

JOAN MARULL
Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona
CARME FONT
Departament de Matemàtiques,
Universitat Autònoma de Barcelona
RAFAEL BOIX
Departament d'Estructura Econòmica,
Universitat de València

LES XARXES DE CIUTATS: L'ESTRUCTURA DE LES MEGAREGIONS A EUROPA

1. Les xarxes urbanes policèntriques

En els darrers dos segles els límits de les ciutats s'han estat redefinint constantment. La força motriu principal dels canvis d'escala experimentats per les ciutats ha estat l'efecte alliberador del que s'ha anomenat "economies externes espacialment mòbils" (Trullén *et al.*, 2013), que no estan limitades a una simple localitat degut a forces d'aglomeració, sinó que poden crear complexes "estructures urbanes trans-metropolitanes a gran escala" (Lang i Nelson, 2009), com són les megaregions.

El desenvolupament de les megaregions és causa i conseqüència de la densificació i l'acceleració de processos socioeconòmics, resultant en nivells creixents de complexitat i eficiència. Les megaregions estan formades per centres metropolitans i les seves àrees d'influència (Ross, 2009). Representen una nova unitat d'anàlisi de la xarxa de ciutats, normalment policèntrica, que emergeix de l'expansió d'àrees metropolitanes, que creixen més enllà unint-se amb altres metròpolis.

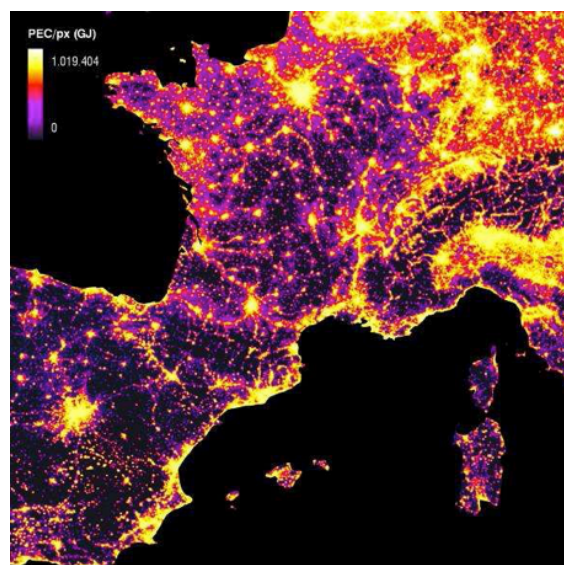
Un debat actual rellevant en relació a les megaregions es basa en la qüestió de si el policentrisme

hauria d'incorporar aspectes relacionals entre els centres que configuren el sistema urbà (Green, 2007). El policentrisme morfològic bàsicament tracta la dimensió i la distribució dels centres urbans en el territori i compara les distribucions més equilibrades (Meijers i Burger, 2010). Al seu torn, el policentrisme funcional considera les connexions entre els assentaments i estudia el conjunt de relacions multidireccionals (Goei *et al.*, 2010).

Combinar les característiques morfològiques amb les relacions funcionals en una mateixa aproximació condueix a una confrontació entre diferents dimensions del policentrisme (Hoyler *et al.*, 2008). S'ha demostrat que moltes regions tendeixen a ser més morfològica que funcionalment policèntriques, és a dir, amb diferents nodes però amb poca connectivitat entre ells. Aquesta diferència s'explica per la dimensió, la connectivitat externa i el grau d'autosuficiència (Burger i Meijers, 2012).

En aquest sentit, el terme policentrisme bàsicament es refereix a la pluralitat de centres urbans en un territori (Parr, 2004). No obstant, el policentrisme tendeix a estar estretament associat amb una distribució equilibrada en la importància d'aquests centres urbans en un o diversos nivells. El present article proposa una sèrie d'indicadors per a mesurar, des d'una aproximació estructural, l'efici-

Figura 1. Consum d'energia primària (GJ) calculat a partir de les dades proporcionades pel satèl·lit NOAA (2009), en el context europeu on es troba la megaregion Barcelona-Lió



Font: IERMB a partir de Badia i Manenti (2010).

ència i l'estabilitat de les xarxes de ciutats a escala megaregional en l'àmbit europeu (Marull *et al.*, 2015), prenent com a referent la megaregió Barcelona-Lió.

El desenvolupament de les xarxes de ciutats dins la matriu territorial no és estrany al procés dissipatiu (Filchakova *et al.*, 2007), el que resulta en una creixent complexitat inherent al propi metabolisme urbà (Wilson, 2009). El propòsit d'aquest article és demostrar que les megaregions emergeixen a través d'una major dissipació d'energia, però també per l'establiment de xarxes de ciutats connectades per sistemes de transport, esdevenint més eficients en l'activitat econòmica i de coneixement, el que suggereix la necessitat d'una nova escala geogràfica per a explorar la sostenibilitat (figura 1).

L'aparició de complexitat en el territori és inevitable, a causa de la dissipació d'energia en l'espai (Pulselli *et al.*, 2006). Quan una ciutat creix, les necessitats acostumen a augmentar més ràpidament que les disponibilitats, cosa que posa uns límits al creixement. Per tal de superar-los, cal desenvolupar sistemes de transport més ràpids i sistemes de processament més eficients. En el passat, un element important per al creixement de les grans ciutats va ser el desenvolupament dels ferrocarrils, que augmentaren l'eficiència del transport, i les màquines de vapor, que incrementaren la capacitat de crear ocupació. Actualment, el tren d'alta velocitat (TAV) té el potencial de ser un mode de transport eficient a escala megaregional (figura 2).

A tall d'exemple, el TAV és sovint citat com una solució a diversos problemes de transport, ja que pot contri-

buir a reduir la congestió en les carreteres i els aeroports, millorar la mobilitat i, fins i tot, aportar alguns beneficis ambientals. En relació amb aquest darrer aspecte, s'ha demostrat empíricament, pel cas de l'Estat espanyol, que les emissions de CO₂ dels TAV (per passatger) solen ser iguals o fins i tot menors que les dels trens convencionals que viatgen entre les mateixes estacions, però en el cas del TAV s'incrementa notablement la velocitat¹.

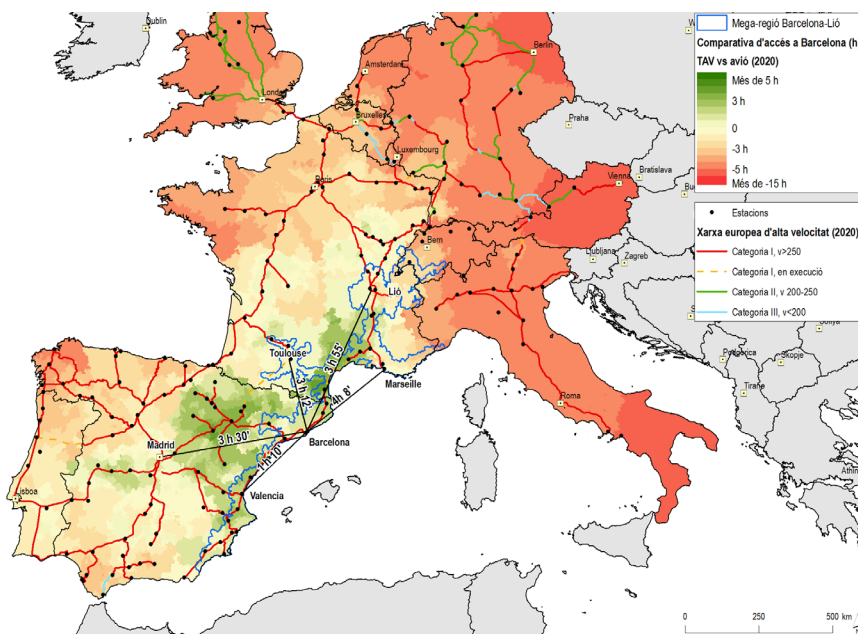
Així doncs, el TAV és més eficient energèticament que el transport amb avió i per carretera i, per tant, la seva implantació hauria de disminuir les emissions de CO₂ a la megaregió de Barcelona-Lió. D'altra banda, el temps de viatge entre les diferents destinacions s'escurça fins al punt que pot competir eficaçment amb l'avió a nivell de megaregió (figura 2). Ambdós indicadors donen lloc a un impacte potencial positiu d'aquest mode de transport megaregional en termes econòmics i ambientals².

Tot seguit s'estudien les dotze megaregions europees —incloent-hi la megaregió Barcelona-Lió— per aproximar l'evolució de les xarxes de ciutats i les metròpolis cap a sistemes urbans més complexes i eficients, tot analitzant la seva implicació en relació a la sostenibilitat.

2. Anàlisi de la xarxa de ciutats

Les dades de llums nocturnes (*Night Time Light*—NTL) que proporciona el sensor satel·litari *Defense Meteorological Satellite Program—Operational Linescan System* (DMSP-OLS) permeten analitzar, a escala global, l'evolució de xarxes de ciutats cap a estructures que ja superen l'escala metropolitana (Doll, 2008; Zhang i Seto, 2011), en sistemes que anomenem megaregions.

Figura 2. El tren d'alta velocitat com a mode de transport megaregional. Comparativa d'accés a Barcelona des d'Europa (TAV vs. avió). Previsió per a l'any 2020



Font: IERMB.

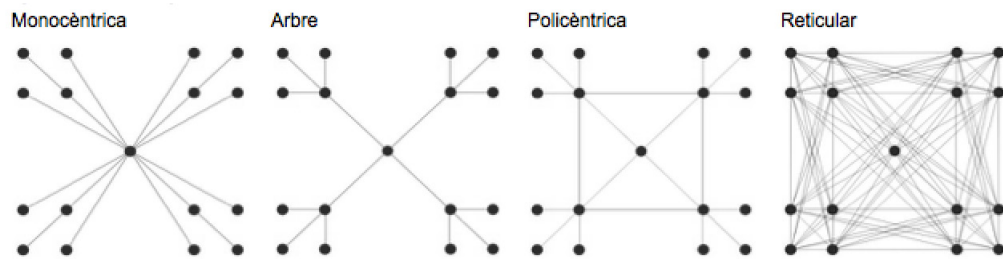
¹ Aquest fet s'explica per raons de tipus tècnic, de disseny del traçat i per les característiques del servei. Des de la implantació del corredor Barcelona-Madrid, el TAV ha anat guanyant terreny a l'avió fins arribar a quotes properes al 50%. Això ha provocat una disminució de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

² Per exemple, per anar de Barcelona a Madrid (627 km) un viatger que va amb TAV emet 13,8 kg de CO₂ per trajecte, mentre que si ho fa en avió emet 70,91 kg de CO₂. En el cas de França, en el trajecte París-Marsella (750 km) el TAV encara mostra major eficiència en les emissions de CO₂ per viatger. Amb avió es generen 97 kg de CO₂ mentre que amb TAV només 2 kg de CO₂ per trajecte (a causa de la major dependència de l'energia nuclear en el cas de França).

S'ha portat a terme una anàlisi per determinar com canvia l'estructura d'aquests sistemes de ciutats en el temps (figura 3), mitjançant indicadors de complexitat, eficiència, estabilitat i policentricitat (Bonacich,

1987; Latora i Marchiori, 2003; Cover i Thomas, 2006), utilitzant les principals xarxes viàries i ferroviàries de les megaregions europees (figura 4).

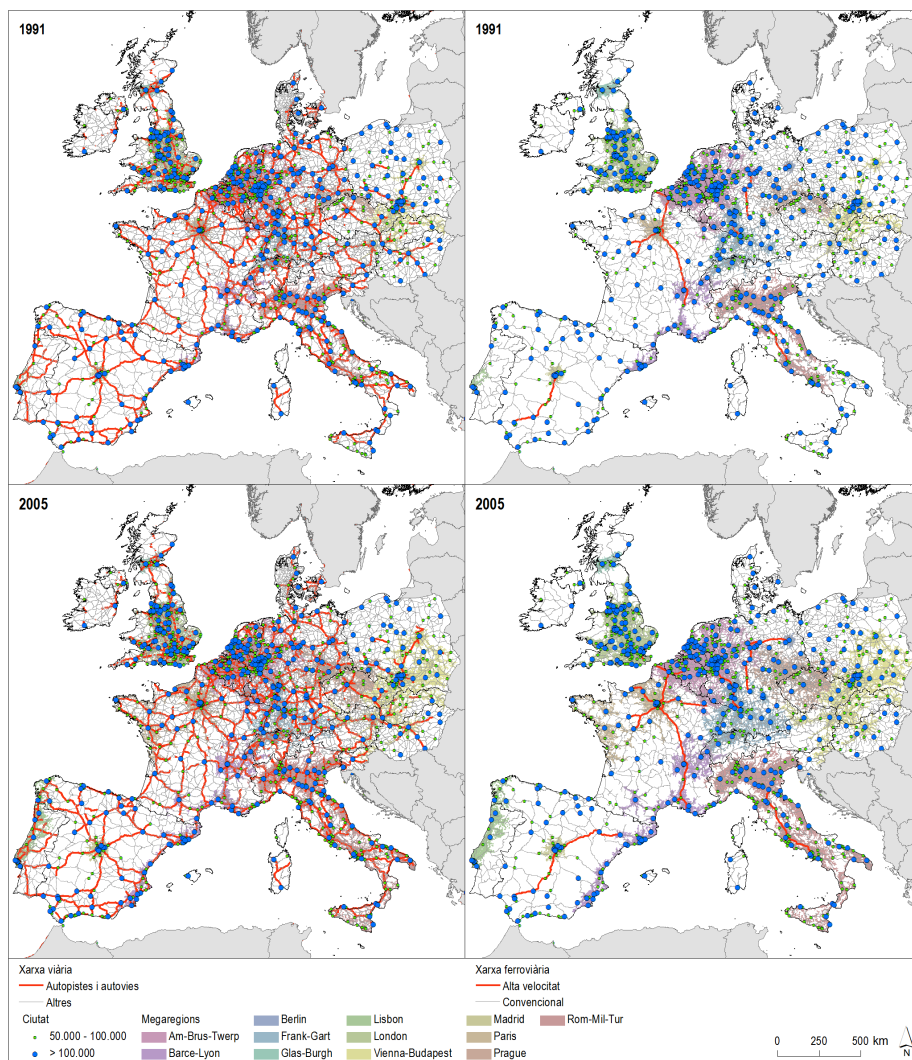
Figura 3. Tipologia d'estructura de xarxes considerada



Nota: 'Monocèntrica' és aquella on hi ha un centre, per anar d'un node a qualsevol altre és necessari passar pel centre. En la d' 'Arbre' també podem trobar pocs centres i alguns subcentres. En la 'Policèntrica' el centre ha perdut influència ja que els subcentres estan ben connectats (passen a ser considerats centres). Mentre que la 'Reticular' no segueix cap patró.

Font: IERMB.

Figura 4. Evolució de la xarxa viària i ferroviària dins les megaregions europees, 1991-2005³



Font: IERMB, elaborat a partir de Trans-tools⁴ i Eurostat⁵.

³ Delimitació de les megaregions els anys 1992-2007. Xarxes de transport dels anys 1991-2005.

⁴ <http://www.energy.jrc.ec.europa.eu/transtools/>.

⁵ <http://www.epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>.

Nombre de ciutats connectades

Els resultats mostren que, en la majoria de casos, les megaregions han augmentat el nombre de nodes (ciutats > 50.000 habitants) (taula 1), excepte 'Berlin', que en té exactament el mateix nombre, i 'Prague', que en perd un. El major nombre de nodes és $N_{\max}=203$, i correspon a 'Am-Brus-Twerp'. El cas de 'Berlin' és a causa del procés històric derivat de la segona guerra mundial, i el cas de 'Prague' s'explica per un decreixement de la població en els darrers anys (Kostelecký i Čermák, 2004).

Les megaregions europees han incrementat les seves xarxes de ciutats en el període d'anàlisi (1991-2005). Una xarxa és més eficient si connecta un major nombre de ciutats en el menor temps possible, per tant el tipus d'estructura de la xarxa de transport pren un paper rellevant.

Eficiència i estabilitat de la xarxa de transport

Per mesurar l'eficiència de la xarxa NE⁶ es considera tant el nombre de ciutats connectades com la qualitat de les vies de comunicació, en aquest cas expressada a partir de la velocitat mitjana a què es pot circular per la xarxa. Per tant, aquest indicador és una mesura de les connexions en xarxa entre els assentaments que caracteritza el policentrisme funcional.

Les megaregions amb un creixement més ràpid són 'Glas-Burgh', 'Madrid' i 'Lisbon'. Però encara que aquestes megaregions pràcticament han doblat la seva dimensió, l'eficiència de la xarxa no ha crescut de la mateixa manera (taula 2). En el cas de 'Paris', 'Barce-Lyon', 'Rom-Mil-Tur' i 'Am-Brus-Twerp' s'incrementa més la distància total sobre el temps total per travessar la xarxa (per exemple, millorant les infraestructures). També ha millorat la xarxa ferroviària a 'Frank-Gart'. En altres casos, el creixement de la xarxa i l'eficiència NE són força similars.

Taula 1. Nombre de nodes (ciutats > 50.000 habitants) connectats per les xarxes de carreteres o de ferrocarrils a les megaregions europees, 1991 i 2005

Megaregió	Xarxa viària			Xarxa ferroviària		
	1991	2005	Variació 91-05	1991	2005	Variació 91-05
Am-Brus-Twerp	186	203	17	186	186	0
Barce-Lyon	56	72	16	56	70	14
Berlin	3	3	0	3	3	0
Frank-Gart	62	63	1	62	63	1
Glas-Burgh	5	8	3	5	8	3
London	158	175	17	158	173	15
Lisbon	17	25	8	17	25	8
Madrid	16	24	8	16	23	7
Prague	37	36	-1	37	36	-1
Paris	46	62	16	46	62	16
Rom-Mil-Tur	116	137	21	116	137	21
Vienna-Budapest	89	92	3	89	92	3

Font: IERMB.

Taula 2. Eficiència NE i Estabilitat NE_{local} de la xarxa viària i ferroviària a les megaregions europees, 1991 i 2005

Megaregió	Xarxa viària				Xarxa ferroviària			
	NE		NE _{local}		NE		NE _{local}	
	1991	2005	1991	2005	1991	2005	1991	2005
Am-Brus-Twerp	0,804	0,880	0,142	0,157	0,461	0,515	0,117	0,134
Barce-Lyon	0,254	0,322	0,029	0,039	0,139	0,180	0,022	0,035
Berlin	0,010	0,010	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008
Frank-Gart	0,259	0,264	0,037	0,038	0,167	0,181	0,040	0,054
Glas-Burgh	0,020	0,034	0,010	0,026	0,012	0,019	0,010	0,023
London	0,649	0,719	0,109	0,118	0,384	0,431	0,101	0,114
Lisbon	0,065	0,100	0,014	0,028	0,041	0,061	0,011	0,024
Madrid	0,065	0,099	0,045	0,083	0,041	0,058	0,050	0,076
Prague	0,137	0,136	0,013	0,013	0,091	0,088	0,015	0,014
Paris	0,200	0,264	0,067	0,090	0,117	0,236	0,066	0,176
Rom-Mil-Tur	0,478	0,567	0,028	0,034	0,298	0,393	0,027	0,039
Vienna-Budapest	0,321	0,333	0,029	0,029	0,219	0,226	0,036	0,037

Font: IERMB.

⁶ NE és l'eficiència de la xarxa. N és el nombre de nodes. E_d i E_t són la inversa de la mitjana harmònica de la distància i el temps. N_{\max} i V_{\max} són el màxim nombre de nodes en una megaregió i la màxima velocitat, respectivament. $0 \leq NE \leq 1$.

$$NE = N \frac{E_t}{E_d} \frac{1}{V_{\max} N_{\max}}$$

L'estabilitat de la xarxa NE_{local}^7 indica la capacitat de la xarxa per reaccionar a fallides. Mesura l'eficiència de la subxarxa formada per una ciutat i les ciutats veïnes (a menys d'una hora) quan aquesta ciutat no hi és. Per tant, aquest indicador és una mesura de l'equilibri en la distribució de ciutats segons l'estructura en xarxa que caracteritza el policentrisme morfològic.

L'estabilitat de la xarxa tampoc està del tot relacionada amb el nombre de nodes. Podem veure (taula 2) que la xarxa viària de 'Paris' de 2005 està en la tercera posició en termes d'estabilitat, mentre és la setena en nombre de nodes (Taula 3.2.1). 'Madrid' té un comportament similar. En contrast, 'Rom-Mil-Tur' és una de les megaregions amb més nodes i, al mateix temps, la xarxa de carreteres ofereix menys estabilitat.

Els indicadors proposats per mesurar l'estructura de la xarxa de ciutats a escala megaregional estan correlacionats entre ells. Una xarxa estable incrementa la seva eficiència. A més, quan una xarxa complexa incorpora un alt grau de policentrisme es fa més eficient.

Complexitat de la xarxa de transport

Una xarxa de transport és més complexa quan més camins possibles hi ha per anar d'una ciutat a un altre de la xarxa. S'interpreta que el sistema amb major entropia és el més complex perquè això implica que costa pràcticament el mateix arribar a qualsevol node (Cover i Thomas, 2006). El policentrisme és referenciat a la pluralitat de ciutats en un territori. No obstant, el policentrisme tendeix a estar estretament associat amb una distribució equilibrada en la importància d'aquestes ciutats, aspecte que mesura la complexitat de la xarxa.

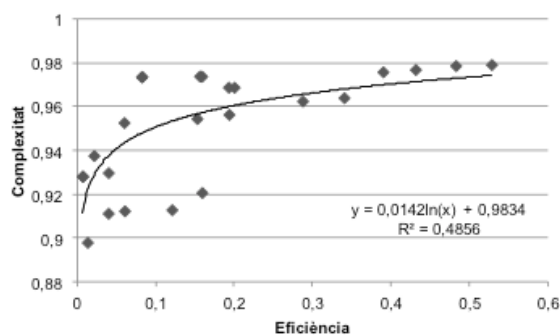
La complexitat (H), mesurada a partir de l'índex de Shannon (1948)⁸, no varia gaire en el període d'anàlisi (taula 3). En l'anàlisi hem tingut en compte la distància de les connexions com a mesura ponderada. No obstant, la complexitat s'incrementa de 1991 a 2005 en les xarxes viària i ferroviària, excepte pels casos de 'Prague' i 'Paris' a causa del seu creixement. En general els resultats són força alts, el que significa que aquestes xarxes són bastant denses.

Taula 3. Complexitat (H) de la xarxa viària i ferroviària a les megaregions europees, 1991 i 2005

Megaregió	Xarxa viària		Xarxa ferroviària	
	1991	2005	1991	2005
Am-Brus-Twerp	0,978	0,979	0,977	0,994
Barce-Lyon	0,954	0,956	0,953	0,954
Berlin	0,928	0,928	0,931	0,937
Frank-Gart	0,974	0,974	0,972	0,971
Glas-Burgh	0,898	0,937	0,893	0,940
London	0,976	0,977	0,974	0,975
Lisbon	0,911	0,912	0,905	0,904
Madrid	0,929	0,952	0,929	0,952
Prague	0,973	0,973	0,971	0,971
Paris	0,913	0,920	0,912	0,907
Rom-Mil-Tur	0,962	0,964	0,965	0,969
Vienna-Budapest	0,968	0,968	0,964	0,962

Font: IERMB.

Figura 5. Estudi comparatiu entre complexitat de la xarxa viària i la seva eficiència NE, 2005



Font: IERMB.

⁷ NE_{local} és l'eficiència local de la xarxa. NE és l'eficiència de la xarxa, N el nombre de nodes i G_i és el subgraf de nodes veïns. Per normalitzar l'estabilitat dividim per $V_{max} \cdot N_{max}$.

$$NE_{local} = \frac{1}{N} \sum NE(G_i).$$

⁸ H és la complexitat de la xarxa. On $P_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum w_{ik}}$, mentre que $w_i = \sum w_{ij}$ és el pes dels de les diverses connexions emeses per cada node i, llavors $W = \sum w_i$ és la suma dels pesos de totes les connexions. Podem normalitzar la complexitat dividint H per $\log(N-1)$. On N és el nombre de nodes i.

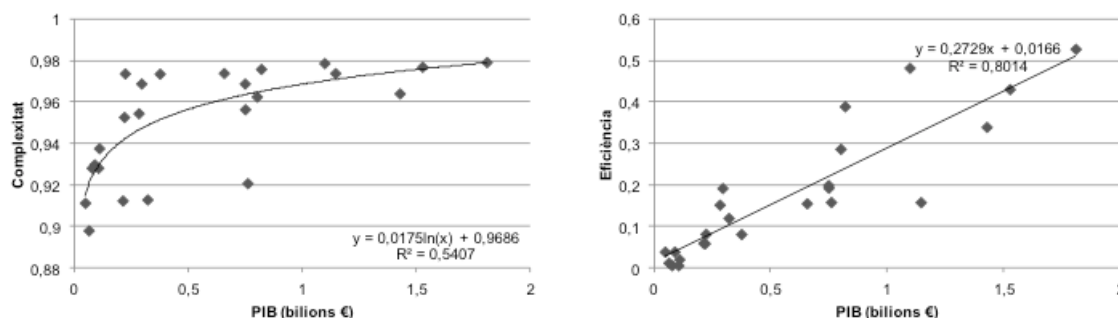
$$H = - \sum_i \mu P_{ij} \log P_{ij}.$$

Si es comparen els valors de complexitat i d'eficiència els resultats mostren una clara relació logarítmica (figura 5). És a dir, que en xarxes de ciutats denses com són les megaregions, un petit augment de complexitat significa una eficiència més elevada. Una complexitat més elevada de la xarxa incrementa l'eficiència, però hi ha un estancament en sistemes altament complexos,

on llavors podria ser més eficient augmentar la informació organitzada.

Més interessant encara és observar la relació entre la complexitat o l'eficiència de la xarxa de carreteres i l'activitat econòmica (PIB) a les megaregions europees (1991 i 2005), logarítmica en el primer cas i lineal amb el segon (figura 6).

Figura 6. Relació entre complexitat o eficiència de la xarxa viària i activitat econòmica (Producte Interior Brut) a les megaregions europees, 2005



Font: IERMB.

Estructura de la xarxa de ciutats

En aquest article s'ha considerat que una megaregió consisteix en una aglomeració policèntrica de ciutats i el seu entorn menys dens. En base als criteris definits, la major part de les megaregions europees s'han mostrat com xarxes compactes que prenen una estructura policèntrica. L'estructura policèntrica és portadora de més informació organitzada.

Els principals canvis estructurals són el pas d'estructura d'arbre a policèntrica (taules 4 i 5) segons la distribució de les ciutats en centres i subcentres de la xarxa (figura 3). Algunes ciutats assumeixen funció de centre, al millorar les infraestructures que les connecten amb l'entorn. Aquest és el cas de la xarxa ferroviària de 'Glas-Burgh'. Mentre que a 'Lisbon' la xarxa es fa més monocèntrica, degut al seu creixement. Les altres megaregions mantenen el tipus d'estructura, amb petites variacions respecte la distribució de centralitat.

Taula 4. Tipologia de la xarxa ferroviària a les megaregions europees, 1991 i 2005

Megaregió	Xarxa ferroviària							
	1991				2005			
	Altres ciutats	Sub-centres	Centres	Tipologia	Altres ciutats	Sub-centres	Centres	Tipologia
Am-Brus-Twerp	0,597	0,075	0,328	policèntrica	0,606	0,074	0,320	policèntrica
Barce-Lyon	0,696	0,000	0,304	policèntrica	0,686	0,029	0,286	policèntrica
Berlin	0,333	0,000	0,667	reticular	0,333	0,000	0,667	reticular
Frank-Gart	0,500	0,226	0,274	policèntrica	0,476	0,127	0,397	policèntrica
Glas-Burgh	0,400	0,400	0,200	arbre	0,125	0,375	0,500	policèntrica
London	0,519	0,212	0,269	policèntrica	0,642	0,139	0,220	policèntrica
Lisbon	0,588	0,176	0,235	policèntrica	0,520	0,320	0,160	monocèntrica
Madrid	0,063	0,063	0,875	reticular	0,043	0,000	0,957	reticular
Paris	0,391	0,565	0,043	monocèntrica	0,322	0,354	0,322	policèntrica
Prague	0,675	0,108	0,216	monocèntrica	0,667	0,111	0,222	monocèntrica
Rom-Mil-Tur	0,828	0,034	0,138	monocèntrica	0,759	0,080	0,161	monocèntrica
Vienna-Budapest	0,663	0,022	0,315	policèntrica	0,663	0,011	0,326	policèntrica

Font: IERMB.

Taula 5. Tipologia de la xarxa viària a les megaregions europees, 1991 i 2005

Megaregió	Xarxa viària							
	1991				2005			
	Altres ciutats	Sub-centres	Centres	Tipologia	Altres ciutats	Sub-centres	Centres	Tipologia
Am-Brus-Twerp	0,543	0,096	0,360	policèntrica	0,536	0,113	0,349	policèntrica
Barce-Lyon	0,696	0,035	0,267	policèntrica	0,694	0,013	0,291	policèntrica
Berlin	0,333	0,000	0,666	reticular	0,333	0,000	0,666	reticular
Frank-Gart	0,403	0,241	0,354	policèntrica	0,412	0,126	0,460	policèntrica
Glas-Burgh	0,600	0,200	0,200	arbre	0,250	0,375	0,375	policèntrica
London	0,449	0,246	0,303	policèntrica	0,188	0,251	0,560	policèntrica
Lisbon	0,470	0,176	0,352	policèntrica	0,520	0,280	0,200	policèntrica
Madrid	0,125	0,000	0,875	reticular	0,041	0,000	0,958	reticular
Paris	0,391	0,586	0,021	monocèntrica	0,387	0,500	0,112	monocèntrica
Prague	0,540	0,243	0,216	policèntrica	0,638	0,138	0,222	policèntrica
Rom-Mil-Tur	0,793	0,068	0,137	monocèntrica	0,824	0,036	0,138	monocèntrica
Vienna-Budapest	0,434	0,108	0,456	policèntrica	0,663	0,065	0,271	policèntrica

Font: IERMB.

Taula 6. Grau de policentricitat (P) a les megaregions europees, 1991 i 2005

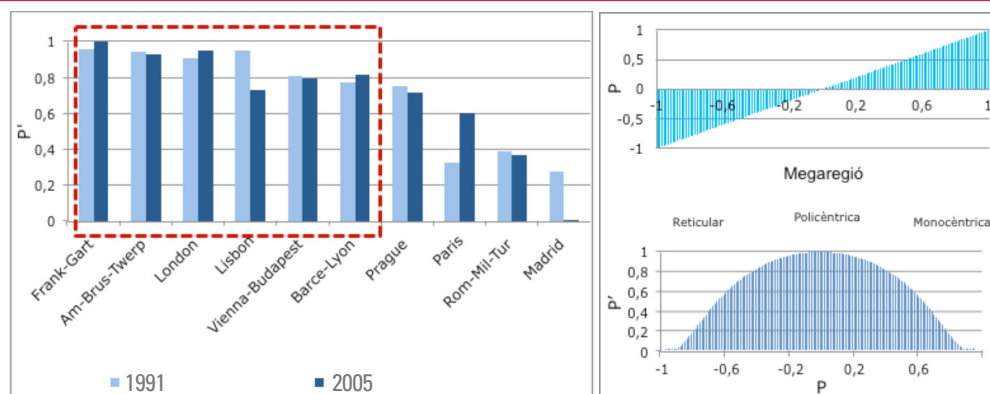
Megaregió	Grau de policentricitat			
	Xarxa viària		Xarxa ferroviària	
	1991	2005	1991	2005
Am-Brus-Twerp	0,315	0,331	0,242	0,256
Barce-Lyon	0,393	0,417	0,450	0,411
Berlin	-0,333	-0,333	-0,333	-0,333
Frank-Gart	0,364	0,157	0,196	0,030
Glas-Burgh	0,444	-0,146	0,522	0,104
London	0,379	0,507	0,296	-0,218
Lisbon	0,461	0,555	0,225	0,491
Madrid	-0,774	-0,913	-0,750	-0,917
Prague	0,525	0,512	0,473	0,501
Paris	0,693	0,217	0,728	0,579
Rom-Mil-Tur	0,711	0,648	0,697	0,708
Vienna-Budapest	0,362	0,344	0,416	0,431

Font: IERMB.

Finalment, s'ha calculat el grau de policentricitat (P) (Marull *et al.*, 2015) per al període d'anàlisi (taula 6). Els resultats mostren una tendència a augmentar la policentricitat de la xarxa de transport (viari i ferroviari). La megaregió amb un grau de policentrisme més elevat és 'Frank-Gart'.

La megaregió Barcelona-Lió és la sisena en policentrisme (P') (figura 7)⁹. Quan una xarxa urbana es fa prou complexa li és més eficient invertir en informació (coneixement) que en energia per augmentar la seva activitat econòmica.

Figura 7. Policentrisme (P') en la xarxa viària de les megaregions europees, 1991 i 2005



Font: IERMB.

⁹ Vegeu en la figura 7 la conversió de policentricitat (P) (els valors va de -1 a +1) en policentrisme (P') (els valors van de 0 a 1).

3. Conclusions: són sostenibles les xarxes urbanes policèntriques?

Les megaregions han emergit com a conseqüència de la densificació i l'acceleració dels processos socioeconòmics. Aquestes xarxes de ciutats concentren una gran proporció de població, producció, innovació i benestar social a nivell mundial, encara que també són grans consumidores de recursos naturals. La nostra pregunta de recerca se centra en analitzar si les megaregions evolucionen cap a un model (in)sostenible. La pregunta resulta transcendental i té implicacions directes en el planejament urbanístic i les polítiques territorials proactives.

En aquest article s'han estudiat les megaregions des del punt de vista de la teoria de xarxes i la 'termo-economia'. S'ha proposat un isomorfisme on les megaregions es defineixen com a 'sistemes complexos oberts' formats per xarxes de ciutats que intercanvien energia interna i externa. Les propietats termodinàmiques dels sistemes complexos oberts suggereixen una seqüència on l'estructura interna de les megaregions hauria d'evolucionar cap a una xarxa més connectada, augmentant la seva complexitat però també incrementant la producció d'informació.

Tanmateix, un sistema urbà no pot absorbir amb la mateixa estructura una quantitat il·limitada d'energia, de forma que reacciona modificant la seva organització funcional amb la finalitat de poder generar i controlar una major quantitat d'informació, el que al seu torn incrementa el seu grau de policentrisme. Aquest procés permet una reducció d'entropia, i un increment en l'eficiència i estabilitat del sistema, el que potencialment implica una major sostenibilitat.

Amb el propòsit d'estudiar la sostenibilitat de les megaregions, es proposen una sèrie d'indicadors fonamentats en la teoria de xarxes i la termo-economia, mesurant les propietats bàsiques de la següent seqüència: complexitat, policentricitat, eficiència i sostenibilitat. Els indicadors s'han aplicat a l'evolució de les dotze megaregions europees en el període 1991-2005. Els resultats mostren que les megaregions incrementen els seus nivells de complexitat, augmentant el grau de policentricitat, i incrementant els nivells d'eficiència i estabilitat. La conclusió és que tant la seqüència teòrica com els càlculs empírics que l'avalen, suggereixen que les megaregions evolucionen cap a una estructura urbana més sostenible.

En conseqüència, els indicadors sobre xarxes de ciutats proposats en aquest capítol, faciliten el diàleg entre l'anàlisi econòmic-ecològic dels balanços sociometabòlics i l'estudi dels sistemes urbans, a una nova escala espacial configurada per les megaregions, el que al seu torn ha de permetre explorar el desenvolupament urbà sostenible de la megaregion Barcelona-Lió.

BIBLIOGRAFIA

BADIA, E.; MANENTI, A. (2010) "Megaregiones: desde la visión económica a la perspectiva ambiental", J. Marull (dir.), Conama 10, Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid.

BONACICH, P. (1987) "Power and centrality: A Family of Measures". *American Journal of Sociology* 92 (5), 1170-1182.

BURGER, M.; MEIJERS, E. (2012) "Form Follows Function? Linking Morphological and Functional Polycentricity". *Urban Studies* 49 (5), 1127 – 1149.

COVER, T. M.; THOMAS, J. A. (2006) "Elements of Information Theory". New York: John Wiley and Sons.

DOLL, C. (2008) "Thematic Guide to Night-time Light Remote Sensing and its Applications". Centre for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University, New York.

FILCHAKOVA, N.; ROBINSON, D.; SCATERZZINI, J.-L. (2007) "Quo vadis thermodynamics and the city: a critical review of applications of thermodynamic methods to urban Systems". *International Journal of Ecodynamics* 2, 222-23.

GREEN, N. (2007) "Functional Polycentricity: A Formal Definition in Terms of Social Network Analysis". *Urban Studies* 44 (11), 2077-2103.

GOEI, B. DE; BURGER, M.; OORT, F. VAN; KITSON, M. (2010) "Functional polycentricity and urban network development in the greater south east UK: evidence from commuting patterns". *Regional Studies* 44. 1149-1170.

HOYLER, M.; KLOOSTERMAN, R. C.; SOKOL, M. (2008) "Polycentric puzzles: emerging mega-city regions seen through the lens of advanced producer services". *Regional Studies* 42. 1055-1064.

KOSTELECKÝ, T.; ČERMÁK, D. (2004) "Metropolitan Areas in the Czech Republic – Definitions, Basic Characteristics, Patterns of Suburbanisation and Their Impact on Political Behaviour". Prague: Sociologický ústav Akademie věd České republiky.

LANG, R.E.; NELSON, A.C. (2009) "Megapolitan America: Defining and Applying a New Geography", in Ross (Ed.) (2009): 'Megaregions. Planning for the Global Competitiveness', Island Press, Washington, USA, pp. 107-126.

LATORA, V.; MARCHIORI, M. (2003) Economic small-world behaviour in weighted networks. *The European Physical Journal B*, 249-263.

MARULL, J.; FONT, C.; BOIX, R. (2015) "Modeling Urban Networks at Megaregional Scale: Are increasingly complex urban systems sustainable?". *Land Use Policy* 43, 15-227.

MEIJERS, E.; BURGER, M. (2010) "Spatial structure and productivity in US metropolitan areas". *Environment and Planning* 42. 1383-1402.

PARR, J. B. (2004) "The polycentric urban region: a closer inspection". *Regional Studies* 38, 231-240.

PULSELLI, R.M.; CIAMPALINI, F.; GALLI, A.; PULSELLI, F.M. (2006) "Non-equilibrium thermodynamics and the city: a new approach to urban studies". *Annali di Chimica* 96, 543-552.

ROSS, C.L. (2009) "Megaregions: Planning for Global Competitiveness". Island Press, Washington.

SHANNON, C. E. (1948) "A Mathematical Theory of Communication". *The Bell System Technical Journal* 27. 379-423, 623-656.

TRULLÉN, J.; BOIX, R.; GALLETTO, V. (2013) "An insight on the unit of analysis in urban research". In: Kresl, P.K., Sobrino, J. (Eds.), *Handbook of Research Methods and Applications in Urban Economies*. Edward Elgar, Northampton, MA, pp.235-264, ISBN: 9780857934611.

WILSON, A. (2009) "The thermodynamics of the city. Evolution and complexity science in urban modeling". In A. Reggiani and P. Nijkamp (Eds.). *Spatial Networks and Complexity*, Springer, Berlin.

ZHANG, Q.; SETO, K. C. (2011) "Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data". *Remote Sensing of Environment* 115, 2320-2329.

LAS REDES DE CIUDADES: LA ESTRUCTURA DE LAS MEGARREGIONES EN EUROPA

Joan
Carne
Rafael Boix

Marull
Font

1. Las redes urbanas policéntricas

En los últimos dos siglos los límites de las ciudades se han estado redefiniendo constantemente. La fuerza motriz principal de los cambios de escala experimentados por las ciudades ha sido el efecto liberador de lo que se ha denominado “economías externas espacialmente móviles” (Trullén, *et al.* 2013), que no están limitadas a una simple localidad debido a fuerzas de aglomeración, sino que pueden crear complejas “estructuras urbanas transmetropolitanas a gran escala” (Lang y Nelson, 2009), como son las megarregiones.

El desarrollo de las megarregiones es causa y consecuencia de la densificación y la aceleración de procesos socioeconómicos, que resultan en niveles crecientes de complejidad y eficiencia. Las megarregiones están formadas por centros metropolitanos y sus áreas de influencia (Ross, 2009). Representan una nueva unidad de análisis de la red de ciudades, normalmente policéntrica, que emerge de la expansión de áreas metropolitanas, que crecen más allá uniéndose con otras metrópolis.

Un debate actual relevante en relación con las megarregiones se basa en la cuestión de si el policentrismo debería incorporar aspectos relacionales entre los centros que configuran el sistema urbano (Green, 2007). El policentrismo morfológico básicamente trata la dimensión y la distribución de los centros urbanos en el territorio y compara las distribuciones más equilibradas (Meijers y Burger, 2010). A su vez, el policentrismo funcional considera las conexiones entre los asentamientos y estudia el conjunto de relaciones multidireccionales (Goei, *et al.* 2010).

Combinar las características morfológicas con las relaciones funcionales en una misma aproximación conduce a una confrontación entre distintas dimensiones del policentrismo (Hoyler, *et al.* 2008). Se ha demostrado que muchas regiones tienden a ser más morfológicamente que funcionalmente

policéntricas, es decir, con distintos nodos pero con poca conectividad entre ellos. Esta diferencia se explica por la dimensión, la conectividad externa y el grado de autosuficiencia (Burger y Meijers, 2012).

En este sentido, el término policentrismo básicamente se refiere a la pluralidad de centros urbanos en un territorio (Parr, 2004). No obstante, el policentrismo tiende a estar estrechamente asociado con una distribución equilibrada de la importancia de estos centros urbanos en uno o diversos niveles. El presente artículo propone una serie de indicadores para medir, desde una aproximación estructural, la eficiencia y la estabilidad de las redes de ciudades a escala megarregional en el ámbito europeo (Marull, *et al.* 2015), tomando como referente la megarregión Barcelona-Lyon.

El desarrollo de las redes de ciudades dentro de la matriz territorial no es ajeno al proceso disipativo (Filchakova, *et al.* 2007), lo que resulta en una creciente complejidad inherente al propio metabolismo urbano (Wilson, 2009). El propósito de este artículo es demostrar que las megarregiones emergen a través de una mayor disipación de energía, pero también por el establecimiento de redes de ciudades conectadas por sistemas de transporte, que se tornan más eficientes en la actividad económica y de conocimiento, lo que sugiere la necesidad de una nueva escala geográfica para explorar la sostenibilidad (figura 1).

La aparición de complejidad en el territorio es inevitable, debido a la disipación de energía en el espacio (Pulselli, *et al.* 2006). Cuando una ciudad crece, las necesidades suelen aumentar más rápidamente que las disponibilidades, lo que pone unos límites al crecimiento. Con el fin de superarlos, es preciso desarrollar sistemas de transporte más rápidos y sistemas de procesamiento más eficientes. En el pasado, un elemento importante para el crecimiento de las grandes ciudades fue el desarrollo de los ferrocarriles, que aumentaron la eficiencia del transporte, y las máquinas de vapor, que incrementaron la capacidad de crear empleo. Actualmente, el tren de alta velocidad (TAV) tiene el potencial de ser un modo de transporte eficiente a escala megarregional (figura 2).

A modo de ejemplo, el TAV es a menudo citado como una solución a diversos problemas de transporte, ya que puede contribuir a reducir la congestión en las carreteras y los aeropuertos, mejorar la movilidad e, incluso, aportar algunos beneficios ambientales. En relación con este último aspecto, se ha demostrado empíricamente, para el caso del Estado español, que las emisiones de CO₂ de los TAV (por pasajero) suelen ser iguales o incluso menores que las de los trenes convencionales que viajan entre las mismas estaciones, pero en el caso del TAV se incrementa notablemente la velocidad.

Así pues, el TAV es más eficiente energéticamente que el transporte en avión y por carretera y, por lo tanto, su implantación debería disminuir las emisiones de CO₂ en la megarregión de Barcelona-Lyon. Por otra parte, el tiempo de viaje entre los distintos destinos se acorta hasta el punto de que puede competir eficazmente con el avión a nivel de megarregión (figura 2). Ambos indicadores dan lugar a un impacto potencial positivo de este modo de transporte megarregional en términos económicos y ambientales.

Acto seguido se estudian las doce megarregiones europeas —incluyendo la megarregión Barcelona-Lyon para aproximar la evolución de las redes de ciudades y las metrópolis hacia sistemas urbanos más

complejos y eficientes, analizando su implicación en relación con la sostenibilidad.

2. Análisis de la red de ciudades

Los datos de luces nocturnas (*night time light*, NTL) que proporciona el sensor satelital Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System (DMSP-OLS) permiten analizar, a escala global, la evolución de redes de ciudades hacia estructuras que ya superan la escala metropolitana (Doll, 2008; Zhang y Seto, 2011), en sistemas que denominamos megarregiones.

Se ha realizado un análisis para determinar cómo cambia la estructura de estos sistemas de ciudades en el tiempo (figura 3), mediante indicadores de complejidad, eficiencia, estabilidad y policentricidad (Bonacich, 1987; Latora y Marchiori, 2003; Cover y Thomas, 2006), utilizando las principales redes viales y ferroviarias de las megarregiones europeas (figura 4).

Número de ciudades conectadas

Los resultados muestran que, en la mayoría de casos, las megarregiones han aumentado el número de nodos (ciudades >50.000 habitantes) (tabla 1), excepto ‘Berlin’, que tiene exactamente el mismo número, y ‘Prague’, que pierde uno. El mayor número de nodos es $N_{max}=203$, y corresponde a ‘Am-Brus-Twerp’. El caso de ‘Berlin’ es debido al proceso histórico derivado de la segunda Guerra Mundial, y el caso de ‘Prague’ se explica por un decrecimiento de la población en los últimos años (Kostecký y Čermák, 2004).

Las megarregiones europeas han incrementado sus redes de ciudades en el periodo de análisis (1991-2005). Una red es más eficiente si conecta un mayor número de ciudades en el menor tiempo posible, por lo tanto el tipo de estructura de la red de transporte adquiere un papel relevante.

Eficiencia y estabilidad de la red de transporte

Para medir la eficiencia de la red se considera tanto el número de ciudades conectadas como la calidad de las vías de comunicación, en este caso expresada a partir de la velocidad media a la que se puede circular por la red. Por lo tanto, este indicador es una medida de las conexiones en red entre los asentamientos que caracterizan el policentrismo funcional.

Las megarregiones con un crecimiento más rápido son ‘Glas-Burgh’, ‘Madrid’ y ‘Lisbon’. Pero aunque estas megarregiones prácticamente han doblado su dimensión, la eficiencia de la red no ha crecido de la misma forma (tabla 2). En el caso de ‘Paris’, ‘Barce-Lyon’, ‘Rom-Mil-Tur’ y ‘Am-Brus-Twerp’ se incrementa más la distancia total sobre el tiempo total para atravesar la red (por ejemplo, mejorando las infraestructuras). También ha mejorado la red ferroviaria en ‘Frank-Gart’. En otros casos, el crecimiento de la red y la eficiencia (NE) son bastante similares.

La estabilidad de la red NE_{local} indica la capacidad de la red para reaccionar ante fallos. Mide la eficiencia de la subred formada por una ciudad y las ciudades vecinas (a menos de una hora) cuando esta ciudad no está. Por lo tanto, este indicador es una medida del equilibrio en la distribución de ciudades según la estructura en red que caracteriza el policentrismo morfológico.

La estabilidad de la red tampoco está del todo relacionada con el número de nodos. Podemos ver (tabla 2) que la red viral de

'Paris' de 2005 está en la tercera posición en términos de estabilidad, mientras que es la séptima en número de nodos (tabla 3.2.1). 'Madrid' tiene un comportamiento similar. En contraste, 'Rom-Mil-Tur' es una de las megarregiones con más nodos y, al mismo tiempo, su red de carreteras ofrece menos estabilidad.

Los indicadores propuestos para medir la estructura de la red de ciudades a escala megarregional están correlacionados entre ellos. Una red estable incrementa su eficiencia. Además, cuando una red compleja incorpora un alto grado de policentrismo se vuelve más eficiente.

Complejidad de la red de transporte

Una red de transporte es más compleja cuantos más caminos posibles existen para ir de una ciudad a otra de la red. Se interpreta que el sistema con mayor entropía es el más complejo porque ello implica que cuesta prácticamente lo mismo llegar a cualquier nodo (Cover y Thomas, 2006). El policentrismo se refiere a la pluralidad de ciudades en un territorio. No obstante, el policentrismo tiende a estar estrechamente asociado con una distribución equilibrada en la importancia de estas ciudades, aspecto que mide la complejidad de la red.

La complejidad (H), medida a partir del índice de Shannon (1948), no varía mucho en el periodo de análisis (tabla 3). En el análisis hemos tenido en cuenta la distancia de las conexiones como medida ponderada. No obstante, la complejidad se incrementa de 1991 a 2005 en las redes vial y ferroviaria, excepto para los casos de 'Prague' y 'Paris' a causa de su crecimiento. En general los resultados son bastante altos, lo que significa que estas redes son considerablemente densas.

Comparando los valores de complejidad y eficiencia, los resultados muestran una clara relación logarítmica (figura 5). Es decir, que en redes de ciudades densas como son las megarregiones, un pequeño aumento de complejidad significa una eficiencia más elevada. Una complejidad más elevada de la red incrementa la eficiencia, pero hay un estancamiento en sistemas altamente complejos, donde entonces podría ser más eficiente aumentar la información organizada.

Más interesante todavía es observar la relación entre la complejidad o la eficiencia de la red de carreteras y la actividad económica (PIB) en las megarregiones europeas (1991 y 2005), logarítmica en el primer caso y lineal con el segundo (figura 6).

Estructura de la red de ciudades

En este artículo se ha considerado que una megarregión consiste en una aglomeración policéntrica de ciudades y su entorno menos denso. En base a los criterios definidos, la mayor parte de las megarregiones europeas se han mostrado como redes compactas que mayormente toman una estructura policéntrica. La estructura policéntrica es portadora de más información organizada.

Los principales cambios estructurales son el paso de estructura de árbol a policéntrica (tablas 4 y 5) según la distribución de las ciudades en centros y subcentros de la red (figura 3). Algunas ciudades asumen función de centro, al mejorar las infraestructuras que las conectan con el entorno. Este es el caso de la red ferroviaria de 'Glas-Burgh'. Mientras que en 'Lisbon' la red se torna más monocéntrica, debido a su crecimiento. Las otras megarregiones mantienen el tipo de estructura, con pequeñas variaciones respecto a la distribución de centralidad.

Finalmente, se ha calculado el grado de policentricidad (P) (Marull, *et al.* 2015) para el periodo de análisis (tabla 6). Los resultados muestran una tendencia a aumentar la policentricidad de la red de transporte (vial y ferroviaria). La megarregión con un grado de policentrismo más elevado es 'Frank-Gart'.

La megarregión Barcelona-Lyon es la sexta en policentrismo (P) (figura 7). Cuando una red urbana se hace lo bastante compleja le es más eficiente invertir en información (conocimiento) que en energía para aumentar su actividad económica.

3. Conclusiones. ¿Son sostenibles las redes urbanas policéntricas?

Las megarregiones han emergido como consecuencia de la densificación y la aceleración de los procesos socioeconómicos. Estas redes de ciudades concentran una gran proporción de población, producción, innovación y bienestar social a nivel mundial, aunque también son mayores consumidoras de recursos naturales. Nuestra pregunta de investigación se centra en analizar si las megarregiones evolucionan hacia un modelo (in)sostenible. La pregunta resulta trascendental y tiene implicaciones directas en el planeamiento urbanístico y las políticas territoriales proactivas.

En este artículo se han estudiado las megarregiones desde el punto de vista de la teoría de redes y la 'termoeconomía'. Se ha propuesto un isomorfismo donde las megarregiones se definen como 'sistemas complejos abiertos' formados por redes de ciudades que intercambian energía interna y externa. Las propiedades termodinámicas de los sistemas complejos abiertos sugieren una secuencia donde la estructura interna de las megarregiones debería evolucionar hacia una red más conectada, aumentando su complejidad pero también incrementando la producción de información.

Sin embargo, un sistema urbano no puede absorber con la misma estructura una cantidad ilimitada de energía, de forma que reacciona modificando su organización funcional con la finalidad de poder generar y controlar una mayor cantidad de información, lo que a su vez incrementa su grado de policentrismo. Este proceso permite una reducción de la entropía, y un incremento en la eficiencia y estabilidad del sistema, lo que potencialmente implica una mayor sostenibilidad.

Con el propósito de estudiar la sostenibilidad de las megarregiones, se proponen una serie de indicadores fundamentados en la teoría de redes y la termoeconomía, midiendo las propiedades básicas de la siguiente secuencia: complejidad, policentricidad, eficiencia y sostenibilidad. Los indicadores se han aplicado a la evolución de las doce megarregiones europeas en el periodo 1991-2005. Los resultados muestran que las megarregiones incrementan sus niveles de complejidad, aumentando el grado de policentricidad, e incrementando los niveles de eficiencia y estabilidad. La conclusión es que tanto la secuencia teórica como los cálculos empíricos que la avalan, sugieren que las megarregiones evolucionan hacia una estructura urbana más sostenible.

En consecuencia, los indicadores sobre redes de ciudades propuestos en este capítulo, facilitan el diálogo entre el análisis económico-ecológico de los balances sociometabólicos y el estudio de los sistemas urbanos, en una nueva escala espacial configurada por las megarregiones, lo que a su vez tiene que permitir explorar el desarrollo urbano sostenible de la megarregión Barcelona-Lyon.