

Multiple Centrality Assessment. Centralità e ordine complesso nell'analisi spaziale e nel progetto urbano

Sergio Porta*, Vito Latora**

1. Introduzione

«Non c'è spesso così tanta perfezione nei lavori composti di molte parti e realizzati dalla mano di diversi maestri quanto in quelli sulle quali ha lavorato un solo individuo. [...] Così quelle vecchie città che, avendo cominciato come villaggi, sono diventate col tempo grandi centri urbani, sono in generale così mal composte, se confrontate con quei luoghi regolari tracciati da un ingegnere su un piano seguendo la sua fantasia, che, anche se considerando i loro edifici separatamente uno spesso trova in essi altrettanta arte, se non di più, che nelle altre, nondimeno guardando come sono disposti, uno grande qui, uno piccolo là, e quanto essi rendono le strade storte e disuguali, uno direbbe che è il caso, piuttosto che la volontà di un uomo sicuro che usa la ragione, che li ha messi in tal modo» (Descartes, 1994, p. 27).

All'alba della modernità Descartes stabilì fermamente che la geometria Euclidea era il solo ordine riconoscibile dagli occhi dell'uomo razionale nel momento in cui si trattava di configurazioni spaziali come giardini, paesaggi, strade e città. Circa tre secoli dopo Le Corbusier reagì brutalmente contro il richiamo di Camillo Sitte al valore estetico-sociale dei tessuti misti di matrice medioevale, con la ben nota invettiva: «*La strada curva è il percorso degli asini, la strada dritta il percorso degli uomini*», (Le Corbusier, 1994 c.1925). Solo gli asini, proseguiva il Maestro, potevano aver disegnato le curve strade d'Europa, con tutta quella confusione di stradine strette e quell'orribile e caotico *puzzle* di incroci e piazzette. Ancora ai nostri giorni il potere della geometria Euclidea è immensamente influente per architetti e *urban designers*, quasi un assioma quando si tratta di progettare strade e città. Non molto diversamente dai buoni vecchi tempi dell'*Urban Renewal*, la politica di estensiva demolizione urbana dei 'ghetti' tardo-ottocenteschi per favorire ricostruzioni improntate all'igienismo razionalista negli anni cinquanta, '60 e '70 del Novecento, ancora oggi i tessuti urbani vecchi sono sottostimati nei loro valori fondamentali. Certo, essi possono essere considerati pittoreschi e resi oggetto, specie se ospitano elementi storico-monumentali, di una sorta di rispettosa, distante conservazione, ma la loro struttura non è compresa e apprezzata fino in fondo per il potenziale che offre alla città dei figli, alla città sostenibile del futuro.

Contro questa stigma modernista si sono sollevate, a partire dagli anni '60, argomentazioni portate in nome della 'magia'

* Human Space Lab - Politecnico di Milano

** Dipartimento di Fisica, Università di Catania, Infn Sezione di Catania.

delle città vecchie (Jacobs, 1993). Il richiamo non riguardava tanto l'estetica, quanto la dimensione della vivibilità. Nella città moderna, questo l'argomento, è difficile vivere. Il successo sociale di un tessuto urbano, il quale è concepito come il prodotto imprevedibile di fiducia, sicurezza, vitalità economica e varietà, emerge dalla complessa e non pianificata interazione di innumerevoli percorsi e esperienze differenti in un ambiente adatto e adattabile. Warren Weaver, citato in Jane Jacobs (Jacobs, 1961), scrisse che la scienza non è una soltanto (Weaver, 1948). Per la verità, ce ne sono molte. E per di più, la scienza evolve nel tempo. Così, problemi semplici del mondo naturale sono stati indagati da aree della scienza diverse da quelle che indagarono problemi complessi disorganizzati e ancora diverse da quelle che indagarono i problemi complessi organizzati, in particolare quelli che trattano i sistemi viventi auto-organizzati. Il punto con i pianificatori 'ortodossi' - continuava Jane Jacobs - è che usano gli strumenti giusti per il problema sbagliato: le città, sono fenomeni complessi organizzati di tipo organico e devono essere indagati con le scienze della complessità. «Sotto l'apparente disordine della città vecchia, ovunque la città vecchia funziona, c'è un ordine meraviglioso che mantiene la sicurezza delle strade e la libertà della città. È un ordine complesso» (Jacobs, 1961, p. 50): solo attraverso le 'nuove scienze' della complessità l'ordine meraviglioso della città vecchia può essere colto e trattato, un ordine che, a differenza della geometria Euclidea, non è visibile alla prima occhiata, non è imposto da una agenzia centrale, ma all'opposto è il risultato del contributo di piccolissimo taglio e graduale nel tempo di innumerevoli soggetti agenti nell'ambiente sociale, fisico e culturale, e in costante reciproco rapporto, ognuno impegnato nella sua individuale traiettoria. Questo ordine, concludeva Jane Jacobs, è un ordine organico, è l'ordine della vita, il solo quindi che possa contribuire a dare vita ai quartieri e alle città: è questo ordine che ci guida alla città sostenibile del futuro (Newman and Kenworthy, 1999).

Ognuno sa, nella 'network community', un'area della ricerca scientifica che indaga i sistemi complessi attraverso l'uso della metafora della 'rete' (network) e della matematica dei grafi, che notevoli risultati sono stati raggiunti da quando fu pubblicato il lavoro seminale di Watts e Strogatz sui cosiddetti 'piccoli mondi' o 'small worlds' (Watts and Strogatz, 1998). La disponibilità di mappe dettagliate di un largo spettro di sistemi auto-organizzati - che vanno da sistemi naturali a tecnologici, da sistemi chimici a biologici fino a sistemi di relazioni sessuali, economiche o culturali e perfino a sistemi linguistici e molti altri ancora - e una capacità computazionale senza precedenti nella storia, hanno permesso di comprendere che tutti questi network condividono proprietà topologiche del tutto simili relative alla loro struttura relazionale, indipendentemente dalla natura degli oggetti coinvolti (Barabasi, 2002; Albert e Barabasi, 2002). Tra gli altri, i nostri studi sui network urbani di strade e intersezioni (Porta et al., 2006a, b, c; Cardillo et al., 2006; Crucitti et al., 2006a, b; Scellato et al., 2006) - un particolare tipo di sistemi geografici, i quali a loro volta sono una famiglia di network complessi caratterizzati da planarità e distanza metrica (Newman, 2003) - hanno mostrato che le stesse proprietà caratterizzano anche tali sistemi nel caso essi siano non-pianificati.

Questi risultati consentono di riconoscere, sotto l'apparente disordine delle città auto-organizzate, i segni di un ordine nascosto che rimane invariato all'opera nelle più diverse condizioni geografiche, economiche, culturali, sociali e climatiche, lo stesso ordine esibito dalla gran parte dei sistemi auto-organizzati di natura non-geografica quali quelli sociali, biologici o tecnologici (Portugali, 2000; Salingaros, 2003). L'ordine meraviglioso della città vecchia di Jane Jacobs, la 'magia' di cui parla Allan Jacobs, ora appaiono un poco meno oscure ai nostri occhi, riuscendo noi a vedere oggi dietro l'apparenza i segni universali della natura, i segni di un sistema naturale organico e complesso evoluto seguendo regole comuni (Albert and Barabasi, 2002; Ravasz and Barabasi, 2003). Quanto lontani sono i sistemi urbani tradizionali non pianificati da quel caotico, insensato 'disordine' che, negli occhi del Maestro, solo gli asini potevano aver concepito. Questo è il motivo per cui le 'nuove scienze dei network' sono così importanti per gli studi urbani oggi: perché il riconoscimento dell'ordine nascosto delle città auto-organizzate è un passo cruciale verso il superamento reale dell'eredità modernista nella pianificazione e nel progetto urbano, così come verso una nuova generazione di strumenti di analisi e di opportunità di progetto per gli urban designers.

La centralità è il fattore cruciale in questo percorso. Essa emerge tecnicamente come la variabile principale che rende possibile il riconoscimento delle regole comuni dei sistemi auto-organizzati, e emerge anche come elemento cardine nell'evoluzione della forma geografica, diremmo della 'forma', di tali sistemi. Così è con una discussione della centralità nell'analisi urbana che cominceremo nel par. 2. Nel par. 3 proseguiamo con una esposizione delle misure di centralità che utilizziamo nella nostra ricerca e nel modello analitico, *Multiple Centrality Assessment (Mca)*, il quale viene esposto nei suoi principi fondamentali nel successivo par. 4. Nel par. 5 chiariremo quali sono i principali risultati che abbiamo ottenuto negli ultimi tre anni. Nel par. 6 proporrò alcune sintetiche riflessioni su quali siano gli usi possibili del modello analitico nel disegno dei quartieri e delle reti di comunicazione e trasporto, degli spazi urbani e perfino delle architetture. Concluderemo nel par. 7 con alcune note sulle direzioni nelle quali la ricerca si sta attualmente sviluppando.

2. Centralità degli spazi, comportamenti collettivi e forma urbana

Se chiedete a un salumaio in quale luogo del quartiere aprirebbe il suo nuovo negozio lo vedreste probabilmente concentrarsi un momento in cerca di qualcosa: sta esplorando la propria mappa mentale delle strade e dei luoghi. Quindi punterebbe il dito su una carta dicendo: «Ecco, questo è il posto migliore!». Perché? «Beh - continuerebbe - qui è dove passa tutta la gente per andare al lavoro ogni mattina, poi qui, all'angolo tra Massave e Pearl [sto prendendo a esempio un salumaio di Boston] sei vicino a ogni altro posto del quartiere, poi Massave è proprio una spina dorsale che tutti nel quartiere conoscono bene perché porta diritto al fiume, al South End e anche al centro città». Ci sarebbe una lezione su come funziona una città reale, nelle parole del salumaio di Boston, che richiama l'importanza decisiva di un fattore in

particolare, tra i molti all'opera nella costituzione del fatto urbano, che chiamiamo 'centralità'. Tutti sanno che un posto centrale ha alcune qualità speciali da offrire in molti modi a chi vive e lavora in una città: è più visibile, è più accessibile dall'immediato contesto del quartiere così come dal contesto più grande della città e della metropoli, è più frequentato in termini di flussi di persone a piedi e potenziali clienti, ha più probabilità di evolvere in un polo di attrazione e in un catalizzatore sociale, di configurare una localizzazione adeguata per funzioni primarie come teatri o sedi centrali di aziende così come di offrire una più vasta varietà di beni commerciali e opportunità. Questo è il motivo per cui le aree più centrali sono più costose in termini di valore immobiliare e tendono a diventare socialmente esclusive: perché queste particolari qualità le rendono in grado di pagare un profitto ragionevole a investimenti superiori rispetto a luoghi meno centrali della stessa area urbana.

Se guardate a dove un centro urbano è collocato, troverete che nella grande maggioranza dei casi - se non in tutti - esso è piazzato all'intersezione di due strade principali, o dove una speciale configurazione del terreno geografico o qualche particolare forma del sistema fluviale o delle coste rende il luogo un passaggio o un approdo obbligato. Qui è dove le città cominciano. Poi, a partire da tale luogo centrale, le città crescono nel tempo aggiungendo attività e edifici, prima lungo le strade principali, quindi riempiendo gli spazi tra queste, poi aggiungendo strade e percorsi che realizzano cicli e punti di ritorno, poi ancora, mano a mano che la struttura diventa più complessa, formando nuove strade e nuovi luoghi centrali e insediando edifici e attività intorno a questi. È un meccanismo evolutivo ciò che ha da sempre guidato la formazione dei nostri organismi urbani, il cuore della civilizzazione umana, attraverso la storia per la gran parte dei quasi sette millenni della storia delle città e fino all'inizio dell'era moderna e dell'età industriale. Così, noi comprendiamo qui che la centralità non è semplicemente al lavoro al cuore della vita urbana contemporanea, legando forme spaziali e comportamenti collettivi, ma è per la verità al cuore del processo incrementale che rese le nostre città quello che sono sempre state e tuttora sono.

A questo punto, il lettore potrebbe aver maturato l'impressione che i pianificatori e gli *urban designers* abbiano speso la gran parte del loro tempo cercando di capire e controllare come la centralità funziona nelle città. Niente potrebbe essere meno vero. Nonostante l'evidente rilevanza del tema, studi sulla centralità nelle città sono stati portati avanti raramente e, come vedremo nel capitolo che segue, mai come approcci comprensivi al soggetto. A dirla tutta, se non fosse per i sociologi (l'avreste mai detto?), saremmo tuttora messi piuttosto male.

3. Dalla sociologia strutturale ai sistemi geografici: definire gli indici di centralità

L'idea di base della sociologia strutturale è di rappresentare un gruppo di persone come una rete nella quale i nodi (*nodes*) sono le persone e gli archi (*edges* o *links*) sono le relazioni (Wasserman and Faust, 1994). Bavelas fu il primo a realizzare che una posizione *centrale* nella struttura del

network corrisponde a potere in termini di indipendenza da, influenza e controllo sugli altri (Bavelas, 1948). I lavori basilari di Freeman sulla centralità (Freeman, 1977, 1979) rivisitarono e coordinarono un corpo di ricerche prodotte fin dall'inizio degli anni cinquanta (Bavelas, 1948, 1950; Leavitt, 1951; Shimmel, 1953; Shaw 1954, 1964) e definì un insieme di indici da allora considerati classici nella letteratura scientifica: centralità di grado ('degree', C^D), vicinanza ('closeness', C^C) e medietà ('betweenness' C^B). Più recentemente, è stata acquisita la nozione che i network complessi di sistemi tanto diversi quanto i sistemi sociali, naturali o creati dall'uomo condividono alcune proprietà strutturali comuni.

Una prima proprietà comune è relativa alla distanza e alla aggregazione (*clustering*): infatti è stato dimostrato come tali sistemi esibiscano la proprietà cosiddetta dei 'piccoli mondi' (*small worlds*), con ciò intendendo che la distanza topologica tra coppie di nodi è piccola se comparata con la dimensione (*size*) del network, nonostante il network mostri un grande fattore di *clustering* locale tipico dei lattici regolari (Watts and Strogatz, 1998). Una seconda proprietà comune è proprio legata alla *centralità*, in particolare la distribuzione del *degree* dei nodi. Il *degree* del nodo k è il numero delle sue connessioni, cioè la misura di centralità che prima abbiamo definito come C^D .

Lo studio di un grande numero di sistemi complessi, tecnologici come il World Wide Web e Internet (Pastor-Satorras e Vespignani, 2004), sociali come il sistema delle collaborazioni tra gli attori di cinema o di contatti sessuali (Lilijeros *et al.*, 2001), biologici (Albert and Barabasi, 2002) e molti altri, ha trovato che la distribuzione di C^D segue, per k grande, una legge di potenza del genere di: $P(k) = N(k)/N \sim k^{-\gamma}$, con l'esponente γ compreso tra 2 e 3. In questa formula, $N(k)$ è il numero di nodi aventi k archi. Network con questo tipo di distribuzione sono stati definiti *scale-free* (Albert and Barabasi, 2002). I risultati raggiunti sono stati ancora più importanti perché diversi da quanto ci si sarebbe aspettato da grafi casuali (Erdős and Rényi, 1959). Infatti, un grafo casuale con N nodi e K archi (una media di \bar{k} per nodo), per esempio un grafo ottenuto selezionando casualmente le k coppie di nodi da connettere, mostrano una distribuzione di C^D centrata su \bar{k} con un comportamento esponenziale e non a legge di potenza per grandi valori di k .

In termini formali, un *network* può essere rappresentato come un grafo $G = (N, K)$, un'entità matematica definita da due insiemi, N e K . Il primo insieme, N , è un insieme non vuoto di N elementi chiamati nodi (*nodes*), mentre K è un insieme di K elementi contenenti un coppie non ordinate di nodi diversi chiamati archi (*edges*). Nel proseguo ci si riferirà a un nodo attraverso il suo ordine i nell'insieme W ($1 \leq i \leq N$). Se tra i nodi i e j c'è un arco, essendo l'arco individuato come (i,j) , i due nodi sono detti *adiacenti* o *connessi*. Alle volte può essere utile considerare un grafo *pesato* $G = (N, K, \Omega)$, definito da tre insiemi N , K e Ω . L'insieme W è un insieme di K elementi costituito dai valori numerici assegnati agli archi e misuranti la 'forza' degli archi stessi. Un grafo $G = (N, K)$ può essere descritto come una matrice singola, la cosiddetta *matrice di adiacenza* $A = \{a_{ij}\}$, a matrice quadrata il cui elemento a_{ij} è uguale a 1 se (i,j) appartiene a K , e a zero se altrimenti. Un grafo *pesato* $G = (N, K, \Omega)$ può essere de-

scritto da due matrici, la matrice di adiacenza A prima definita, e una matrice W contenente i pesi degli archi. Nel caso particolare di un grafo *spaziale* (o *geografico*), per esempio un grafo i cui nodi hanno una posizione precisa in uno spazio Euclideo a due o tre dimensioni e gli archi sono reali connessioni fisiche, noi troviamo più utile lavorare con *lunghezze* invece che *pesi* così che, al posto della matrice W , noi considereremo la matrice $L = \{l_{ij}\}$, a il cui elemento l_{ij} è la lunghezza metrica dell'arco che connette i e j (una quantità inversamente proporzionale al peso associato all'arco). In un grafo pesato, la lunghezza percorso minimo d_{ij} tra i e j è definito come la somma minima delle lunghezze degli archi tra tutti i percorsi possibili nel grafo che connettono i a j , mentre in un grafo non pesato esso è semplicemente dato dal numero minimo di passaggi (*steps*) necessari a andare da i a j . La *lunghezza caratteristica* del percorso (*characteristic path length*) L (Watts and Strogatz, 1998) è definita come la lunghezza media dei percorsi minimi (essendo la media calcolata su tutte le coppie di nodi del *network*):

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} d_{ij} \quad (1)$$

L è una misura della proprietà di connettività del *network*. Questo indice, comunque, non è ben definito per grafi non connessi, a meno che non poniamo artificialmente l'assunto che il valore di d_{ij} sia finito anche quando non c'è alcuna connessione tra i e j . Per risolvere questo problema abbiamo introdotto un nuovo indice, l'*efficienza globale* E_{glob} (Latora e Marchiori, 2001). Così come la lunghezza caratteristica L , E_{glob} è una misura di quanto bene i nodi comunicano attraverso il *network*, ed è basata sul presupposto che l'efficienza ε_{ij} nella comunicazione tra due generici nodi i e j del grafo sia inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso minimo che li connette, in particolare $\varepsilon_{ij} = 1/d_{ij}$. Nel caso in cui G è non connesso e non c'è alcun percorso che connette i e j , $d_{ij} = +\infty$ e, di conseguenza, $\varepsilon_{ij} = 0$. L'efficienza globale del grafo G è definita come la media di ε_{ij} calcolata su tutte le coppie di nodi:

$$E_{glob}(G) = \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \neq j}} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \neq j}} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

L'efficienza globale è correlata a $1/L$, con una lunghezza caratteristica del percorso che corrisponde a una bassa efficienza (Latora e Marchiori, 2003). Per definizione, nel caso di grafo topologico (non pesato) E_{glob} prende valori nell'intervallo $[0,1]$, ed è uguale a 1 per il grafo completo (un grafo nel quale sono presenti tutti i possibili $N(N-1)/2$ nodi). Nei sistemi metrici (tradotti in grafi pesati), comunque, è possibile normalizzare tale quantità (Latora e Marchiori, 2001) dividendo $E_{glob}(G)$ per l'efficienza $E_{glob}(G^{ideal})$ di un ideale sistema completo nel quale l'arco che connette la generica coppia di nodi $i-j$ è presente e ha una lunghezza uguale alla distanza Euclidea tra i e j :

$$E_{glob}(G^{ideal}) = \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}^{Eucl}} \quad (3)$$

dove d_{ij}^{Eucl} è la distanza Euclidea tra i nodi i e j lungo una linea retta, per esempio la lunghezza di una connessione virtuale diretta $i-j$. In questo modo abbiamo $E_{glob,1}(G) = E_{glob}(G)/$

$E_{glob}(G^{ideal})$. Più recentemente è stata proposta una diversa normalizzazione che offre risultati particolarmente interessanti nel caso di sistemi geografici di strade e intersezioni quali quelli che noi trattiamo. Tale normalizzazione (Vragović *et al.*, 2004) si presenta come:

$$E_{glob}(G) = \frac{\sum_{i, j \in N} \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}}}{N(N-1)} \quad (4)$$

A questo punto siamo pronti per definire i vari indici di centralità. I tre indici riportati in Freeman (1977, 1979) possono essere raggruppati in due famiglie distinte (Latora e Marchiori, 2004): C^D e C^C possono essere inclusi nello stesso concetto di *essere centrale come essere vicini agli altri* (Shimbel, 1953; Sabidussi, 1966, Nieminen, 1974; Freeman 1977, 1979; Scott, 2003), mentre C^B interpreta un *essere centrali come essere tra gli altri*, per esempio, essere gli intermediari (Anthonisse, 1971; Freeman 1977, 1979; Freeman *et al.* 1991; Newman and Girvan, 2003). Dopo numerose revisioni e applicazioni attraverso circa quattro decenni (Bonacich, 1972, 1987, 1991; Stephenson and Zelen, 1989; Altman, 1993) tali indici sono stati modificati e estesi a casi diversi, ma le famiglie fondamentali non sono cambiate un gran che. Nella pianificazione dei trasporti per esempio l'accessibilità di un nodo è ancora definita come la sua proprietà di essere raggiunto *in breve* da tutti gli altri nodi della rete, il che rimane essenzialmente - a parte una diversa e più complessa pesatura degli archi in termini di costo di trasporto e non di semplice distanza metrica - una C^C . La crescente attenzione per la *network analysis* dei sistemi complessi ha comunque prodotto negli ultimi dieci o quindici anni a nuovi indici di centralità. Per gli obiettivi di questo articolo tre di essi sono rilevanti: *efficienza (efficiency)*, *direttività (straightness)* e *informazione (information)*, tutti fondati sulla efficienza globale E_{glob} . La centralità di efficienza C^E , un tipo di *closeness*, una volta applicata a grafi geografici e normalizzata confrontando la lunghezza del percorso minimo con quella della connessione virtuale diretta tra gli stessi nodi (Vragović *et al.*, 2004) si scopre catturare un nuovo, diverso, prettamente geografico concetto di centralità che chiamiamo *straightness centrality* C^S : *essere centrali come essere raggiungibili linearmente dagli altri*. Infine, la *information centrality* C^I incorpora entrambe le precedenti C^C e C^B in una singola misura (Latora e Marchiori, 2004), finendo in un nuovo distinto concetto di *essere centrali come essere critici per gli altri*.

3.1. Essere vicini agli altri: C^D e C^C

La *centralità di grado (degree)* C^D esprime l'idea che i nodi siano tanto più importanti quanto più è grande il numero di archi che vi convergono.

Il grado di un nodo è il numero di archi incidenti nel nodo, o anche il numero di nodi 'primi vicini' ad esso. Il grado del nodo i è definito in termini della matrice di adiacenza come $k_j = \sum_{j \in N} a_{ij}$.

La centralità di grado C^D di i è definita come (Nieminen, 1974; Freeman, 1979):

$$C_i^D = \frac{k_i}{N-1} = \frac{\sum_{j \in N} a_{ij}}{N-1} \quad (6)$$

La normalizzazione qui adottata è tale per cui C^D prende valori compresi tra 0 e 1, ed è uguale a 1 quando un nodo è connesso con tutti gli altri nodi del grafo.

La *centralità di vicinanza (closeness)* C^C è basata sulla nozione di percorso minimo (*geodesic*) d_{ij} cioè, in un grafo pesato, la somma minima delle lunghezze degli archi attraverso tutti i possibili percorsi del grafo che connettono i e j . In un grafo non pesato, o topologico, C^C considera il minimo numero di archi attraversati. La centralità di closeness del punto i è (Sabidussi, 1966; Freeman, 1979; Wasserman and Faust, 1994):

$$C_i^C = L_i^{-1} = \frac{N-1}{\sum_{j \in N, j \neq i} d_{ij}} \quad (7)$$

dove L_i è la distanza media tra il nodo i e tutti gli altri nodi. Tale misura è significativa solo per i nodi connessi, a meno che non si assuma artificialmente che d_{ij} sia uguale a un valore finito in assenza di connessione tra i nodi i e j , e prende un valore tra 0 e 1 nel caso di grafi non pesati.

3.2. Essere tra gli altri: C^B

La *centralità di medietà (betweenness)* C^B esprime l'idea che le interazioni tra due nodi non adiacenti sia dipendente dai nodi intermedi i quali possono giocare un ruolo strategico di controllo o influenza su di essi. Questo concetto si può semplificare assumendo che la comunicazione avvenga solo lungo i percorsi minimi. Perciò, se n_{jk} è il numero di percorsi minimi tra i nodi j e k e $n_{jk}(i)$ è il numero di percorsi minimi tra j e k che passano per il nodo i , la centralità di *betweenness* del nodo i è definita come (Freeman, 1979):

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \cdot \sum_{\substack{j,k \in N \\ j \neq k; j,k \neq i}} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (8)$$

C_i^B prende valori compresi tra 0 e 1 e raggiunge il valore massimo quando i insiste su tutti i percorsi minimi tra j e k . Altri indici di *betweenness*, per esempio la *flow betweenness* e la *random path betweenness*, sono stati altrove definiti per tenere conto dei contributi dei percorsi non-minimi; in ogni caso, nei nostri lavori utilizziamo la formula qui riportata in (8).

3.3. Essere raggiungibili linearmente dagli altri: C^S

La *centralità di direttività (straightness)* C^S proviene dall'idea che l'efficienza nella comunicazione tra due nodi i e j sia uguale all'inverso della lunghezza del percorso minimo d_{ij} (Latora e Marchiori, 2001). Così l'efficienza C^E del nodo i è:

$$C_i^E = \frac{\sum_{j \in N, j \neq i} \frac{1}{d_{ij}}}{\sum_{j \in N, j \neq i} \frac{1}{d_{ij}^{Eucl}}} \quad (9)$$

dove è la distanza Euclidea tra i nodi i e j lungo una linea retta virtuale. La centralità di *straightness* C^S è una variante della efficienza C^E dovuta a una differente normalizzazione (Vragović et al., 2004). La *straightness* del nodo i è:

$$C_i^S = \frac{\sum_{j \in N, j \neq i} \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}}}{N-1} \quad (10)$$

Questo indice esprime quanto i percorsi reali che connettono il nodo i con tutti gli altri nodi della rete deviano dai percorsi lineari virtuali.

3.4. Essere critici per gli altri: C^I

La *centralità di informazione (information)* C^I , misurata relativamente al nodo i , esprime la caduta nell'efficienza complessiva del *network* causata dalla rimozione da G degli archi incidenti in i :

$$C_i^I = \frac{\Delta E_{glob,2}}{E_{glob,2}} = \frac{E_{glob,2}(G) - E_{glob,2}(G')}{E_{glob,2}(G)} \quad (11)$$

dove con G' indichiamo il *network* con N nodi e $K-k$ archi ottenuto dalla rimozione da G degli archi incidenti nel nodo i . Qui utilizziamo l'efficienza definita in (4). La rimozione di alcuni archi produce un impatto su alcuni nodi del grafo generando un incremento nella lunghezza dei percorsi minimi. Conseguentemente l'efficienza del nuovo grafo $E_{glob,2}(G')$ è più piccola di quella del grafo originario $E_{glob,2}(G)$. L'indice C_i^I è normalizzato in modo da prendere valori inclusi nell'intervallo $[0,1]$. È immediato osservare che C_i^I è collegato a tutti gli altri tre indici classici di centralità C_i^D , C_i^C e C_i^B . Comunque, C_i^I dipende anche dalle lunghezze dei nuovi percorsi minimi, cioè dei percorsi minimi alternativi che vengo utilizzati quando il nodo i è disattivato: nessuna informazione su tali percorsi alternativi è invece contenuta negli indici precedenti.

4. Multiple Centrality Assessment: l'analisi di centralità delle reti urbane di strade e intersezioni

L'analisi dei *network* è stata utilizzata largamente negli studi urbani e territoriali. Fin dai primi anni '60 è stata prodotta molta ricerca per modellizzare gli usi del suolo, il comportamento dei mercati e i flussi di traffico sulla base di alcune caratteristiche topologiche e geometriche dei canali di traffico e comunicazione (Larson, 1981; Wilson, 2000), o perfino gli scambi di beni e attitudini culturali tra insediamenti storici nello spazio geografico (Pitts, 1965, 1979; Peregrine, 1991; Byrd, 1994). Il contributo dell'urban design in questa storia è stato principalmente teorico (Batty e Longley, 1994; Alexander, 1998; Salingeros, 1998) con una eccezione rilevante: seguendo il lavoro seminale di Hillier e Hanson (1984), una applicazione coerente della *network analysis* alla città, ai quartieri, alle strade e perfino ai singoli edifici è stata sviluppata sotto il nome di '*Space Syntax*'. Questo lavoro ha tra le altre cose postulato, e successivamente verificato, una correlazione esplicita tra la accessibilità (là chiamata 'integra-

zione’) topologica delle strade e fenomeni che pertengono alle dinamiche della vita sociale ed economica della città, quali la frequentazione (pedonale e veicolare), l’orientamento umano e la leggibilità dei luoghi, la sicurezza contro la criminalità urbana, la vitalità del piccolo commercio di comunità e della rete dei servizi, la separazione delle funzioni e l’inquinamento atmosferico (Penn e Turner, 2003). Per quanto non limitato solo a quello, il cuore del metodo di *Space Syntax*, quando applicato alle reti di strade e intersezioni, è l’indice di *integrazione* (*integration*), che è affermato come «*così fondamentale da essere probabilmente in se stesso la chiave di comprensione di molti aspetti della organizzazione umana dello spazio*» (Hillier, 1996, p. 33). L’integrazione di una strada è stata definita come «*la somma dei percorsi minimi tra ogni connessione (o spazio) e tutte le altre nel network (definendo ‘minimo’ in termini del minor numero di cambi di direzione)*» (Hillier, 1998, p.36). In questo modo, l’integrazione si rivela come null’altro che una *closeness centrality C^c* normalizzata (Jiang and Claramunt, 2004b), l’indice definito sin dai primi anni cinquanta dai sociologi strutturali e stabilizzato da Freeman nei tardi anni ’70. Un rapido confronto tra le definizioni formali di integrazione (Hillier e Hanson, 1984, p. 108; Teklenburg *et al.*, 1993, p. 350; Hillier, 1996, p. 36, nota 16; Jiang e Claramunt, 2002, pp. 298-299, e molti altri) e quella di *C^c* presentata prima nel par. 3.1. (eq. 7) offre una piena conferma di questo. *Space Syntax* ha offerto dalla metà degli anni ’80 agli *urban designers* e ai pianificatori urbani una preziosa apertura verso l’analisi di centralità e verso un’intera interpretazione organica e evolucionista del fatto urbano, apertura che essi hanno in grande parte lasciato cadere. A fianco di una indubbia capacità di intervenire fattivamente su temi-cardine delle politiche urbane contemporanee (sicurezza, sorveglianza naturale dello spazio pubblico, vivacità e stabilità della rete del piccolo commercio di comunità), capacità che ne garantisce ancora oggi un grande successo professionale, l’approccio di Hillier ha anche evidenziato negli anni problemi più volte dibattuti nella comunità scientifica (Desyllas e Duxbury, 2001; Jiang e Claramunt, 2002; Batty, 2004a, b; Ratti, 2004; Hillier e Penn, 2004, Crucitti *et al.*, 2006a). Tenendo sullo sfondo questo corpo critico, è stata soprattutto l’intersezione con percorsi disciplinari diversi relativi in particolare alla fisica dei sistemi complessi e alla sociologia strutturale a consentirci di produrre un’innovazione che generalizza, articola e supera *Space Syntax* sul piano *tecnico*, riconoscendone d’altra parte la fondatezza e la rilevanza sul piano epistemologico e storico-critico. Tale innovazione, che chiamiamo *Multiple Centrality Assessment (Mca)*, si configura come un’applicazione di analisi urbana, territoriale e spaziale fondata sulla scienza dei sistemi complessi a rete e rivolta alla pianificazione e progettazione urbana sostenibile. Di seguito esponiamo i tre principi fondanti di *Mca*, mentre nel successivo par. 5 renderemo brevemente conto dei risultati finora acquisiti.

4.1. Grafo primale: utilizzare la rappresentazione standard della rete urbana, superare il ‘length problem’ e incorporare la dimensione dello spazio geografico
Mca rappresenta network di spazi (come per esempio network di strade e intersezioni) attraverso grafi dove entità geografiche a zero dimensioni (intersezioni) sono tradotte in entità

del grafo a zero dimensioni (nodi), e entità geografiche a una dimensione (strade) sono tradotte in entità del grafo a una dimensione (archi); in forza della coerenza tra le dimensioni delle entità geografiche e del grafo, questo tipo di rappresentazione è qui definita ‘diretta’, o *primale*. Analogamente, una rappresentazione inversa nella quale le strade sono tradotte in nodi e le intersezioni in archi del grafo è qui definita ‘indiretta’ o *duale*: tale è per esempio il caso di *Space Syntax* (fig. 1).

La scelta della rappresentazione primale caratterizza profondamente *Mca* in tre modi. In primo luogo *Mca* lavora sulla base di strati informativi codificati secondo lo standard maggiormente diffuso e comunemente utilizzato nella pianificazione dei trasporti e nel *geo-mapping* in tutto il mondo, il cosiddetto formato ‘*road-centerline-between-nodes*’ (Dalton *et al.*, 2003), mentre la rappresentazione duale implica, come nel caso di *Space Syntax*, la costruzione della base informativa ex-novo ad ogni applicazione. Ciò evidentemente favorisce la affidabilità, la fattibilità finanziaria e la controllabilità dei risultati ottenuti da un processo di *Mca*.

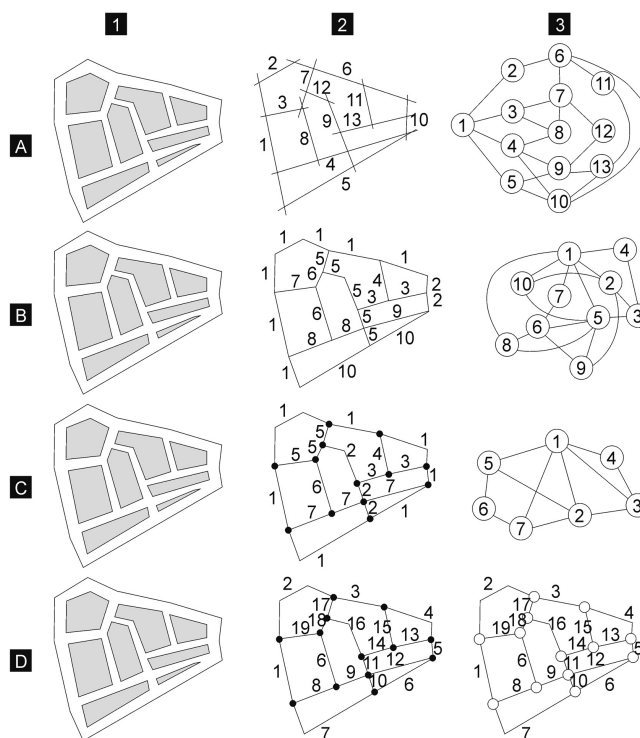


Fig. 1 - Rappresentazione duale (a, b, c) e primale (d) dello stesso sistema urbano di strade e intersezioni. Il caso duale viene qui esemplificato dopo l’applicazione di tre diversi criteri di generalizzazioni: a. *Space Syntax*: linearità (Hillier and Hanson, 1984); b. medesimo nome (Jiang and Claramunt, 2004a, b); c. minore discontinuità all’intersezione (Thomson, 2004; Porta *et al.*, 2006a)

In secondo luogo la costruzione primale del grafo permette a *Mca* di ottenere delle mappe di centralità notevolmente più dettagliate rispetto a *Space Syntax* superando il cosiddetto 'length problem' (Salheen, 2003): infatti la centralità viene calcolata direttamente su ogni nodo del grafo (cioè su ogni intersezione del sistema stradale), quindi indirettamente su ogni arco come media della centralità dei suoi due nodi. Questa procedura è affidabile e significativa solo in virtù della costruzione primale del grafo che garantisce che una strada (arco) ha sempre e solo due nodi (uno di inizio e uno di fine) attraverso i quali scambia con il sistema nel suo complesso: in questo modo, non si avrà mai che un arco scambi con un altro arco in qualche punto che non sia il nodo di inizio o di fine di entrambi gli archi, e che non si abbiano mai 'nodi' intermedi. Questo caratterizza il grafo primale di *Mca* diversamente rispetto alla 'axial map' di *Space Syntax* e al derivato duale 'connectivity graph', nel quale l'identità di una strada (in questo caso nodo del grafo) si mantiene lungo una pluralità di intersezioni il che significa che la centralità di una strada rimane forzatamente costante nonostante la strada scambi - possibilmente - in molti punti intermedi con il resto del sistema. Il 'length problem' che ne risulta produce un impatto molto forte sulla mappa di centralità, nella quale non è possibile rendere conto delle variazioni che intervengono lungo una stessa strada mano a mano che essa si interseca con altre strade, il che è particolarmente poco realistico nel caso di strade lunghe che tipicamente attraversano contesti urbani differenti. Mentre in *Mca* la distribuzione spaziale delle centralità sopra il network segue il 'flusso naturale' dei valori di centralità nel sistema e dipende solamente dalle condizioni strutturali di questo, in *Space Syntax* essa è largamente determinata dal criterio di estensione della identità di una strada attraverso le intersezioni, un problema che i geografi conoscono come 'generalizzazione' e che non ha nulla a che fare con la centralità né con la struttura del network: nel caso di *Space Syntax* questo criterio è la linearità (a due segmenti separati da una intersezione viene attribuita la stessa identità se essi sono disposti lungo un medesimo asse).

4.2. Distanza metrica: migliorare il realismo dell'analisi mettendo insieme i fattori cognitivi e performativi dei comportamenti sociali

Mca calcola i valori di centralità usando la *distanza metrica* invece che quella *topologica* (*step-distance*): la prima è tradizionale nelle scienze spaziali (analisi urbana e territoriale, pianificazione dei trasporti, scienze geografiche) mentre la seconda è lo standard per chi si occupa di *network* non-spaziali (come quelli sociali o biologici): quest'ultimo approccio, un portato ineludibile della rappresentazione duale, è anche alla base di *Space Syntax*. In breve, mentre in un *network* geografico la distanza d_{ij} tra due nodi i e j è, diciamo, 153,45 metri (tanto quanto la somma della lunghezza metrica degli archi che connettono i a j lungo il percorso minimo), in un *network* topologico (o 'relazionale') essa è, per esempio, 3 (come il numero di nodi, o 'passaggi', o 'steps', che si incontrano lungo il percorso tra i e j che presenta il minor numero di nodi, o passaggi, o 'steps'). Come detto, la natura metrica di *Mca* deve essere considerata la conse-

guenza diretta della sua fondazione primale. Siccome nel grafo primale una strada è tradotta in un arco (e l'arco segue l'impronta a terra della strada come essa appare nella mappa originaria) la lunghezza della strada è trattenuta incorporata nelle proprietà dell'entità geografica e chiaramente accessibile ai comuni sistemi Gis (Geographic Information Systems); al contrario in *Space Syntax*, siccome una strada viene tradotta in un nodo del grafo, il nodo non può evidentemente trattenere le proprietà geografiche della strada originaria, e tra queste la lunghezza metrica. In più, in un mondo metrico abbiamo a che fare con *network* pesati (essendo il peso, in *Mca*, la lunghezza dell'arco) mentre in un mondo relazionale con *network* binari (un arco è uguale a 1 se esiste e a zero se non esiste). Perciò, due nodi di destinazione D_1 e D_2 rispettivamente localizzati a 10 metri e a 10 km dallo stesso nodo di origine O_1 sono calcolati coerentemente in *Mca* mentre in *Space Syntax* possono bene essere considerati alla stessa distanza, se tra essi e O_1 intercorre lo stesso numero di cambi di direzione.

Il punto qui è che prendere in considerazione la distanza metrica semplicemente migliora il realismo dell'osservazione. Sebbene ciò possa suonare banale al senso comune, non è tuttavia da considerarsi scontato in sede scientifica: mentre la distanza metrica è in qualche modo lasciata sullo sfondo da chi si occupa di scienze della cognizione e di psicologia ambientale, la sua importanza è assoluta per chi si occupa di analisi spaziale, pianificazione urbana e territoriale e geografia. Ciò che conta, ai nostri fini, sono i comportamenti collettivi degli 'utenti finali' dello spazio aperto urbano, i quali, crediamo, sono *influenzati* (anche se non mai *determinati*) sia dai processi *cognitivi*, attraverso i quali le persone percepiscono l'ambiente e rappresentano a se stesse le proprie percezioni assegnandovi significati, sia dai processi *performativi*, attraverso i quali l'ambiente è esperito dalle persone in termini di obiettivi, sforzo e successo. In breve, dopo che il mondo è stato percepito e ristrutturato in termini di costruzione mentale, questa è pur sempre solo metà della storia: poi il mondo è pur sempre là fuori e rimane sempre da produrre il comportamento. Se la destinazione è troppo lontana, può diventare semplicemente impossibile (troppo costoso, non fattibile) arrivarci anche se è proprio al centro della tua mappa cognitiva (Kuipers *et al.*, 2003). Pertanto possiamo facilmente essere d'accordo con chi sostiene che la distanza topologica abbia una maggiore rilevanza di quella metrica nella formazione dello spazio cognitivo (Hillier, 2003; Hillier e Shinichi, 2005; Penn, 2003). Semplicemente pensiamo che lo spazio *cognitivo* non sia l'unico spazio in gioco quando si tratta di comportamenti collettivi reali: bisogna considerare anche lo spazio *performativo* per avere il quadro completo. Quindi sia la distanza metrica che quella topologica contano nel dare forma ai comportamenti collettivi nel mondo reale: questa impostazione sostiene pienamente l'approccio metrico primale di *Mca*, visto che la computazione della distanza è effettuata *metricamente* in un sistema fondato sulla *topologia* della struttura relazionale dei nodi nello spazio.

4.3. Indici multipli di centralità: abbandonare i modelli di generalizzazione e superare l'effetto bordo

Mca mappa la distribuzione di molti diversi indici di centra-

lità sopra il sistema spaziale. Facendo ciò, *Mca* interpreta la centralità come un concetto molteplice. Infatti ci sono molti modi per lo stesso spazio di essere centrale in un sistema di spazi, e questi diversi modi possono sovrapporsi oppure contraddirsi reciprocamente: in entrambi i casi essi sono sempre là, tutti insieme contemporaneamente. Come abbiamo visto nel precedente par. 3, riconosciamo quattro famiglie di centralità alle quali corrispondono quattro diversi modi di essere centrale: essere vicini a, essere tra, essere raggiungibili in modo linearmente diretto da, essere critici per: queste misure sono largamente basate sulla ricerca condotta nel dopoguerra su sistemi sociali o economici, nelle quali alle varie centralità (di una persona, di una organizzazione) erano attribuiti significati differenti di *leadership*, potere, influenza, controllo prominenza. Questo approccio differenzia *Mca* da *Space Syntax*, che assegna una importanza preponderante - almeno nel caso dei sistemi di strade urbane - a un unico indice di nome *integration*, cioè, alla *closeness*, C^c (vedi all'inizio di questo stesso par. 4). Ma la nozione molteplice di centralità gioca in *Mca* un ruolo più sottile ma ancora più importante, in quanto permette di evitare l'utilizzo di qualunque modello di generalizzazione. Un modello di generalizzazione è, per i geografi, un processo di riduzione della complessità usato nella riduzione di scala di una mappa; nel caso di una rete stradale, esso si compone di due passi: prima singoli segmenti stradali sono uniti in un'unica entità (strada), poi queste entità sono selezionate 'per importanza' nella visualizzazione in cartografica alla scala ridotta (Thomson, 2004). In *Space Syntax* la procedura di 'axial mapping' funziona come un modello di generalizzazione in quanto due strade adiacenti sono unite in una entità superiore ('asse') se sono allineate in modo rettilineo (sulla stessa 'line of sight' o 'line of unobstructed movement'). Questo procedimento non è indolore: esso infatti è costoso in termini di tempo, largamente soggettivo (Batty e Rana, 2002), e genera il 'length problem' prima discusso; ci deve essere qualche motivo importante quindi per continuare ad ancorare il modello all'axial mapping: quale è questo motivo? L'axial mapping, semplicemente, è ciò che permette a *Space Syntax* di sfuggire al cosiddetto 'effetto-bordo' (*edge-effect*), un problema che altrimenti renderebbe l'intero modello del tutto privo di significato e inutilizzabile sul piano pratico. Cos'è dunque l'effetto bordo? L'effetto-bordo è una distorsione della mappa di centralità tale per cui i valori alti vengono artificialmente concentrati al centro geometrico dell'immagine; tale risultato è dovuto al fatto che il *network* rappresenta di regola solo una parte del sistema reale, quella da tematizzare nel caso in questione, la quale viene artificialmente separata dall'universo 'tagliando' le connessioni di bordo. Questo taglio evidentemente pone i nodi posti vicino al bordo in una condizione di marginalità rispetto al sistema così rappresentato, mentre i nodi delle parti centrali acquisiscono una condizione di maggiore centralità per il solo fatto di essere geometricamente centrali nell'inquadratura costituita dal taglio. Solo in casi particolari - un'isola, un campus universitario in aperta campagna, un insediamento isolato stretto tra mare e deserto - questo effetto corrisponde a un carattere della struttura territoriale, mentre nella maggioranza dei casi si tratta di una pura distorsione che rende l'analisi tanto meno affidabile

quanto più la zona di bordo soggetta all'effetto si estende verso il centro del sistema analizzato. L'effetto bordo tende a aumentare considerevolmente con la frammentazione del *network*, e varia grandemente a seconda dell'indice di centralità utilizzato: la centralità di *closeness* C^c è molto sensibile all'effetto-bordo, a tal punto che su grafi frammentati risulta del tutto inutilizzabile per la preponderanza di questa distorsione. Per questo in *Space Syntax*, il quale è interamente basato su una misura di *closeness*, risulta essenziale ridurre di molto la frammentazione del grafo, cosa che viene ottenuta attraverso l'impiego preliminare di una procedura di generalizzazione, appunto l'*axial mapping*: sperimentato senza questo accorgimento preliminare, infatti, un'analisi di *Space Syntax* per altro verso del tutto convenzionale ha dato risultati inaccettabili (Dalton *et al.*, 2003).

Nel caso di *Mca* il problema viene risolto alla radice evitando di impiegare l'analisi di *closeness* se non su scala locale, dove essa mantiene per intero la sua affidabilità: nella analisi locale infatti la centralità di un nodo non viene calcolata rispetto a tutti gli altri nodi del sistema, ma solo al sottoinsieme dei nodi posti entro distanza d dal nodo dato (fig. 2). Ciò serve a evidenziare un livello di comunità (quartiere o distretto) il quale utilizza una struttura urbana letteralmente diversa, in quanto a proprietà fondamentali, rispetto al livello urbano, metropolitano o territoriale. L'analisi di *Mca* alla scala globale viene quindi preferibilmente indirizzata sugli altri indici disponibili, i quali evidenziano performance quasi del tutto insensibili all'effetto-bordo, una possibilità offerta proprio dalla nozione molteplice di centralità.

5. Multiple Centrality Assessment: risultati di ricerca e applicazioni pratiche

La nostra ricerca degli ultimi tre anni ha condotto alla definizione della procedura che abbiamo chiamato *Mca* e alla sua applicazione sul terreno in casi pilota. Di seguito elenchiamo i risultati finora ottenuti.

I luoghi urbani possono essere centrali e marginali allo stesso tempo, perché esistono *diversi modi di essere centrale* (fig. 3). La distribuzione di centralità in ogni caso, di tutte le centralità, risulta estremamente coerente sul piano spaziale: le centralità sembrano caratterizzare gerarchicamente catene continuative di percorsi attraverso il susseguirsi di strade adiacenti con valori privi di 'salti', legati secondo una gradualità che permette di leggere livelli annidati e conseguenti di aree centrali. Ciò permette un utilizzo del modello efficace nella 'lettura' dei diversi livelli della natura strutturale del sistema urbano e per la verifica di ipotesi di sviluppo in ordine ai temi centrali della vita urbana più sopra ricordati. Si può supporre che luoghi centrali in un certo modo, diciamo centrali per *betweenness* C^b , siano potenzialmente più 'vocati' a sostenere certe attività, diciamo il piccolo commercio e i servizi di comunità. In questo senso vanno per esempio i primi risultati, relativi al caso di Bologna (tabella di fig. 4), della nostra ricerca sulle correlazioni tra centralità e struttura funzionale, tuttora in corso su numerosi altri casi: si tratta di risultati che attestano in quel caso una correlazione statistica positiva estremamente significativa (anche vista la

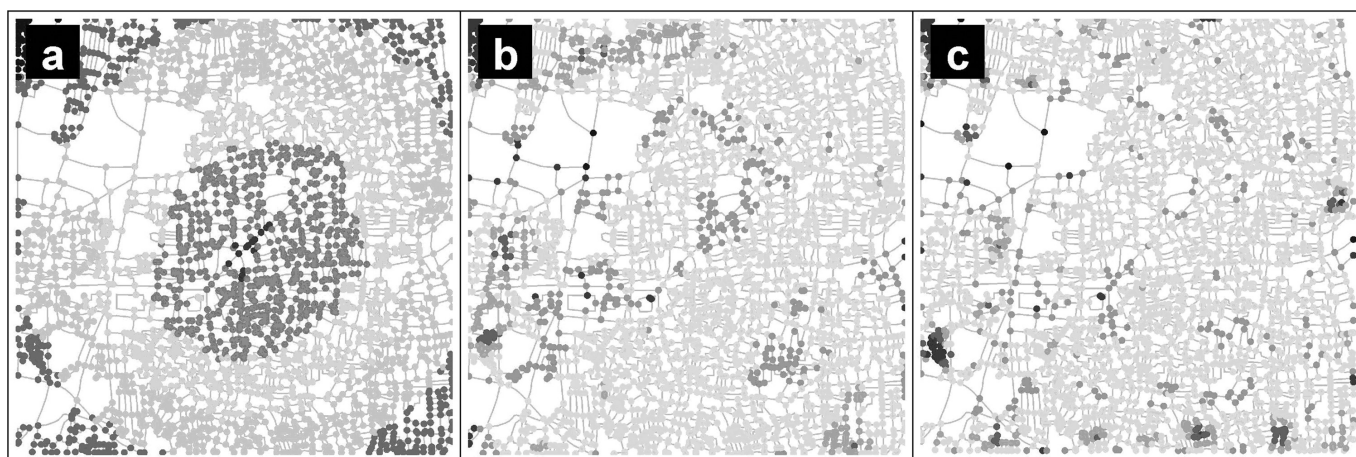


Fig. 2 - Effetto-bordo e centralità di *closeness* su un miglio quadrato di Ahmedabad, India: a. C^C_{glob} misura globale; b. C^C_{400} misura locale con $d=400\text{mt}$.; c. C^C_{200} misura locale con $d=200\text{mt}$

dimensione del campione: oltre 2.700.000 dati) tra centralità e struttura dei servizi e del commercio di comunità, con una particolare rilevanza per la centralità di *betwenness*. Ciò sostiene pienamente l'assunto di fondo che proviene dall'esperienza empirica: esiste un legame profondo nella struttura degli spazi pubblici urbani tra le centralità e cruciali elementi della armatura funzionale, legame che influisce su aspetti relevantissimi della vita sociale ed economica urbana e sulla sua evoluzione formale. Ma ciò significa che la struttura profonda dello spazio urbano in realtà cambia a seconda che produciamo un'economica 'di passaggio' (*betwenness*) o di tipo origine-destinazione (*closeness*), o piuttosto legata all'orientamento nella rete urbana (*straightness*).

Non solo i luoghi urbani possono essere centrali o marginali nello stesso tempo a seconda della diversa nozione di centralità considerata, ma la distribuzione delle centralità propone geografie completamente diverse anche rispetto alla scala. Luoghi centrali in senso globale possono essere marginali se consideriamo un utilizzo locale del sistema urbano, e questo vale anche per sequenze di scale locali caratterizzate da soglie metriche crescenti o decrescenti. In una indagine tuttora in corso sulla città di Barcellona, le sequenze di centralità di *closeness* C^C locali, da una soglia di 200 mt a oltre 15 km, propone anche visivamente l'emersione delle aree centrali alla scala del quartiere, che si trasformano passo per passo in una diversa geografia delle aree centrali alla scala del distretto e della città: alle soglie dei 1.400-1.600 m emergono con eccellente precisione i centri urbani storicamente autonomi e successivamente inglobati dall'espansione della città di Barcellona, sia entro che oltre l'*ensanche* di Cerda.

Ciò significa che tutti noi viviamo in un sistema spaziale che, pur costante nella sua consistenza fisica, in realtà offre una struttura profonda diversa a seconda di come noi in quel momento utilizziamo la città: se per esempio abbiamo bisogno di un servizio di base a scala di vicinato (per esempio una tabaccheria, una salumeria, una scuola elementare) o non piuttosto di un servizio raro a scala metropolitana (per esempio un teatro dell'opera o un'università).

La struttura urbana si rivela però, pur 'attraversata' a vari livelli e nello stesso momento da flussi di centralità con comportamenti non necessariamente coerenti, non per questo una struttura *disordinata*: al contrario, la centralità ci offre una chiave di lettura adatta alla comprensione, nei tessuti auto-organizzati delle città storiche, di un *ordine complesso e nascosto* che da un lato è uguale a quello di sistemi auto-organizzati evolutivi di genere del tutto diverso (organici, sociali, tecnologici...) e dall'altro è differente da quello espresso dai tessuti urbani pianificati (fig. 5).

L'ordine nascosto dei tessuti storici è organico e evolutivo, lontanissimo da una geometria visibile di tipo Euclideo: questo ordine però assicura al sistema storico tradizionale *il migliore rapporto tra efficienza e costo* (fig. 6). Normalizzate le misure sul numero e sulla posizione (in x e y) dei nodi, i tessuti medievali auto-organizzati mostrano infatti la maggiore efficienza in assoluto insieme ai tessuti con matrice a *grid-iron* (strade ortogonali regolari), ma questi ultimi presentano costi mediamente superiori. Pessima è invece la performance dei tessuti modernisti e a 'lollipop', tipici dei suburbi a bassa densità degli anni '60 e '70.

In conclusione, la ricerca ha chiarito aspetti essenziali della

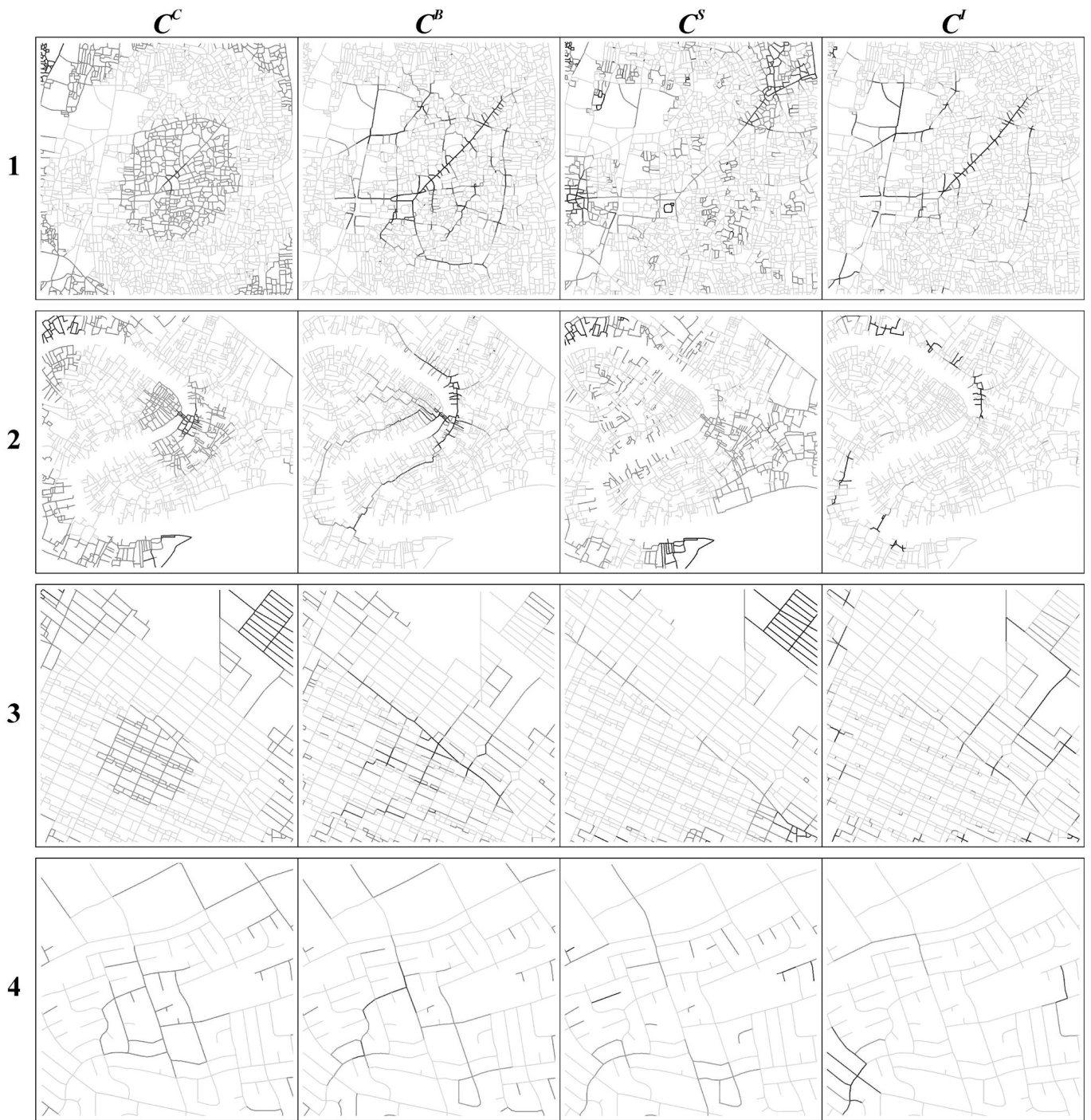


Fig. 3 - Multiple Centrality Assessment di 4 estratti di tessuti urbani (quadrati di un miglio di lato) relativi alle città di Ahmedabad (1), Venezia (2), Richmond (3) e Walnut Creek (4) tematizzati secondo le centralità globali di *closeness* C^C , *betweenness* C^B , *straightness* C^S e *information* C^I

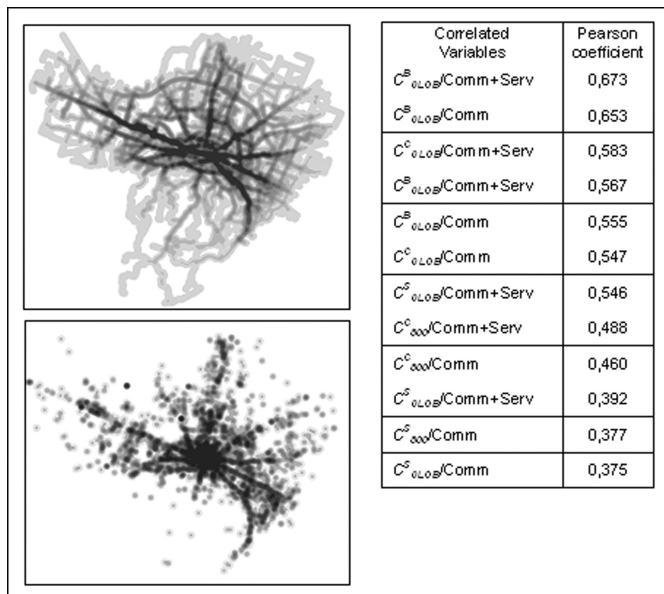


Fig. 4 - Bologna: correlazioni tra centralità e localizzazione di attività di comunità: densità di centralità con *betweenness globale* C_{eLoB}^B ; densità di localizzazioni commerciali e di servizio; le densità sono calcolate con metodo Kernel con *bandwidth* = 200 m e celle con lato = 10 m. Tabella a fianco: analisi statistica della correlazione lineare (Pearson) tra densità di centralità e densità di localizzazioni. Le centralità (*closeness* C^C , *betweenness* C^B e *straightness* C^S) sono calcolate in globale e locale ($d = 800$ m). L'indice Pearson prende valori tra -1 e 1, dove 1 è la correlazione perfetta lineare positiva. Le correlazioni sono state calcolate su un universo di oltre 2.700.000 dati

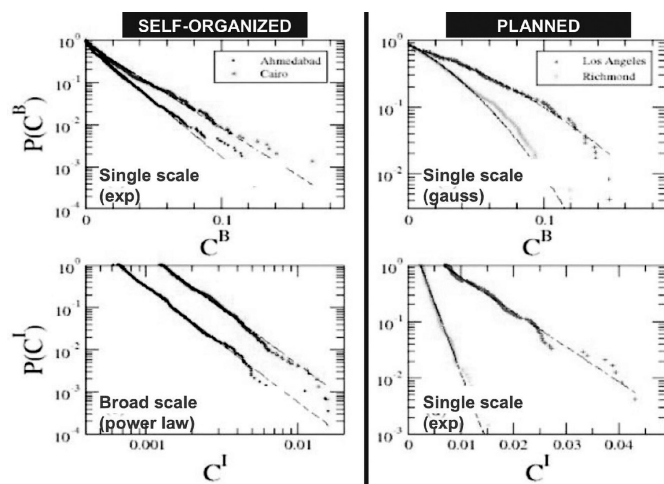


Fig. 5 - Distribuzioni cumulative di delle centralità di *betweenness* C^B e *information* C^I per due tessuti auto-organizzati (Ahmedabad e Cairo) e due pianificati (Los Angeles e Richmond): C^I caratterizza diversamente i due tipi di tessuti: in quelli auto-organizzati emerge un chiaro comportamento a legge di potenza, in quelli pianificati un comportamento esponenziale

natura della centralità spaziale e della sua distribuzione sopra *network* di strade urbane. Essa ha anche mostrato che la centralità caratterizza l'ordine che presiede alla forma della struttura delle città e che i tessuti di matrice storica medievale presentano caratteristiche di eccellenza nel rapporto efficienza/costo che li avvicinano ai sistemi 'small worlds' di tipo organico, tecnologico e sociale. Infine la ricerca ha stabilito, con i primi risultati degli studi di correlazione tra centralità e dinamiche, un forte legame tra centralità e localizzazione di attività cruciali per la sostenibilità sociale delle città. Quest'ultimo punto, in particolare, consente di attribuire a *Mca* una dimensione predittiva essenziali al suo impiego operativo nelle pratiche di pianificazione e progettazione urbana.

6. Utilizzare la Multiple Centrality Assessment

Negli interventi di riqualificazione urbana della dimensione del quartiere o del distretto è tema di assoluto rilievo l'integrazione del nuovo intervento nella struttura spaziale e territoriale esistente: la debolezza di tale integrazione è sempre rimarcata come fattore rilevante di esclusione sociale, di degrado del tessuto microeconomico locale, di insicurezza. Il circolo vizioso che innesta e corrobora le 'traiettorie discendenti' di tanti quartieri di edilizia sociale costruiti nel dopoguerra, per esempio, e oggi oggetto di intense politiche di rivitalizzazione, è spesso basato su una debole integrazione. L'analisi di centralità consente di visualizzare quale sia il contributo della struttura spaziale alla marginalizzazione di un'area urbana, dove siano i problemi maggiori, e quali impatti possano generare diverse alternative di progetto. Applicazioni di questo genere sono da almeno tre decenni il *core business*, per esempio, di *Space Syntax Ltd*, la struttura professionale nata come *spin-off* della ricerca di Bill Hillier alla University Colleg London, o più recentemente, sempre a Londra, di *Intelligent Space Partnership Ltd*, a sua volta esito della ricerca di Jake Desyllas.

Politiche coerenti di riqualificazione degli spazi pubblici, di sicurezza sociale, di mobilità sostenibile e di rivitalizzazione economica sono il nocciolo di una intera stagione urbanistica che guarda alla umanizzazione della città contemporanea come fattore decisivo per la sua competitività. La valutazione di centralità consente, come auspicato del resto nel libro probabilmente più influente di questa nuova stagione (Urban Task Force, 1999), di attraversare questi temi con analisi scientificamente fondate ma disponibili all'interpretazione degli attori all'interno di strategie concertative o partecipative.

Se le scale del quartiere e del distretto, cioè le dimensioni più tipiche dell'*urban design*, sono senza dubbio il campo originario e privilegiato di applicazione della valutazione di centralità (Hillier, 1998; Porta *et al.*, 2006c), essa può offrire informazioni di grande rilievo anche alla scala urbana e metropolitana integrando analisi funzionali con l'interpretazione delle potenzialità strutturali dei luoghi per orientare politiche di densificazione e di *Transit Oriented Developments* (Cervero, 1998, 2004; Calthorpe e Fulton, 2001).

Infine, la valutazione di centralità è da ora applicabile anche nella progettazione dell'edificio circa il potenziale degli

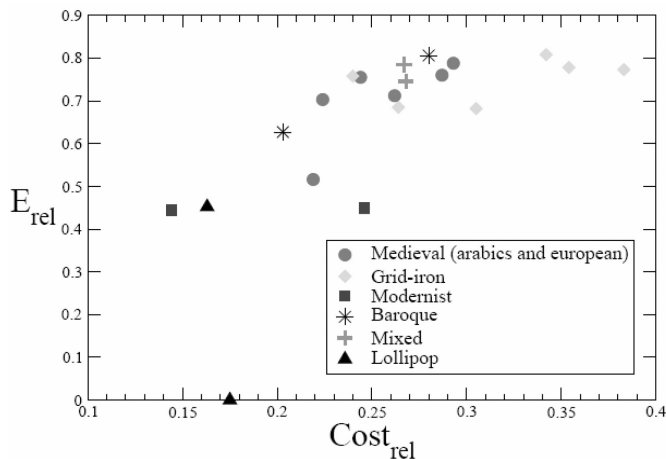


Fig. 6 - La relazione tra il costo relativo C_{rel} e la efficienza relativa E_{rel} . Ogni punto nel diagramma rappresenta uno dei 20 estratti di tessuti urbani di un miglio quadrato analizzati, raggruppati in classi a seconda del tipo di struttura stradale. Il punto (0,0) corrisponderebbe a un *network* con i medesimi nodi nelle medesime posizioni connessi secondo il *Minimum Spanning Tree*, il punto (1,1) analogamente ma connesso secondo la *Greedy Triangulation* (Cardillo *et al.*, 2006)

spazi interni in diverse alternative di distribuzione in pianta, con l'obiettivo di rendere coerente l'assetto delle funzioni, delle attività e delle barriere con lo sviluppo probabile dei flussi pedonali, la preminenza strutturale degli spazi e la loro accessibilità. Valutazioni di questo genere, anche se riferite a criteri di *visibilità* piuttosto che di centralità strutturale, sono state del resto già sperimentate per edifici complessi quali aeroporti, sedi di imprese, ospedali, outlet e centri commerciali o musei (Turner *et al.*, 2001). Nel caso del *layout* di outlet o centri commerciali, l'analisi di centralità consente di qualificare su base scientifica l'attrattività commerciale di ogni specifico punto vendita all'interno della struttura più generale; qui l'applicazione di *Mca* entra nell'area del *geo-marketing* alla scala dell'edificio ma anche del territorio (valutazione delle localizzazioni su base regionale).

7. Conclusioni e futura ricerca

Un nuovo strumento è disponibile per i pianificatori urbani, gli *urban designers* e gli architetti (Porta e Latora, 2008, *in print*). Si tratta di uno strumento rivolto all'analisi di centralità dei sistemi di spazi attraverso lo studio dei *network* che rappresentano tali sistemi. La valutazione di centralità consente di farsi un'idea delle potenzialità che i gli spazi hanno - solo per la loro posizione e per come sono connessi gli uni agli altri - di attirare flussi pedonali, attenzione collettiva, funzioni primarie e secondarie di tipo commerciale e di ser-

vizio. Lo strumento, *Multiple Centrality Assessment (Mca)*, produce attraverso una procedura in ambiente Gis (*Geographic Information System*), mappe dettagliate di centralità dei luoghi. Lo sviluppo di *Mca* procede attualmente in quattro direzioni. In primo luogo stiamo sviluppando l'evidenza empirica sulle correlazioni tra centralità e dinamiche localizzative urbane: studi di caso sono in corso sulla città di Barcellona, attraverso la *partnership* con la locale *Agencia de Ecologia Urbana* (<http://www.bcnecologia.net/>), e su sedici quartieri dislocati in cinque diverse città della Gran Bretagna (Leicester, Oxford, Sheffield, Edimburgo e Glasgow) all'interno di un vasto progetto chiamato '*City Form*' (<http://www.city-form.com/>).

In secondo luogo studiamo l'evoluzione delle forme urbane nel tempo attraverso una comparazione della cartografia storica alla ricerca del ruolo esercitato dalle centralità nello sviluppo graduale del sistema spaziale. Questo studio è affiancato da un analogo studio dell'evoluzione delle foglie di alcune specie arboree da frutto, come approfondimento della metafora organica all'interno delle scienze dei sistemi complessi.

Un terzo filone di sviluppo è rappresentato dalla sperimentazione di *Mca* sugli spazi interni degli edifici sia contemporanei che storici: in quest'ultimo caso siamo interessati a indagare le relazioni tra le distribuzioni spaziali delle centralità e i tracciati geometrico proporzionali che presiedevano alla costruzione delle fabbriche antiche avevano radici nel simbolismo sacro quanto nelle tecniche musicali e nella gestione strutturale del corpo edilizio.

Infine un quarto sviluppo in atto è l'applicazione alla modellistica convenzionale della simulazione dei trasporti e del traffico di diversi indici di centralità assumendo da quella tradizione una pesatura del *network* più complessa rispetto alla semplice distanza metrica (Scheurer e Porta, 2006).

Riferimenti bibliografici

- Albert R., Barabási A.L., 2002, «Statistical Mechanics of Complex Networks», *Review of Modern Physics*, n. 74.
- Alexander C., 1998, *The Nature of Order*, Oxford U.P., New York.
- Altman M., 1993, «Reinterpreting Network Measures for Models of Disease Transmission», *Social Networks*, n. 15.
- Anthonisse J.M., 1971, *The Rush in a Graph*, University of Amsterdam Mathematical Centre, Amsterdam.
- Barabasi A.L., 2002, *Linked: The New Science of Networks*, Perseus Publishing, Cambridge, MA.
- Batty M., 2004a, *A New Theory of Space Syntax*, Working Paper n. 75, Center for Advanced Spatial Analysis, University College London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>.
- Batty M., 2004b, *Distance in Space Syntax*, Working Paper n. 80, Center for Advanced Spatial Analysis, University College London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>.
- Batty M., Longley P., 1994, *Fractal Cities*, Academic Press, London.
- Batty M., Rana S., 2002, *Reformulating Space Syntax: The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps*, Working Paper n. 58, Center for Advanced Spatial Analysis, University College London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>.
- Bavelas A., 1948, «A Mathematical Model for Group Structures», *Human Organization*, n. 7.
- Bavelas A., 1950, «Communication Patterns in Task Oriented Groups»,

- Journal of the Acoustical Society of America*, n. 22.
- Bonacich P., 1972, «Factoring and Weighting Approaches to Status Scores and Clique Identification», *Journal of Mathematical Sociology*, n. 2.
- Bonacich P., 1987, «Power and Centrality: A Family of Measures», *American Journal of Sociology*, n. 92.
- Bonacich P., 1991, «Simultaneous Group and Individual Centralities», *Social Networks*, n. 13.
- Byrd B.F., 1994, «Public and Private, Domestic and Corporate: The Emergence of the Southwest Asian Village», *American Antiquity*, n. 59.
- Calthorpe P., Fulton W., 2001, *The Regional City: Planning for the End of Sprawl*, Island Press, Washington.
- Cardillo A., Scellato S., Latora V., Porta S., 2006, «Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns», *Physical Review E, Journal of the American Physical Society*, vol. 73, n. 6.
- Cervero R., 1998, *The Transit Metropolis*, Island Press, Washington.
- Cervero R., 2004, *Developing Around Transit: Strategies and Solutions That Work*, Urban Land Institute, Washington.
- Crucitti P., Latora V., Porta S., 2006a, «Centrality Measures in Spatial Networks of Urban Streets», *Physical Review E, Journal of the American Physical Society*, vol. 73, n. 3.
- Crucitti P., Latora V., Porta S., 2006b, «Centrality in Networks of Urban Streets, Chaos», *Quarterly of the American Institute of Physics*, vol. 16, n. 1.
- Dalton N., Peponis J., Dalton R., 2003, *To Tame a Tiger one has to know its Nature: Extending Weighted Angular Integration Analysis to the Description of Gis Road-centerline Data for Large Scale Urban Analysis*, Proceedings 4th International Space Syntax Symposium, London.
- Descartes R., 1994, *Discours De La Methode: Discourse on Method. A Bilingual Edition with an Interpretive Essay*, University of Notre Dame Press, Notre Dame, IN (ed. or. 1637).
- Desyllas J., Duxbury E., 2001, *Axial Maps and Visibility Analysis: A Comparison of their Methodology and Use in Models of Urban Pedestrian Movement*, Proceedings 3rd International Space Syntax Symposium, Atlanta.
- Erdős P., Rényi A., 1959, «On Random Graphs», *Publicationes Mathematicae*, n. 6.
- Freeman L.C., 1977, «A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness», *Sociometry*, n. 40.
- Freeman L.C., 1979, «Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification», *Social Networks*, n. 1.
- Freeman L.C., Borgatti S.P., White D.R., 1991, «Centrality in Valued Graphs: A Measure of Betweenness Based on Network», *Social Networks*, n. 13.
- Hillier B., 1996, *Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture*, Cambridge U.P., Cambridge, UK.
- Hillier B., 1998, «From Research to Designer-engineering the Space in Trafalgar Square», *Urban Design Quarterly*, n. 68.
- Hillier B., 2003, *The Architectures of Seeing and Going: Or, are Cities Shaped by Bodies or Minds? And is there a Syntax of Spatial Cognition?*, Proceedings 4th International Space Syntax Symposium, London.
- Hillier B., Hanson J., 1984, *The Social Logic of Space*, Cambridge U.P., Cambridge, UK.
- Hillier B., Penn A., 2004, «Rejoinder to Carlo Ratti», *Environment and Planning B*, n. 31.
- Hillier B., Shinichi I., 2005, *Network and Psychological Effects in Urban Movement*, paper presented at Cosit '05 «Conference On Spatial Information Theory», sep. 14-18, Ellicottville, New York.
- Jacobs A., 1993, *Great Streets*, Mit Press, Boston.
- Jacobs J., 1961, *The Death and Life of Great American Cities*, Random House, New York.
- Jiang B., Claramunt C., 2002, «Integration of Space Syntax into Gis: New Perspectives for Urban Morphology», *Transactions in Gis*, n. 6.
- Jiang B., Claramunt C., 2004a, «Topological Analysis of Urban Street Networks», *Environment and Planning B*, n. 31.
- Jiang B., Claramunt C., 2004b, «A Structural Approach to the Model Generalization of an Urban Street Network», *GeoInformatica*, n. 8.
- Kuipers B., Tecuci D., Stankiewicz B., 2003, «The Skeleton in the Cognitive Map: A Computational and Empirical Exploration», *Environment and Behavior*, n. 35.
- Larson R., 1981, *Urban Operations Research*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Latora V., Marchiori M., 2001, «Efficient Behavior of Small-world Networks», *Physical Review Letters*, n. 87.
- Latora V., Marchiori M., 2003, «Economic Small-world Behavior in Weighted Networks», *The European Physical Journal B*, n. 87.
- Latora V., Marchiori M., 2004, *A Measure of Centrality Based on Network Efficiency*, arxiv.org preprint cond-mat/0402050.
- Leavitt H.J., 1951, «Some Effects of Certain Communication Patterns on Group Performance», *Journal of Abnormal and Social Psychology*, n. 46.
- Lilijeros F.L., Edling C.R., Amaral N., Stanley H.E., Aberg Y., 2001, «The Web of Human Sexual Contacts», *Nature*, n. 411.
- Newman M., Girvan M., 2003, *Finding and Evaluating Community Structure in Networks*, arxiv.org preprint cond-mat/0308217.
- Newman P., Kenworthy J., 1999, *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Island Press, Washington.
- Nieminen J., 1974, «On Centrality in a Graph», *Scandinavian Journal of Psychology*, n. 15.
- Pastor-Satorras R., Vespignani A., 2004, *Evolution and Structure of the Internet*, Cambridge U.P., Cambridge, UK.
- Penn A., 2003, «Space Syntax And Spatial Cognition: Or Why the Axial Line?», *Environment and Behavior*, vol. 35, n. 1.
- Penn A., Turner A., 2003, *Space Layout Affects Search Efficiency for Agents with Vision*, Proceedings 4th International Space Syntax Symposium, London.
- Peregrine P (1991), *A graph theoretic approach to the evolution of Cahokia*, *American Antiquity*, 56.
- Pitts F.R., 1965, «A Graph Theoretic Approach to Historical Geography», *The Professional Geographer*, n. 17.
- Pitts F.R., 1979, «The Medieval River Trade Network of Russia Revisited», *Social Networks*, n. 1.
- Porta S., Crucitti P., Latora V., 2006a, «The Network Analysis of Urban Streets: A Dual Approach», *Physica A, Statistical mechanics and its applications*, vol. 369, n. 2.
- Porta S., Crucitti P., Latora V., 2006b, «The Network Analysis of Urban Streets: A Primal Approach», *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 33, n. 5.
- Porta S., Crucitti P., Latora V., 2006c, «Multiple Centrality Assessment in Parma: A Network Analysis of Paths and Open Spaces», *Urban Design International*, in print.
- Porta S., Latora V., 2008, «Centrality and Cities Multiple Centrality Assessment as a Tool for Urban Analysis and Design», in Haas T. (ed.), *New Urbanism & Beyond: Contemporary and Future Trends in Urban Design*, Rizzoli, New York, in print.
- Portugali J., 2000, *Self-organization and the City*, Springer, Berlin.
- Ratti C., 2004, «Space Syntax: Some Inconsistencies», *Environment and Planning B*, n. 31.
- Ravasz E., Barabasi A.L., 2003, «Hierarchical Organization in Complex Networks», *Physical Review Letters*, n. 67.
- Sabidussi G., 1966, «The Centrality Index of a Graph», *Psychometrika*, n. 31.
- Salheen M., 2003, *An Application of Universal Distance Using Space Syntax Analysis*, Proceedings 4th International Space Syntax Symposium, London.
- Salingaros N.A., 1998, «Theory of the Urban Web», *Journal of Urban Design*, n. 3.
- Salingaros N.A., 2003, *Connecting the fractal city, Keynote speech, 5th Biennial of «Towns and town planners in Europe»*, Barcelona, apr., <http://www.math.utsa.edu/sphere/salingar/connecting.html>.
- Scheurer J., Porta S., 2006, *Centrality and Connectivity in Public Transport Networks and their Significance for Transport Sustainability in*

- Cities*, paper presented at the «World Planning Schools Congress», Mexico, 13-16 jul.
- Scellato S., Cardillo A., Latora V., Porta S., 2006, «The Backbone of a City», *The European Physical Journal B*, vol. 50, n. 1-2.
- Scott J., 2003, *Social Networks Analysis*, 2nd edition, Sage Publications, London.
- Shaw M.E., 1954, «Some Effects of Unequal Distribution of Information Upon Group Performance in Various Communication Nets», *Journal of Abnormal and Social Psychology*, n. 49.
- Shaw M.E., 1964, «Communication Networks», in Berkovitz L. (ed.), *Advances in Experimental Social Psychology*, vol. 6, Academic Press, New York.
- Shimbel A., 1953, «Structural Parameters of Communication Networks», *Bulletin of Mathematical Biophysics*, n. 15.
- Silverman B.W., 1986, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, London.
- Stephenson K., Zelen M., 1989, «Rethinking Centrality: Methods and Examples», *Social Networks*, n. 11.
- Teklenburg J., Timmermans H., Van Wagenberg A., 1993, «Space Syntax: Standardized Integration Measures and some Simulations», *Environment and Planning B*, n. 20.
- Thomson R.C., 2004, *Bending the Axial Line: Smoothly Continuous Road Centre-line Segments as a Basis for Road Network Analysis*, Proceedings 4th International Space Syntax Symposium, London.
- Turner A., Doxa M., O'Sullivan D., Penn A., 2001, «From Isovists to Visibility Graphs: A Methodology for the Analysis Architectural Space», *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 28, n. 1.
- Urban Task Force, 1999, *Towards an Urban Renaissance*, E & FN Spon, London.
- Vragović I., Louis E., Diaz-Guilera A., 2004, *Efficiency of Informational Transfer in Regular and Complex Networks*, arxiv.org preprint cond-mat/0410174.
- Wasserman S., Faust K., 1994, *Social Networks Analysis*, Cambridge U.P., Cambridge, UK.
- Watts D.J., Strogatz S.H., 1998, «Collective Dynamics of Small-world Networks», *Nature*, n. 393.
- Weaver W., 1948, «Science and Complexity», *American Scientist*, n. 36.
- Wilson G.A., 2000, *Complex Spatial Systems: The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.