

# COME STIMARE LA DENSITA' DI POPOLAZIONI ANIMALI USANDO LE TRAPPOLE FOTOGRAFICHE SENZA LA NECESSITA' DI RICORRERE AL RICONOSCIMENTO INDIVIDUALE.

**Autori:** Rowcliffe, J. Marcus; Field, Juliet; Turvey, Samuel T.; Carbone, Chris

Traduzione a cura di Camilla Gotti

## Riassunto

1.

La stima della densità è di importanza fondamentale nella gestione della fauna. L'uso di fototrappole per stimare la densità animale fino ad ora si è limitata a analisi tramite metodo di cattura-ricattura di specie che permettessero l'identificazione individuale. Questo studio sviluppa un metodo che elimina i requisiti di riconoscimento individuale degli animali tramite la costruzione di un modello che sfrutta i processi di contatto tra gli animali e le fotocamere.

2.

Il modello fornisce un fattore che mette in relazione linearmente la frequenza di trappolaggio (trapping rate) con la densità, dipendendo da due variabili biologiche chiave (dimensione media del gruppo di animali e range giornaliero) e due caratteristiche del sensore della fotocamera (distanza e angolo entro i quali l'animale viene fotografato).

3.

Abbiamo testato questo approccio in un parco faunistico recintato con abbondanze note di quattro specie differenti, ottenendo stime accurate in tre casi su quattro. La non accuratezza della quarta specie è stata causata dall'errato collocamento delle fototrappole in relazione alla distribuzione della specie.

4.

### *Sintesi e applicazioni.*

Se le trappole fotografiche vengono posizionate correttamente e le misurazioni dei parametri necessari vengono eseguite accuratamente, questo modello matematico fornisce la possibilità di ridurre molto i costi di lavoro per stimare la densità di popolazioni di fauna selvatica rendendo anche possibili stime là dove prima non lo era.

## Introduzione

Il trappolaggio fotografico utilizza fotocamere fisse, innescate da sensori a infra-rosso, per "catturare" immagini degli animali che vi passano davanti. È una tecnica quantitativa che ha costi relativamente bassi di lavoro, è non invasiva, implica minimo disturbo ambientale (Henschel & Ray 2003; Silveira, Jacomo & Diniz-Filho 2003), è resistente a variazioni delle condizioni del terreno e del clima, e, soprattutto, può essere efficacemente utilizzato per ottenere informazioni su specie estremamente elusive e in territori difficili dove altre metodologie sono verosimilmente fallimentari (Karanth & Nichols 1998; O'Brien, Kinnaird & Wibisono 2003; Silveira, Jacomo & Diniz-Filho 2003).

Inoltre, le trappole fotografiche sono egualmente efficienti nel raccogliere dati sia di giorno che di notte e offrono la possibilità di raccogliere informazioni addizionali sulla distribuzione e sull'uso dell'habitat delle specie (Henschel & Ray 2003; Silveira, Jacomo & Diniz-Filho 2003), sulla struttura di popolazione e sul comportamento (Silveira, Jacomo & Diniz-Filho 2003; Wegge, Pokheral & Jnawali 2004). Innanzitutto, il numero di fotografie scattate per unità di tempo (frequenza di trappolaggio) contiene informazioni riguardo la densità di una specie. In supporto a questa affermazione, una correlazione significativa tra frequenze di trappolaggio e stime indipendenti di densità è stata dimostrata su differenti specie a Sumatra (O'Brien, Kinnaird & Wibisono 2003). Ad ogni modo, l'applicazione della frequenza di trappolaggio come indice di abbondanza (Carbone et al. 2001; Silveira, Jacomo & Diniz-Filho 2003) è controversa, sia sul piano teorico che pratico (Jennelle, Runge & MacKenzie 2002; Karanth et al. 2003). Questo è principalmente dovuto al fatto che non stima la probabilità di rilevamento e può quindi essere influenzato dalla variazione di questo fattore (MacKenzie et al. 2002; Pollock et al. 2002). Secondo un'interpretazione estrema, questo potrebbe significare che correlazioni tra frequenza di trappolaggio e densità sono attendibili solo una volta ricalibrate per ogni località e periodo a cui sono applicate. Una ben consolidata e valida metodologia per aggirare questo problema è utilizzare modelli di cattura-ricattura per stimare l'abbondanza, che sono basati sul ritrappolaggio di individui riconoscibili tramite le fotocamere (Karanth 1995; Karanth & Nichols 1998; Maffei et al. 2005). Questo metodo è preferibile agli indici di frequenza di trappolaggio perchè in grado di fornire robuste e obiettive stime di densità che siano comparabili attraverso siti differenti (Jennelle, Runge & MacKenzie 2002; Wilson & Delahay 2001; Srbeek-Araujo & Chiarello 2005). Comunque, il metodo è limitato a specie che presentino caratteristiche naturali uniche per

ogni individuo o, in linea di principio, per quelle in cui un campione può essere marcato individualmente precedentemente al fototrappolaggio (Trolle & Kery 2003). Relativamente poche specie hanno marchi naturali sufficientemente variabili da poter permettere un riconoscimento individuale, difatti molti studi tramite fototrappolaggio si concentrano su felidi dal mantello maculato o striato (Karanth & Nichols 1998; Henschel & Ray 2003; Maffei et al. 2005). Inoltre, sebbene sia da poco disponibile un metodo robusto per misurare l'area effettivamente campionata in studi di cattura – ricattura (Borchers & Efford, in stampa), molti studi di fototrappolaggio hanno fino ad ora utilizzato approcci ad hoc per far fronte a questo problema, come distanze medie percorse tra le catture e misure indipendenti di ampiezza di home range (Soisalo & Cavalcanti 2006).

Queste metodologie non hanno una vera base teorica e la loro affidabilità è discutibile (Williams, Nichols & Conroy 2002). Specie senza marcature individuali sono state scarsamente considerate nella recente ricerca tramite fototrappolaggio, in quanto la considerazione era limitata ampiamente alle specie presenti negli inventari dei mammiferi (Trolle 2003; Srbeek-Araujo & Chiarello 2005) o come supplemento di una specie target riconoscibile individualmente (O'Brien, Kinnaird & Wibisono 2003). Modelli di occupancy (MacKenzie et al. 2002) e dimensione di popolazione (Royle & Nichols 2003; Stanley & Royle 2005) che possano stimare le probabilità di rilevamento del fototrappolaggio forniscono un importante vantaggio in tal senso. Ad ogni modo, attualmente tali metodi non offrono stime di densità e l'estensione delle metodologie di fototrappolaggio anche per le specie non distinguibili individualmente amplierebbe notevolmente il valore di questa tecnica.

Jennelle, Runge & MacKenzie (2002) suggeriscono che un metodo efficace per ottenere stime di densità tramite fototrappolaggio consisterebbe nel costruire un modello del processo di osservazione. Vi presentiamo tale modello, e forniamo una prova su campo della sua affidabilità comparando stime di densità ottenute tramite fototrappolaggio con densità conosciute di differenti specie in un grande parco faunistico recintato. Usando delle simulazioni, esaminiamo anche in che modo la precisione della stima vari al variare dello sforzo di campionamento e della distribuzione spaziale.

## METODI

### Stima della densità dalla frequenza di trappolaggio

I fisici hanno usato modelli meccanicistici per descrivere le frequenze di collisione delle molecole di gas per almeno 150 anni, e i biologi solo recentemente hanno adattato tali modelli per descrivere le frequenze di contatto, per esempio tra gruppi animali, tra animali e osservatori e tra spermatozoi e cellule uovo. I modelli classici bidimensionali prevedono che ci sia una zona circolare intorno all'oggetto entro cui avviene il contatto. In contrasto, la zona di contatto di una trappola fotografica ha una forma diversa, cioè ha un'area a forma di sezione circolare entro cui il sensore IR della camera può essere attivato dal passaggio di un animale. In questo studio gli autori hanno derivato un modello che descrive le frequenze di contatto tra animali e trappole fotografiche da cui è possibile ottenere un estimatore della densità animale.

Per capire meglio le basi del modello ideale bidimensionale dei gas, immaginiamo una particella che si muove nello spazio, coprendo un'area che è il prodotto dell'ampiezza della particella per la distanza totale in cui essa si è mossa in un dato tempo. Il numero atteso di contatti tra particelle in un dato periodo è semplicemente il rapporto tra l'area coperta da tutte le particelle presenti e l'area totale entro cui sono contenute (Hutchinson & Waser 2007). Per un oggetto stazionario con una zona circolare di rilevamento entro cui avviene il contrasto, l'area coperta da un animale in movimento è facilmente calcolabile come prodotto della velocità dell'animale ( $v$ ) moltiplicata per il tempo ( $t$ ), e moltiplicata 2 volte per il raggio della zona di rilevamento ( $r$ ) della trappola fotografica e per il numero di particelle presenti, dato dal prodotto della densità e dell'area ( $DA$ ). Dividendo l'area coperta per  $A$ , il numero di contatti ( $y$ ) è indipendente dall'area campionata:

$$y = 2rtvD \quad \text{eqn 1}$$

Per le fototrappole la zona di rilevamento ha una forma a settore circolare con un raggio  $r$  e un angolo  $\theta$  (fig. 1), invece che circolare, e l'ampiezza del percorso coperto da un animale non è più  $2r$  ma una variabile dipendente dall'angolo di avvicinamento. L'ampiezza del percorso coperto in questo caso può essere definita come l'ampiezza del profilo presentato all'animale dalla zona di rilevamento, calcolato in media attraverso tutti i possibili angoli di approccio. La

fig. 1 definisce questi profili per l'angolo di approccio  $\pi$  e, poichè in questo caso è simmetrico, il profilo medio attraverso tutti i possibili angoli di approccio è dato da:

$$\frac{2 \int_{(\pi-\theta)/2}^{\pi/2} 2r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\gamma) d\gamma + 2 \int_{\theta}^{\pi/2} r \sin(\gamma) d\gamma + r\theta}{(\pi-\theta/2)} =$$

$$\frac{4\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi-\theta}{2}\right) + 2\cos(\theta) + \theta}{\pi} = r \frac{2+\theta}{\pi}$$

eqn 2

dove  $\gamma$  è l'angolo opposto al profilo da essere misurato. Il numero atteso di contatti tra animali e trappole fotografiche (ogni contatto provoca una fotografia) è quindi dato da:

$$y = \frac{2+\theta}{\pi} r v D$$

eqn 3

Riarrangiando la formula si ottiene la densità come funzione della frequenza di cattura (il numero di fotografie per unità di tempo,  $y/t$ ), la velocità di movimento dell'animale ( $v$ ), e le dimensioni della zona di rilevamento della fotocamera ( $r$  e  $\theta$ ):

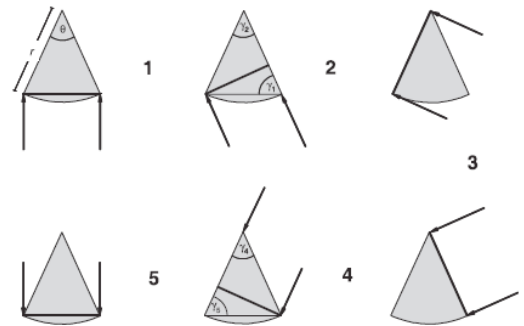
$$D = \frac{y}{t} \frac{\pi}{v r (2+\theta)}$$

eqn 4

Quest'ultima equazione permette di stimare la densità dai dati di frequenza di trappolaggio, in combinazione con valori precisi degli altri parametri.

Quando gli animali si muovono in gruppi coesivi è invece necessaria una modifica a questa formula perchè in questo caso l'unità indipendente registrata dalla camera è il gruppo di animali piuttosto che il singolo individuo. In questo caso  $D$  nell'eqn 4 è la densità del gruppo e deve essere moltiplicata per una stima indipendente e precisa della dimensione media dei gruppi ( $g$ ) per dare la densità individuale degli animali. E' anche importante notare che settando  $\theta = 0$  nell'eqn 4 si può ottenere la formula FMP descritta da Stephens et al (2006) per stimare la densità degli animali dalla frequenza di contatto tra tracce animali e transetti lineari.

**Fig. 1.** Diagramma che illustra la variazione nei profili presentati agli animali che si avvicinano da angoli differenti alla zona di rilevamento della trappola fotografica. Le direzioni di avvicinamento sono indicate dalle frecce, la zona di rilevamento è l'area ombreggiata, definita dalla distanza radiale  $r$  e dall'angolo  $\theta$ , e i profili presentati sono indicati dalle linee solide. Sono mostrati sei casi limite per angoli di avvicinamento  $\pi$ , con cinque transizioni risultanti. Gli angoli opposti ai profili,  $\gamma$ , sono indicati per le transizioni 1, 2, 4 e 5 (il profilo per la transizione 3 è costante e non è necessario indicare l'angolo). Le ampiezze dei profili e i range di  $\gamma$  per ogni transizione sono dati da: transizione 1 e 5,  $2r \sin(\theta/2) \sin(\gamma)$ ,  $(\pi - \theta)/2 \leq \gamma \leq \pi/2$ ; transizione 2 e 4:  $r \sin(\gamma)$ ,  $\theta \leq \gamma \leq \pi/2$ ; transizione 3:  $r$  per l'angolo di avvicinamento  $\theta$ .



## STIMA DELLA VARIANZA

La varianza può essere stimata attraverso un bootstrapping non-parametrico (Efron e Tibshirani, 1993), ricampionando le localizzazioni della fotocamera con sostituzione e prendendo la varianza di un largo numero di stime di densità ricampionate. Le varianze dei parametri stimati indipendentemente ( $v$ ,  $g$ ,  $r$ , e  $\theta$ ) possono essere incorporate usando il metodo delta (Seber, 1982), aggiungendo i coefficienti della variazione al quadrato a quelli derivati dal bootstrapping per ottenere un coefficiente totale quadrato della variazione per la stima di densità. Negli studi di campo presentati

sotto in questo articolo, i parametri relativi alle fotocamere,  $r$  e  $\theta$ , sono stati misurati senza la varianza del campionamento e quindi si assume che per tali valori la varianza sia zero. Ciononostante, a causa delle piccole dimensioni del campione nello studio di campo, la precisione è stata generalmente bassa (soprattutto per le stime di velocità di movimento) e come stime di densità sono stati perciò presentati degli intervalli di confidenza log-normali. La precisione delle stime può spesso essere migliorata stratificando la stima. In questo studio, la densità totale è calcolata come la media delle stime di densità in differenti zone, pesata sull'area di queste zone. Gli intervalli di confidenza per le stime stratificate sono dati dal ricampionamento, con sostituzione dentro zone ma senza sostituzione tra esse, così mantenendo quindi il numero di posizionamenti delle fotocamere per zona lo stesso del numero che si aveva nei dati originali.

## TEST DI CAMPO

Il lavoro su campo è stato eseguito in un periodo di 6 settimane dal 13 giugno al 24 luglio 2005 presso il Whipsnade Wild Animal Park, che si trova in Bedfordshire, nel Sud dell'Inghilterra.

Nel parco sono presenti varie specie di animali totalmente liberi, rinchiusi in un'area di 226 ettari recintata da una rete. Per questa analisi l'attenzione è stata focalizzata su 4 specie: Wallaby collo rosso (*Macropus rufogriseus*), Cervo d'acqua cinese (*Hydropotes inermis*), Cervo di Reeve (*Muntiacus reevesi*) e Mara (*Dolichotis patagonum*) (è una specie di capibara). Il parco può essere suddiviso in 4 aree in funzione della presenza di 4 tipologie principali di habitat: due aree di prati aperti con vegetazione sparsa, un'area di prato grezzo con terreno molto sconnesso e un'area con un misto di case abitate, strade, prati inglesi e qualche albero sparso. Ogni specie usa queste aree in modo differenziale e prevedibile, originando anche delle differenze di densità in ciascuna area dentro il parco.

## SETTAGGI DELLE FOTOTRAPPOLE E PARAMETRI

Per i test eseguiti in questo studio sono state usate 6 fotocamere trappola modello DeerCam DC300 (Non Typical Inc., Wisconsin, USA; [www.deercam.com](http://www.deercam.com)). Si tratta di sensori a infrarosso termico passivo e motion-detectors collegati ad una fotocamera analogica 35-mm che registra la data e l'ora di ogni fotografia scattata. Le fotocamere sono state caricate con pellicola a colori da 36 scatti a 200 ASA.

La posizione delle fototrappole è stata cambiata circa ogni 10 giorni, quindi durante tutto il periodo di test si sono avute 3 fasi di trappolaggio; però dopo i primi 10 giorni una fototrappola si è rotta, dunque nello studio si sono avuti 16 posizionamenti unici delle fotocamere. Sei di queste erano nelle valli, quattro presso la vecchia fattoria, tre presso il paddock dell'istituto e tre nel parco centrale. In quanto vincolati dalla scelta di aree accessibili e che presentassero punti di attacco adeguati e rivolti verso aree aperte, le trappole sono state posizionate semi-sistematicamente, selezionando le localizzazioni in modo da ottenere una buona copertura di ogni area del parco.

Le trappole sono state posizionate a circa 0,75 metri sopra il terreno, per mirare i mammiferi di media taglia oggetto di questo studio; non è stato utilizzato alcun tipo di esca per attirare gli animali. Il tempo di delay tra foto è stato settato a 2 minuti. Questo periodo di attesa fornisce il giusto equilibrio tra l'esigenza di mantenere un campionamento continuo e il bisogno di evitare scatti multipli per ogni singolo contatto di un singolo animale o di un gruppo di animali che attiva ripetutamente il sensore della trappola mentre attraversa la zona coperta dai sensori (Henschel & Ray 2003). Le trappole sono state controllate quasi giornalmente. Nei casi in cui la pellicola terminava prima di esser sostituita, si determinava l'ora dell'ultimo scatto dallo sviluppo dell'ultima fotografia e il gap nel periodo di campionamento veniva rimosso prima delle analisi.

Per stimare i parametri relativi all'area coperta dal sensore,  $r$  e  $\theta$  sono stati stimati attraverso una serie di prove in cui una persona si avvicinava alle fotocamere a diverse velocità e da diverse direzioni, registrando se e in quale punto i sensori si attivavano. Allo scopo di stimare la distanza a cui un sensore si attiva ( $r$ ) la zona è stata attraversata perpendicolarmente al fascio del sensore, mentre l'arco  $\theta$  della zona di sensibilità è stato stimato attraversando la fotocamera parallelamente al fascio del sensore.

## STIMA DEI PARAMETRI ANIMALI

Allo scopo di determinare la densità partendo dalla frequenza di fototrappolaggio, sono necessarie delle stime indipendenti della velocità di movimento ( $v$ ) e della dimensione dei gruppi ( $g$ ), per ogni specie. Un parametro utile per stimare la velocità degli animali per il nostro scopo è rappresentato dal range di spostamento giornaliero (day range) che è stato calcolato da osservazioni focalizzate su alcuni individui selezionati arbitrariamente, seguendo ogni individuo per 30 minuti e registrando la distanza totale coperta durante questo tempo come somma di tutti i percorsi

lineari dell'animale. Le specie focali erano sufficientemente abituate alla presenza umana da non influenzare il comportamento degli animali. Sono state eseguite un totale di 10 osservazioni per ogni specie, tra le 08.00 e le 18.00 allo scopo di controllare ogni variazione dei patterns di movimento durante tutto il giorno. Lo spostamento giornaliero di ogni specie è stato calcolato quindi come la media di tutte le osservazioni focali per ogni specie. La dimensione media dei gruppi è stata stimata registrando sistematicamente il numero di individui in gruppo incontrati lungo dei transetti eseguiti su tutta l'area di studio.

### CENSIMENTO DEGLI ANIMALI

Un censimento completo è stato effettuato alla fine del periodo di fototrappolaggio tra le 9.30 e le 14.00 da una squadra di 12 censitori. In tre aree periferiche, una linea coordinata di censori separati tra loro da 20-40 m hanno percorso sistematicamente l'area contando tutti gli animali che attraversavano la linea. Ognuna di queste tre aree è stata coperta in un'unica battuta, precludendo ogni possibilità di conta doppia. Nel parco centrale, grandi recinzioni hanno impedito l'uso di questa tecnica e piccole squadre hanno contato sistematicamente aree centrali, coordinando i movimenti per assicurare la copertura completa senza la possibilità di conteggi doppi. Tale tecnica di censimento è stata usata annualmente nel parco per circa sei anni, ed è stata perfezionata per assicurare un elevato livello di confidenza del conteggio finale, rendendo non necessario un appoggio per campionamento.

### SIMULAZIONE DELLA PRECISIONE

Per analizzare l'influenza del variare dello sforzo di trappolaggio e delle diverse collocazioni spaziali delle fotocamere sulla precisione della stima, abbiamo simulato dei dati tenendo fissa la densità media totale, campionando i parametri del tempo, degli animali e dell'area di rilevamento della fototrappola e utilizzando l'equazione 3 per calcolare il numero medio atteso di fotografie per fotocamera. I dati di trappolaggio sono stati quindi generati estraendo numeri random di fotografie da una distribuzione binomiale negativa, con la media definita dal numero atteso di fotografie e la varianza definita o dal massimo osservato nei dati di campo o da una varianza molto più bassa, simile a Poisson, come ci si aspetterebbe se la densità animale fosse piuttosto uniforme, e il processo di trappolaggio fosse ben approssimabile al modello dei gas ideali (parametri di dispersione di binomiale negativa 0.4 e 20 per alta e bassa varianza, rispettivamente).

Le densità sono state stimate da queste frequenze di trappolaggio, ricampionando 10000 volte per ogni casistica e calcolando il coefficiente di variazione tra le stime di densità come una misura della precisione. Le simulazioni inizialmente hanno mantenuto il tempo di impiego costante a 10 giorni per fotocamera, variando il numero di fototrappole da 2 a 100. Un secondo set di simulazioni hanno mantenuto invece costante il numero di fototrappole a 20 variando il tempo di impiego da 1 a 50 giorni per fotocamera. In entrambi i casi, l'ammontare totale di tempo per fotocamera variava da 20 a 1000 giorni-fotocamera. Comunque, in pratica, sia il numero di fotocamere sia l'ammontare di tempo disponibile per l'indagine spesso sarebbe stato limitato, con la necessità di trovare un compromesso tra numero di locazioni e tempo per locazione. Un set finale di simulazioni infine ha fissato l'ammontare totale di tempo per fotocamera a 500 giorni-fotocamera, mentre variando il numero di uniche locazioni campionate tra 2 ( $250 \text{ giorni locazione}^{-1}$ ) e 100 ( $5 \text{ giorni locazione}^{-1}$ ). In tutte le simulazioni, la densità media è stata settata a  $10 \text{ km}^{-2}$ , la velocità di spostamento a  $1 \text{ km per giorno}^{-1}$ , l'estensione del gruppo  $g$  a 1, il raggio di rilevamento della fotocamera a 12 m e l'angolo di rilevamento  $\theta$  a 0.175 radianti. Le conclusioni non erano sensibili a nessuna di queste variabili.

**Tabella 1.** Sintesi dei dati di censimento e delle frequenze di fototrappolaggio, divisi per specie e zona.

	Downs	Institute Paddock	Old Farm	Central Park	Total
Area (km <sup>2</sup> )	0.49	0.28	0.23	1.26	2.26
Camera hours (day time)	898	440	543	317	2198
Census count					
Mara	15	2	0	136	153
Muntjac	3	0	5	22	30
Wallaby	544	213	185	120	1062
Water deer	36	10	133	91	270
Density (animals km <sup>-2</sup> )					
Mara	30	7	0	108	68
Muntjac	6	0	22	18	13
Wallaby	1101	760	803	96	468
Water deer	73	36	577	72	119
Day-time camera trap photographs					
Mara	3	1	2	3	9
Muntjac	10	1	4	23	38
Wallaby	225	195	78	38	536
Water deer	32	3	89	23	147
Trap rate (photographs 12 h s <sup>-1</sup> )					
Mara	0.04	0.03	0.04	0.11	0.05
Muntjac	0.13	0.03	0.09	0.87	0.21
Wallaby	3.01	5.32	1.72	1.44	2.93
Water deer	0.43	0.08	1.97	0.87	0.8

## Risultati

### RISULTATI DI CAMPO

I Wallaby erano la specie più abbondante nel censimento, seguiti dai Cervi d'acqua cinesi, i Mara e infine i Cervi di Reeve (Tabella 1).

Le densità locali variavano da più di 1000 km<sup>-2</sup> (Wallaby nelle valli) a 0 km<sup>-2</sup> (Mara nella fattoria vecchia e Cervi di Reeve nel paddock dell'istituto). Nonostante ciò, le fototrappole hanno rilevato tutte e quattro le specie in tutte e quattro le aree, confermando l'utilità di questa tecnica anche con basso livello di utilizzo.

È stato accumulato un totale di 3277 ore di fototrappolaggio in 16 stazioni di trappolaggio nei quattro siti. Comunque, siccome il calcolo di densità stime di range di spostamento giornaliero, il quale può essere ottenuto solo di giorno, nelle analisi seguenti sono state utilizzate solo le fotografie scattate di giorno, per un totale di 2198 ore di fototrappolaggio. La frequenza diurna di fototrappolaggio era significativamente correlata con la densità censita (Fig. 2a), sebbene la precisione della relazione fosse modesta ( $R^2 = 0,69$ ). Gli animali in genere si muovevano poco, in particolare i Wallaby, sebbene i Cervi di Reeve fossero considerevolmente più mobili delle altre specie (Tabella 2.). I Wallaby e i Cervi d'acqua cinesi non si riscontravano in gruppi, e fu perciò loro assegnata la grandezza del gruppo  $g = 1$ . I Mara, e per una certa misura anche i Cervi di Reeve, spesso si trovavano in coppie o in gruppi familiari, e la dimensione effettiva del gruppo era perciò più grande per queste specie (Tabella 2). Le densità stimate dalle frequenze di fototrappolaggio erano più strettamente correlate alle densità censite dei dati grezzi delle frequenze di trappolaggio [ $r^2 = 0.76$  usando la trasformazione  $\log_{10}(x + 1)$ ].

Ad ogni modo, più rilevantemente, i valori assoluti delle densità stimate erano sparsi attorno alla linea di eguaglianza delle densità censite (Fig. 2b). Questo indica nessun errore rilevante nelle stime di densità, suggerendo che la metodologia sviluppata da noi per estrarre densità assolute da dati di tasso di trappolaggio da buoni risultati. Una grossa eccezione pare comparire all'estremità inferiore del range di densità, dove la stima è basata su pochissime fotografie da solo tre locazioni delle fotocamere.

Inoltre, i totali censiti erano estremamente bassi in alcuni casi, rappresentando un singolo conteggio, che non può rappresentare perfettamente le densità medie a lungo termine raccolte dalle fototrappole. Dati tutti questi elementi, un ulteriore test di accuratezza predittiva è stato effettuato stimando le densità di tutto il parco dai dati delle fotocamere e comparando questi risultati con le densità censite (Fig. 3). Per i Cervi di Reeve, i Wallaby e i Cervi d'acqua, le densità stimate non differivano significativamente (entro il 22%) dai risultati dei censimenti. Comunque, il numero di Mara stimato era dell'86% più basso di quello osservato.

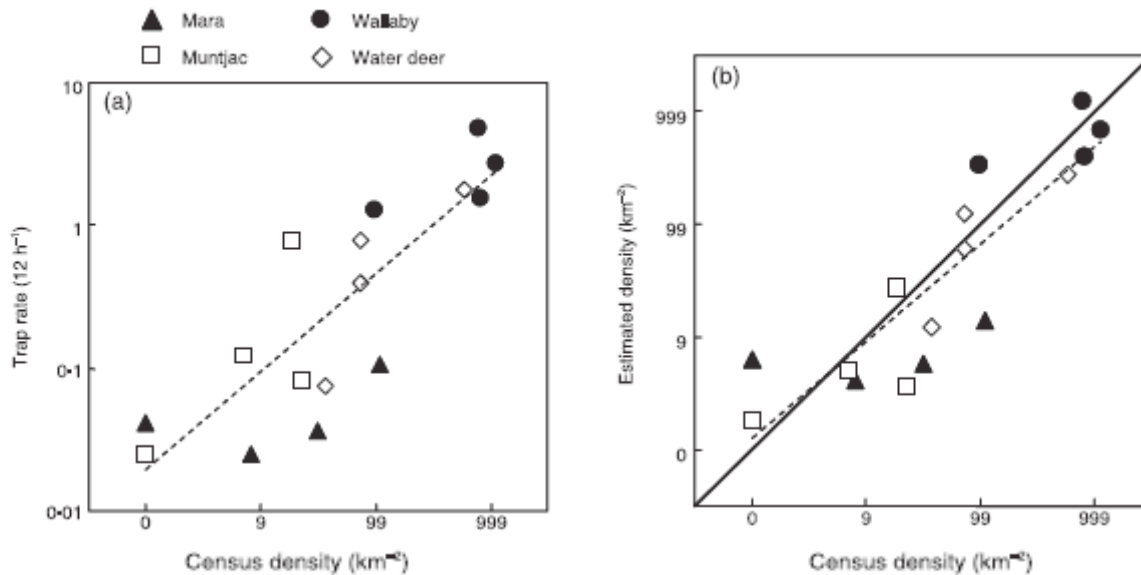


Fig. 2. (a)

Frequenze di trappolaggio e (b) densità stimate delle quattro specie focali graficate con le densità censite (notare la scala logaritmica). Le linee tratteggiate indicano le linee di regressione lineare; la linea solida in (b) è la linea di uguaglianza (stimato = censito). Punti ripetuti per ogni specie rappresentano le quattro aree del parco.

Tabella 2. Riassunto delle variabili indipendenti necessarie per calcolare la densità animale dalla frequenza di fototrappolaggio (varianza tra parentesi).

	Mara	Muntjac	Wallaby	Water deer
Average day range ( $v$ , km day <sup>-1</sup> )	2.56 (11-57)	8.27 (36-87)	0.71 (1-27)	1.17 (2-22)
Average group size ( $g$ )	1.8 (0-4)	1.5 (0-28)	1 (0)	1 (0)
Detection arc ( $\theta$ , radians)	0.175			
Detection distance ( $\alpha$ , km)	0.012			

## RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

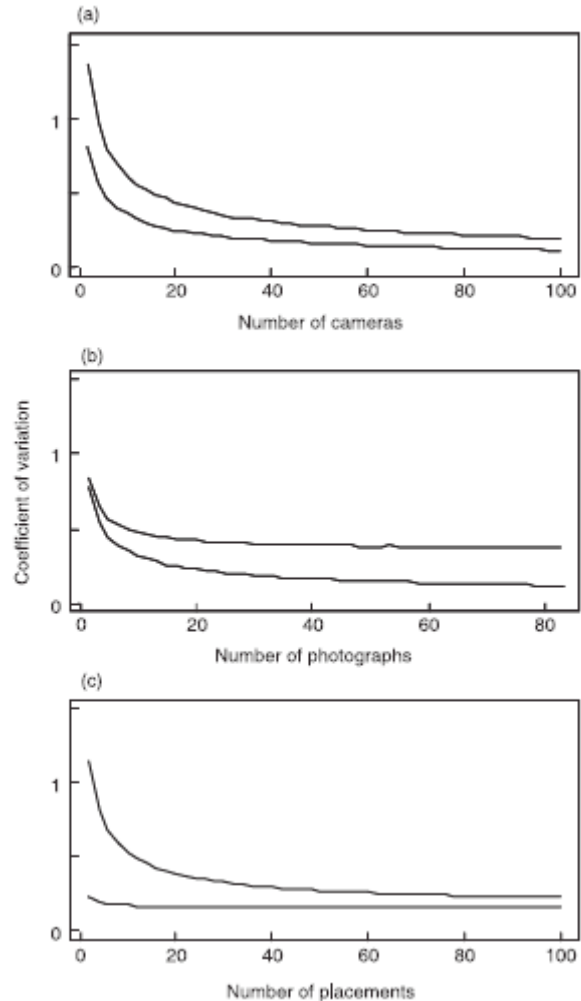
Per il successo di questa tecnica è chiaramente di grande importanza ottenere un numero ragionevole di fotografie da un numero adeguato di disposizioni della fotocamera. Abbiamo perciò analizzato l'effetto di un crescente sforzo di campionamento sulla precisione delle stime di densità utilizzando simulazioni. Abbiamo trovato che per un periodo fissato di utilizzo della fotocamera, la precisione aumenta rapidamente fino a circa 20 posizionamenti delle fotocamere, dopo di che continua ad aumentare ma molto più lentamente (Fig. 4a). Se invece fissiamo il numero di piazzamenti delle fotocamere, variando il loro periodo di utilizzo, la precisione è meno sensibile a sforzo crescente, migliorando rapidamente solo fino a circa 10-20 fotografie (Fig. 4b). Quando l'ammontare totale di tempo – fotocamera è fissato ma varia il numero di piazzamenti, l'influenza di sforzo di allocazione sulla precisione dipende fortemente dalla varianza della frequenza di trappolaggio (Fig. 4c). Con varianza elevata, la precisione migliora rapidamente fino a circa 20 posizionamenti, e più lentamente in seguito, suggerendo che, dato un tempo- fotocamera fissato, le fotocamere dovrebbero essere spostate spesso per massimizzare il numero di posizionamenti. Ad ogni modo, quando la varianza della frequenza di trappolaggio è molto bassa, la precisione è ampiamente poco sensibile al modo in cui lo sforzo totale è distribuito. Il caso che considera una varianza alta è in genere più vicino alla realtà.

Considerati insieme, i risultati suggeriscono che un minimo assoluto di 20 posizionamenti di fototrappole è necessario, ma preferibilmente essi dovrebbero essere almeno 40 quando la frequenza di cattura è altamente variabile. E' necessario che ogni fototrappola in un posizionamento catturi almeno 10 fotografie, ma sarebbe preferibile almeno 20. Lo sforzo necessario per ottenere un campione adeguato dipenderà dalla densità e dai range giornalieri della specie target.

Combinazioni tipiche di questi parametri biologici possono esser derivati da studi comparativi che forniscono equazioni allometriche per range giornaliero e densità nei mammiferi (Silva & Downing 1994, 1995; Fa & Purvis 1997; Carbone & Gittleman 2002; Rowcliffe, Cowlshaw & Long 2003; Carbone et al. 2005).

La Figura 5 sovrappone queste tipiche combinazioni per tre gruppi di mammiferi (carnivori, ungulati e roditori) sullo sforzo di trappolaggio richiesto per ottenere 10 fotografie. Ciò indica che solo per le popolazioni più rare di grandi ungulati e carnivori sarebbero necessari più di 1000 giorni - trappola. Nella maggiorparte dei casi, sono necessari molto meno di 1000 giorni - trappola, e certe volte anche meno di 100 sono sufficienti, indicando che il metodo può fornire risultati importanti molto rapidamente in alcune circostanze.

**Fig. 4.** La precisione della densità stimata dai dati di simulazione in relazione alla variazione nello sforzo di campionamento, assunto varianza alta o bassa nella frequenza di trappolaggio (curva superiore e inferiore, rispettivamente, in ogni grafico). Lo sforzo varia in termini di (a) numero di fotocamere tenendo costante il tempo per fotocamera; (b) tempo per camera (indicizzato dal numero totale di fotografie scattate) tenendo costante il numero di fototrappole; e (c) numero di posizionamenti delle fototrappole tenendo costante l'ammontare totale di tempo-fototrappola.



**Fig. 5.** Sforzo di trappolaggio atteso (giorni-fototrappola, indicati dai contorni) richiesto per ottenere 10 fotografie al variare della densità e del range giornaliero, assumendo la dimensione del gruppo uguale a 1. Combinazioni tipiche di range giornaliero e densità sono indicati per carnivori (C), ungulati (U) e roditori (R), calcolati usando equazioni allometriche per range giornaliero e densità alla capacità portante (vedi il testo) e illustrando le densità tra il 10% e il 100% della capacità portante.

## Discussione

Il metodo discusso in questo articolo consente di ottenere stime della densità di popolazioni animali abbastanza precise. Calcolando inoltre la frequenza di cattura fotografica per una tipica densità di mammiferi e i range giornalieri (basati su calcoli allometrici) si è anche dimostrato che, nella maggioranza dei casi, la frequenza di ritorno delle foto catture è sufficientemente elevata da rendere questo metodo efficiente entro tempi realistici in condizioni naturali. Comunque, una appropriata applicazione di questa tecnica richiede una chiara comprensione dei suoi limiti. Per prima cosa bisogna sottolineare che ci sono tre assunzioni chiave: 1) gli animali devono adattarsi bene al modello matematico usato per descrivere il processo di rilevamento da parte dei sensori fotografici; 2) le fotografie rappresentano contatti indipendenti tra animale e fotocamera; e 3) la popolazione studiata deve essere chiusa (senza immigrazioni/emigrazioni).

Una seconda importante considerazione è la derivazione delle stime dei parametri indipendenti. La base scientifica della teoria di questo studio è che si assume che gli animali si muovano come molecole di gas ideale, casualmente ed



indipendentemente le une dalle altre. Questo è chiaramente poco realistico in quanto gli animali rispondono gli uni agli altri interagendo anche con l'ambiente che li circonda. Comunque lo scopo di questo studio è stato principalmente quello di fornire una valutazione preliminare del modello e di quanto esso possa fornire una adeguata approssimazione del processo di rilevamento. Il fatto che non ci sono stati particolari errori di vizio (bias) nella stima della densità delle popolazioni di tre specie su quattro in questo studio è incoraggiante. Una seconda importante assunzione del modello qui descritto è che gli animali si muovono indipendentemente dalle trappole fotografiche, e questa assunzione sarebbe errata se le strategie di posizionamento delle fototrappole o evitassero o puntassero solo la specie target. Sicuramente, posizionamenti delle fotocamere inappropriati spiegano la drammatica sottostima dell'abbondanza dei mara in questo studio. Durante i conteggi del censimento, circa il 90% di questa popolazione è stata osservata nell'area del parco centrale, dove generalmente pascolano nei terreni erbosi. Queste aree sono anche ampiamente frequentate dai visitatori del parco e, per evitare di intasare le fotocamere con fotografie di persone che potevano interferire con gli strumenti, le fotocamere sono state posizionate in aree meno affollate lontano dai prati aperti. Ma queste aree erano anche meno frequentate dai Mara, di qui la sottostima della loro abbondanza.

L'esempio dei Mara rappresenta l'estremo opposto a strategie di collocazione tipicamente utilizzate negli studi di trappolaggio fotografico, il cui scopo fondamentale è quello spesso di massimizzare la frequenza di trappolaggio di specie rare posizionando le fotocamere vicino alle tracce degli animali, su sentieri, estremità dei crinali, pozze d'acqua che potrebbero utilizzare, o utilizzando esche e richiami. Tale approccio viola il modello sviluppato in questo studio e non può essere sfruttato per ottenere stime di densità corrette. Ad ogni modo un posizionamento rigorosamente random non è comunque praticabile in diverse situazioni. È necessario trovare un giusto equilibrio: non posizionarle attirando gli animali ma cercare di posicionarle sempre in maniera randomizzata nei punti dove si possa avere più probabilità di fotografarli.

Un altro modo possibile in cui l'assunzione del movimento indipendente degli animali dalle fotocamere può essere violata è quando si verifica che gli animali evitano le trappole fotografiche, causato dalla paura della fotocamera di per sé oppure dei loro flash (Séquin et al. 2003; Wegge, Pokheral & Jnawali 2004). Ci si può accorgere di questo quando si osserva una repentina diminuzione della frequenza di fototrappolaggio, sebbene tale trend possa anche essere il risultato di un declino nell'abbondanza nel tempo, o in un generico declino nella probabilità di trappolaggio causato, per esempio, da una diminuzione nella velocità di movimento. L'ideale per risolvere questo problema è quello di usare fototrappole con flash IR per la notte o, se l'animale è almeno in parte diurno, disabilitando il flash e facendo affidamento alla luce naturale e alle fotografie scattate di giorno.

Comunemente, in alcuni casi estremi in cui gli animali scorgono e evitano ogni oggetto inusuale associato alla presenza umana (Séquin et al. 2003), possono essere necessari ulteriori lavori per identificare ed eliminare il motivo di questo comportamento.

Se da un lato il metodo descritto in questo articolo non permette posizionamenti delle trappole fotografiche per focalizzare solo le specie target, è comunque possibile un campionamento diretto attraverso una appropriata stratificazione; se per esempio alcune aree del sito studiato sono difficili da raggiungere, ma possono essere definite e misurate e almeno alcune, anche se piccole, possono essere raggiunte per posizionare le fototrappole lì, la stratificazione come quella descritta in questo studio può essere usata per ottenere stime non viziate delle densità. Inoltre, anche se una variazione spaziale degli animali è influenzata da una zonazione visibile del suolo, come per esempio diversi tipi di habitat, la stratificazione di queste zone è opportuna allo scopo di migliorare la precisione delle stime.

I dati per il metodo descritto devono essere in forma di numeri di contatti indipendenti tra animale (individuo o gruppo) e fototrappola. Ciò implica che un animale lasci la zona coperta dal sensore della trappola fotografica dopo un contatto e che lo stesso animale o uno diverso rientri in seguito nella zona sensibile per dare un secondo contatto indipendente. Se un animale resta nella zona sensibile della fototrappola per lungo tempo, o un grosso gruppo di animali passa attraverso la zona sensibile per un periodo esteso, si possono ottenere molte fotografie di un singolo contatto. Nello studio di campo presentato in questo articolo abbiamo cercato di evitare questo problema impostando l'inattività della fototrappola a 2 minuti dopo ogni scatto. Comunque, usando lunghi periodi di inattività della fototrappola dopo ogni scatto si rischia di mancare altri contatti indipendenti che si possono succedere in breve tempo. Da questo punto di vista è necessario ulteriore lavoro per rifinire questo tipo di impostazione ma, nello stesso tempo, potrebbe essere preferibile usare una breve latenza della fotocamera dopo ogni scatto oppure annullarla completamente e verificare quali gruppi di fotografie rappresentano contatti indipendenti basandosi sull'orario di scatto e su ciò che è stato fotografato; tale approccio è sicuramente più fattibile con le fotocamere digitali che non hanno molti limiti di memoria. Una assunzione finale di questo metodo è che la popolazione monitorata sia chiusa. Nello studio di campo presentato in questo articolo gli animali non avevano possibilità di migrare all'esterno perché l'area era recintata e inoltre il

periodo di trappolaggio è stato sia breve sia al di fuori della principale stagione riproduttiva e in cui si hanno più decessi. Idealmente, il periodo di trappolaggio dovrebbe essere stabilito seguendo questi criteri per rispettare il più possibile questa assunzione. Ad ogni modo, se l'abbondanza cambia durante un'indagine, il metodo fornirà una stima che semplicemente farà da media del trend generale.

Per quanto riguarda la stima dei parametri indipendenti, una misura accurata dei parametri relativi alla trappola fotografica (raggio e angolo di sensitività del sensore piroelettrico termico) è abbastanza semplice. Tali valori possono variare in base alla fotocamera utilizzata e alle condizioni ambientali (in particolare la temperatura) e possono anche essere sensibili alla dimensione della specie animale considerata (Swann et al. 2004). Per cui è consigliabile eseguire sempre diverse prove per ogni studio di campo e per ogni specie. Sicuramente comunque i parametri della fototrappola sono più facili da stimare rispetto ai parametri relativi agli animali (dimensione dei gruppi e velocità di movimento). Questi parametri sono più problematici perché sono più difficili da misurare e spesso portano a dei vizi di stima (bias). Per esempio, le osservazioni degli animali frequentemente soffrono del fatto che gruppi più piccoli sono più difficili da rilevare, causando una sovrastima della misura dei gruppi. Inoltre, sia l'ampiezza del gruppo che la velocità di spostamento possono essere ampiamente variabili all'interno della medesima specie, a seconda dell'habitat, della stagione, del ciclo lunare, dei livelli di disturbo e della densità di popolazione. Idealmente, la dimensione dei gruppi e le velocità di spostamento dovrebbero essere stimate nello stesso periodo e nello stesso luogo in cui avviene il fototrappolaggio, utilizzando metodi appropriati per evitare bias. In alcune circostanze è ragionevole usare stime ottenute da altri studi trovati in bibliografia relativamente alla stessa specie e in simili circostanze ed è anche possibile usare una stima allometrica del range giornaliero (day range) (Carbone et al., 2005). Si deve comunque ricordare che questo tipo di misure indirette può portare a dei vizi nei dati a volte molto ampi e dunque devono essere utilizzate con cautela solo in casi in cui siano sufficienti solo stime grossolane della densità di una popolazione. E' quindi molto raccomandato eseguire valutazioni sul campo quanto più accurate possibile di questi parametri animali.

A questo punto nello sviluppo del modello abbiamo usato il bootstrapping per stimare la varianza nella densità. Comunque, una varianza ideale dovrebbe essere stimata usando un approccio di massima verosimiglianza (maximum likelihood). In tal modo si avrebbe il beneficio di descrivere formalmente sia l'errore di osservazione (la varianza nel numero di fotografie per una data densità locale) sia l'errore di processo (la varianza nella densità locale tra i differenti posizionamenti delle fototrappole), e permettendo i classici test di ipotesi comparando le densità. Comunque, analisi preliminari suggeriscono che i dati di frequenza di campionamento potrebbero essere non in grado di separare affidabilmente i contributi relativi degli errori di osservazione e di processo sulla varianza complessiva. Una soluzione possibile potrebbe essere quella di stimare indipendentemente il grado di inesattezza nelle frequenze di trappolaggio attese tramite pattern conosciuti di spostamento degli animali, e di permettere il calcolo della varianza nella densità locale dai dati. Il modello dei gas ideali su cui il tasso di trappolaggio si basa assume che le particelle si muovano in linee rette, in tal caso in numero di contatti segue teoricamente la distribuzione di Poisson (Hutchinson & Waser 2007). Gli animali chiaramente non seguono questo andamento e Hutchinson & Waser (2007) mostrano che, mentre ciò non ha influenza sul numero di contatti atteso, porta però a una più varia distribuzione dei contatti. Nonostante questa utile osservazione, la base teorica necessaria per supportare una stima di massima verosimiglianza (maximum likelihood) non è ancora sufficientemente avanzata e lasciamo quindi questo eventuale ampliamento a una futura pubblicazione.

Sommando i vantaggi e gli svantaggi, il metodo sviluppato rappresenta un vantaggio nell'aggirare due limitazioni alle analisi di marcaggio-ricattura dei dati del fototrappolaggio. Per prima cosa, non richiede che la specie oggetto di studio abbia marchi distinguibili individualmente, permettendo a questa tecnica di essere impiegata per un molto più elevato numero di specie. In secondo luogo, questo metodo non è sensibile alla dimensione degli home range degli animali, e può perciò essere applicato più flessibilmente a una maggior varietà di specie. Ad ogni modo, il metodo ha uno svantaggio significativo rispetto alle analisi di marcaggio-ricattura in quanto la collocazione delle fototrappole deve essere attentamente randomizzato relativamente alla distribuzione degli animali. Ne risulta che un posizionamento diretto delle fototrappole per massimizzare le frequenze di trappolaggio non può essere impiegato, e record di specie estremamente rare possono accumularsi in tempi troppo lunghi per essere utili. Infine, abbiamo sottolineato come per utilizzare questo metodo siano estremamente importanti stime esatte e indipendenti di dimensione dei gruppi e range giornaliero percorso.

In conclusione, l'utilizzo attento di questa metodologia, tenendo presenti le sue limitazioni, ha il potenziale di fornire un utile contributo agli strumenti di osservazione e indagine degli animali, sia come una alternativa a minor costo di lavoro sia, per alcune specie altamente elusive, forse l'unico modo per stimarne la densità. Tali principi possono essere applicabili ad altre metodologie statiche come il monitoraggio acustico. Le priorità per ulteriori lavori sono, dal lato teorico, di sviluppare un metodo di stima "maximum likelihood" e di quantificare il grado e i determinanti della variazione nei parametri del modello attraverso lo spazio, il tempo, e i taxa animali. Sul lato pratico, sono necessari

ulteriori test di tale metodologia a scala più ampia, e con un range più ampio di specie. Per esempio, il fototrappolaggio abbinato simultaneamente a monitoraggio tramite radio-telemetria aiuterebbe enormemente a dimostrare quanto la variazione nei pattern di movimento influenzino i risultati.