

Le proprietà emergenti di un social network per i delfini

David Lusseau†

Dipartimento di Zoologia, Università di Otago, PO Box 56, Dunedin, Nuova Zelanda (lusda563@student.otago.ac.nz)

Raccolto 29.05.03; Accetto 02.06.03; In linea 04.07.03

Molte reti complesse, comprese le società umane, Internet, il World Wide Web e le reti elettriche, hanno proprietà sorprendenti che consentono ai vertici (individui, nodi, pagine Web, ecc.) di essere in stretto contatto e di trasferire rapidamente le informazioni tra di loro. Non si sa nulla delle proprietà emergenti delle società animali, ma ci si aspetterebbe che tendenze simili emergano dalla topologia delle reti sociali animali. Nonostante le sue piccole dimensioni (64 individui), la comunità di delfini tursiopi di Doubtful Sound ha le stesse caratteristiche. La connettività degli individui segue una distribuzione complessa che ha una distribuzione della legge di potenza senza scala per grandi k . Inoltre, la capacità di due individui di restare in contatto non è influenzata dalla rimozione casuale degli individui. La rimozione di individui con molti collegamenti con altri influisce sulla lunghezza del percorso di "informazione" tra due individui, ma, a differenza di altre reti senza scala, non frammenta la coesione della rete sociale.

Questi fenomeni di auto-organizzazione permettono alla rete di rimanere unita, anche in caso di eventi mortali catastrofici.

Parole chiave: reti senza scala; socialità; Delfino tursiopo; analisi di resilienza

1. INTRODUZIONE Reti

complesse che contengono molti membri come le società umane (Newman *et al.* 2002), il World Wide Web (WWW) (Lawrence & Giles 1999) o le reti elettriche (Watts & Strogatz 1998), hanno proprietà emergenti che consentono tutti i componenti (o vertici) della rete devono essere collegati da una breve catena di vertici intermedi. Recenti lavori teorici ed empirici sulle reti complesse mostrano che possono essere classificate in due categorie principali a seconda della probabilità, $p(k)$, che un vertice sia collegato con k vertici (Albert *et al.* 2000). Il primo tipo di rete – il modello casuale descritto da Erdős e Rényi (1959) e l'effetto piccolo mondo di Watts e Strogatz (1998) – ha una topologia abbastanza omogenea, con $p(k)$ seguenti abbassando una distribuzione di Poisson che raggiunge il picco in media di k . L'altra categoria, descritta da Barabási e Albert, è topologicamente eterogenea con $p(k)$ che segue una legge di potenza senza scala con esponente per k grande cioè $p(k) \propto k^{-\alpha}$ (Barabási & Albert 1999). Nel primo tipo di modello è improbabile che un vertice abbia molti collegamenti e la coesione della rete è mantenuta da fattori casuali "deboli"

links', in altre parole collegamenti tra due individui appartenenti a diversi cluster all'interno della rete (es. società umane; Newman *et al.* 2002). Nelle reti senza scala esistono vertici che fungono da hub di attività

perché possiedono molti collegamenti con altri vertici (ad esempio Internet; Barabási & Albert 1999).

Animali gregari e longevi, come i gorilla (*Gorilla gorilla*), i cervi (*Cervus elaphus*), gli elefanti (*Loxodonta africana*) e i delfini tursiopi (*Tursiops truncatus*) si affidano al trasferimento di informazioni per sfruttare il loro habitat (Janik 2000; Conradt & Roper 2003). Nonostante alcuni sforzi per comprendere come vengono comunicate queste informazioni, abbiamo ancora poca comprensione del modo in cui queste società sono organizzate per trasferire le informazioni. Ho studiato le proprietà della rete sociale dei delfini tursiopi (*Tursiops spp.*) presenti a Doubtful Sound (45°30' S, 167° E), Fiordland, Nuova Zelanda.

2. METODI

La popolazione di delfini tursiopi del Doubtful Sound è piccola, conta 60-65 individui e risiede tutto l'anno in questo fiordo (Williams *et al.* 1993). Ho definito le conoscenze sociali nella rete come 'compagnie preferite' (Connor *et al.* 2001), cioè individui che venivano visti insieme più spesso del previsto per caso. Ogni volta che un banco di delfini veniva incontrato nel fiordo tra il 1995 e il 2001, ogni membro adulto del banco veniva fotografato e identificato dai segni naturali sulla pinna dorsale. Questa informazione è stata utilizzata per determinare la frequenza con cui due individui sono stati visti insieme. Per misurare quanto strettamente due individui fossero associati nella popolazione (cioè quanto spesso si trovassero insieme) ho calcolato un indice di associazione di metà peso (HWI) per ciascuna coppia di individui (Cairns & Schwaeger 1987). Questo indice stima la probabilità che due individui vengano visti insieme rispetto alla probabilità di vedere uno qualsiasi dei due individui quando si incontra una scuola:

$$HWI = X \frac{X}{0.5(Ya Yb)},$$

dove X è il numero di banchi in cui il delfino a e il delfino b sono stati visti insieme; Y_a è il numero di scuole in cui è stato avvistato il delfino a ma non il delfino b ; e Y_b è il numero di scuole in cui è stato avvistato il delfino b ma non il delfino a .

In questa analisi sono stati considerati solo gli individui sopravvissuti ai primi 12 mesi dello studio, in modo che fossero disponibili informazioni sufficienti per analizzare le loro preferenze in associazione. Ho testato il significato di questi indici di associazione permutando casualmente gli individui all'interno dei gruppi (20.000 volte), mantenendo costanti le dimensioni del gruppo e il numero di volte in cui ciascun individuo è stato visto, utilizzando Socprog v. 1.3 (sviluppato da Hal Whitehead per Matlab, disponibile su <http://www.dal.ca/~hwhitehe/social.htm>). Dopo ciascuna permutazione, è stato calcolato l'HWI per ciascuna coppia e l'HWI osservato è stato confrontato con l'HWI ottenuto da ciascuna delle 20.000 permutazioni. Il numero di permutazioni non è stato scelto arbitrariamente: ho aumentato il numero di permutazioni eseguite fino a quando il valore p ottenuto dalla simulazione Monte Carlo non si è stabilizzato (Bejder *et al.* 1998). Se più del 95% dell'HWI atteso era inferiore all'HWI osservato, la coppia di delfini veniva definita come compagnia preferita. In altre parole, era più probabile che la coppia di delfini venisse vista insieme che per caso.

Ho confrontato questo social network con reti casuali che conterrebbero lo stesso numero di collegamenti e vertici. Ho studiato il diametro e il coefficiente di clustering di queste reti utilizzando Ucinet 6 (Borgatti *et al.* 2002). Il diametro d di una rete è definito come la lunghezza media dei percorsi più brevi tra due vertici qualsiasi. Quanto più piccolo è d , tanto più velocemente le informazioni possono essere trasferite tra un dato individuo. Ad esempio, la popolazione umana globale sembra avere un diametro pari a sei, il che significa che due esseri umani qualsiasi possono essere collegati utilizzando cinque conoscenti intermedi (Milgram 1967). Il coefficiente di clustering, C , fornisce una misura della parentela sociale degli individui all'interno della rete. Per ciascun vertice n fornisce la probabilità che due associati di n siano essi stessi associati.

3. RISULTATI Nel

corso dei 7 anni di osservazione è stata raccolta la composizione di 1292 scuole. C'erano 64 individui adulti in questo social network collegati da 159 compagni preferiti-

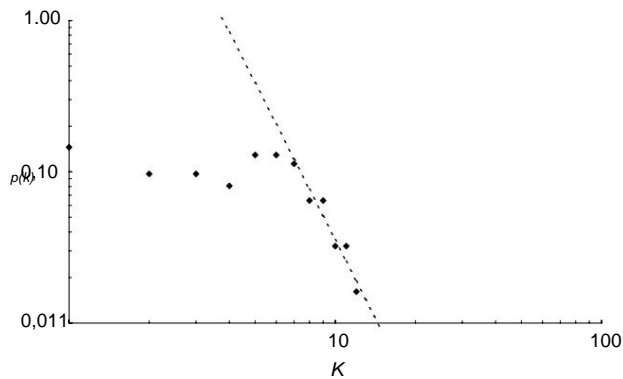


Figura 1. La funzione di distribuzione del numero di compagni preferiti (bordi, k) per ciascuno dei 64 individui nella rete dei delfini. Ci sono 159 archi tra questi delfini e la connettività media $k = 4,97$. La linea tratteggiata ha pendenza = $-3,45$. delfino

navi (bordi) e quindi la connettività media della rete, k , era $4,97$. Il numero di collegamenti posseduti da ciascun individuo non era distribuito secondo Poisson (test di bontà di adattamento: $G2 \text{ adj, df} = 12$

$= 26,48$, $p = 0,009$). La coda della distribuzione di $p(k)$ era simile a quella delle reti senza scala, mentre sembrava appiattirsi per $k = 7$. La coda della distribuzione, $k = 7$, sembrava seguire una legge di potenza con $-3,45 \pm 0,1$ (figura 1).

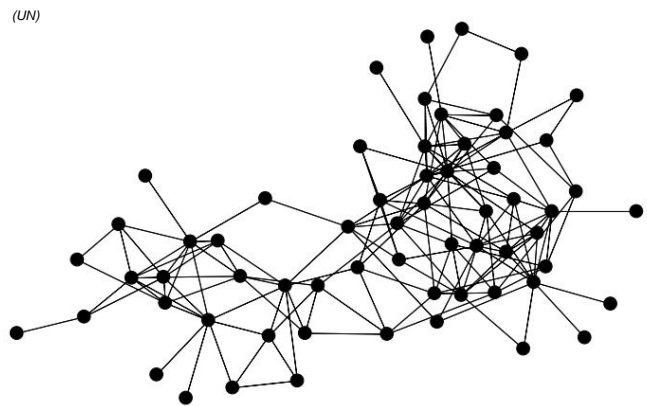
delfino

Sia le reti casuali che la rete dei delfini avevano diametri simili (figura 2, $d_{\text{dolphin}} = 3,36$; $d_{\text{random}} = 2,72$, $\text{se}(\text{random}) = 0,03$ su 10 reti casuali testate), ma la rete dei delfini aveva un livello di clustering molto più elevato ($C_{\text{dolphin}} = 0,303$; $C_{\text{random}} = 0,081$, $\text{se}(\text{casuale}) = 0,003$).

Non sorprende che la rete priva di scaglie di delfini fosse resistente agli attacchi casuali. Il diametro della rete è aumentato solo di $0,4$ con l'allontanamento del 20% degli individui (figura 3). Questi valori sono la media di 10 prove diverse per rimuovere i vertici in modo casuale. Il tasso medio di mortalità annuo osservato dal 1995 al 1999 variava dall'1,8% al 7,9% (Haase 2000), quindi i valori testati qui erano irrealisticamente alti. Gli attacchi mirati, cioè l'allontanamento dei soggetti con più associati, hanno però influito sul diametro della rete (figura 3). Il percorso più breve tra due individui qualsiasi è stato aumentato di $1,6$ con la rimozione del 20% degli individui (figura 3). La rete dei delfini non si è frammentata sotto attacchi mirati, ma ha mantenuto un ampio cluster che comprende la maggior parte degli individui (figura 4). Anche quando più del 30% degli individui veniva rimosso, in modo casuale o selettivo, la rete era caratterizzata dalla presenza di un ampio cluster che comprendeva la maggior parte degli individui presenti e singoli individui senza associati (figura 4).

4. DISCUSSIONE

Questa rete sociale era caratterizzata dalla presenza di 'centri' di associazioni, il che dimostra che non tutti gli individui hanno un ruolo uguale in questa società. Questi hub erano principalmente femmine adulte, con l'eccezione di un maschio adulto, e sembravano essere individui più anziani (molte cicatrici e dimensioni maggiori). Questi individui sembrano svolgere un ruolo nel mantenere un breve percorso informativo tra gli individui della popolazione.



(B)

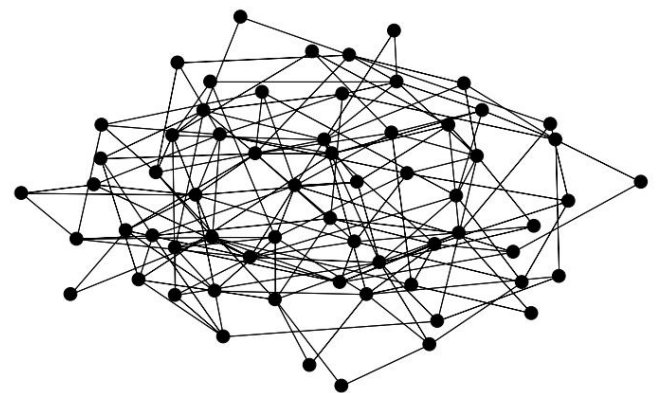


Figura 2. Illustrazione della rete dei delfini e di una rete casuale costruita con caratteristiche simili ($n = 64$, $k = 4,97$). Queste reti sono state costruite utilizzando Netdraw come parte del software Ucinet (Borgatti *et al.* 2002). (a) Rete del piccolo mondo dei delfini. La rete è disomogenea, alcuni vertici hanno un gran numero di collegamenti e molti ne hanno solo uno o due. (b) La rete casuale è omogenea, il numero di collegamenti che ciascun vertice ha segue una distribuzione di Poisson.

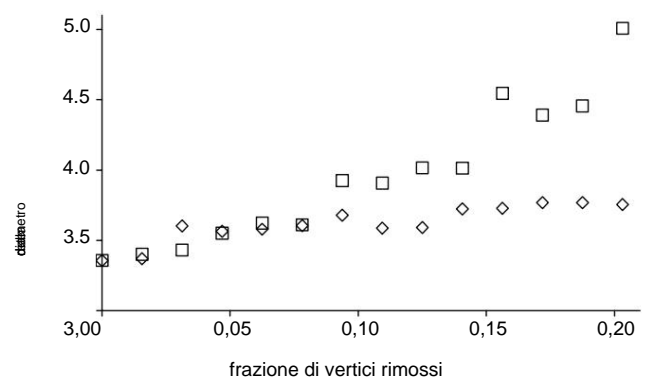


Figura 3. Cambiamenti nel diametro della rete sociale dei delfini con la frazione di vertici rimossi. Quando la selezione dei vertici da rimuovere è casuale (attacchi casuali, diamanti), le variazioni del diametro sono minori anche dopo la rimozione di un numero irrealistico di vertici (0,20).

Quando vengono rimossi i vertici con molti collegamenti (attacchi mirati, quadrati), il cambiamento di diametro è evidente ma differisce in grandezza dal comportamento di altre reti di piccoli mondi sotto attacchi simili (Albert *et al.* 2000).

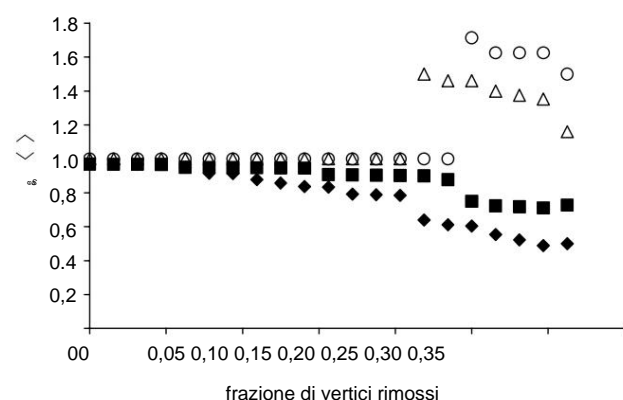


Figura 4. Frammentazione della rete sotto attacchi casuali e mirati. La dimensione del cluster più grande nella rete (S) è relativa al numero totale di individui nella rete e quindi varia da 0 a 1. La dimensione media s dei cluster isolati (ovvero cluster diversi da quello più grande) è 1 se tutti i cluster isolati sono composti da singoli individui isolati. La dimensione media s è maggiore di 1 se i cluster isolati sono una combinazione di piccoli cluster contenenti 1 o più individui. Lo schema di frammentazione è simile sia negli attacchi casuali (quadrati, S ; cerchi, s), sia in quelli mirati (diamanti, S ; triangoli, s). Anche dopo la rimozione di un numero irrealistico di individui (Haase 2000), il cluster più grande contiene la maggior parte degli individui presenti nella rete (contrariamente ad altre reti di piccolo mondo sotto attacchi mirati).

La rimozione dei poli associativi (cioè degli individui con molti associati) ha modificato il diametro della rete. Tuttavia, questo aumento è stato insignificante rispetto alle reti senza scala precedentemente studiate (Albert *et al.* 2000). Ad esempio, il diametro di due grandi reti (Internet e WWW) è più che raddoppiato quando è stato rimosso il 2% dei nodi con il maggior numero di collegamenti (Albert *et al.* 2000). Le reti casuali e senza scala vengono tipicamente frammentate in piccoli cluster sotto attacchi mirati (Albert *et al.* 2000). Questo non è stato il caso del social network dei delfini. Gli individui con molti compagni non mantengono la coesione della rete, tuttavia non tutti gli individui della rete svolgono un ruolo simile nella sua coesione (figura 4). L'elevato coefficiente di clustering della rete può rivelare un elevato livello di ridondanza nelle connessioni. Questa ridondanza consentirebbe un aumento della resilienza della rete alle morti, assicurando che esistano diversi percorsi brevi tra due individui qualsiasi nella rete. Nonostante questa apparente ridondanza nella connettività, k rientrava ampiamente nell'intervallo di altre reti senza scala ($k_{\text{Internet}} = 3.4$, $k_{\text{WWW}} = 5.46$ e $k_{\text{actors}} = 28.78$ (Barabási & Albert 1999; Albert *et al.* 2000). Tuttavia, la distribuzione dei numeri di collegamento differivano anche dalle tipiche reti senza scala poiché si appiattivano per k 7. Alcuni

le reti sociali umane sono state descritte con caratteristiche di distribuzione simili (Barabási & Albert 1999). La resilienza della rete dei delfini alla rimozione degli individui può essere correlata a questa porzione appiattita della distribuzione. Non c'erano cricche (gruppi di vertici in cui tutti i vertici sono collegati tra loro) con più di cinque individui nella rete e solo tre cricche

contenenti cinque individui ciascuno. Sembra quindi che gli individui con un numero intermedio di associati (da quattro a sette) svolgano un ruolo importante come collegamenti ridondanti tra le diverse sezioni della rete.

I benefici derivanti da questa resilienza emergente sono evidenti. Le proprietà di resilienza di questa rete consentono il mantenimento di una società coesa anche in caso di catastrofe che comporterebbe la perdita di oltre un terzo della popolazione. Inoltre, le proprietà di scalabilità sono vantaggiose per una rete che si evolve nel tempo.

Permettono l'assimilazione di nuovi vertici senza interrompere la coesione della rete (Barabási & Albert 1999).

Questa è una delle reti più piccole, di qualsiasi tipo, in cui sono state osservate proprietà emergenti senza scala. Fornisce un'ulteriore prova del fatto che questi fenomeni di auto-organizzazione non dipendono esclusivamente dalle caratteristiche dei singoli sistemi, ma sono leggi generali delle reti in evoluzione. La resilienza di questo social network dei delfini agli attacchi selettivi e casuali dovrebbe essere esplorata ulteriormente. Tali proprietà potrebbero essere vantaggiose se applicate ad altre reti (il WWW, Internet) che possono essere seriamente danneggiate da attacchi mirati (Albert *et al.* 2000).

Ringraziamenti

Durante questo studio ho ricevuto una borsa di studio Bridging dell'Università di Otago. Questa ricerca è stata finanziata dal New Zealand Whale and Dolphin Trust, dal Dipartimento di Conservazione della Nuova Zelanda e da Real Journeys Inc. L'Università di Otago (Divisione di Scienze, Dipartimenti di Zoologia e Scienze Marine) ha fornito ulteriore supporto finanziario e tecnico. Le informazioni sulla composizione del gruppo sono state raccolte da Karsten Schneider (1995–1997), Patti Haase (1999), Oliver J. Boisseau (2001) e l'autore (1999–2001). Ringrazio due revisori anonimi per i loro contributi che hanno notevolmente migliorato la qualità di questo manoscritto.

- Albert, R., Jeong, H. & Barabási, AL 2000 Errore e tolleranza agli attacchi di reti complesse. *Natura* **406**, 378–381.
- Barabási, AL & Albert, R. 1999 Emergenza del ridimensionamento in reti casuali. *Scienza* **286**, 509–512.
- Bejder, L., Fletcher, D. & Brañger, S. 1998 Un metodo per testare modelli di associazione di animali sociali. *Ann.Behav.* **56**, 719–725.
- Borgatti, SP, Everett, MG & Freeman, LC 2002 Ucinet per Windows: software per l'analisi dei social network. Harvard: Tecnologie analitiche. Vedere <http://www.analytictech.com>.
- Cairns, JS & Schwaiger, SJ 1987 Un confronto tra indicatori di associazione ces. *Ann.Behav.* **35**, 1454–1469.
- Connor, RC, Heithaus, MR & Barre, LM 2001 Struttura sociale complessa, stabilità dell'alleanza e accesso all'accoppiamento in una "super-alleanza" dei delfini tursiopi. *Proc.R.Soc.Lond. B* **268**, 263–267. (DOI 10.1098/rspb.2000.1357.)
- Conradt, L. & Roper, TJ 2003 Processo decisionale di gruppo negli animali. *Natura* **421**, 155–158.
- Erdo's, P. & Re'nyi, A. 1959 Sui grafici casuali. *Publ.Math.* **6**, 290–297.
- Haase, P. 2000 Organizzazione sociale, comportamento e parametri della popolazione dei delfini tursiopi a Doubtful Sound, Fiordland. Tesi di Master, Università di Otago, Dunedin, Nuova Zelanda.
- Janik, VM 2000 Abbinamento con fischio nei delfini tursiopi selvatici (*Tursiops truncatus*). *Scienza* **289**, 1355–1357.
- Lawrence, S. & Giles, CL 1999 Accessibilità delle informazioni sul Web. *Natura* **400**, 107–109.
- Milgram, S. 1967 Il problema del piccolo mondo. *Psychol.Today* **2**, 60–67.
- Newman, MEJ, Watts, DJ & Strogatz, SH 2002 Modelli a grafo casuale di reti sociali. *Proc.Natl Acad.Sci.* **99**, 2566–2572.
- Watts, DJ & Strogatz, SH 1998 Dinamiche collettive di 'piccoli-reti mondiali. *Natura* **393**, 440.
- Williams, JA, Dawson, SM & Slooten, E. 1993 L'abbondanza e la distribuzione del delfino tursiopo (*Tursiops truncatus*) a Doubtful Sound, Nuova Zelanda. *Can.J.Zool.* **71**, 2080–2088.