

Modelli funzionali delle reti ecologiche: dal particolare al generale

Gianni Fenu ^(a), Pier Luigi Pau ^(b) * **

^(a) Dipartimento di Matematica e Informatica, Via Ospedale 72, 09124 Cagliari, tel. (+39) 070-675-8759, fax (+39) 070-675-8779, e-mail: fenu@unica.it

^(b) Dipartimento di Matematica e Informatica, Via Ospedale 72, 09124 Cagliari, e-mail: pierluigipau@unica.it

Abstract

La protezione degli habitat e delle specie a rischio avviene oggi in Europa attraverso l'istituzione del progetto Natura 2000. La caratteristica principale di Natura 2000 è il comportamento reticolare delle aree protette, il quale deve emergere da una gestione del territorio che avviene in ambito locale, le cui finalità non si limitino alla protezione di uno specifico habitat, ma si integrino con obiettivi di larga scala e di lungo periodo. La rete Natura 2000 è frequentemente oggetto di studio con tecniche derivate dalla teoria delle reti complesse, tuttavia nella maggior parte dei casi i modelli matematici utilizzati per rappresentare la rete tengono conto solamente di una specie scelta come obiettivo, o un insieme limitato di specie. La ricerca di un modello che catturi il comportamento reticolare della rete in senso più generale può passare attraverso l'integrazione tra i dati raccolti per aree protette diverse, oltre a quella con dati provenienti da altre fonti; integrazione necessaria poiché i dati sulla rete Natura 2000 provengono da attività di rilevamento operate sul territorio e si intendono riferite a singole aree protette, sebbene talora assai vaste. Questo lavoro, considerando come caso di studio i siti della Regione Sardegna, mira alla generazione di modelli funzionali della rete ecologica, tramite l'integrazione dei dati raccolti dai rilevatori nell'ambito del progetto Natura 2000 con i dati sull'uso del suolo, operata tramite software GIS, e conseguentemente allo studio delle proprietà della rete risultante con la teoria delle reti complesse. Questa nuova tipologia di modello risulta utile per il confronto con modelli relativi a singole specie, allo scopo di valutare la portata delle modificazioni conseguenti a interventi proposti sul territorio.

Abstract (English)

The protection of endangered habitats and species is coordinated in Europe under the project denominated Natura 2000. The main aspect of this project is the notion that nature protection areas are considered part of an ecological network, and they have to be established and maintained while taking into account a number of large-scale goals, especially concerning the protection of biodiversity. The Natura 2000 network has frequently been an object of study using complex network analysis, but in most cases, the graph models under analysis are built considering only a single species or a very limited set of species. In an endeavour toward a graph model with a higher degree of generality, the data sources that are part of the project should be integrated with external sources, as within the Natura 2000 project, no information is collected on territories outside nature protection areas. This paper aims at building general graph models by cross-referencing land use data with the employment of GIS software, and providing guidelines to the analysis of these models using complex network analysis techniques. The proposed models can be useful to make comparisons with single-species models and perform the assessment of proposed network modifications.

Introduzione

L'approccio tradizionale alla protezione di habitat e specie a rischio di estinzione è quello di creare riserve naturali, ossia aree protette dedicate alla preservazione di ambienti naturali. Storicamente, queste riserve sono state istituite principalmente sotto forma di isole in un mare di territorio urbanizzato o caratterizzato dalla presenza di infrastrutture. Sebbene vi siano stati numerosi casi di successo nella preservazione di determinate specie a rischio, sul lungo periodo questo approccio ha mostrato di soffrire di alcune pesanti limitazioni; più precisamente, l'efficacia delle riserve naturali è limitata da fattori quali una dimensione insufficiente delle riserve o una distanza eccessiva tra una riserva e altre porzioni di habitat adatti alle specie protette. Si è inoltre accertato che una maggiore estensione delle aree protette non consente solamente di ospitare un maggior numero di esemplari di una specie, ma anche un maggior numero di specie diverse (Diamond, 1975), e l'isolamento delle aree protette può avere conseguenze negative sul patrimonio genetico di una specie.

Allo scopo di superare queste limitazioni, si è diffuso ed evoluto fino ad oggi il concetto di rete ecologica (Beier e Noss, 1998; Roberts et al., 2001; Vimal et al., 2012). Nella creazione di aree protette e nella gestione di quelle esistenti si deve cioè tenere conto di obiettivi di preservazione su larga scala, e si deve considerare l'effetto che le aree protette possono avere sul territorio quando sono considerate come un sistema complesso. Il comportamento di un insieme di riserve naturali come un sistema unitario può avvenire spontaneamente, purché siano rispettate determinate condizioni; in alternativa è possibile cercare di indurlo intervenendo sul territorio, ad esempio con la creazione di corridoi ecologici artificiali allo scopo di connettere aree protette distanti tra loro (Rosenberg et al., 1997). In maniera non dissimile dalle stesse riserve naturali, corridoi ecologici con caratteristiche diverse possono risultare adeguati per la migrazione di specie differenti; perciò, la pianificazione e l'implementazione di corridoi ecologici deve avvenire tenendo conto delle caratteristiche di una o più specie obiettivo, di cui si voglia favorire la migrazione (Fleury e Brown, 1997). L'efficacia dei corridoi ecologici è stata frequentemente messa in discussione; si sono comunque identificati numerosi casi di studio in cui la loro implementazione ha determinato un incremento nelle migrazioni delle specie obiettivo (Gilbert-Norton et al., 2010).

Il fenomeno della transizione verso le reti ecologiche, che avviene su scala mondiale, nell'ambito dell'Unione Europea trova espressione nel progetto "Natura 2000", che è mirato specialmente alla preservazione della biodiversità sul territorio europeo, tramite la definizione di politiche comunitarie per la gestione delle aree protette, la quale non è più vista come un'attività esclusivamente a carattere locale. È dunque naturale chiedersi come si possa valutare ad un livello di vasta scala l'andamento delle politiche in atto. Proprio a questo scopo, gli approcci più consolidati allo studio della pianificazione territoriale tramite software per la gestione di dati geografici (GIS) trovano un complemento ideale nel ricorso ai grafi come modelli matematici delle reti ecologiche, e nelle tecniche di analisi derivate dalla teoria delle reti complesse quali strumenti utili ad uno studio quantitativo delle proprietà di una rete ecologica, grazie all'applicazione di algoritmi efficienti analoghi a quelli applicati in altri contesti (Urban e Keitt, 2001).

In questo articolo si analizza la struttura degli insiemi di dati a disposizione su Natura 2000, con particolare riferimento alla loro utilizzabilità nella costruzione di modelli per una rete ecologica, considerando finalità differenti per lo studio, dalle analisi incentrate su una singola specie ai casi di studio più generali. Per la costruzione di grafi di esempio, si è utilizzato l'insieme dei 124 siti Natura 2000 presenti sul territorio della Regione Sardegna. I dati relativi al progetto Natura 2000 sono incrociati con quelli disponibili nell'ambito del progetto Corine Land Cover. Non essendo disponibili dati da questo progetto per il territorio corrispondente a sette dei siti Natura 2000, viene preso in considerazione un insieme di 117 siti.

Lo studio di reti ecologiche come reti complesse

L'analisi di reti complesse è una disciplina basata sul calcolo di proprietà statistiche di un grafo che rappresenti la rete oggetto di analisi. I grafi sono strumenti matematici particolarmente idonei alla costruzione di modelli per le reti, dal momento che sono costituiti da insiemi di nodi e da insiemi di

archi, ossia di collegamenti fra i nodi. Proprietà quali la distribuzione del grado dei nodi (ossia del numero di connessioni che ogni particolare nodo ha con altri nodi), l'appartenenza di nodi e archi ai cammini minimi sulla rete, la maggiore o minore ridondanza delle connessioni diventano oggetto di studio e strumenti per la valutazione quantitativa dello stato della rete, con la possibilità di confrontare delle reti, ovvero due o più modelli rappresentanti diverse proposte di intervento su una rete data.

Tutte queste valutazioni diventano possibili, naturalmente, una volta che un modello matematico per la rete in esame sia definito, vale a dire che devono essere state definite alcune scelte fondamentali per la generazione di un grafo. Le reti complesse risultano uno strumento molto versatile, le cui applicazioni spaziano dalle reti sociali alla bioinformatica, e in ogni campo di studi, oltre a definirsi significati contestualizzati per le misure più comuni, sono state proposte misure diverse e più raffinate (Costa et al., 2007).

Nel contesto delle reti ecologiche, per la generazione di un modello sotto forma di grafo, risulta preminente la scelta della scala, cioè se un nodo debba rappresentare un'intera area corrispondente a una regione geografica o un'intera area protetta, o piuttosto una singola porzione di terreno uniforme dal punto di vista dell'habitat (la cosiddetta *patch*). Di particolare importanza sono inoltre i criteri per stabilire la presenza o meno di un arco tra due nodi e, se previsto, il peso di ogni arco.

La scelta della scala è determinata dalla coerenza con l'obiettivo reale di ciascun singolo studio, mentre per quanto riguarda i criteri di definizione degli archi, tra i diversi approcci considerati ad oggi, è diventato prevalente quello della rappresentazione della connettività funzionale. I dettagli implementativi possono variare, ma l'obiettivo rimane quello di rappresentare con un arco la possibilità di migrazione o dispersione di una specie fra due nodi della rete. L'approccio di rappresentare la connettività strutturale – ossia di inserire e pesare gli archi in funzione delle caratteristiche intrinseche del territorio – non ha avuto successo, a causa della difficoltà di rappresentare fedelmente tutti i possibili ostacoli presenti sul territorio (Urban et al., 2009).

Il limite insito nell'approccio funzionale alle reti complesse ecologiche è la necessità di rappresentare lo stato della rete con un grafo (identificabile come “grafo di specie”) per ciascuna specie di interesse. Per questa ragione, solitamente gli studi si limitano a pochi casi considerati più interessanti, prendendo per riferimento un insieme limitato di specie, o perfino una singola specie, eventualmente scelta in quanto “specie ombrello” (Roberge e Angelstam, 2004), ossia rappresentativa di un insieme di specie, nel senso che il miglioramento dello stato della rete per la specie ombrello si dovrebbe ripercuotere in miglioramenti per il numero maggiore possibile di altre specie (Caro, 2003).



Figura 1 – Esempi di grafo di specie riferiti ai siti Natura 2000 della Regione Sardegna. A sinistra: *Cervus elaphus corsicanus*. A destra: *Rhinolophus hipposideros*

In Figura 1 sono riportati due esempi di grafo di specie, generati in base ai dati a disposizione su 117 siti di Natura 2000 presenti nella Regione Sardegna. La posizione dei nodi corrisponde alle coordinate dei centroidi dei siti; sono collegati con archi le coppie di siti con distanza geografica inferiore a 30 Km calcolata tra i confini dei siti, considerando solamente i siti in cui si trova la specie di interesse.

Tra le osservazioni più immediate e di maggiore importanza vi è quella relativa alle componenti connesse. Ignorando in questo caso i siti isolati, si osserva in entrambi i casi che non risulta sempre possibile scegliere arbitrariamente due nodi nei quali la specie di interesse sia presente e costruire un percorso tra i due nodi, considerando solamente gli archi presenti sulla rete. Gli insiemi di nodi per cui questo risulta possibile sono detti componenti connesse; in entrambi i casi è possibile individuare due componenti connesse. In un modello ben formato, che tenga conto delle caratteristiche del territorio e della specie, e in particolare in cui sia realistica la scelta della distanza massima per collegare fra loro due siti, a diverse componenti connesse si possono associare popolazioni separate della specie (Minor e Urban, 2008); ciò dovrebbe essere accertato con opportune osservazioni sul territorio. La separazione delle popolazioni può avere effetti negativi sulla biodiversità, a causa del rischio che vi sia un eccesso di incroci fra consanguinei e alla possibilità che nel tempo venga a mancare l'omogeneità tra i patrimoni genetici; perciò, una volta verificata la situazione reale, potranno essere considerati interventi volti alla realizzazione di una connessione tra le componenti.

Modello dei dati e integrazione con i sistemi di informazione geografica

Sebbene non si possa prescindere dai modelli funzionali attualmente consolidati, la ricerca di modelli dotati della capacità di catturare proprietà generali di una rete ecologica è giustificata dalle possibilità di applicazione di un tale modello. Nell'ambito della pianificazione del territorio, un modello unificato potrebbe tornare utile nella valutazione delle proposte di implementazione di corridoi ecologici.

Infatti, considerato un grafo di specie, una possibile domanda è se e come sia sensato proporre l'estensione della rete, tramite l'aggiunta di archi tra nodi già collegati, oppure di archi che aggiungano nodi ad una delle componenti connesse, o anche eventualmente per collegare componenti attualmente disconnesse. La risposta dovrebbe tenere conto, naturalmente, sia di vincoli strutturali presenti sul territorio, sia di vincoli relativi al costo degli interventi sul territorio che corrispondono alle soluzioni proposte sul modello matematico. Per quest'ultimo motivo, è altresì sensato chiedersi quale tra diversi interventi possibili consenta di ottenere il maggior ritorno possibile nel rispetto dei vincoli di budget.

La risposta a queste domande sarebbe facilitata dalla possibilità di confronto di un grafo di singola specie con un grafo che rappresenti la connettività strutturale. Tuttavia, come già osservato, un grafo simile risulta di difficile costruzione. Se necessario, l'individuazione di fasce contigue di territorio può essere eseguita tramite software GIS, utilizzando fonti di dati esterne al progetto Natura 2000. A causa della vastità dello spazio di ricerca, tuttavia, può essere opportuno valutare preventivamente gli interventi possibili basandosi solamente su approcci basati sui grafi, onde restringere il campo della ricerca di territori contigui a pochi casi esemplari.

Nell'ambito di Natura 2000, lo stato di conservazione delle specie e degli habitat di interesse nei siti riconosciuti viene verificato periodicamente, con la compilazione da parte di esperti di settore di un rapporto sull'andamento del sito. I dati raccolti in questa attività sono memorizzati in un data base condiviso e pubblico. Alcuni dati sono immagazzinati in forma strutturata, fra i quali si può menzionare la stima della popolazione di ciascuna specie; i siti, le tipologie di habitat e le specie sono tutti identificati tramite codici univoci per facilitarne la categorizzazione. Altri dati sono sotto forma di testo libero, e perciò più difficilmente analizzabili in maniera automatica. Fra questi vi sono una descrizione del sito e l'eventuale indicazione di misure di conservazione da adottare a livello locale.

Il modello di dati utilizzato mette al centro il sito, al quale tutte le altre entità rilevanti sono collegate (Figura 2). Questa scelta, certamente sensata per gli scopi originari del progetto, pone ulteriori difficoltà di analisi, dal momento che, mentre è riportata la presenza di ogni specie e habitat in ogni sito, viene persa l'informazione sulla porzione di habitat nella quale effettivamente ogni specie trovi la propria collocazione ideale. Per memorizzare questa informazione sarebbe necessario il ricorso ad un modello esteso dei dati (Figura 3). Le specie dovrebbero cioè essere messe in relazione con la singola patch, a cui sia associato il tipo di habitat; le associazioni tra siti e habitat avverrebbero per tramite dell'entità che rappresenta le singole patch presenti in un sito.

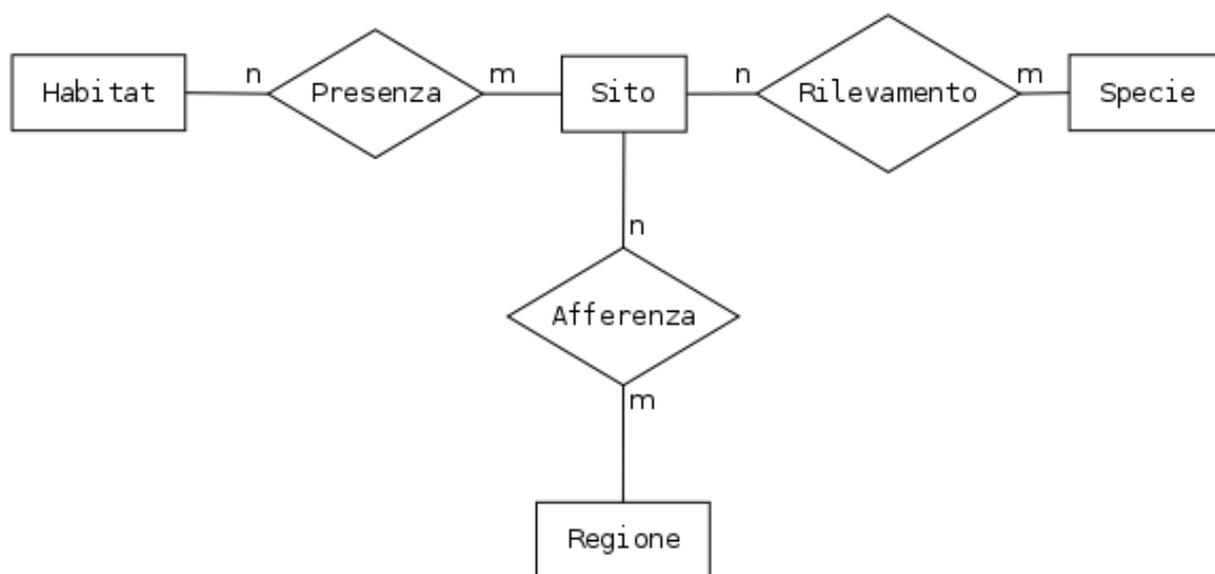


Figura 2 – Diagramma entità-relazione semplificato del data base dei siti di Natura 2000

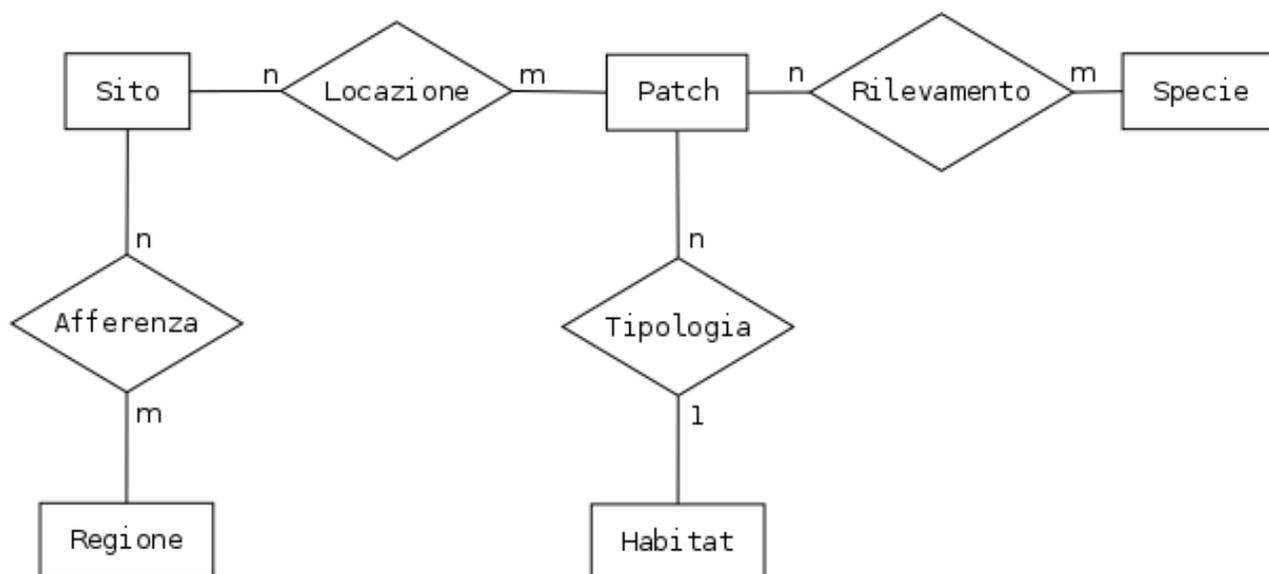


Figura 3 – Diagramma entità-relazione di un modello concettuale che tenga conto della possibilità di individuare la presenza delle specie nelle singole patch di habitat

Il vantaggio di un modello esteso sarebbe evidente nella possibilità di automatizzare il processo di ricerca di patch di habitat adatte ad ospitare una specie, localizzate in un sito nel quale attualmente la specie risulti assente. Questo consentirebbe una facile individuazione di possibili proposte di rilocalizzazione o trapianto delle specie, nei casi in cui si consideri opportuno aumentare le locazioni a

disposizione per una specie a rischio. Prendendo in considerazione il modello attualmente in uso, invece, un approccio possibile è quello di calcolare un indice di similarità tra i siti, e utilizzarlo come stima della possibilità per un sito di ospitare una specie obiettivo: se questa specie si trova attualmente in un dato sito, si potrebbe considerare che possa essere ospitata anche da siti simili.

Verso un modello generale della rete ecologica

La similarità fra i siti Natura 2000 può essere calcolata rappresentando ogni sito come un vettore binario n-dimensionale, le cui componenti assumono il valore 0 oppure 1 per identificare, rispettivamente, l'assenza o la presenza di un elemento di una delle seguenti tipologie:

- l'insieme delle specie di interesse;
- gli habitat, categorizzati nell'ambito di Natura 2000;
- le tipologie di uso del suolo.

Nei primi due casi, la costruzione dei vettori può avvenire utilizzando i dati raccolti nell'ambito del progetto Natura 2000, mentre nell'ultimo caso è necessario fare ricorso a fonti esterne di dati e ad un software GIS per calcolare l'intersezione delle patch di uso del suolo con i siti Natura 2000. La suddivisione del territorio secondo le tipologie di uso del suolo è ricavabile dai dati del progetto Corine Land Cover. Un indice di similarità applicabile in questo contesto è il coefficiente di Jaccard, costituito dal rapporto tra il numero di attributi posti a 1 in entrambi i vettori e il numero di attributi posti a 1 in almeno uno dei due vettori. Questo indice risulta compreso tra i valori 0 e 1, dove 1 esprime la massima similarità, cioè quella di due vettori identici.

Il ricorso ai dati sull'uso del suolo provenienti dal progetto Corine è giustificabile per la disponibilità di questi dati per i territori non situati all'interno di siti Natura 2000. Ciò rende possibile, se lo si ritiene opportuno nella valutazione di piani di gestione, costruire opportunamente il vettore rappresentativo di un'area di interesse esterna ai siti Natura 2000.

I grafi di Figura 4 sono costruiti sullo stesso insieme di nodi dei grafi di specie considerati precedentemente; a differenza di quanto avviene nei grafi di specie, sono collegati fra loro con un arco le coppie di nodi la cui similarità, calcolata con i coefficienti di Jaccard dei vettori basati sull'uso del suolo, sia uguale o superiore a una data soglia. Questa tipologia di grafo può essere denominata "grafo di similarità". Sui 117 nodi considerati, con soglia pari a 0,6 si costruisce una rete con 556 archi; con soglia pari a 0,7 il numero di archi si riduce a 163, fino a soli 22 archi con soglia pari a 0,8. Si può quindi considerare che valori da 0,7 in su rappresentano un requisito molto forte per collegare fra loro una coppia di siti.

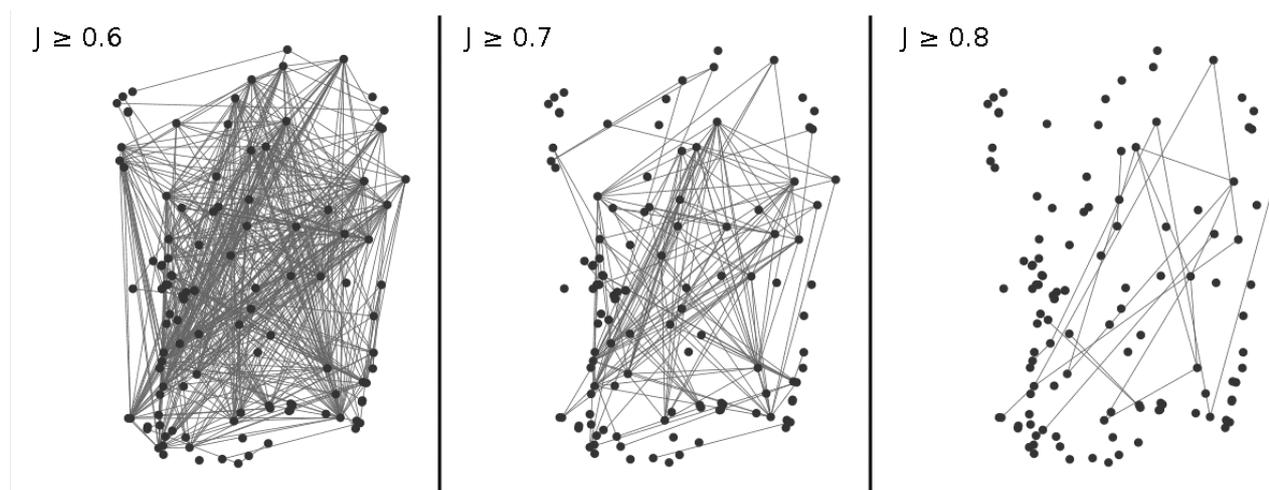


Figura 4 – Grafi di similarità basati sui dati sull'uso del suolo, senza applicazione di una soglia per distanza geografica

Per gli studi incentrati sulle specie non volatili, è opportuno applicare una soglia anche sulla distanza geografica tra i siti, applicando una distanza massima come condizione per il collegamento

di coppie di siti. In Figura 5 si mostra l'effetto dell'applicazione di una tale soglia sul primo grafo di Figura 4. Le distanze sono calcolate tra i confini dei siti, con l'utilizzo del software Spatialite (estensione per SQLite per dati geografici), ed eventuali coppie di siti intersecati sono considerati a distanza nulla. Si prende in considerazione la soglia di 0,6 per l'indice di similarità, e tre possibili soglie per la distanza geografica: con una distanza massima di 50 Km si costruisce un grafo con 164 archi; il numero di archi scende a 131 per la distanza massima di 40 Km e 104 con una distanza di 30 Km. Se però la soglia per l'indice di similarità può essere scelta valutando quanto sia restrittivo ogni possibile criterio, la scelta di una soglia per la distanza deve essere incentrata sulle finalità dello studio, che saranno generalmente basate sul confronto con un grafo di specie su cui sia applicata la stessa soglia di distanza.

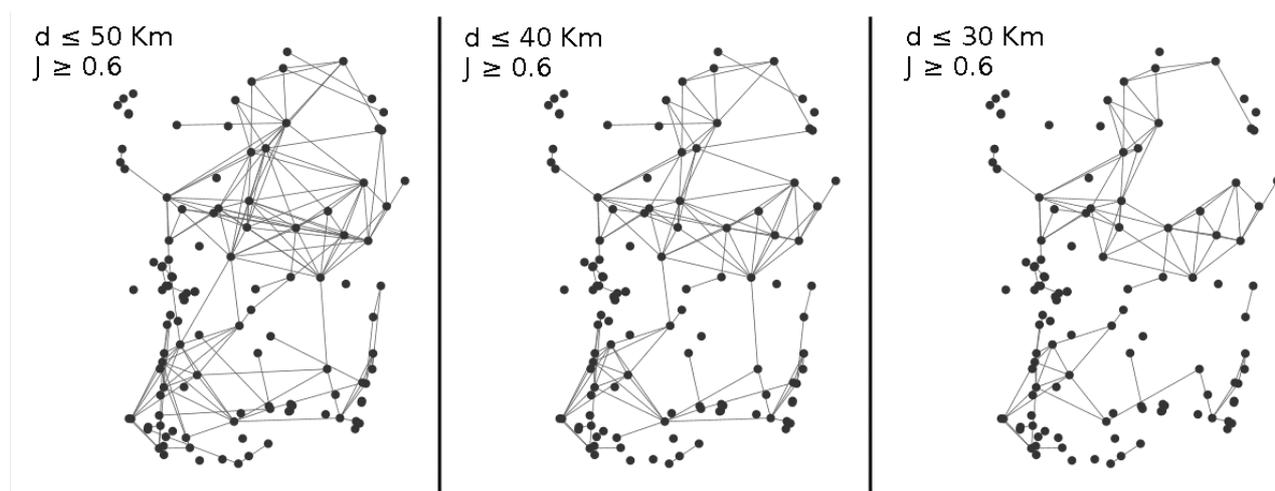


Figura 5 – Grafi di similarità basati sui dati sull'uso del suolo, con applicazione di una soglia per distanza geografica

Conclusioni

La costruzione di modelli matematici per una rete ecologica avviene sulla base di osservazioni sul territorio, effettuate da esperti di settore. Bisogna tuttavia considerare che, nonostante i crescenti sforzi per l'armonizzazione delle modalità con cui la raccolta di queste informazioni avviene, vi sono ugualmente delle limitazioni dovute al carattere prettamente locale di questa attività. La costruzione di un modello generale risulta perciò non immediata, ed è frequente il ricorso a modelli che rappresentino casi di interesse specifico. Nel caso del progetto Natura 2000, un'ulteriore difficoltà è insita nella necessità di integrare fonti diverse per supplire alla mancanza di informazioni sul territorio esterno ai siti riconosciuti.

La disponibilità di dati pubblici risulta comunque più che adeguata alla costruzione di modelli basati sulla similarità tra i siti. Questi modelli possiedono un grado maggiore di generalità, sebbene risulti ugualmente necessaria una scelta oculata dei parametri perché il confronto con i casi di studio sia significativo.

Laddove la finalità dello studio includa la proposta di modificazioni sul territorio, l'integrazione con i dati sull'uso del suolo provenienti dal progetto Corine Land Cover risulta indispensabile per le verifiche della contiguità sul territorio, e rende possibile un'analisi preliminare, che preceda la raccolta ad hoc di dati sul territorio.

Note

* Questo contributo è redatto nell'ambito del Programma di Ricerca "Natura 2000: Valutazione dei piani di gestione e studio dei corridoi ecologici come Rete complessa", finanziato, per gli anni 2015-2018, dalla Regione Autonoma della Sardegna, nel quadro del Bando per la presentazione di "Progetti di ricerca fondamentale o di base", annualità 2013, sviluppato presso il Dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università di Cagliari.

** Il presente articolo è stato prodotto durante la frequenza del corso di dottorato in Informatica dell'Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2015/2016 - XXVIII ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 - Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività I.3.1 "Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell'ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell'energia e dello sviluppo sostenibile, dell'agroalimentare e dei materiali tradizionali.

Riferimenti bibliografici

- Beier, P., Noss, R.F. (1998), "Do Habitat Corridors Provide Connectivity?", *Conservation Biology*, 12: 1241-1252.
- Caro, T.M. (2003), "Umbrella species: critique and lessons from East Africa", *Animal Conservation*, 6 (2): 171-181
- Costa, L. da F., Rodrigues, F.A., Travieso, G., Boas, P.R.V. (2007), "Characterization of complex networks: A survey of measurements", *Advances in Physics*, 56: 167-242
- Diamond, J.M. (1975), "The Island Dilemma: Lessons of Modern Biogeographic Studies for the Design of Natural Reserves", *Biological Conservation*, 7 (2): 129-146
- Fleury, A.M., Brown, R.D. (1997), "A framework for the design of wildlife conservation corridors With specific application to southwestern Ontario", *Landscape and Urban Planning*, 37: 163-186
- Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J.R., Beard, K.H. (2010), "A Meta-Analytic Review of Corridor Effectiveness", *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 24 (3): 660-668
- Minor, E. S., Urban, D.L. (2008), "A Graph-Theory Framework for Evaluating Landscape Connectivity and Conservation Planning", *Conservation Biology*, 22 (2): 297-307
- Roberge, J.-M., Angelstam, P. (2004), "Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool", *Conservation Biology*, 18 (1): 76-85
- Roberts, C.M., Halpern, B., Palumbi, S.R., Warner, R.R. (2001), "Designing Marine Reserve Networks Why Small, Isolated Protected Areas Are Not Enough", *Conservation in Practice*, 2: 10-17
- Rosenberg, D.K., Noon, B.R., Meslow, E.C. (1997), "Biological Corridors: Form, Function, and Efficacy", *BioScience* 47: 677-687
- Urban, D., Keitt, T. (2001), "Landscape Connectivity: A Graph-Theoretic Perspective", *Ecology*, 82: 1205-1218
- Urban, D.L., Minor, E. S., Treml, E.A., Schick, R.S. (2009), "Graph Models of Habitat Mosaics", *Ecology Letters*, 12 (3): 260-273
- Vimal, R., Mathevet, R., Thompson, J. D. (2012), "The changing landscape of ecological networks", *Journal for Nature Conservation*, 20 (1): 49-55