose estos como los vertebrados de la red y definidores de la utilidad de la misma, a través de su relación con el cálculo de los tiempos de viaje.

9.2.3.4.- Determinación de los tiempos de viaje entre los nodos de cálculo

El cálculo de los tiempos de viaje entre las diferentes estaciones se ha configurado como el elemento crítico de la metodología en lo que a la economía de cálculo se refiere. Este hecho se debe a la cantidad de interacciones que se producen dentro de los cálculos de tiempos de viaje, por tanto, la determinación de un proceso de cálculo sencillo y preciso de estos tiempos ha sido uno de los objetivos fundamentales de los trabajos.

Debido a ello, se han planteado dos maneras de obtener los tiempos de viaje:

- 1) Una primera, basada en la descripción matemática de todos los tiempos parciales que tienen lugar en el desplazamiento.
- 2) Una segunda, basada en la utilización de los tiempos de viaje que ofrecen las compañías explotadoras de los servicios de transporte.

Determinada la forma de obtención de los tiempos de viaje para ambas metodologías, se ha pasado a realizar su implementación dentro del área metropolitana de Madrid. La doble aplicación de los cálculos se ha sometido a ensayo y se han obtenido resultados similares en ambos casos, según se ha descrito en capítulos anteriores.

De esta forma, se puede concluir que **la metodología basada en la suma de los tiempos parciales que existen a lo largo del viaje es equivalente a la metodología basada en la utilización de los tiempos dados por los operadores del transporte**. Esta aportación es relevante, ya que permitirá la utilización de una u otra metodología según el grado de dificultad que en cada caso se observe al obtener los tiempos de viaje entre los diferentes nodos de cálculo.

Además de esta conclusión, se puede decir que **estas dos metodologías son complementarias en cuanto a su utilización**, puesto que en los ámbitos centrales de las áreas metropolitanas no suelen existir problemas de obtención de los tiempos a través de los operadores del transporte. Sin embargo, las deficiencias que se pueden producir en este método, sobre todo en las periferias por la existencia de varios operadores, se pueden suplir con la aplicación de la metodología basada en la adición de los tiempos parciales que se producen en el conjunto del viaje.

9.2.3.5.- Comparabilidad entre la delimitación de las ciudades interiores y las ciudades costeras

Aunque este epígrafe podría incorporarse propiamente dentro de las conclusiones obtenidas de la interpretación de los ensayos realizados, su inclusión en este apartado se considera apropiada porque también tiene implicaciones sobre la determinación de ciertos parámetros de la modelización. Entre ellos, principalmente, los relacionados con el cálculo de la superficie asociada a las coronas circulares de la teoría de formas fractales.

En el desarrollo de los trabajos, en un primer momento, se diseñaron las modelizaciones y los ensayos se realizaron de manera idéntica en todas las áreas metropolitanas. Sin embargo, a raíz del estudio pormenorizado de los resultados que se iban sucediendo, fue necesario recapacitar sobre la comparabilidad de estos ensayos entre las ciudades costeras y las ciudades interiores. Este hecho se debió, en concreto, a la falta de coherencia de los resultados asociados al área metropolitana de Barcelona respecto del resto de áreas metropolitanas.

Vistos los resultados obtenidos y tras un periodo de análisis de los mismos, se llegó a la conclusión de la **imposibilidad de comparar tal cual los resultados provenientes de las ciudades interiores con los resultados de las ciudades costeras (Barcelona, en este caso)**. Así, se estudió este hecho y se llegó a dos conclusiones principales que explicaban el porqué de la incomparabilidad de los resultados:

- 1) En primer lugar, el centro de gravedad de una superficie semicircular (ciudad costera) se encuentra desplazado respecto del centro urbano de la ciudad principal. Esta circunstancia no sucede en las superficies circulares (ciudad interior) y parece estar relacionado con la determinación de la media de los tiempos de viaje dentro de las ciudades. Esto es así porque al desplazar el centro de gravedad del centro urbano, el grueso de las estaciones de cálculo se aleja del centro de gravedad de la superficie que abarca la forma urbana.
- 2) En segundo lugar, el Indicador de Fractalidad lleva aparejado el cálculo de la superficie asociada a determinadas coronas circulares. El hecho de tener la ciudad construida únicamente afectada por la mitad de esas circunferencias influye en los resultados, por tanto, este hecho se debe tener en cuenta a la hora de corregir los resultados obtenidos a través del Indicador de Fractalidad.

Estas deducciones, realizadas a través de la observación de los resultados y de la delimitación de las áreas metropolitanas, son relevantes por sí mismas, pero además conducen hasta una conclusión de más calado. Así, **la propia morfología establecida a través de la delimitación de las ciudades**

hace variar los resultados asociados a los Indicadores de Oferta del transporte. Es decir, independientemente de la forma y operación de la red, la forma de la ciudad modifica los resultados de los Indicadores de Oferta.

Todas estas conclusiones permiten establecer nuevas líneas de investigación entre las que se encuentran aquellas que lleven a la comparación relativa entre ciudades interiores y ciudades costeras, de forma que se determine si se establecen correlaciones paralelas a través de la comparación de los indicadores de oferta entre ciudades costeras e interiores o si, sin embargo, las correlaciones descritas por ambas familias de indicadores se cortan. Además, también se puede ahondar en el estudio sobre la propia eficiencia de las redes de transporte colectivo guiado en función de la morfología de las ciudades estudiadas.

9.2.4.- Resumen de conclusiones sobre el desarrollo de la metodología de trabajo

Dentro de este resumen de conclusiones, y partiendo del principio de la búsqueda de compromisos entre precisión de la metodología y economía de cálculo en el desarrollo de la misma, se pretende enumerar el conjunto de conclusiones obtenidas en los epígrafes anteriores.

1) En lo referente a la delimitación de la ciudad, es necesario definir el concepto de área metropolitana para poder saber sobre qué elemento se está trabajando. Además, dado el grado de complejidad que presenta la determinación caso a caso de qué superficies forman parte del área metropolitana, también es necesario establecer una serie de criterios que faciliten la toma de decisiones sobre la pertenencia a la ciudad de las superficies más periféricas del área metropolitana.

2) En segundo lugar, respecto a la determinación de la utilidad de la red y a la modelización de los grafos. Se ha visto cómo los nodos de intercambio entre las líneas de la red son los auténticos definidores del grado de utilidad del conjunto de la red, ya que de ellos depende la formación de los diferentes trayectos dentro de la red, además de determinar por sí mismos los tiempos de los viajes que tienen que realizar los usuarios del transporte.

3) En lo que se refiere a la obtención de una metodología sencilla y precisa para la obtención de los tiempos de viaje, se puede decir que se han encontrado dos procedimientos de cálculo válidos, equivalentes y complementarios, que aseguran la mejor disposición a la hora de enfrentarse a este momento crítico dentro de la economía de cálculo del conjunto de la metodología.

4) Finalmente, entrando a valorar el caso de la comparabilidad de las ciudades interiores con las ciudades costeras, se ha establecido que esta posibilidad de comparación es bastante dudosa. A través de la toma en consideración de determinados elementos puramente geométricos, se ha llegado a la conclusión de que la morfología tomada en la delimitación de las áreas metropolitanas es un factor influyente en la propia obtención de resultados a través de los Indicadores de Oferta definidos. Es decir, la forma de la ciudad es uno de los determinantes de los resultados obtenidos en los Indicadores de Oferta aplicados sobre la red de transporte.

Como conclusión final, al margen de todas las determinaciones obtenidas para cada elemento concreto de los explicados anteriormente, parece necesario destacar el hecho de que **el grado de precisión alcanzado en el desarrollo de la metodología de los trabajos es suficiente para la obtención de los resultados perseguidos.** De esta manera, la búsqueda de una mayor perfección en los procedimientos dará lugar a cálculos más costosos que, a la vista de los resultados obtenidos, no ayudarán a establecer conclusiones novedosas respecto a las ya descritas. Además, todo ello ha de ponerse en contraposición con el enorme esfuerzo realizado para efectuar toda la modelización y con la **gran dificultad que representa manejar toda la información necesaria dentro de esta clase de análisis.**

La evidencia palpable de que la metodología desarrollada es fundamentalmente válida, es la posibilidad de haberla implantado dentro de cinco áreas metropolitanas de manera homogénea y con resultados coherentes entre ellas, según las interpretaciones que se han dado a lo largo de los trabajos.

9.3.- Exposición de las conclusiones asociadas a las características de las redes, estudiadas a través de los Indicadores de Oferta desarrollados, y a sus relaciones con la planificación, el territorio y el transporte

9.3.1.- Introducción

Una vez determinada la metodología de cálculo a emplear, la implementación en la misma de los Indicadores de Oferta considerados se convierte en el aspecto central de los trabajos. El desarrollo conceptual de los propios trabajos requiere de este paso de cálculo y comparación de los resultados obtenidos, de forma que se puedan obtener conclusiones útiles para la planificación y la comprensión del territorio y del transporte bajo la óptica de las características de la oferta de las redes de infraestructuras ferroviarias. Para ello, en primer lugar, se recuerdan los indicadores de oferta considerados:

- Indicador de Accesibilidad, basado en las definiciones previas dadas por Martín, Cristóbal y Gómez¹ (2.002).
- Indicador de Cobertura, basado en la definición del mismo que dio Wooton² (1.967).
- Indicador de Fractalidad, basado en las experiencias previas de Dupuy³ (1.991).
- Indicador de Densidad, basado en consideraciones territoriales y de eficacia de cobertura de las redes.

Con la exposición de las principales conclusiones obtenidas sobre estos aspectos se va a desarrollar el siguiente epígrafe.

Para la mejor comprensión de los siguientes epígrafes de este apartado, se comenta a continuación la estructura del mismo. En primer lugar, se establecerán las conclusiones encontradas en los ensayos entre los propios Indicadores de Oferta definidos para el estudio de las características morfológicas de las redes. A continuación, se establecerán las conclusiones asociadas a la correlación entre los Indicadores de Oferta con los Indicadores asociados al territorio y al transporte, para, finalmente, asociar todas las conclusiones obtenidas con la planificación de la oferta de infraestructuras ferroviarias en general.

De esta forma, el siguiente apartado se configura como el resumen ordenado de los hallazgos efectuados y de las conclusiones evidenciadas en el desarrollo de los trabajos. Así, los Indicadores de Oferta se constituyen en una herramienta con una utilidad demostrada en el estudio de las características morfológicas de las redes y aglutinadora de las interacciones existentes entre territorio, transporte y planificación.

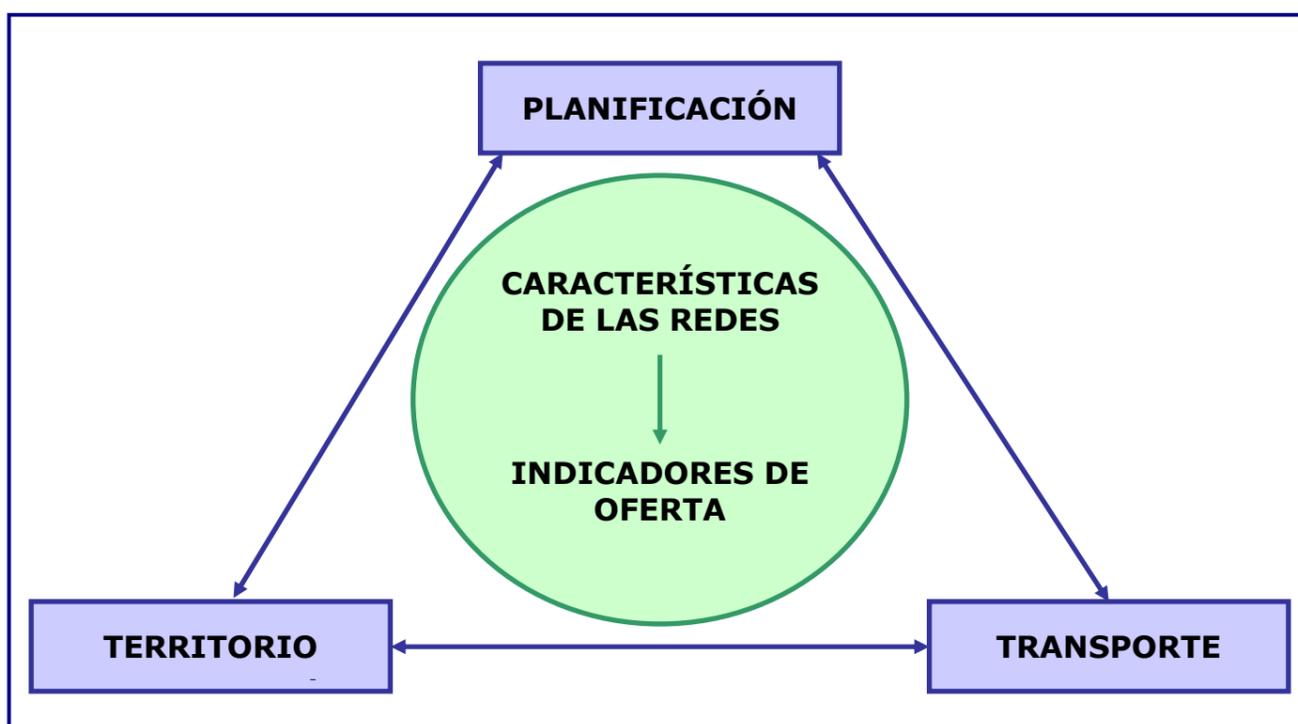


Figura 9.1, relación entre las redes y territorio, transporte y planificación

(f. propia)

9.3.2.- Primeras conclusiones obtenidas, relaciones encontradas entre los propios Indicadores de Oferta definidos

9.3.2.1.- Introducción

Dentro de las conclusiones establecidas a partir de los ensayos sobre los Indicadores de Oferta definidos, se han establecido dos ámbitos más o menos claros de reflexión; uno primero, destinado a la búsqueda final de los Indicadores a ensayar y, otro segundo, en el que se determinan las relaciones que existen entre los propios Indicadores de Oferta a ensayar. De esta forma, se introducen dos subapartados para determinar las conclusiones obtenidas en cada caso.

Esta dualidad que se da en el apartado 9.3.2 viene también establecida por su propia ubicación dentro del capítulo, ya que, aunque la primera parte, relacionada con la búsqueda de los Indicadores a ensayar, pudiera estar incluida dentro del apartado anterior dedicado a la exposición de conclusiones asociadas a la concepción de la metodología de modelización, la segunda parte, dedicada a explicar las relaciones existentes entre los Indicadores de Oferta definidos, es claramente parte de las conclusiones asociadas a los Indicadores de Oferta y no a la metodología.

9.3.2.2.- Búsqueda final de los Indicadores de Oferta a ensayar

Después de realizar el laborioso proceso de desarrollo metodológico, de aplicar las simplificaciones que ya han sido explicadas y tras calcular los parámetros a introducir dentro de los diferentes indicadores, ha sido necesario el identificar Indicadores de Oferta comparables entre áreas metropolitanas. En esta identificación, además, es necesario resolver los problemas debidos a los efectos matemáticos que las diversas simplificaciones efectuadas producen sobre el cálculo de dichos Indicadores.

Los principales problemas metodológicos asociados al cálculo final de los indicadores se enclavan en dos grandes grupos:

- 1)** Asociado a los Indicadores de Accesibilidad y Cobertura: existe el problema del paso de los indicadores simplificados calculados a otros que tengan en cuenta el tamaño total de la red.
- 2)** Asociado al Indicador de Fractalidad: existe el problema de la existencia de operaciones en las que existe el logaritmo de cero.

Dentro de los ensayos realizados, y a través de las diferentes aproximaciones efectuadas para obtener los resultados deseados, se ha llegado a la conclusión de la **correlatividad entre las diferentes formulaciones posibles que se han tanteado**. Sin embargo, esta correspondencia entre indicadores no inhabilita a que, conceptualmente, se hayan considerado algunas soluciones más válidas que otras. De esta manera, se han determinado los siguientes criterios:

- 1)** Asociado a los Indicadores de Accesibilidad y Cobertura, para tener en cuenta el tamaño del ámbito de trabajo, resulta más adecuada la ponderación por superficies que por número de paradas, ya que los trabajos están buscando, principalmente, la determinación de las características espaciales de las redes.
- 2)** Asociado al Indicador de Fractalidad, se considera adecuado valorar el logaritmo de cero con el valor de cero, otorgando así igual utilidad a las coronas circulares que poseen cero estaciones que a las coronas circulares que poseen una estación, entendiéndose además que la utilidad de una o ninguna estación por corona circular puede considerarse nula.

Con estos criterios de cálculo y con la conclusión enunciada ya se tienen los Indicadores de Oferta unívocamente determinados para ser introducidos en los ensayos a realizar.

9.3.2.3.- Correlaciones establecidas entre los Indicadores de Oferta determinados

Del simple estudio de las correlaciones existentes entre los propios Indicadores de Oferta definidos se pueden extraer algunas conclusiones de interés. En primer lugar, hay que establecer que existe una correlación entre determinados indicadores, en concreto **los Indicadores de Accesibilidad Sintética, de Densidad y de Fractalidad, presentan una elevada correlación entre sí**. De ello

se deducen numerosas implicaciones, entre ellas se puede destacar la posibilidad de utilizar unos u otros según la capacidad de cálculo que se posea en cada momento.

Por otro lado, **del estudio del Indicador de Cobertura se ha determinado que éste no presenta correlaciones relevantes con ningún otro indicador estudiado.** La ausencia de correlación afecta tanto a los Indicadores de Oferta asociados a las características espaciales de la red, como al resto de Indicadores utilizados para buscar nuevas relaciones físicas de los Indicadores con el territorio y el transporte y con su planificación.

Esta ausencia de correlaciones del Indicador de Cobertura o de Wooton² (1.967) con el resto de Indicadores, lleva a establecer que ésta no es una característica influyente en relación con la planificación del transporte y del territorio, al menos tal y como se ha tratado desde estos trabajos. Aparte de esta ausencia de correlaciones y de utilidad aparente entre el Indicador de Cobertura definido y el resto de Indicadores de Oferta, el resto de ensayos realizados se pueden calificar, en general, como bastante positivos. De esta forma, con todos los ensayos efectuados se han podido extraer conclusiones válidas para la comprensión de las redes ferroviarias y para la futura planificación del territorio y de los medios de transporte colectivo guiado en relación con estas redes.

Así, la primera determinación relevante es que, un Indicador de cálculo relativamente sencillo y de fácil modificación en la planificación de la oferta de infraestructuras ferroviarias, como es **el Indicador de Fractalidad, se convierte en una herramienta de análisis importante** teniendo en cuenta su relación con el Indicador de Accesibilidad Sintético y con el Indicador de Densidad, ambos físicamente relacionados con el transporte y con el territorio respectivamente.

Por lo que hace referencia a las relaciones cruzadas entre los Indicadores de Oferta calculados, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- 1) Gracias a la relación existente entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Densidad, se demuestra que las ciudades que más aproximan la forma de su red de transporte colectivo guiado a una forma fractal, generan menos superficies urbanizadas carentes de servicio de ferrocarril.**
- 2) Gracias a la relación existente entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad Sintético, se demuestra que las ciudades que más aproximan la forma de su red de transporte colectivo guiado a una forma fractal, presentan una disminución de los tiempos medios de viaje relativo.**

Como se puede ver, a través de este análisis se han extraído dos conclusiones relevantes, una que afecta al territorio y otra que afecta al transporte, además de la conclusión metodológica de la importancia alcanzada por el Indicador de Fractalidad. Con este bagaje inicial, se exponen a continuación las conclusiones obtenidas tras el análisis realizado de los ensayos efectuados sobre los Indicadores de Oferta.

9.3.3.- Relación de los Indicadores de Oferta con el territorio de las áreas metropolitanas

Gracias a los ensayos efectuados, se han conseguido establecer varias evidencias que relacionan las características espaciales de las redes ferroviarias estudiadas a través de los Indicadores de Oferta, con el territorio sobre el que se asientan las áreas metropolitanas. Estas relaciones se han manifestado sobre los Indicadores de Accesibilidad Sintética, Densidad y Fractalidad y, sobre ellas, se han podido constatar o construir una serie de conceptos teóricos que hasta el momento no presentaba demasiadas pruebas empíricas de su existencia. De esta forma, de cada uno de los tres indicadores nombrados se desprenden las implicaciones que se pasan a explicar a continuación:

- 1) El Indicador de Fractalidad se ha demostrado como un identificador del grado de dispersión existente en las áreas metropolitanas.** Así, un incremento del grado de fractalidad de las redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija de las ciudades estudiadas representa una disminución del grado de dispersión de dichas ciudades. Por tanto, se puede concluir que **la morfología de la red de ferrocarril define el grado de dispersión de la ciudad** sobre la que se asienta dicha red.

2) Asociado al concepto de ciudad dispersa, también se han encontrado otros elementos que combinan territorio e Indicadores de Oferta. De esta manera, se ha identificado cómo a medida que disminuye el grado de dispersión de la ciudad aumenta el Indicador de Densidad. Esto quiere decir que **las ciudades más compactas, finalmente poseen una mayor proporción de su superficie servida por el transporte público.**

Sin embargo, esta afirmación puede ser entendida en el sentido inverso, es decir, que **las áreas metropolitanas que presentan una mayor cobertura del espacio por parte de sus redes de ferrocarril consiguen que la ciudad resultante sea menos dispersa.** A través de esta conclusión extraída, se pueden llegar a elaborar políticas urbanas tendentes a la contención de los asentamientos urbanos, siendo éste un tema ampliamente debatido desde los foros asociados a la planificación de la ciudad.

3) Igualmente, asociado al Indicador de Densidad, pero esta vez a través de la correlación de éste con el Indicador de Inversión Relativa, se muestran nuevos efectos territoriales de las infraestructuras de transporte colectivo guiado. En este caso, se ha demostrado cómo **la diferente priorización de la oferta de infraestructuras sobre los distintos modos de transporte, en general ferrocarril o autopista, modifica la estructura de las superficies urbanizadas.**

Esta conclusión viene a significar que, el mantenimiento de la proporción de inversión para la realización de infraestructuras no consigue modificar la estructura de las superficies urbanizadas. Por tanto, para conseguir una mejor cobertura del territorio, no basta con reproducir los parámetros pasados de inversión relativa entre ferrocarril y autopista, sino que es necesario invertir proporcionalmente más en ferrocarril para conseguir una mejor cobertura del territorio por parte de la red ferroviaria.

Este planteamiento es básico a la hora de juzgar políticas tímidas a favor del ferrocarril, ya que es necesaria una inversión importante para poder desencadenar cambios visibles dentro de los asentamientos en el territorio. Esto es así porque, por ejemplo, para incrementar el Indicador de Densidad, o sea la cobertura de la red, desde el 0,3 al 0,5 es necesario incrementar la inversión en ferrocarril en 2,5 veces respecto a la inversión en autopistas.

4) Finalmente, dentro de las conclusiones asociadas al territorio, se ha podido correlacionar el Indicador de Accesibilidad Sintética con el Indicador de Inversión Relativa. A través de la descomposición del Indicador de Inversión Relativa y de la comprensión de su significado y composición se ha podido concluir que **el aumento de la longitud de la red de autopistas produce un aumento de la superficie urbanizada.**

De esta forma, algo en principio relativamente evidente, como son los procesos de dispersión asociados al aumento de la accesibilidad que provoca el aumento de la red de autopistas de las áreas metropolitanas, ha podido ser demostrado empíricamente gracias a los anteriores ensayos.

Con todos los elementos puestos en juego en este apartado se ha podido ver cómo **existen numerosas e importantes correlaciones entre las características de las redes ferroviarias, representadas por los Indicadores de Oferta estudiados, y determinados efectos físicos sobre el territorio.** Estas implicaciones se dan en forma de **modificaciones en la forma y en la cantidad de la superficie ocupada en el territorio,** elementos éstos de importancia dentro de todas las disciplinas que pretenden actuar sobre el crecimiento de las áreas metropolitanas.

[9.3.4.- Relación de los Indicadores de Oferta con los parámetros que regulan el funcionamiento del transporte dentro de las redes de transporte colectivo sobre infraestructura fija](#)

Al igual que se han manifestado una serie de correlaciones entre los Indicadores de Oferta estudiados y los efectos de las redes de transporte colectivo guiado sobre el territorio, los ensayos realizados sobre los Indicadores de Oferta, también han conseguido poner de manifiesto una serie de relaciones existentes entre éstos y las características de los servicios del transporte que se asientan sobre las infraestructuras ferroviarias.

1) De esta forma, a través de la correlación existente entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Gestión de Red se ha llegado a identificar que **las redes ferroviarias que basan su funcionamiento en la lógica del metro tienen una gestión más eficiente que aquellas que basan su funcionamiento en la lógica del ferrocarril.**

No se ha llegado a investigar porqué las redes en las que predomina el metro tienen un funcionamiento mejor que la media, ya que las herramientas que se han manejado no permiten este discernimiento. Sin embargo, sí que existen suficientes hechos diferenciales entre metro y ferrocarril que deben permitir investigar sobre las condiciones que hacen mejorar la gestión global de las redes de transporte colectivo de infraestructura fija. Sin ir más lejos, desde el epígrafe correspondiente de los trabajos, se han incluido posibles ámbitos diferenciales de estudio, como pueden ser la propia historia e idiosincrasia del gestor de la red, la forma de la red, el proceso histórico de formación de la red o los territorios servidos por cada una de las tipologías de infraestructuras ferroviarias entre otros.

2) Igualmente, a través de la observación del Indicador de Fractalidad, y en este caso también a través del Indicador de Accesibilidad Sintética, se encuentran determinadas correlaciones con el Indicador de Inversión relativa. En este caso, la conclusión que se desprende del estudio de los ensayos efectuados es que **el aumento relativo del porcentaje de inversiones destinadas a redes de autopistas respecto a las inversiones destinadas a redes ferroviarias deriva en un empeoramiento de la eficiencia del transporte ferroviario.**

Esta afirmación se manifiesta en las interrelaciones que se desprenden de las gráficas, estas demuestran que con el aumento relativo de la inversión hacia las redes de autopistas se consigue un alejamiento de las redes de transporte colectivo guiado de la morfología asociada a las formas fractales. Además, también existe un aumento de los tiempos medios de viaje relativo dentro de los servicios de transporte pertenecientes a las redes de transporte ferroviario. Estos dos efectos, tal y como se ha venido manifestando a lo largo de todos los trabajos, son elementos perniciosos que alejan a las redes de transporte colectivo guiado de su funcionamiento óptimo.

3) Asociado a estos efectos, la correlación existente entre el Indicador de Accesibilidad Sintética y el Indicador asociado a la Urbanización Dispersa, también demuestra que **a medida que va aumentando la dispersión de las áreas metropolitanas se va aumentando el tiempo medio de viaje relativo de los usuarios de los servicios de transporte colectivo de infraestructura fija.**

Estos fenómenos de dispersión que están ocurriendo en las áreas metropolitanas, de forma fundamental en los últimos años, podría parecer que son inocuos sobre el transporte ferroviario, sin embargo, se ha demostrado a lo largo de los trabajos cómo la huida desde la ciudad compacta hacia la ciudad difusa, a través de las nuevas formas de ocupación del territorio, además de malgastar el propio territorio, provocan una pérdida de eficiencia de los servicios de transporte colectivo guiado, aumentando los tiempos medios de viaje relativo de los servicios de transporte ferroviario.

4) En otro orden de ideas, al buscar relaciones entre los Indicadores de Oferta diseñados y la carga transportada por las redes de transporte colectivo, se ha podido constatar una mayor dificultad a la hora de encontrar relaciones que aporten datos concluyentes. Respecto a los viajes por kilómetro de red y año no se ha encontrado ningún elemento que permita establecer conclusiones, sin embargo, de la comparación del dato de los viajes por habitante y año existentes en cada red con el Indicador de Densidad sí que se ha encontrado una correlación de interés.

Esta correlación entre los viajes por habitante y por año con el Indicador de Densidad lleva a concluir que el aumento del porcentaje de superficie urbanizada cubierta por la red de transporte colectivo guiado lleva a un aumento del número de viajes por habitante y año que se producen. Esta conclusión es importante desde el punto de vista de que **el aumento en la oferta de la superficie cubierta por el transporte ferroviario conlleva una mayor utilización de estos modos guiados de transporte.**

De esta forma, parece ser que la cobertura de la red, asociada a un fenómeno físico de ocupación por la propia red del territorio, es el factor clave para aumentar los ratios de ocupación de las redes de transporte colectivo guiado. Además, de la observación y estudio de la gráfica de correlación, se puede observar cómo **incrementos relativamente pequeños de la tasa de densidad de**

cobertura conllevan incrementos elevados de la tasa de viajeros de los servicios del transporte ferroviario.

De estos datos se desprende la importancia de contar con una red próxima al usuario final de la misma, siendo éste uno de los motivos clave de su uso por parte de los ciudadanos que tienen necesidades de movilidad que satisfacer.

5) Como conclusión final, en lo referente a la influencia de los Indicadores de Oferta sobre la red de transporte colectivo, cabría establecer que según se muestra en las conclusiones parciales, la mejora de los Indicadores de Fractalidad y Accesibilidad Sintética procura unos servicios del transporte más eficientes, mientras que la mejora del Indicador de Densidad proporciona una red con una mayor carga de viajeros.

9.3.5.- Aplicación de las conclusiones obtenidas a la planificación del territorio y de los servicios de transporte

9.3.5.1.- Introducción

Del conjunto de conclusiones que se han expuesto a lo largo de los trabajos, y más concretamente dentro de este capítulo noveno, se pueden extraer criterios tendentes a la mejor comprensión de las redes y con ello de la planificación del territorio y de los servicios del transporte. Dado que alcanzar unos desarrollos urbanos y unos servicios de transporte lo más parecidos a lo que se ha planificado es uno de los objetivos básicos de cualquier actor que interviene sobre el diseño de las áreas metropolitanas, el establecimiento de criterios de planificación y el entendimiento de la evolución de las formas urbanas, se configura como un elemento fundamental a la hora de conseguir una planificación adecuada a los modelos propuestos, coherente con la ciudad construida y que evite la dispersión de los asentamientos y la ineficiencia de sus servicios de transporte colectivo.

Por todo lo anterior, se va a proceder a establecer las conclusiones básicas que, basadas en los Indicadores de Oferta definidos, van a ayudar a configurar unos asentamientos urbanos con un mejor aprovechamiento del territorio y unos servicios del transporte con una mayor eficiencia.

9.3.5.2.- Aplicación de las conclusiones obtenidas a la planificación del territorio

En primer lugar, por lo que se refiere al territorio que ocupan las áreas metropolitanas, actuando sobre los Indicadores de Oferta y, en concreto, promoviendo el aumento del Indicador de Fractalidad y del Indicador de Densidad y la disminución del Indicador de Accesibilidad Sintética, se pueden conseguir los siguientes efectos territoriales:

- Se puede controlar el grado de dispersión de las áreas metropolitanas, ya que como se ha visto la morfología de la red define en parte el grado de dispersión de la ciudad.
- Se puede controlar el incremento de las superficies urbanizadas, con políticas activas a favor del ferrocarril y contrarias a las redes de infraestructuras viarias se pueden reducir los incrementos de superficies urbanizadas.
- Se puede modificar la estructura de los asentamientos, a través de la propia definición morfológica de la red ferroviaria se consigue modificar el grado de compacidad de la ciudad y a su vez la propia distribución de los asentamientos.
- Se puede conseguir que exista una mayor cobertura del espacio, por parte de las redes de transporte colectivo guiado, dentro de las áreas urbanizadas.

Como se puede comprobar, **con los Indicadores de Oferta definidos, utilizados como herramienta de planificación, se puede realizar una política territorial integral en busca de una mejor distribución espacial de las superficies urbanizadas de las áreas metropolitanas.** Además, esta política asociada a los asentamientos urbanos está graduada en escalas, desde la gran escala que afronta los problemas de dispersión, hasta la pequeña escala, que puede hacer frente a los problemas de cobertura de las áreas urbanizadas por el transporte colectivo de infraestructura fija.

9.3.5.3.- Aplicación de las conclusiones obtenidas a la planificación de los servicios del transporte

Al igual que sobre el territorio, la actuación sobre los Indicadores de Oferta permite obtener determinadas repercusiones sobre los servicios del transporte. Un elemento interesante de estas repercusiones es que actuando sobre los Indicadores de Oferta en la misma dirección en la que se ha actuado en el apartado dedicado a explicar las aplicaciones de los Indicadores de Oferta a la planificación del territorio, se consiguen efectos favorables sobre el transporte urbano.

De esta manera, promoviendo el aumento del Indicador de Fractalidad y del Indicador de Densidad y la disminución del Indicador de Accesibilidad Sintético, se pueden conseguir los siguientes efectos favorables sobre la gestión del transporte desarrollado sobre infraestructuras férreas:

- Se puede aumentar en gran medida la carga transportada, expresada en viajes por habitante y año, a través de incrementos no muy sustanciales de la cobertura de la red sobre la superficie urbanizada.
- Se puede mejorar la eficiencia de la red, reduciendo los tiempos medios de viaje relativo entre nodos, a través del control de la dispersión de las áreas metropolitanas.

Como se ha mostrado **a través de la actuación sobre los Indicadores de Oferta se consigue una mejor gestión de los servicios ferroviarios, además de una más eficiente respuesta territorial de las áreas metropolitanas.**

Además de estas consideraciones efectuadas, también se han demostrado otra serie de conclusiones con evidentes implicaciones dentro de la planificación del transporte. En primer lugar, respecto a la relación de las infraestructuras viarias con las ferroviarias, para una mayor eficiencia de las redes ferroviarias es necesario incrementar la inversión en los modos guiados, respecto a las infraestructuras viarias, de manera más que proporcional a las inversiones habidas anteriormente. Es decir, si se mantiene la proporción de inversiones preexistente entre los modos viario y ferroviario, no se conseguirá una mejora de la eficiencia de la red de transporte colectivo guiado.

Resumiendo el párrafo anterior, se puede concluir que **para planificar la eficiencia de las infraestructuras ferroviarias hay que actuar también sobre la red viaria.**

Una última conclusión que se ha obtenido en relación a la planificación de la gestión de los servicios ferroviarios es que los modelos de transporte colectivo basados fundamentalmente en el metro son más eficientes que los modelos de transporte colectivo basados en el ferrocarril. De esta manera, **la planificación de modelos eficientes de transporte colectivo guiado deben estar basada en el modo metro.**

Esta conclusión se ha manifestado en los ensayos realizados, sin perjuicio de que no haya sido posible determinar cuáles son las características del modo metro que hacen que éste sea más eficaz que el modo ferroviario de cercanías.

Con todos los elementos puestos en valor en este apartado, se pueden establecer las iniciativas pertinentes para conseguir una gestión más adecuada de los modos ferroviarios dedicados al transporte colectivo.

9.4.- Desarrollo conceptual de los elementos de la teoría fractal dentro del territorio cubierto por las redes de transporte colectivo guiado

9.4.1.- Introducción

Dentro del conjunto de indicadores definidos, ensayos efectuados y conclusiones enunciadas, se ha puesto de manifiesto la existencia de un indicador relativamente novedoso en su formulación, útil en cuanto a su relación con la planificación del territorio y del transporte y fácil en cuanto a su

determinación. Este Indicador es el de Fractalidad y, como ya se ha especificado anteriormente, está referido a la característica que muestra el grado de desarrollo que presentan las formas fractales dentro las redes de infraestructuras de transporte colectivo guiado.

La importancia percibida en el Indicador de Fractalidad ha llevado a procurar un mayor estudio del mismo, no ya tanto respecto a sus relaciones con el transporte y la planificación, sino en cuanto a la comprensión de los propios elementos que definen la fractalidad asociados a las redes formadas por las infraestructuras ferroviarias. Este interés por las formas fractales, ha desembocado en una última parte de ensayos en los trabajos y a su correspondiente apartado de conclusiones obtenidas.

De esta manera, dentro de este breve apartado de conclusiones se articulan dos epígrafes, uno, dedicado a la exposición de la fractalidad dentro de todo el conjunto de trayectos que componen el viaje del usuario del transporte ferroviario y, otro, dedicado a la determinación de los grados parciales de fractalidad que se pueden encontrar dentro de una misma red de transporte colectivo guiado, grados de fractalidad que a su vez definen alguna propiedad de las estudiadas en el conjunto de la teoría de formas fractales.

9.4.2.- Descripción de la fractalidad dentro de las diferentes partes del trayecto recorridas por los usuarios del transporte colectivo sobre infraestructura fija

Dentro del recorrido que un usuario del transporte público ha de realizar para trasladarse de un punto a otro existen numerosas partes de ese trayecto perfectamente diferenciables. Así, existe un trayecto para acceder a la red ferroviaria, un trayecto dentro del servicio ferroviario y un trayecto para alcanzar el punto final objeto del desplazamiento.

La concepción fractal de las redes de transporte ferroviario dentro de ciudades de gran tamaño es evidente, en tanto que existe un conjunto de infraestructuras lineales, conectadas a la ciudad a través de unos nodos denominados estaciones, de modo que se llega a ofrecer, de mejor o peor manera, una cobertura espacial al conjunto del área metropolitana.

Determinado el hecho de la fractalidad de las redes de transporte sobre infraestructura fija, cabe preguntarse por la existencia o inexistencia de fractalidad dentro de los trayectos de acceso y salida de la red de transporte, o lo que es lo mismo, la existencia de fractalidad dentro de los trayectos que, generalmente a pie, se realizan para aproximarse hasta la red de transporte.

Desde estos trabajos se ha interpretado que **existe fractalidad en los trayectos de acceso y salida a la red de transporte colectivo guiado**. De esta manera, a través de los diferentes croquis adjuntados y de las explicaciones dadas se ha visto cómo la red de posibles caminos de acceso en torno a las estaciones de servicio se configura como una forma fractal, y cómo esta **red de caminos está introducida dentro de los procesos de cálculo a través del Índice de Rodeo**.

A través de la argumentación realizada para la introducción de los conceptos expuestos, se ha conseguido extender el concepto de fractalidad a todo el recorrido de los viajeros. De esta manera, se puede concluir que **el conjunto del trayecto realizado por un usuario de la red de transporte colectivo guiado, para desplazarse desde un punto origen hasta un punto destino sigue una lógica basada en la teoría de los objetos fractales**.

Esta lógica del desplazamiento, según la teoría fractal, puede permitir el acercamiento a otras formas de comprensión del fenómeno del viaje y de la movilidad y ayudar a la modelización de nuevos métodos de estudio y análisis del comportamiento de los viajeros.

9.4.3.- Determinación de los diferentes grados de fractalidad de las redes de transporte colectivo guiado

Dentro de la homogeneización de las características fractales que ha supuesto la introducción del Indicador de Fractalidad, es evidente que las redes de transporte colectivo guiado presentan

diferentes grados de densidad dentro de una misma área metropolitana. Esta diferenciación de la densidad de la red ha sido estudiada dentro de los trabajos y, para ello, se han establecido coronas circulares que ayuden a la definición de estos grados de densidad.

La conclusión extraída en primer lugar es que, realmente, existe una gradación de densidades por coronas circulares, de manera que **la red va pasando de más a menos densa a medida que se aleja del centro de la superficie urbana**. Esta conclusión, más o menos inmediata, se ha completado con otra conclusión menos evidente, y es que **existen zonas extensas de ciudad con densidades de red que tienen una relación fractal constante**. De esta forma, en cada ciudad se han determinado entre dos y cuatro zonas con relación fractal constante, siendo en la mayoría de ellas tres el número de zonas identificadas.

Esta determinación de pocas zonas con relaciones fractales constantes ha puesto de manifiesto la existencia de una propiedad característica de las formas fractales dentro de su teoría clásica, así se puede concluir que **dado que se han encontrado zonas amplias con relaciones fractales constantes y que, además, estas zonas tienen una densidad de red decreciente, existe la propiedad de la cuasiautosimilitud**. Por tanto, el identificar esta propiedad ayuda a encuadrar todavía mejor las redes de transporte colectivo guiado dentro de la teoría de objetos fractales.

Finalmente, se ha visto que estas zonas de relación fractal semejante son prácticamente las mismas dentro del conjunto de ciudades estudiadas. Esta conclusión no tendría por qué ser inmediata, porque se podría pensar que el tamaño de la red y por tanto sus áreas más y menos densas podrían depender del tamaño de la ciudad, sin embargo, esto no es así. Por el contrario, se encuentra una primera zona de influencia clara que abarca los primeros 6 a 8 kilómetros y, una zona final, también más o menos clara que comienza alrededor de los 45 a 50 kilómetros. En el medio de estas dos zonas de relación constante se encuentra una tercera zona intermedia con posibles tratamientos infraestructurales diferentes que determinan su densidad.

Toda esta exposición anterior viene a **identificar una posible zona de agotamiento de la eficacia de las redes de transporte ferroviario para el servicio de las áreas metropolitanas, acotada por la zona de relación fractal constante situada sobre los 45 kilómetros de distancia al centro urbano**, y que, posiblemente, empezaría a requerir de otras modalidades de transporte que las aquí ensayadas.

9.5.- Consideraciones finales

Dentro de estas consideraciones finales, y sin ánimo de ser reiterativo, simplemente se pretenden exponer las principales aportaciones hechas por los trabajos. En primer lugar, se ha desarrollado una metodología de cálculo que permite la extrapolación de la misma a cualquier área metropolitana y, por tanto, se posibilita el estudio comparado de las características de las redes ferroviarias de las áreas metropolitanas a través de una nueva herramienta de trabajo.

En segundo lugar, asociados a la nueva metodología de trabajo definida, se han incorporado unos Indicadores de Oferta que se configuran como instrumentos de análisis de las características de las redes y de sus efectos sobre la forma urbana y sobre la gestión del transporte. Los Indicadores de Accesibilidad Sintética, de Densidad y de Fractalidad se configuran como nuevas herramientas en la forma de trabajar sobre los ámbitos urbanos y, además, consiguen integrar la planificación del territorio y del transporte dentro de un escenario conectado.

Dentro de estos Indicadores de Oferta, el Indicador de Fractalidad se constituye como una pieza clave del análisis, en cuanto que es un indicador de cálculo relativamente sencillo, con lo cual permite variar los elementos de planificación de forma rápida. Esto permite una economía de cálculo que no se obtiene con otro tipo de Indicadores.

Como último elemento de consideración, se podrían englobar todas las conclusiones en la **capacidad que tienen las características de la oferta de la red de infraestructuras ferroviarias para modificar numerosos parámetros referidos al territorio y al transporte**. A través del estudio comparado de las áreas metropolitanas seleccionadas, se han podido identificar numerosos comportamientos en la forma de ocupación del territorio y en la eficiencia de la gestión del

transporte que tienen un origen básicamente morfológico. De esta forma, se ha llegado a determinar que la morfología de la red de transporte es un condicionante de la distribución de la urbanización y de la eficiencia de las redes de transporte colectivo guiado.

Con todo lo expuesto se abren numerosas posibilidades dentro de la planificación, debido al conocimiento de las repercusiones que tiene la implantación de una u otra infraestructura y de la forma en que esta infraestructura se materializa sobre el territorio. Así, se posibilitan nuevas técnicas de gestión en la oferta de la red de infraestructuras del transporte, que pueden estar basadas en los deseables criterios de sostenibilidad ambiental y económica, de tan difícil inserción en las lógicas imperantes de la mera satisfacción de la demanda de movilidad.

Finalmente, cabría volver sobre las palabras de uno de los primeros autores que empezó a comprender el espacio de las redes como el auténtico generador de oportunidades. De esta forma, Soria⁴ (1.980) estableció que "*La forma de la ciudad es y debe ser consecuencia de sus necesidades de locomoción*". Desde estos trabajos, además de entender esta afirmación, con las conclusiones obtenidas se puede añadir que si no se planifica de acuerdo con este criterio, la dinámica de crecimiento de la ciudad se encargará de adaptar la forma de la propia ciudad a sus posibilidades reales de satisfacción de la movilidad.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 9

¹ MARTÍN DUQUE, D.; CRISTOBAL PINTO, C.; GÓMEZ LÓPEZ, F.J. (2.002): *Cobertura y Accesibilidad en transporte público en un corredor metropolitano: el corredor del Henares en Madrid*. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander.

² WOOTTON, H.J.; PICK, G.W. (1.967): *A Model for trips generated by households*, Journal of Transport economics and policy, mayo.

³ DUPUY, G. (1.991): *Urbanisme de Reseaux, théories et méthodes*. Ed. A. Colin, París.

⁴ SORIA, A. (1.980): *¿A qué llamamos transporte?*. Ciudad y Territorio N°21, Madrid.

Índice de Anejos

239	ANEJO 1 PLANOS
240	A1.1.- Mapa del Área Metropolitana de la ciudad de Barcelona y perfil delimitador de la superficie ocupada por el proceso urbanizador
241	A1.2.- Mapa de la red de transporte público colectivo de infraestructura fija guiada del Área Metropolitana de la ciudad de Barcelona
242	A1.3.- Mapa de intersección del Área Metropolitana de la ciudad de Barcelona con la superficie servida por la red de transporte colectivo de infraestructura fija
243	A1.4.- Mapa de sectorización en coronas circulares de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija del Área Metropolitana de la ciudad de Barcelona
244	A1.5.- Mapa del Área Metropolitana de la ciudad de Londres y perfil delimitador de la superficie ocupada por el proceso urbanizador
245	A1.6.- Mapa de la red de transporte público colectivo de infraestructura fija guiada del Área Metropolitana de la ciudad de Londres
246	A1.7.- Mapa de intersección del Área Metropolitana de la ciudad de Londres con la superficie servida por la red de transporte colectivo de infraestructura fija
247	A1.8.- Mapa de sectorización en coronas circulares de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija del Área Metropolitana de la ciudad de Londres
248	A1.9.- Mapa del Área Metropolitana de la ciudad de Madrid y perfil delimitador de la superficie ocupada por el proceso urbanizador
249	A1.10.- Mapa de la red de transporte público colectivo de infraestructura fija guiada del Área Metropolitana de la ciudad de Madrid
250	A1.11.- Mapa de la red de transporte público colectivo de infraestructura fija guiada del Área Metropolitana de la ciudad de Madrid para el estudio de la red completa
251	A1.12.- Mapa de intersección del Área Metropolitana de la ciudad de Madrid con la superficie servida por la red de transporte colectivo de infraestructura fija
252	A1.13.- Mapa de sectorización en coronas circulares de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija del Área Metropolitana de la ciudad de Madrid
253	A1.14.- Mapa del Área Metropolitana de la ciudad de Milán y perfil delimitador de la superficie ocupada por el proceso urbanizador
254	A1.15.- Mapa de la red de transporte público colectivo de infraestructura fija guiada del Área Metropolitana de la ciudad de Milán
255	A1.16.- Mapa de intersección del Área Metropolitana de la ciudad de Milán con la superficie servida por la red de transporte colectivo de infraestructura fija
256	A1.17.- Mapa de sectorización en coronas circulares de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija del Área Metropolitana de la ciudad de Milán
257	A1.18.- Mapa del Área Metropolitana de la ciudad de París y perfil delimitador de la superficie ocupada por el proceso urbanizador
258	A1.19.- Mapa de la red de transporte público colectivo de infraestructura fija guiada del Área Metropolitana de la ciudad de París
259	A1.20.- Mapa de intersección del Área Metropolitana de la ciudad de París con la superficie servida por la red de transporte colectivo de infraestructura fija
260	A1.21.- Mapa de sectorización en coronas circulares de la red de transporte colectivo sobre infraestructura fija del Área Metropolitana de la ciudad de París
261	A1.22.- Mapa de comparación del tamaño del área metropolitana y de la red de transporte ferroviario de los diferentes ámbitos de estudio
263	ANEJO 2 RESULTADOS PARCIALES
265	A2.1.- Resultados Parciales del Área Metropolitana de Barcelona
265	<i>A2.1.1.- Superficie cubierta por cada estación</i>
265	<i>A2.1.2.- Relación fractal por coronas circulares</i>

267	A2.1.3.- <i>Indicador de Accesibilidad por estaciones</i>
267	A2.1.4.- <i>Indicador de Cobertura por estaciones</i>
268	A2.2.- <i>Resultados Parciales del Área Metropolitana de Londres</i>
268	A2.2.1.- <i>Superficie cubierta por cada estación</i>
269	A2.2.2.- <i>Relación fractal por coronas circulares</i>
271	A2.2.3.- <i>Indicador de Accesibilidad por estaciones</i>
273	A2.2.4.- <i>Indicador de Cobertura por estaciones</i>
274	A2.3.- <i>Resultados Parciales del Área Metropolitana de Madrid</i>
274	A2.3.1.- <i>Superficie cubierta por cada estación</i>
275	A2.3.2.- <i>Relación fractal por coronas circulares</i>
276	A2.3.3.- <i>Indicador de Accesibilidad por estaciones</i>
277	A2.3.4.- <i>Indicador de Cobertura por estaciones</i>
278	A2.3.5.- <i>Indicador de Accesibilidad y Cobertura para la red completa de Madrid</i>
282	A2.4.- <i>Resultados Parciales del Área Metropolitana de Milán</i>
282	A2.4.1.- <i>Superficie cubierta por cada estación</i>
282	A2.4.2.- <i>Relación fractal por coronas circulares</i>
284	A2.4.3.- <i>Indicador de Accesibilidad por estaciones</i>
285	A2.4.4.- <i>Indicador de Cobertura por estaciones</i>
285	A2.5.- <i>Resultados Parciales del Área Metropolitana de París</i>
285	A2.5.1.- <i>Superficie cubierta por cada estación</i>
286	A2.5.2.- <i>Relación fractal por coronas circulares</i>
288	A2.5.3.- <i>Indicador de Accesibilidad por estaciones</i>
289	A2.5.4.- <i>Indicador de Cobertura por estaciones</i>

291 ANEJO 3 RESUMEN DE REGRESIONES Y FORMULACIONES OBTENIDAS

293	A3.1.- <i>Relaciones obtenidas del desarrollo metodológico</i>
293	A3.1.1.- <i>Relación entre los tiempos de viaje obtenidos con las dos metodologías</i>
293	A3.2.- <i>Relaciones entre los Indicadores Definidos</i>
293	A3.2.1.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad ponderado según áreas y entre el Indicador de Accesibilidad Ponderado según estaciones</i>
294	A3.2.2.- <i>Relación entre el Indicador de Cobertura ponderado según áreas y entre el Indicador de Cobertura Ponderado según estaciones</i>
294	A3.2.3.- <i>Relación entre el Indicador de Fractalidad para $\log(0)=0$ y el Indicador de Fractalidad para $\log(n+1)$</i>
295	A3.2.4.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Cobertura del conjunto de las ciudades</i>
295	A3.2.5.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Fractalidad del conjunto de las ciudades</i>
296	A3.2.6.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Densidad del conjunto de las ciudades</i>
296	A3.2.7.- <i>Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Fractalidad del conjunto de las ciudades</i>
297	A3.2.8.- <i>Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Densidad del conjunto de las ciudades</i>
297	A3.2.9.- <i>Relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Fractalidad del conjunto de las ciudades</i>
298	A3.2.10.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Cobertura de las ciudades interiores</i>
298	A3.2.11.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Fractalidad de las ciudades interiores</i>
299	A3.2.12.- <i>Relación entre el Indicador de Accesibilidad y el Indicador de Densidad de las ciudades interiores</i>
299	A3.2.13.- <i>Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Fractalidad de las ciudades interiores</i>

- 300 A3.2.14.- *Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Densidad de las ciudades interiores*
- 300 A3.2.15.- *Relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Fractalidad de las ciudades interiores*
- 301 A3.2.16.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad Sintético del conjunto de las ciudades*
- 301 A3.2.17.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad Sintético para ciudades interiores*
- 302 A3.2.18.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad Sintético de superficie cubierta por la red del conjunto de las ciudades*
- 302 A3.2.19.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Accesibilidad Sintético de superficie cubierta por la red para ciudades interiores*
- 303 A3.3.- *Relaciones procedentes de la investigación con el resto de parámetros*
- 303 A3.3.1.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Gestión de la Red*
- 303 A3.3.2.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Accesibilidad del conjunto de las ciudades*
- 304 A3.3.3.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Cobertura del conjunto de las ciudades*
- 304 A3.3.4.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Fractalidad del conjunto de las ciudades*
- 305 A3.3.5.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Densidad del conjunto de las ciudades*
- 305 A3.3.6.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Accesibilidad del conjunto de las ciudades*
- 306 A3.3.7.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Cobertura del conjunto de las ciudades*
- 306 A3.3.8.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Fractalidad del conjunto de las ciudades*
- 307 A3.3.9.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Densidad del conjunto de las ciudades*
- 307 A3.3.10.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Accesibilidad para ciudades interiores*
- 308 A3.3.11.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Cobertura para ciudades interiores*
- 308 A3.3.12.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Fractalidad para ciudades interiores*
- 309 A3.3.13.- *Relación entre el Indicador de Carga de la Red y el Indicador de Densidad para ciudades interiores*
- 309 A3.3.14.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Accesibilidad para ciudades interiores*
- 310 A3.3.15.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Cobertura para ciudades interiores*
- 310 A3.3.16.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Fractalidad para ciudades interiores*
- 311 A3.3.17.- *Relación entre el Indicador de Carga Kilométrico de la Red y el Indicador de Densidad para ciudades interiores*
- 311 A3.3.18.- *Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Inversión Relativo del conjunto de las ciudades*
- 312 A3.3.19.- *Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Inversión Relativo del conjunto de las ciudades*
- 312 A3.3.20.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Inversión Relativo del conjunto de las ciudades*
- 313 A3.3.21.- *Relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Inversión Relativo del conjunto de las ciudades*
- 313 A3.3.22.- *Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Inversión Relativo para ciudades interiores*
- 314 A3.3.23.- *Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Inversión Relativo para ciudades interiores*
- 314 A3.3.24.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Inversión Relativo para ciudades interiores*

- 315 | A3.3.25.- *Relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Inversión Relativo para ciudades interiores*
- 315 | A3.3.26.- *Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y la longitud de la red de ferrocarril para ciudades interiores*
- 316 | A3.3.27.- *Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y la longitud de la red de autopistas para ciudades interiores*
- 316 | A3.3.28.- *Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Dispersión del conjunto de las ciudades*
- 317 | A3.3.29.- *Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Dispersión del conjunto de las ciudades*
- 317 | A3.3.30.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Dispersión del conjunto de las ciudades*
- 318 | A3.3.31.- *Relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Dispersión del conjunto de las ciudades*
- 318 | A3.3.32.- *Relación entre el Indicador de Accesibilidad Sintético y el Indicador de Dispersión para ciudades interiores*
- 319 | A3.3.33.- *Relación entre el Indicador de Cobertura y el Indicador de Dispersión para ciudades interiores*
- 319 | A3.3.34.- *Relación entre el Indicador de Fractalidad y el Indicador de Dispersión para ciudades interiores*
- 320 | A3.3.35.- *Relación entre el Indicador de Densidad y el Indicador de Dispersión para ciudades interiores*
- 320 | A3.4.- *Relaciones establecidas de la ampliación del concepto de fractalidad*
- 320 | A3.4.1.- *Representación gráfica de la relación fractal de Barcelona*
- 321 | A3.4.2.- *Representación gráfica de la relación fractal de Londres*
- 321 | A3.4.3.- *Representación gráfica de la relación fractal de Madrid*
- 322 | A3.4.4.- *Representación gráfica de la relación fractal de Milán*
- 322 | A3.4.5.- *Representación gráfica de la relación fractal de París*
- 323 | A3.4.6.- *Relación fractal de Barcelona entre las coronas circulares de radio 1 a 6 Km*
- 323 | A3.4.7.- *Relación fractal de Barcelona entre las coronas circulares de radio 7 a 15 Km*
- 324 | A3.4.8.- *Relación fractal de Barcelona entre las coronas circulares de radio 16 a 38 Km*
- 324 | A3.4.9.- *Relación fractal de Londres entre las coronas circulares de radio 1 a 8 Km*
- 325 | A3.4.10.- *Relación fractal de Londres entre las coronas circulares de radio 9 a 18 Km*
- 325 | A3.4.11.- *Relación fractal de Londres entre las coronas circulares de radio 19 a 51 Km*
- 326 | A3.4.12.- *Relación fractal de Londres entre las coronas circulares de radio 52 a 69 Km*
- 326 | A3.4.13.- *Relación fractal de Madrid entre las coronas circulares de radio 1 a 8 Km*
- 327 | A3.4.14.- *Relación fractal de Madrid entre las coronas circulares de radio 9 a 20 Km*
- 327 | A3.4.15.- *Relación fractal de Madrid entre las coronas circulares de radio 21 a 52 Km*
- 328 | A3.4.16.- *Relación fractal de Milán entre las coronas circulares de radio 1 a 6 Km*
- 328 | A3.4.17.- *Relación fractal de Milán entre las coronas circulares de radio 7 a 57 Km*
- 329 | A3.4.18.- *Relación fractal de París entre las coronas circulares de radio 1 a 6 Km*
- 329 | A3.4.19.- *Relación fractal de París entre las coronas circulares de radio 7 a 40 Km*
- 330 | A3.4.20.- *Relación fractal de París entre las coronas circulares de radio 41 a 63 Km*

331 | ANEJO 4 MATRICES DE TIEMPOS DE VIAJE DEL ÁREA METROPOLITANA DE MADRID

- 333 | A4.1.- *Tiempos de viaje calculados con el método inicialmente diseñado*
- 338 | A4.2.- *Tiempos de viaje calculados a través de los datos dados por las operadoras*