

**RED VIARIA Y ORDENACION ESPACIAL EN LA ISLA DE MENORCA.
APLICACION DE LA TEORIA DE GRAFOS.**

Juana María Petrus Bey
(Universidad de Les Illes Balears)

1. INTRODUCCION

Resulta del todo evidente que la aplicación de métodos cuantitativos al conocimiento y planificación del territorio ha puesto de relieve, por un lado, la necesidad de una rápida y correcta asimilación de los avances matemáticos por parte de los geógrafos, y por otra, la extrema utilidad y eficacia de estos métodos a la hora de resolver problemas de ordenación espacial. Problemas éstos que otros métodos, empírico-inductivos, no han podido plantear correctamente o detectar siquiera y, por tanto, resolver de forma satisfactoria.

Evidentemente ha llegado a ser también, por fortuna, que la utilización indiscriminada de métodos y técnicas cuantitativas no garantiza, a priori, y por su mero planteamiento matemático, la solución óptima a los problemas geográficos (el de la ordenación espacial entre ellos).

Aplicar un método, teoría o técnica cuantitativa a un problema geográfico, no significa, por más que todos los cálculos matemáticos sean correctos, "resolver" eficazmente ese problema. Si eso es lo que se pretende, habrá que partir de tres premisas principales: 1ª definir clara y distintamente el problema; 2ª comprobar que el método cuantitativo escogido es el más adecuado para la resolución óptima de aquél; 3ª comprobar la aplicación correcta del método, teoría o técnica escogida al problema. De cumplir únicamente con esta última premisa se conseguirá tan sólo obtener un "ejemplo" arbitrario de cómo se aplica un determinado método cuantitativo a un problema. Sus resultados, sin embargo, no podrán explicar

(más que por pura casualidad) la realidad, al menos no matemáticamente y, por tanto, resultarán en ese sentido ficticios.

2. OBJETIVOS Y METODOS DEL TRABAJO

La presente comunicación tiene como objetivos fundamentales: 1º) abordar el estudio de la ordenación espacial de Menorca-territorio físicamente bien delimitado por su condición de insularidad- utilizando para ello la teoría matemática de grafos en su forma más usual de aplicación dentro de la Geografía Humana: el estudio de las redes de transporte (en concreto del transporte por carretera); y 2º) comprobar cómo la introducción de un nuevo medio de transporte en la isla, el aéreo en concreto (de vital importancia para los territorios insulares), y la consiguiente construcción de su elemento terrestre principal, el aeropuerto, ha modificado la estructura de la red viaria existente y, por tanto, el orden espacial que ésta había establecido entre las distintas poblaciones de la isla antes de su aparición.

2.1 Justificación y tratamiento del tema

Así pues, de acuerdo con las premisas enunciadas en la introducción y con lo expuesto en ésta, no nos hemos limitado a aplicar sin más la teoría de grafos a la red de carreteras de Menorca para mostrar fácilmente y con rápidas operaciones cómo se aplica esta teoría al estudio de una red viaria. Con este fin y sin exceder estas pretensiones son varios los trabajos existentes que han utilizado la red viaria de esta isla para ofrecer un ejemplo claro de la aplicación de la teoría de grafos: recordemos el de BENEJAM y VERGARA (1976), o el de ESTEBANEZ (1976) entre otros; pero, a nuestro modo de ver, en ninguno de ellos se llega a estudiar en profundidad los problemas más simples de esta teoría: accesibilidad y conectividad. La teoría de grafos no se aplica en ninguno de estos casos a la misma red viaria, no se explicita previamente qué se pretende demostrar o explicar y, desde luego, se llegan a resultados de los que es fácil disentir.

El principal punto de discusión parece estar en la selección de las carreteras que se utilizan como arcos internodales y en las poblaciones, cruces, u otros lugares que se consideran "nodos" en el estudio. Estos elementos son fundamentales a la hora de extraer conclusiones pues su "más o menos afortunada elección puede hacer que el sentido y la fiabilidad de los resultados cambien totalmente (...), los trabajos prácticos que hemos encontrado para el caso de España en aplicación de la técnica de grafos, demuestran que la elección de rutas está determinada por criterios técnicos y administrativos, de manera que se eligen las carreteras a cargo del Estado (A.M. GARCIA LORCA, 1979), o de éstas simplemente su tipología, como por ejemplo las comarcales (ESTABENEZ, 1971)" (BRUNET, P., 1980, pag. 13).

Respecto a los nodos o vértices seleccionados en la teoría de grafos existe también un problema de definición, pues son interpretados a veces como sinónimos de núcleos de población, entrecruce de vías, u otros elementos (sobre este problema terminológico volveremos en el subpárrafo siguiente).

Pretendemos, por consiguiente, en este estudio, utilizar la teoría de grafos no tan sólo para describir y expresar los fenómenos espaciales del territorio en términos matemáticos sino, fundamentalmente, para determinar la importancia de la reordenación espacial que la red viaria ha establecido sobre el territorio en dos momentos sucesivos: 1º) tras la creación del actual aeropuerto, situado a 5 km. de Maó (y a 6 minutos de viaje); y 2º) tras la adición de un nuevo segmento o tramo a la red preexistente (enlace C-721 con la local Maó-St. Climent).

2.2 Sobre lenguaje y terminología

Al igual que otros autores creemos que, de alguna manera, la base de un común entendimiento y de una correcta interpretación y crítica ulterior de los modelos cuantitativos, reside, en gran parte, en el hecho de que exista previamente una definición clara y unívoca de los términos y conceptos que se empleen en la exposición.

La terminología aquí utilizada no es arbitraria, seguimos la habitualmente desarrollada en este campo por GARRISON, KANSKY, NYSTUEY, TAYLOR, POTRYKOWSKI... A fin de agilizar la lectura del texto, y presuponiendo que la mayoría de términos son de sobra conocidos, remitimos al final de la comunicación donde hemos incluido un breve vocabulario que clasificará las nociones utilizadas en el texto. Los conceptos que aparecen en él son definidos gradualmente y remitiremos a ellos, si es necesario, como sigue: por ejemplo, "Grafo (D-6)", significando que la definición 6 aclara lo que en el texto entendemos por dicho término.

3. LA RED DE CARRETERAS DE MENORCA

La red de Transportes (D-5) de este espacio insular ha sido objeto de numerosas y considerables modificaciones a lo largo de la historia (Fig. 1) pero la consolidación de su trazado más importante a partir del que se ha ido desarrollando vías arteriales de conexión, data del siglo XVIII. (Camí d'en Kane, 1720). Este, en principio camino, hoy carretera comarcal C-721, ha reforzado la ordenación del espacio insular en torno a un eje central que recorre la isla de Este a Oeste pasando por todos los núcleos importantes de población. Algo más desarrollada, la red viaria anterior a la apertura del aeropuerto actual (1969) (Fig. 1) conserva, aunque con la incorporación de algunos nuevos tramos (D-12), esta línea de comunicación esencial. Tras la aparición del aeropuerto y su ubicación, en el extremo suroriental de la isla, puede observarse claramente la amplia densificación de la red que se ha producido en 15 años, sobre todo en las zonas turísticas próximas a la costa oriental (norte y sobre todo sur), más cercanas al aeropuerto o mejor conectas con él.

Para comprobarse esta densificación puede verse la Fig. 2 donde se destaca en trazo grueso la red principal de carreteras que conecta exclusivamente poblaciones principales entre sí, y en trazo más fino, las carreteras que conducen a núcleos turísticos y urbanizaciones.

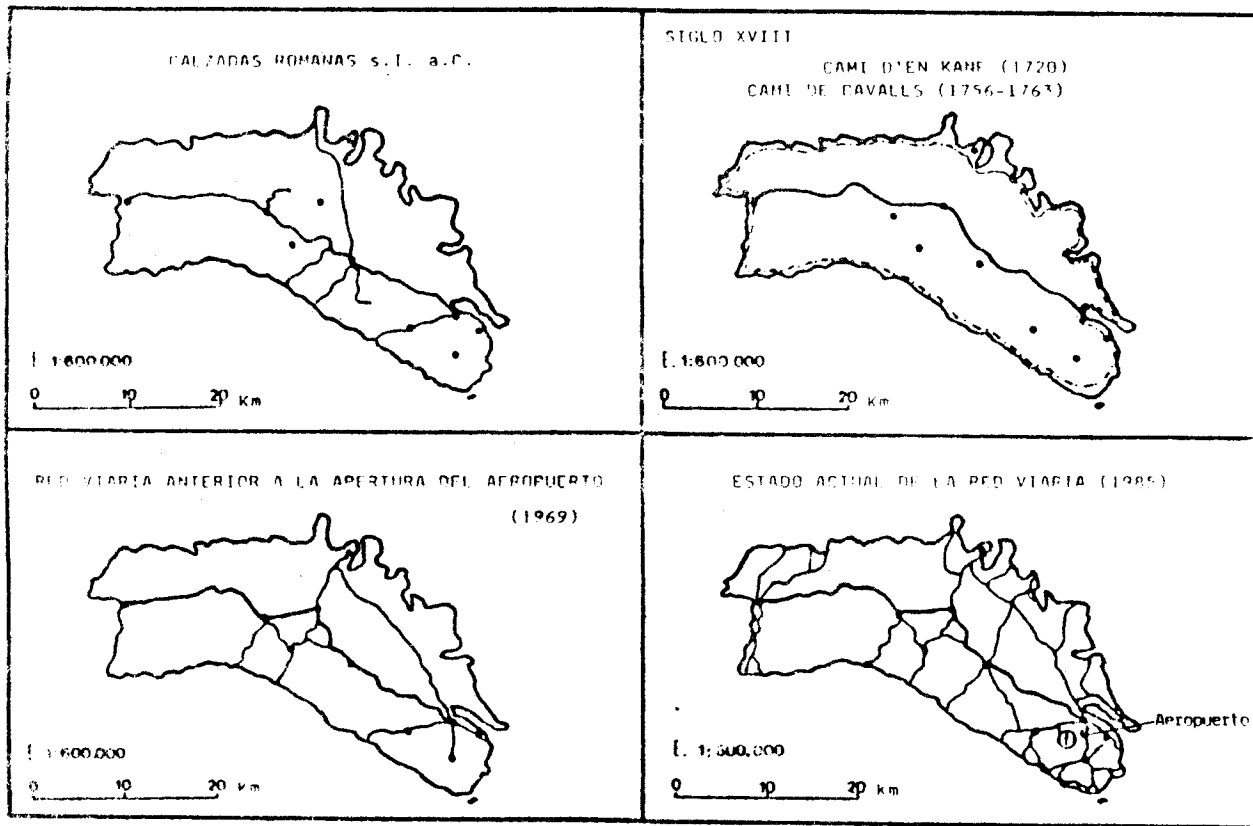


Fig. 1. Estado morfológico de la Red viaria de Menorca en distintos momentos de su desarrollo.

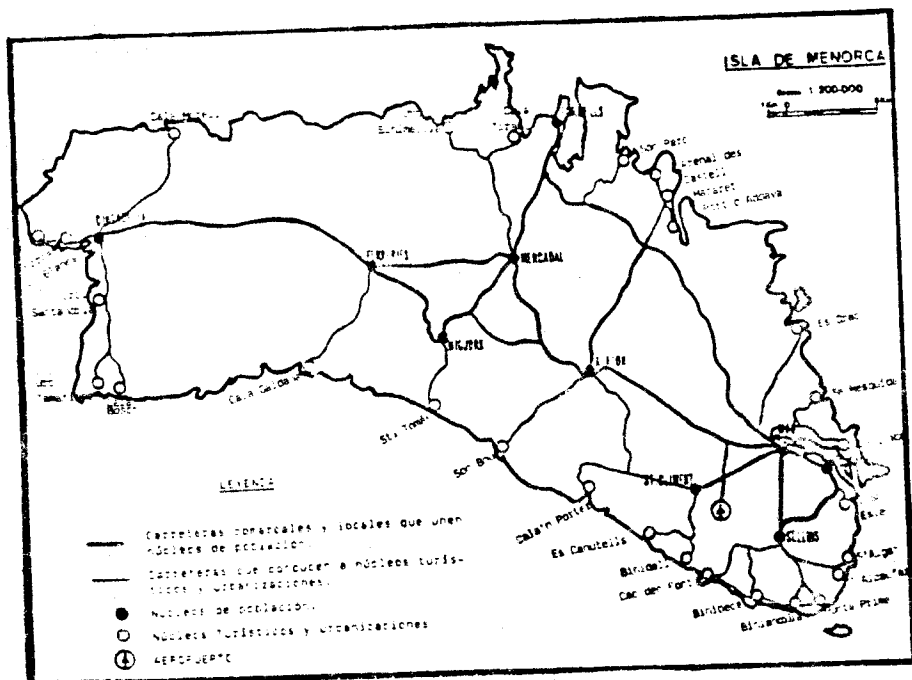


Fig. 2. Mapa de la Isla de Menorca, donde se destacan principalmente la Red de Carreteras que cubre la isla así como las poblaciones y núcleos turísticos que quedan por ella conectadas.

4. APLICACION DE LA TEORIA DE GRAFOS A LA ACTUAL RED VIARIA DE MENORCA

Para el análisis topológico (D-4) de la red de carreteras hemos utilizado el mapa de Menorca a escala 1:93.000 realizado por el Consejo Superior Cartográfico (CSC, 1960) aunque para su presentación gráfica se haya reducido la escala a 1:200.000 y 1:600.000.

4.1 La transformación de la red viaria en grafo

A partir de la red general de carreteras (Fig. 2) hemos realizado dos esquematizaciones sucesivas. La primera contiene exactamente los mismos enlaces, cruces y conexiones que el Mapa General anterior, sólo que se ha transformado el trazado más largo existente entre sus nodos, por uno ficticio de trazado mínimo (Fig. 3). La segunda esquematización corresponde a la red viaria escogida para nuestro estudio, con indicación de códigos de identificación tanto en los futuros nodos o vértices (D-9) (poblaciones y aeropuerto) como de las intersecciones viarias en ruta (cruces internodales y/o interviales) (Fig.4).

Se presentan a continuación otras dos esquematizaciones, idénticas a las de la figura 4, que contienen como novedad: una, Fig. 5, el haber incorporado a cada tramo viario (D-12) el indicativo correspondiente a las distancias kilométricas entre los distintos nodos y cruces de la red seleccionada; la otra, Fig. 6, la incorporación, como en el caso anterior, esta vez de las distintas distancias horarias (expresadas en minutos).

Tanto el mapa de la Fig. 4 como los de las Figs. 5 y 6 permitirán comprobar a quienes lo deseen, la transformación de estas esquematizaciones, topológicas, kilométricas y horarias, en los grafos no planos G y G_A (D-8) que se presentan cada uno de ellos bajo esas tres distintas mediciones de distancia (Fig. 7 a la Fig. 12).

Hemos designado con el nombre de GRAFO G aquel grafo de representación topográfica no plana (D-8) de la red de carreteras

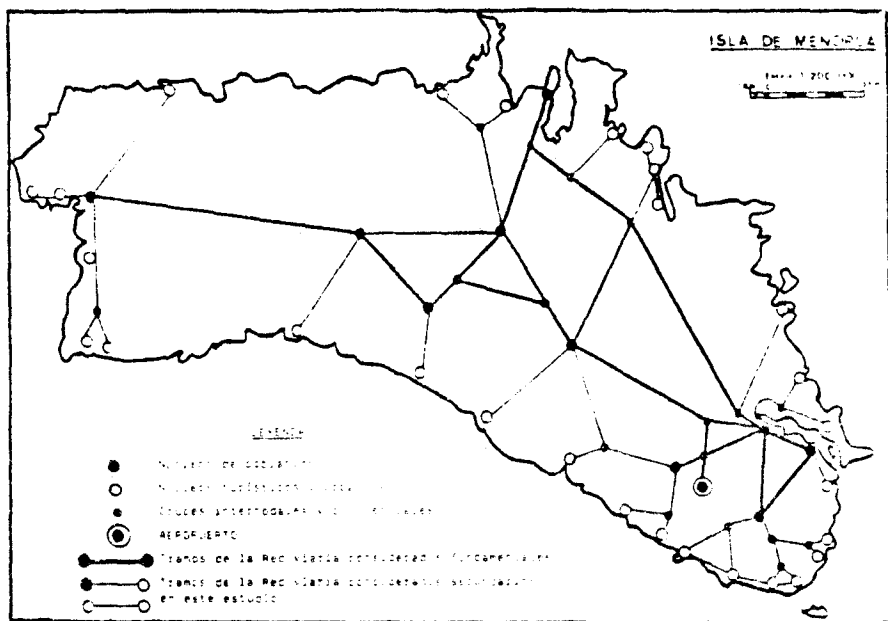


Fig. 3. Esquemización de la actual Red de Carreteras de Menorca.

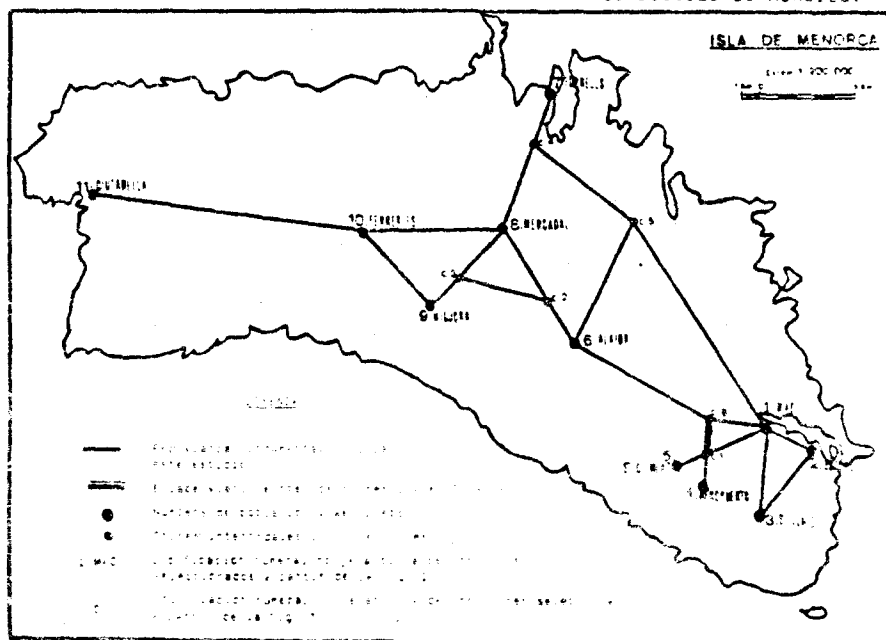


Fig. 4. Esquemización de la Red viaria utilizada en este trabajo.

Fig. 5. Esquemática de la Red Vial seleccionada con indicación de distancias kilométricas entre nodos y cruces de la misma.

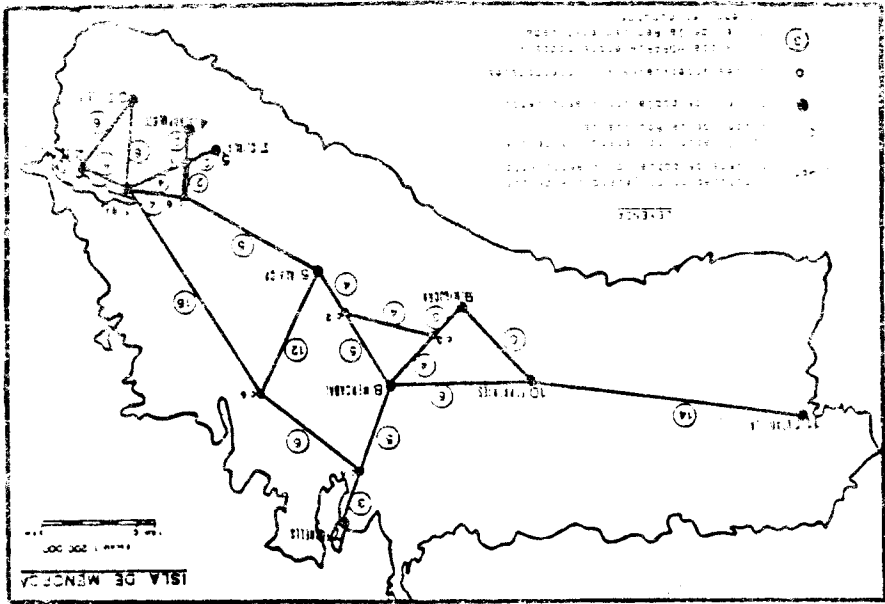
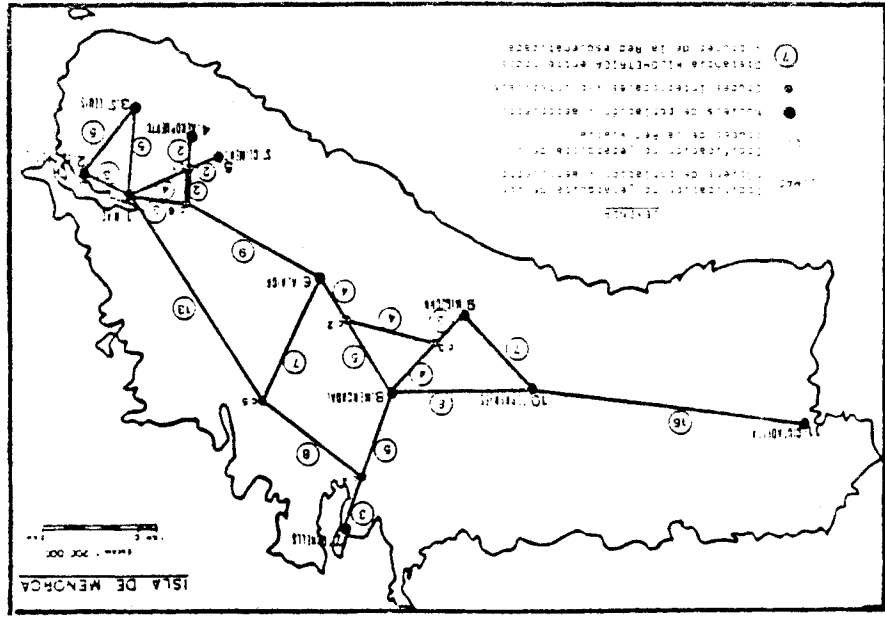


Fig. 5. Esquemática de la Red Vial seleccionada con indicación de distancias KILOMÉTRICAS entre nodos y cruces de la misma.



presentada en la Fig. 4 con la excepción del enlace C.1-C.6, vía ésta que, al cortar la carretera local Maó-Sant Climent, por la que se desvía uno hacia el aeropuerto en el Km. 4, con la carretera comarcal C-721 (Maó-Ciutadella) en el Km. 3, pone en contacto, con sólo dos Km., ambas carreteras desviando: 1º) por un lado, el tráfico que procedente de otros pueblos de la isla, y viniendo por la C-721, habían de dirigirse, forzosamente, hasta Maó, para tomar luego la carretera Maó-Sant Climent y de ella desviarse hasta el aeropuerto, y 2º) por otro, el tráfico que, procedente del aeropuerto, tiene como punto de destino cualquier otro núcleo de población que no sean los de la costa suboriental (Maó, Es Castell, Sant Lluís o Sant Climent). Este tráfico, antes de la creación del enlace C.1-C.6, se veía obligado también a pasar por el centro de la ciudad de Maó, con lo que no sólo aumentaba la distancia kilométrica a recorrer, y el tiempo invertido, sino que además, contribuía a congestionar enormemente los cinturones viarios periféricos de la ciudad de Maó, ya de por sí sobresaturada de tráfico, en especial durante los meses de estío.

El grafo G_A designa el grafo cuya representación topológica no-plana de la red viaria de la Fig. 4 incluye toda la red en su conjunto, incluido el enlace C.1-C.6.

5. ALGUNAS MEDIDAS DE COHESION DE LAS REDES DE TRANSPORTE APLICADAS A LOS GRAFOS G Y G_A

Medir el grado de cohesión recíproca entre los vértices definidos en un grafo siempre resulta interesante, pero "el concepto de cohesión cobra un significado especial si 1) comparamos distintas redes, o bien 2) seguimos el desarrollo de una red en el tiempo (...) el grado de comunicación de la red constituye una medida que permite valorar la complejidad de las conexiones socioeconómicas de la región". (POTRYKOWSKI, M., 1994, pag. 122).

En nuestro propósito de analizar cómo ha afectado a la ordenación del espacio insular la introducción de un nuevo segmento

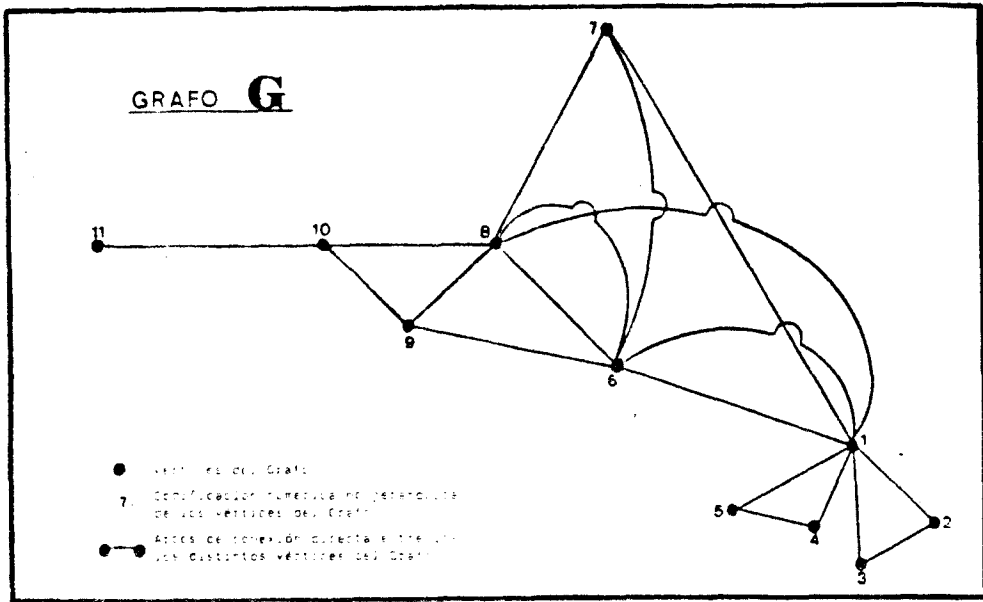


Fig. 7. Grafo no-plano G . Representación topológica de la Red de Carreteras seleccionada a partir de la Fig. 4. (Excluyendo el enlace C₁₁-C₆).

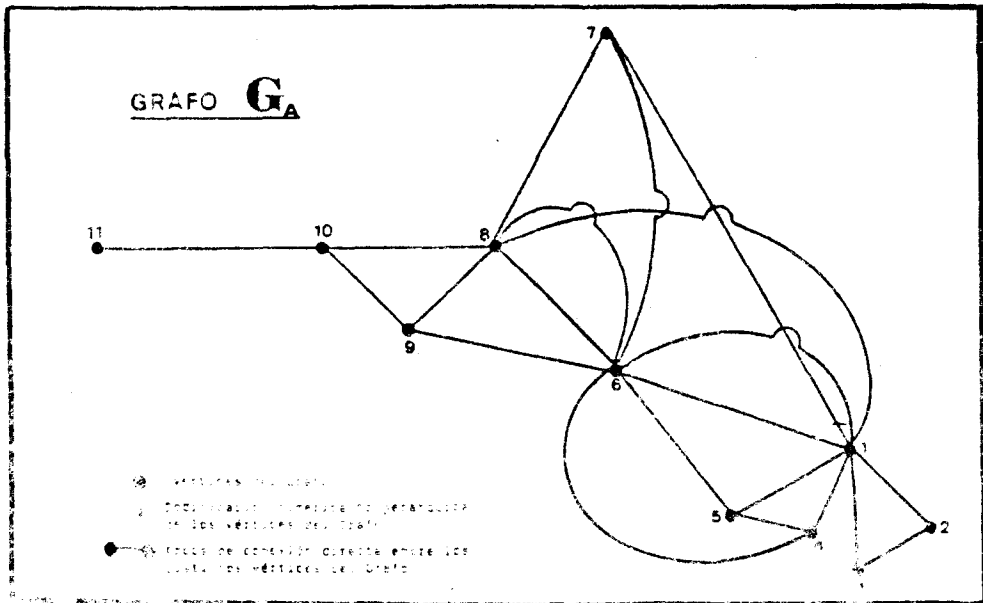


Fig. 8. Grafo no-plano G_A . Representación topológica de la Red de Carreteras seleccionada a partir de la Fig. 4. (Incluyendo el enlace C₁₁-C₆).

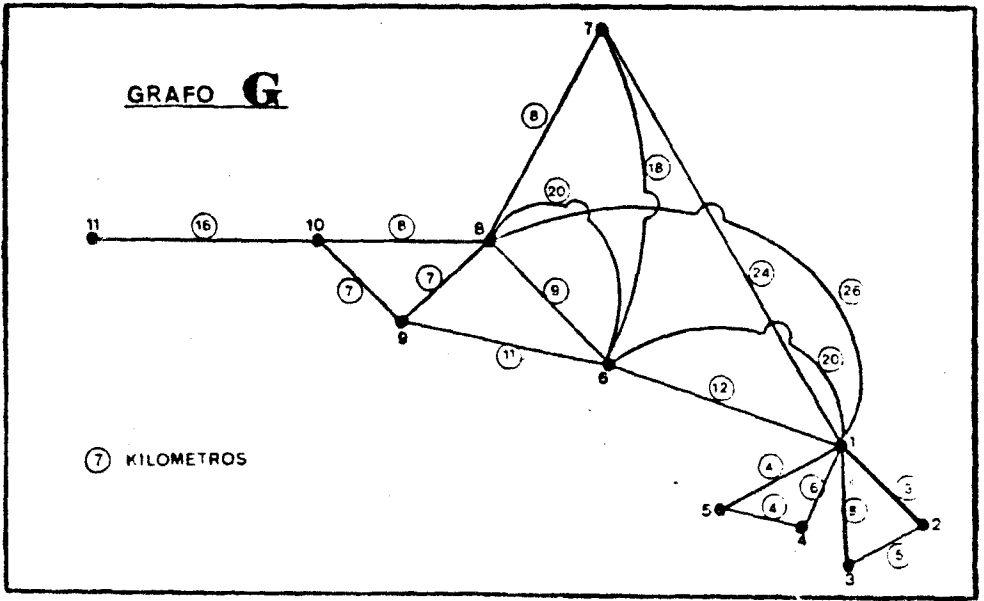


Fig. 9. Grafo G no-plano con indicación de distancias **KILOMÉTRICAS** inter-nodos.

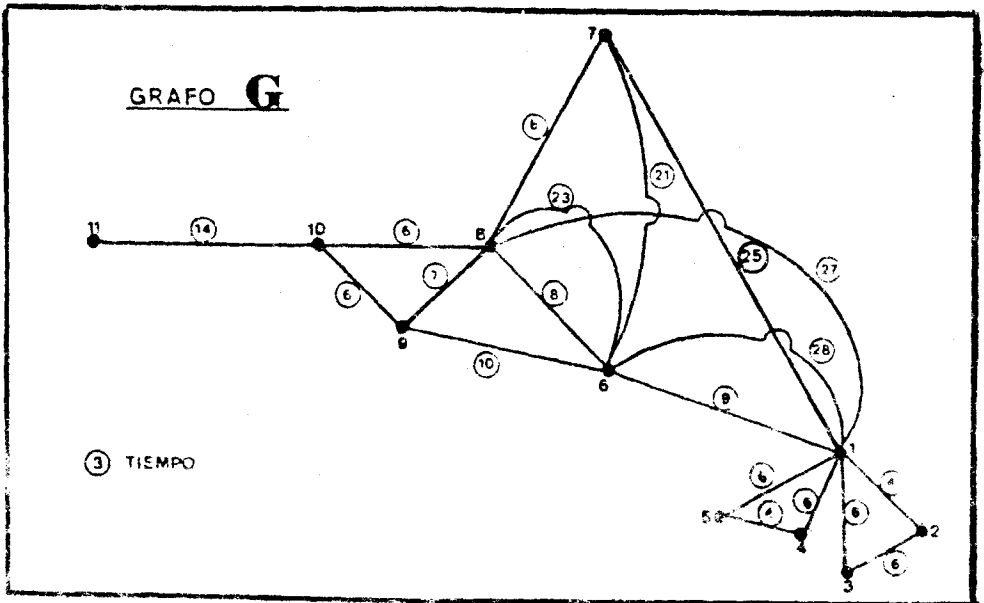


Fig. 10. Grafo G no-plano con indicación de distancias **HORARIAS** inter-nodos: (Minutos)

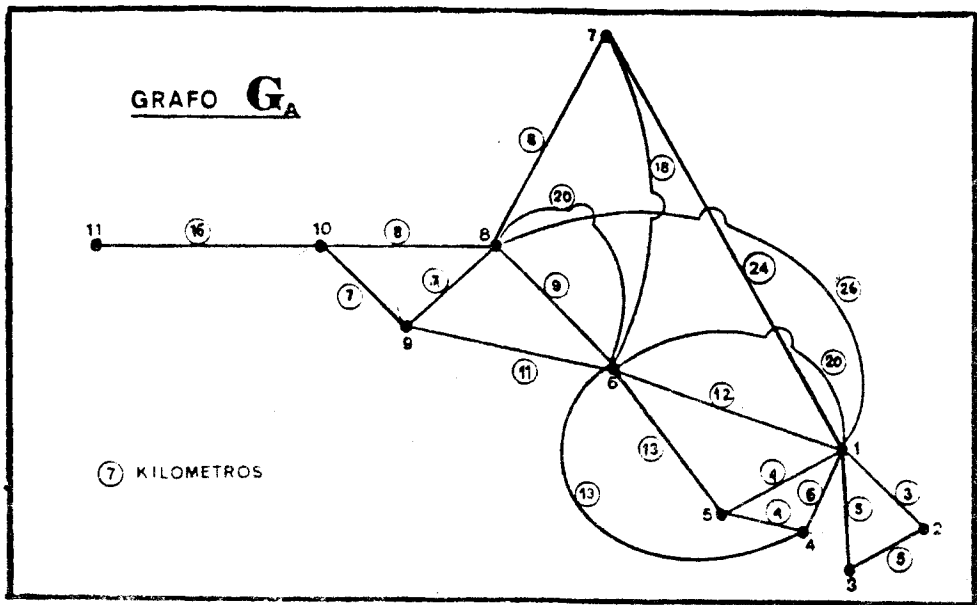


Fig. 11. Grafo G_A no-plano con indicación de distancias KILOMÉTRICAS internodales.

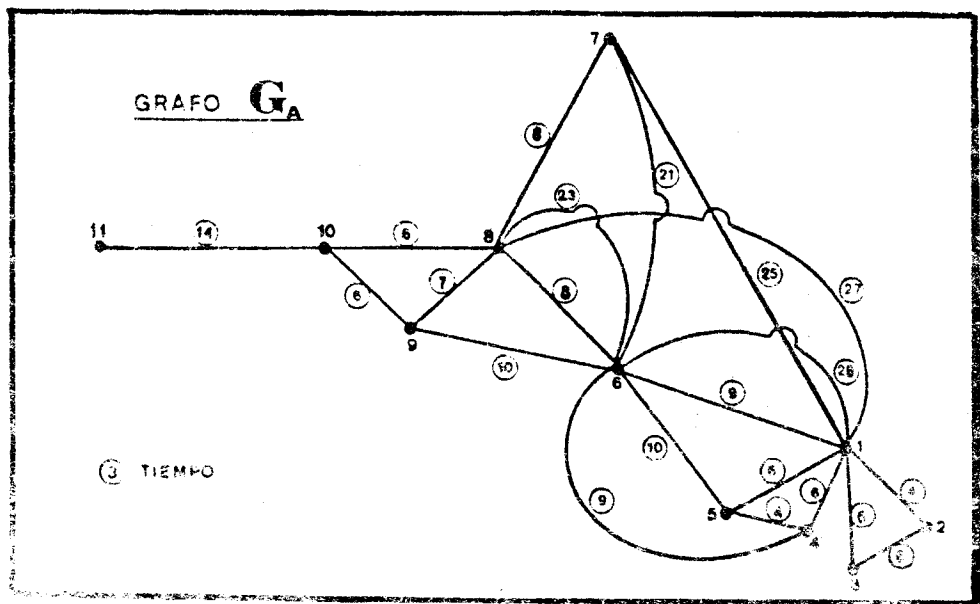


Fig. 12. Grafo G_A no-plano con indicación de distancias HORARIAS internodales. (Minutos).

viario en la red de carreteras, hemos de hacer uso en primer lugar de medidas que describan el grado de cohesión de la red para así determinar si la complejidad de la red representada por el grafo G es mayor, menor o igual que la del grafo G_A , al que le ha sido añadido el nuevo tramo (Figs. 7 y 8). En el caso de que sea mayor la cohesión del grafo G_A hablaremos de un grafo altamente cohesionado (D-16).

5.1 Grado de cohesión de Prihar

Siguiendo la fórmula propuesta por Z. PRIHAR en 1976 escribimos:

$$Cst = V (V-1)/2e$$

donde:

Cst = Grado de Cohesión de la red

V = Número de vértices

e = Número de aristas.

Aplicando a nuestros grafos G y G_A nos da como resultado:

Grafo G:

$$V = 11 \quad e = 19 \quad Cst = 110/38 = 2'89$$

Grafo G_A :

$$V = 11 \quad e = 21 \quad Cst = 110/42 = 2'62$$

Los límites de este índice son: $1 \leq Cst \leq V/2$ indicador del grado de cohesión de la red oscilan entre 1 (cohesión máxima) y $V/2$ (5'5). De ello se deduce que ambos grafos (G y G_A) están bastante más próximos a la máxima cohesión (Cst = 1), pero ésta sólo ha aumentado 27 centésimas con la adición de este enlace viario C.1-C.6.

5.2 Número ciclomático

Frecuentemente, como medida de cohesión, se utiliza también el llamado primer número de Betti o número ciclomático, que se formula así:

$$\mu = e - V + p$$

donde:

e = Número de aristas
V = Número de vértices
p = Número de subgrafos.

Los grafos incoherentes y árboles tienen números ciclomáticos iguales a cero, por ello, cuanto más elevado sea el número ciclomático de un grafo, más coherente será éste.

En nuestros casos (G y G_A) resulta:

Grafo G:

$$e = 19 \quad V = 11 \quad \mu = 19 - 11 + 1 = 9$$

Grafo G_A:

$$e = 21 \quad V = 11 \quad \mu = 21 - 11 + 1 = 11$$

Teniendo en cuenta que el límite del número ciclomático oscila entre $0 \leq \mu \leq (V - 1) - (V - 2)/2$, es decir, entre $0 \leq \mu \leq 45$, los valores obtenidos ($\mu = 9$ y $\mu = 11$) no se aproximan excesivamente al máximo grado de cohesión aunque como en el caso anterior, el grafo G_A está algo más cohesionado que el G.

5.3 Índices de cohesión de Kansky (α, β, γ)

A excepción de los ya enunciados de Prihar y el de Betti, el resto de índices de cohesión fueron ideados por Kansky en 1963 basándose en la teoría matemática de los grafos pero no derivando directamente de ésta. Kansky presentó así un nuevo número ciclomático corregido, conocido como índice α . Este índice α "expresa la relación entre el número de circunvalaciones (ciclos) observados y el máximo" (POTRYKOWKI, 1964, pag. 124) número de ciclos posibles, y adopta, para el caso de los grafos no planos, que son los que nos ocupan, la siguiente forma:

$$\alpha = 2\mu / (V-1)(V-2)$$
 (sus límites oscilan entre 0 y 1, o bien, expresados en porcentajes, entre un 0% y un 100%). Como en el caso del número ciclomático (Véase 4.2), los valores iguales o

próximos a 0 son propios de grafos incoherentes y redes inconexas).
En nuestro caso:

Grafo G:

$$\alpha = 2 \times 9 / (11-1) \times (11-2) = 0'20, \text{ o bien } 20\% \text{ de cohesión.}$$

Grafo G_A :

$$\alpha = 0'24 \text{ o bien } 24\% \text{ de cohesión.}$$

El índice Beta de Kansky es posiblemente el más fácil y sencillo de aplicar. Relaciona el número de aristas "e" con el número total de vértices del grafo. $\beta = e/V$, en nuestro caso:

Grafo G:

$$e = 19$$

$$V = 11$$

$$\beta = 19/11 = 1'72$$

Grafo G_A :

$$e = 21$$

$$V = 11$$

$$\beta = 21/11 = 1'9$$

El límite oscila entre $0 \leq \beta \leq V-1/2$ (en nuestro ejemplo entre 0 y 5), por lo tanto la cohesión del grafo G como la del G_A , pese a ser la de este último algo más alta, es aún bastante reducida).

El índice de Kansky δ es el último de los más utilizados y expresa la relación entre el número de aristas existentes en el grafo y el mayor número de aristas posibles.

Para los grafos no planos se expresa así:

$$\delta = 2 e/V (V-1)$$

de donde en nuestro caso:

Grafo G:

$$e = 19$$

$$V = 11$$

$$\delta = 38/110 = 0'34, \text{ o bien } 34\%$$

Grafo G_A :

$$e = 21$$

$$V = 11$$

$$\delta = 42/110 = 0'38, \text{ es decir } 38\%$$

5.4 Grado de cohesión del grafo

Por último, presentamos el índice por ZAGOZDZON (1970-71) que indica el grado de desarrollo del grafo. Se presenta como:

$$G_p = \frac{\frac{v^2 - v}{2} - e}{v}$$

que en el caso de nuestro grafo G_A da un valor de $G_p = 3'09$ y en el del grafo $G = 3'27$.

"El grado de desarrollo de un grafo indica el número de aristas que faltan para completar el grafo y que corresponden a cada vértice. El índice G_p informa sobre las dimensiones de los complementos que se han de introducir en la red" (POTRYKOWSKY, 1984, pag. 131).

Se comprobará que la adición de un segmento (que es lo que diferencia el grafo G del G_A) aumenta el "desarrollo" del grafo bien poco.

En definitiva, la conectividad y la cohesión de la red de transportes (D-5) de Menorca, representada por la red topológica (D-6) G y por la G_A no sufren, de una u otra, una variación fundamental, por lo que la adición del nuevo segmento, a efectos de planificación y reordenación espacial, no resulta ser un elemento que aporte enormes beneficios a la red anterior existente. (Su verdadera importancia la veremos a continuación, al analizar la accesibilidad de la red de transportes).

6. ACCESIBILIDAD DE LA RED DE TRANSPORTES DE MENORCA

Uno de los puntos que nos interesa respecto a la accesibilidad es el que se deriva de la dominancia, preeminencia y/o competitividad espacial entre los nudos de la red, pero además, y especialmente, los cambios producidos en la estructura por la adición

de un nuevo enlace entre vías. Las ventajas o desventajas respecto al orden espacial que obtengan los distintos nudos de la red a partir de una modificación de su estructura, son todos ellos cambios fácilmente y rigurosamente detectados por las medidas de accesibilidad.

6.1 Medidas de accesibilidad de los nodos

Aparentemente una ojeada al mapa geográfico de Menorca bastaría para determinar cuales son los medios más accesibles, sin embargo difícilmente podríamos determinar con exactitud todo el orden jerárquico de los núcleos y, mucho menos, cuál es la variación de este orden en función de la adición de una nueva vía. Para ello es necesario recurrir a las ya conocidas matrices de accesibilidad. (Por cuestión de espacio eludimos la matriz de enlaces -deceros y unos- y pasamos directamente a la matriz de distancias).

En el Cuadro I se presenta la matriz de accesibilidad topológica (D-22) del grafo G. Esta y todas las restantes matrices de distancias parten del concepto "distancia dxy" (D-15). Se ha calculado así esta matriz a partir del grafo G (Fig. 7). Ella nos permitirá definir una serie de características de este grafo,

$\phi(G) = 5$, extraídas a partir del número de asociaciones de los vértices (D-19); el índice de Shimbél (1953) que nos determina la accesibilidad del grafo (D-22) desde cada uno de los vértices o nodos dados (ver Cuadro I); y la dispersión del grafo (D-23) que equivale a la suma de los índices de Shimbél de cada nodo.

Una vez confeccionada esta matriz puede establecerse el rango u orden jerárquico que establecen los nodos de la red (o del grafo) entre sí, rango que, obviamente, podremos comprobar como cambia no tan sólo del grafo G con respecto al G_A , sino, además, la variación del rango de los nodos de cada uno de estos grafos independientemente considerados según establezcamos como unidad de medida la distancia topológica, kilométrica o horaria (en minutos) que separa cada uno de los nodos de la red de los restantes. (Puede comprobarse estas diferencias comparando las matrices de accesibi-

CUADRO 2

MATRIZ DE ACCESIBILIDAD TOPOLOGICA.

GRAFO G

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nº Asoc.	Ind. SHIMB.	R
1. MAC	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	17	1
2. ES CASTELL	-	-	1	2	2	2	2	3	3	4	5	5	25	6
3. ST. LUIS	1	1	-	2	2	2	2	3	3	4	5	5	25	6
4. AEROPUERTO	1	2	2	-	1	2	2	3	3	4	5	5	25	6
5. ST. CLIMENT	1	2	2	1	-	2	2	3	3	4	5	5	25	6
6. ALAIOR	1	2	2	2	2	-	1	1	1	2	3	3	17	1
7. FORNELLS	1	2	2	2	2	1	-	1	2	2	3	3	18	3
8. MERCADAL	2	3	3	3	3	1	1	-	1	1	2	3	20	4
9. MIGJORN	2	3	3	3	3	1	2	1	-	1	2	3	21	5
10. FERRERIES	2	4	4	4	4	2	2	1	1	-	1	4	26	10
11. CIUTADELLA	4	5	5	5	5	3	3	2	2	1	-	5	35	11

$e(G) = 4$

$\delta(G) = 5$

$D(G) = 254$

CUADRO II

MATRIZ DE ACCESIBILIDAD. DISTANCIAS INTERNODALES EN KILOMETROS.

GRAFO G

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nº Asoc.	Ind. SHIMB.	R
1. MAÓ	-	3	5	6	4	12	24	21	23	29	45	45	172	2
2. ES CASTELL	3	-	5	9	7	15	27	24	26	32	48	48	196	4
3. ST.LLUIA	5	5	-	11	9	17	29	26	28	34	50	50	214	7
4. AEROPUERTO	6	9	11	-	4	18	30	27	29	35	51	51	220	8
5. ST.CLIMENT	4	7	9	4	-	16	28	25	27	33	49	49	202	6
6. ALAIOR	12	15	17	18	16	-	18	9	11	17	33	33	166	1
7. FORNELLS	24	27	29	30	28	18	-	8	15	16	32	32	227	9
8. MERCADAL	21	24	26	27	25	9	8	-	7	8	24	27	179	3
9. MIGJORN	23	26	28	29	27	11	15	7	-	7	23	29	196	4
10. FERRETTES	29	32	34	35	33	17	16	8	7	-	16	35	227	9
11. CIUTADELLA	45	48	50	51	49	33	32	24	23	16	-	51	371	11

$$e(G) = 26$$

$$D(G) = 51$$

$$D(G) = 2.370$$

CUADRO III

MATRIZ DE ACCESIBILIDAD. DISTANCIAS INTERNODALES EN MINUTOS.

GRAFO G

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nº Asoc.	Ind. SHIMB.
1. MAÓ	-	4	6	6	6	9	25	17	19	23	37	37	152
2. ES CASTELL	4	-	6	10	10	13	29	21	23	27	41	41	184
3. ST.LLUIIS	6	6	-	12	12	15	31	23	25	29	43	43	202
4. AEROPUERTO	6	10	12	-	4	15	31	23	25	29	43	43	198
5. ST.CLIMENT	6	10	12	4	-	15	31	23	25	29	43	43	198
6. ALAIOR	9	13	15	15	15	-	21	8	10	14	28	28	148
7. FORNELLS	25	29	31	31	31	21	-	8	15	14	28	31	233
8. MERCADAL	17	21	23	23	23	8	8	-	7	6	20	23	156
9. MIGJORN	19	23	25	25	25	10	15	7	-	6	20	25	175
10. FERRERIES	23	27	29	29	29	14	14	6	6	-	14	29	191
11. CIUTADELLA	37	41	43	43	43	28	28	20	20	14	-	43	317

$$e(G) = 23$$

$$D(G) = 43$$

$$D(G) = 2.154$$

CUADRO IV

MATRIZ DE ACCESIBILIDAD TOPOLOGICA.

GRAFO G_A

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nº Asoc.	Ind. SHIMB.
1. MAÓ	-	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	14
2. ES CASTELL	1	-	1	2	2	2	2	2	3	3	4	4	22
3. ST.LLUI	1	1	-	2	2	2	2	2	3	3	4	4	22
4. AEROPUERTO	1	2	2	-	1	1	2	2	2	3	4	4	20
5. ST.CLIMENT	1	2	2	1	-	1	2	2	2	3	4	4	20
6. ALAIOR	1	2	2	1	1	-	1	1	1	2	3	3	15
7. FORNELLS	1	2	2	2	2	1	-	1	2	2	3	3	18
8. MERCADAL	1	2	2	2	2	1	1	-	1	1	2	2	15
9. MIGJORN	2	3	3	3	2	1	2	1	-	1	2	3	20
10. FERRERIES	2	3	3	3	3	2	2	1	1	-	1	3	21
11. CIUTADELLA	3	4	4	4	4	3	3	2	2	1	-	4	30

$$e(G_A) = 2$$

$$D(G_A) = 4$$

$$D(G_A) = 217$$

CUADRO V

MATRIZ DE ACCESIBILIDAD. DISTANCIAS INTERNODALES EN KILOMETROS.

GRAFO G_A

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nº Asoc.	Ind. SHIME.
1. MAÓ	-	3	5	6	4	12	24	21	23	29	45	45	172
2. ES CASTELL	3	-	5	9	7	15	27	24	31	32	48	48	201
3. ST.LLUIS	5	5	-	11	9	17	29	26	28	34	50	50	214
4. AEROPUERTO	6	9	11	-	4	13	30	22	24	30	46	46	195
5. ST.CLIMENT	4	7	9	4	-	13	28	22	24	30	46	46	187
6. ALAIOR	12	15	17	13	13	-	18	9	11	17	33	33	158
7. FORNELLS	24	27	29	30	28	18	-	8	15	16	32	32	227
8. MERCADAL	21	24	26	22	22	9	8	-	7	8	24	26	171
9. MIGJORN	23	31	28	24	24	11	15	7	-	7	23	31	193
10. FERRERIES	29	32	34	30	30	17	16	8	7	-	16	34	219
11. CIUTADELLA	45	48	50	46	46	33	32	24	23	16	-	50	363

$e(G_A) = 26$

$\delta(G_A) = 50$

$D(G_A) = 2.30$

CUADRO VI

MATRIZ DE ACCESIBILIDAD. DISTANCIAS INTERNODALES EN MINUTOS.

GRAFO G_A

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nº Asoc.	Ind. SHIMB.
1. MAÓ	-	4	6	6	6	9	25	17	19	23	37	37	152
2. ES CASTELL	4	-	6	10	10	13	29	21	23	27	41	41	184
3. ST.LLUIS	6	6	-	12	12	15	31	23	25	29	43	43	202
4. AEROFUERTO	6	10	12	-	4	9	30	17	19	23	37	37	167
5. ST.ELIMENT	6	10	12	4	-	10	31	18	20	24	38	38	173
6. ALAIOR	9	13	15	9	10	-	21	8	10	14	28	28	137
7. FORNELLS	25	29	31	30	31	21	-	8	15	14	28	31	232
8. MERCADAL	17	21	23	17	18	8	8	-	7	6	20	23	145
9. MIG.ORN	19	23	25	19	20	10	15	7	-	6	20	25	164
10. FERRERIES	23	27	29	23	24	14	14	6	6	-	14	29	180
11. CIUTADELLA	37	41	43	37	38	28	28	20	20	14	-	43	306

$$e(G_A) = 28$$

$$D(G_A) = 43$$

$$D(G_A) = 2.04$$

COMPARACIÓN ENTRE COTAS DE ACCESIBILIDAD SI GUN INDICE DE SHIMBEL

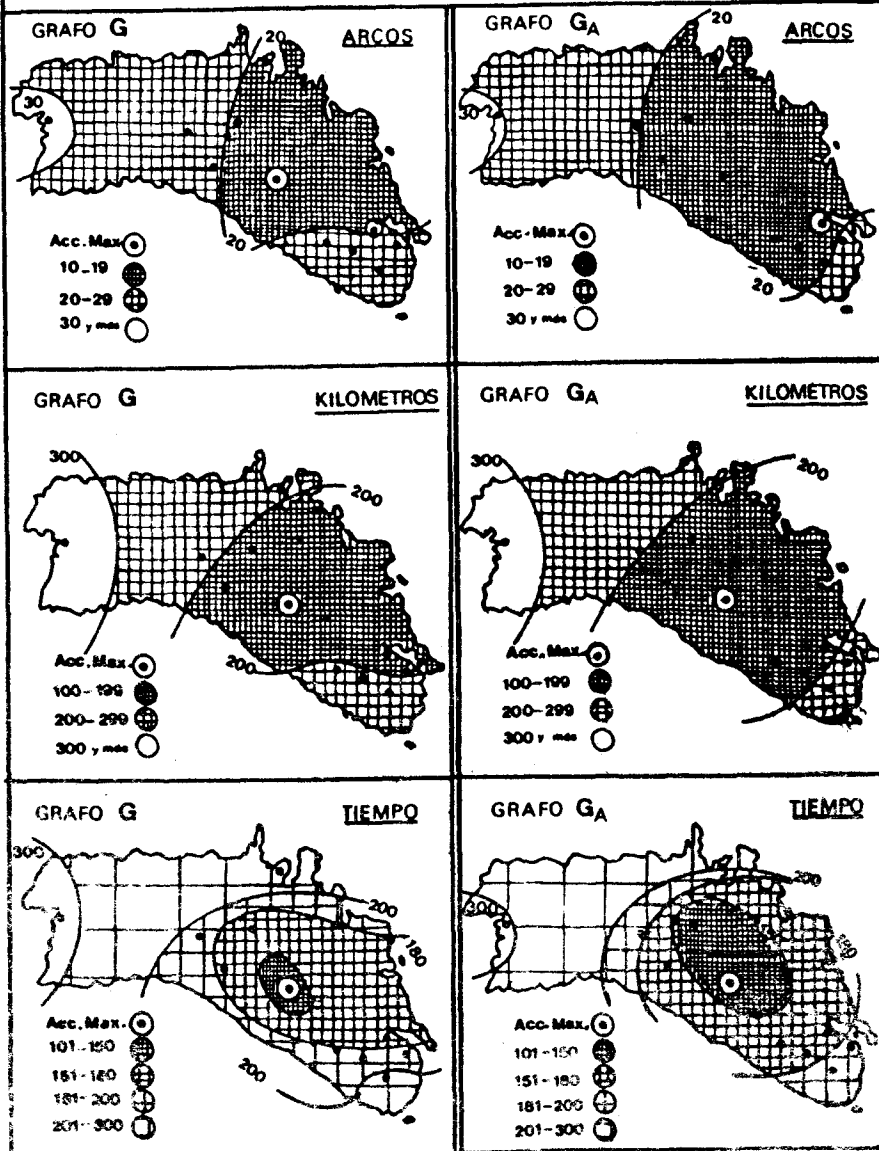


Fig. 13. Comparación mediante representación gráfica de las cotas de Accesibilidad -topológica, kilométrica y horaria- obtenidas a partir del trazado de isolinias entre intervalos de variación del Índice de SHIMBEL. (Ver Cuadro VII).

lidad topológica, kilométrica y horaria que aparecen en los Cuadros I, II y III respectivamente para el grafo G, y IV, V y VI para el grafo G_A , o pasarse directamente al Cuadro resumen VII y VIII).

Este Cuadro VII nos comprueba que la adición de un nuevo tramo a la red viaria (C.1-C.6) ha modificado la accesibilidad de algunos nodos importantes, en lo que a enlaces kilométrico y de tiempo se refiere. El Aeropuerto ha ganado en accesibilidad y la forma más gráfica de comprobarlo consiste en acudir a la Fig. 13, donde aparecen representados gráficamente sobre distintos mapas de Menorca los Indices de accesibilidad de SHIMBEL, tanto en los nodos de las redes G como de la G_A medidos en distancia topológica (arcos), kilométrica y horaria (tiempo en minutos). Por medio de interpolaciones se han establecido cotas de accesibilidad, lo que nos ha permitido comparar, dos a dos, (Grafo G con G_A), las modificaciones habidas en cada una de las distintas distancias consideradas. Se comprueba así que: el punto más accesible de toda la isla es Alaior y el menos accesible Ciutadella. El nodo 4. (Aeropuerto) que nos interesaba especialmente, por cuanto la diferencia entre el Grafo G y el G_A reside precisamente en un nuevo enlace con él, aparece en todos los Mapas del Grafo G (Fig. 13) en un intervalo de accesibilidad inferior al que adquiere en el Grafo G_A tras la adición del segmento.

Finalmente, hemos aplicado a las Matrices de los Cuadros del I al VI, otro Índice, esta vez de Accesibilidad relativa o Índice de STUTZ (D-25), que se formula como sigue:

$$\Omega_g = \frac{A_y - A_*}{A^* - A_*} \cdot 100$$

donde:

A_y = Índice de Shimbél del nodo A_y

A_* = Nodo más accesible (Índ. Shimbél más bajo)

A^* = Nodo más inaccesible (Índ. Shimbél más alto)

CUADRO VII. VALORES DE ACCESIBILIDAD SEGUN SHIMBEL.

Nº de Nodo	ARCOS		KILOMETROS		TIEMPO	
	G	G _A	G	G _A	G	G _A
1	14	17	172	172	152	152
2	22	25	196	201	184	184
3	22	25	214	214	202	202
4	20	25	220	195	167	198
5	20	25	202	187	173	198
6	15	17	166	158	137	148
7	18	18	227	227	232	233
8	15	20	179	171	145	156
9	20	21	196	193	164	175
10	21	26	227	219	180	191
11	30	35	371	363	306	317
D(G)	217	254	2370	2300	2042	2154

**CUADRO VIII. COMPARACION DE LOS RANGOS DE ACCESIBILIDAD
DE LOS NODOS DE LOS GRAFOS G Y G_A.**

Nº de Nodo	ARCOS		KILOMETROS		TIEMPO	
	G	G _A	G	G _A	G	G _A
1.MAO	1	1	2	3	2	3
2.ES CASTELL	6	9	4	7	5	8
3.ST.LLUIIS	6	9	7	8	9	9
4.AREOPUERTO	6	5	8	6	7	5
5.ST.CLIMENT	6	5	6	4	7	6
6.ALAIOR	1	2	1	1	1	1
7.FORNELLS	3	4	9	10	10	10
8.MERCADAL	4	3	3	2	3	2
9.MIGJORN	5	3	4	5	4	4
10.FERRERIES	10	8	9	9	6	7
11.CIUTADELLA	11	11	11	11	11	11

De su aplicación a las seis Matrices de los Grafos G y G_A obtenemos los valores relativos de la accesibilidad de cada nodo respecto a los demás, es decir, expresados porcentualmente. (Ver Cuadro IX). A partir de este Cuadro IX hemos podido elaborar los Mapas de la Fig. 14. Este Índice de STUTZ de accesibilidad relativa tiene la ventaja de permitir la homogeneización de criterios a la hora de comparar, pues se expresa en tantos por ciento.

De nuevo se observa cómo un simple tramo de apenas dos kilómetros ha contribuido a acortar distancias kilométricas y temporales, "reduciendo" o "encogiendo" con ello el espacio insular.

7. CONCLUSION

Creemos haber mostrado pues cómo los métodos cuantitativos, en este caso de la teoría de los grafos, son un instrumento no sólo adicional sino imprescindible para una comprensión y explicación óptima de la ordenación real del territorio, por lo que resulta sumamente importante tenerlos en cuenta a la hora de planificar éste. Hemos visto cómo: 1º) toda la configuración espacial de un, ya por sí, reducido territorio se ha modificado primero con la ubicación en la zona sur oriental de la isla de su actual aeropuerto (Fig. 1); y 2º) cómo desde un punto de vista topológico, kilométrico y horario, el espacio físico se ha visto "reducido" en sus dimensiones. Este tratamiento conjunto de la red viaria, a través de la teoría de grafos, es su valor más importante puesto que para la planificación territorial es imprescindible estudiar la estructura de la red de transporte considerada como un sistema, total e integrado. Creemos que en este estudio y planificación del orden espacial los geógrafos han, forzosamente, de intervenir. Bien definidos los problemas y resueltos adecuadamente, son sin duda los métodos cuantitativos los que con mayor precisión podrán darlos un conocimiento más útil de la realidad.

**CUADRO IX. VALORES DE ACCESIBILIDAD RELATIVA
SEGUN INDICE DE STUTZ.**

Nº de Nodo	ARCOS		KILOMETROS		TIEMPO	
	G	G _A	G	G _A	G	G _A
1.	0	0	2'92	9'26	2,36	8'87
2.	44,44	50	14'63	20'93	21'30	27'81
3.	44'44	50	23'41	27'31	31'95	38'46
4.	44'44	37'50	26'34	18'04	28'58	17'75
5.	44'44	37'50	17'56	14'14	29'58	21'30
6.	0	6'25	0	0	0	0
7.	5'55	2'50	29'75	33'65	50'29	56'21
8.	16'66	6'25	6'34	6'34	4'73	4'73
9.	22'22	37'50	14'63	17'07	15'97	15'97
10.	50	43'75	29'75	29'75	25'44	25'44
11.	100	100	100	100	100	100

ACCESIBILIDAD RELATIVA SEGÚN ÍNDICE DE STUTZ

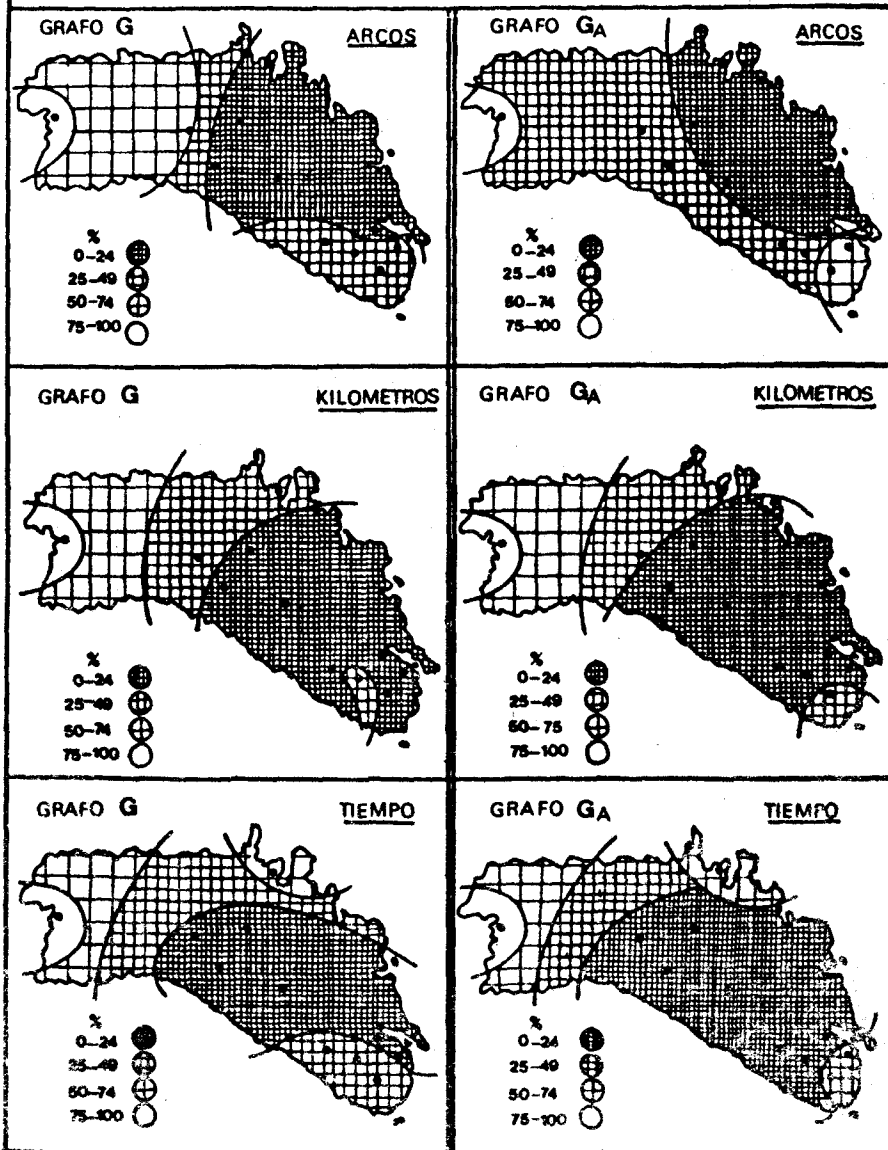


Fig. 14. Representación gráfica del Índice de Accesibilidad Relativa de STUTZ. Comparación porcentual de los Grafos G y G_A en cualquiera de las expresiones posibles de distancias: topológicas, kilométricas u horarias. (Ver Cuadro IX).

BIBLIOGRAFIA

- BENEJAM, P.; VERGARA, J.M. (1976): Intercambio. Barcelona. Vicens Vives, pág. 379.
- BRUNET, P. (1980): "La red viaria de Mallorca. Estudio de la densidad de carreteras y aplicación de la teoría de grafos". Palma de Mallorca, Rev. Mayurqa nº 19, págs. 11-29.
- CAPEL, H. (1973): "Percepción del medio y comportamiento geográfico". Barcelona, Rev. de Geografía.
- ESTEBANEZ, J. (1976): "Esquema metodológico para el estudio de la estructura de las redes de transporte en España". Madrid, Aportación española al XXIII Congreso Geográfico Internacional, págs. 185-197.
- FORTEZA, M. (1958): Las carreteras de Baleares. Madrid, MOPU.
- GARCIA, A.M. (1979): "La red de transportes de la provincia de Almería: Aplicación de la Teoría de Grafos". Almería, Rev. Paralelo 37º, nº 3, págs. 137-152.
- POTRYKOWSKI, M.; TAYLOR, Z. (1984): Geografía del Transporte. Barcelona, Ariel Geografía. pág. 303.
- SEGUI, J.Mª. (1985): "Transportes: aislamiento y comunicación". Palma de Mallorca, Anuario 1985, Última Hora, págs. 215-228.

GLOSARIO

- D1** - Vías de transporte: Parte del territorio destinadas y acondicionadas al tráfico de vehículos.
- D2** - Líneas de transporte: Trayectos del tráfico, traslados o envíos, definidos para una vía de transporte en concreto.
- D3** - Rutas de transporte: Lugares del territorio en las que comienza, transcurre o finaliza la carga, transbordo o descarga de pasajeros y/o de mercancías.
- D4** - Nudo de transporte: Clase especial de punto de transporte donde convergen tres o más líneas de transporte o vías.
- D5** - Red de transporte: "Conjunto de vías y líneas por una parte y de puntos y nudos por otra". (POTRYKOWSKI, 1984, pág. 12).
- D6** - Red topológica o Grafo (G): Conjunto x de puntos y líneas que dibujan una estructura de la que se considera la posición y las relaciones que se establecen entre esos puntos y líneas que la conforman.
- D7** - Grafo plano: es aquel cuyos arcos o aristas no tienen más puntos comunes que los vértices.
- D8** - Grafo no plano: es aquel cuyos arcos o aristas tienen entre sí puntos comunes (inter-cruces o vías) que no son únicamente los vértices. Dichos grafos aumentan la posibilidad de nuevos arcos (su crecimiento es infinito) pero no la de nuevos vértices.
- D9** - Punto, vértice o nodo del grafo: Cada elemento del conjunto x no vacío se considera un punto o vértice de la red topológica o grafo (G).

- D10** - Enlaces aristas y arcos de un grafo: Llamamos enlaces o aristas (e) de un grafo (G) al par de puntos o vértices, (x,y) o (y,x) , no ordenado que definen un segmento el cual une directamente, sin pasar por ningún otro, los vértices x,y del grafo G . El arco se define de idéntica forma sólo que en este caso el par (x,y) o (y,x) es un par ordenado, es decir su dirección no es indiferente sino que viene dada.
- D11** - Longitud de la vía: Número total de arcos (o aristas tomadas en una sola dirección) que componen la sucesión de líneas y puntos de un grafo.
- D12** - Tramo: Conjunto de arcos que unen varios puntos o vértices del grafo. El conjunto de todos los tramos es la red topológica-relacionada.
- D13** - Arbol: Red topológica relacionada formada por un mínimo de dos vértices unidos por un arco pero en la que en ningún caso encontramos un circuito.
- D14** - Circuito: Tramo cerrado. Conjunto de arcos cuyo recorrido empieza y acaba en el mismo vértice del grafo.
- D15** - Distancia d_{xy} : Es la distancia que separa topológicamente el vértice x del vértice y , siendo la distancia entre x - y la más corta posible. (Recorriendo el menor número posible de arcos entre ambos vértices).
- D16** - Grafo altamente coherente: Red topológica coherente. Para cada dos de sus vértices existe como mínimo un arco que los une.
- D17** - Red mínimamente coherente: Red cuyo número de aristas es siempre igual al número de vértices (V) menos uno ($e_m = V-1$). Es decir, grafo para el que sólo existe una sucesión posible y en el que de suprimirse una arista se destruiría éste, dando lugar a dos subgrafos aislados.

- D18** - Circunvalación: Vía concluída en la que el vértice inicial del primer arco es a la vez el vértice final del último arco de la vía. Si la vía pasa exactamente una y solo una vez por todos los vértices del grafo (excepto del vértice que es simultáneamente inicio y fin del ciclo) la circunvalación recibe el nombre de circunvalación de Hamilton.
- D19** - Número de asociaciones de un vértice x : Es la distancia topológica más grande entre el vértice x y el vértice más distante del grafo. Escribimos $e(x)$.
- D20** - Diámetro del grafo: Es el número máximo de asociaciones de un vértice dentro de un grafo entero. Escribimos $\delta(G)$.
- D21** - Punto central del grafo: Vértice x_0 del grafo G para el que el número de asociaciones es finito y mínimo respecto a los demás vértices. Escribimos $e(G)$.
- D22** - Accesibilidad topológica: Suma de las distancias entre un nudo determinado de un grafo (G) y todos los demás nudos de su red. Viene representada por el llamado índice de Shímbel. Lo designamos por medio de A_y .
- D23** - Dispersión topológica: Suma de todos los índices de accesibilidad de la red. Escribimos $D(G)$.
- D24** - Longitud media de la vía (P_y): Índice elaborado a partir del índice de accesibilidad de un nudo "y" de la red. Permite conocer cual es el número medio de arcos que habrá que recorrer desde el vértice "y" hasta cualquiera otro punto de la red. Escribimos $P_y = A_y/Y$.
- D25** - Accesibilidad topológica relativa: Índice de accesibilidad propuesto por STUTZ (1973) que permite calcular porcentualmente cual es la accesibilidad de cada vértice "y" de la red en relación a los vértices del grafo (G) y lo que es más importante, permite comparar la accesibilidad de distintos grafos entre sí.