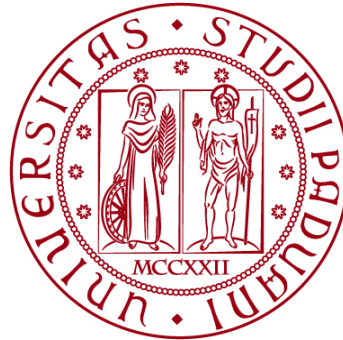


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea magistrale in Biologia Evoluzionistica



TESI DI LAUREA

Influenza delle ondate di calore sul comportamento  
sociale dei pulcini in *Falco naumanni*

Relatore: Prof. Andrea Augusto Pilastro

Dipartimento di Biologia

Correlatore: Dott. Alejandro Corregidor Castro

Dipartimento di Biologia

Laureanda: Valentina Giongo

ANNO ACCADEMICO 2022/2023



## ***Indice***

<b>Abstract</b>	<b>pag.1</b>
<b>1. Introduzione</b>	<b>pag.3</b>
1.1 I cambiamenti climatici e il fattore temperatura	pag.3
1.2 Impatto sulla biodiversità	pag.4
1.3 Risposte ecologiche	pag.5
1.4 Risposte fenologiche	pag.6
1.5 Risposte fisiologiche	pag.7
1.6 Risposte etologiche	pag.8
1.7 Risposte degli uccelli al cambiamento climatico	pag.8
1.8 Obiettivo dello studio	pag.12
<b>2. Materiali e Metodi</b>	<b>pag.14</b>
2.1 Biologia della specie: il falco grillaio	pag.14
2.2 Disegno sperimentale e attività di campo	pag.17
2.3 Analisi video	pag.23
2.4 Analisi statistiche:	pag.24
2.4.1 Temperatura massima nei due gruppi sperimentali	pag.25
2.4.2 Durata della visita dei genitori	pag.26
2.4.3 Respirazione dei pulcini	pag.26
2.4.4 Comportamento	pag.26
2.5 Nota etica	pag.27
<b>3. Risultati</b>	<b>pag.28</b>
3.1 Temperatura massima nei due gruppi sperimentali	pag.28
3.2 Durata della visita dei genitori	pag.29
3.3 Respirazione dei pulcini	pag.30
3.4 Comportamento	pag.32
<b>4. Discussione</b>	<b>pag.35</b>
4.1: Durata della visita dei genitori	pag.35
4.2 Respirazione dei pulcini	pag.36
4.3 Comportamento	pag.37
<b>5. Conclusioni</b>	<b>pag.39</b>
<b>6. Appendice</b>	<b>pag.40</b>
<b>7. Bibliografia</b>	<b>pag.46</b>

## ***Abstract***

Il cambiamento climatico che sta interessando il nostro pianeta è associato ad un aumento della temperatura e della frequenza delle ondate di calore; tale fattore ha e avrà in futuro un forte peso sulla sopravvivenza degli esseri viventi. Si prevede infatti, un aumento di 1,5°C nei prossimi 20 anni (IPCC,2021). Il cambio di clima porta con sé una serie di risposte di tipo ecologico, fisiologico e comportamentale della fauna. Alcuni animali possono adottare strategie di evitamento dello stress, spostando il loro areale e modificando le rotte migratorie; altri non si spostano e attuano invece comportamenti per dissipare il calore in eccesso, arrivando a sviluppare anche modificazioni fisiologiche che rispondono a tale scopo.

Lo studio delle risposte messe in atto in questi casi permette di ampliare la conoscenza delle specie e di predire quale sarà il loro futuro in un mondo caratterizzato da ondate di calore sempre più frequenti.

Gli uccelli sono una classe interessante da prendere in considerazione. Essi attuano un ampio range di risposte al cambiamento climatico. In questa analisi viene utilizzato il falco grillaio (*Falco naumanni*) le cui popolazioni mediterranee stanno affrontando un rapido riscaldamento climatico che in quest'area è particolarmente accentuato. La popolazione di Matera, che ho studiato, nidifica ad elevata densità in cassette nido artificiali, consentendo l'osservazione del comportamento riproduttivo di un campione di nidi statisticamente rilevante e la manipolazione sperimentale delle temperature alle quali sono esposti i pulcini durante lo sviluppo. Mi sono focalizzata sul comportamento dei pulcini perché a differenza degli adulti, che hanno la possibilità di spostarsi in risposta a temperature giornaliere elevate e di sfruttare le nicchie microclimatiche più favorevoli, hanno una mobilità limitata. Essi, inoltre, dipendono dai genitori per il cibo e sono quindi potenzialmente più esposti agli effetti dei picchi di temperatura elevati, che stanno aumentando per frequenza ed intensità con l'acuirsi della crisi climatica. I nidi analizzati nel contesto del progetto di ricerca sono stati suddivisi in due gruppi sperimentali: i nidi di controllo, non ombreggiati, nei quali le temperature raggiungono valori più elevati durante le ondate di calore e i nidi ombreggiati, nei quali la schermatura dalla luce diretta del sole determina una attenuazione delle temperature massime all'interno del nido. Gli adulti, viceversa, passano gran parte della giornata al di

fuori del nido e quindi sono esposti alle stesse condizioni climatiche, indipendentemente dalla manipolazione sperimentale dello stesso.

L'obiettivo dello studio è quello di indagare se sia presente o meno una differenza significativa tra i due gruppi sperimentali nel comportamento e nelle interazioni tra i pulcini della stessa nidiata durante l'alimentazione. Per maggior completezza, oltre all'analisi comportamentale, vengono prese in considerazione lo sforzo parentale ricevuto e la condizione fisiologica dei pulcini in presenza di ondate di calore. Viene svolta in primis un'analisi delle cure parentali durante l'alimentazione che mostra che, nei nidi di controllo, i genitori spendono più tempo al nido e distribuiscono la preda in porzioni meno monopolizzabili dal singolo pulcino, riducendo la necessità di competizione per il boccone rispetto ai nidi ombreggiati. L'analisi fisiologica si concentra invece sulla presenza di "panting" e sul tasso respiratorio; in questo modo si ottiene indicazione del grado di stress a cui è sottoposta la specie in presenza di temperature elevate. Dall'analisi emerge che il falco grillaio si trova in una condizione sfavorevole in presenza di ondate di calore, dove intensifica la termoregolazione. Questo comporta un ridimensionamento delle risorse energetiche ed una riduzione di attività dispendiose come la competizione nei pulcini. Dall'analisi comportamentale risulta inoltre che sono i pulcini subordinati a sfruttare maggiormente comportamenti competitivi e di richiesta del boccone ("begging") e sono quindi loro, in presenza delle ondate di calore, a dover modificare maggiormente il bilancio tra ritorno energetico in termini di cibo e spesa per ottenerlo. Con le alte temperature inoltre, i pulcini incrementano l'attività alimentare, indipendentemente dal rango.

Il falco grillaio è una specie provata dalle ondate di calore che interessano il sud Italia nella sua stagione riproduttiva. Scopo di questa tesi è portare un contributo alla conoscenza delle risposte attuate dalla specie in questa condizione climatica.

## ***1.Introduzione***

### ***1.1 I cambiamenti climatici e il fattore temperatura***

I cambiamenti climatici costituiscono una delle maggiori problematiche del nostro tempo (Eyring et al., 2021). Variazioni a lungo termine del profilo climatico globale non sono mai state così repentine come negli ultimi due secoli, con conseguenti ripercussioni visibili su numerosi campi, da quello economico, a quello sociale e della biodiversità (Diaz et al., 2022). L'aumento delle emissioni di gas serra di origine antropica, provenienti per la maggior parte dall'uso di combustibili fossili, sta comportando un aumento complessivo delle temperature e una modificazione del clima a livello generale e locale (Eyring et al., 2021). L'incremento generale delle temperature si sta accompagnando all'aumento di frequenza e intensità di eventi come alluvioni, scioglimento dei ghiacci, innalzamento degli oceani, acidificazione delle acque, incendi e ondate di calore (Eyring et al., 2021). Tali variazioni sono diffuse e comportano una sfera variegata di risposte degli esseri viventi, caratterizzati da differenti gradi di vulnerabilità, esposizione e capacità adattativa (Foden & Young, 2016; Kovach et al., 2019). Queste risposte corrispondono a variazioni ecologiche, fenologiche, fisiologiche ed etologiche che possono avere ripercussioni sulla sopravvivenza delle specie e sull'equilibrio di interi ecosistemi.

L'aumento delle temperature è un fattore fondamentale da tenere in considerazione quando si parla di conservazione della biodiversità, perché sta mettendo a rischio un numero crescente di specie a livello globale. Ne sono un esempio i produttori primari, sia terrestri che acquatici, il cui calo o scomparsa ha un effetto a catena sulle altre specie (Visser & Gienapp, 2019). La tendenza attuale dell'aumento della temperatura rischia di compromettere la sopravvivenza delle popolazioni che vivono in aree geografiche ai limiti climatici tollerati dalla specie. In queste zone, un ulteriore aumento delle temperature potrebbe portare al superamento della soglia di temperatura fisiologicamente tollerata. Si prevede questo in numerosi animali d'acqua dolce e marini antartici, come l'anatina prismatica (*Laternula elliptica*), che vivono in una condizione limite. In questi ambienti si stima un aumento della temperatura di 2°C entro il 2100 che porterebbe queste specie ad una condizione oltre la soglia di sopravvivenza (Peck, 2005). Dal rapporto AR6 dell'IPCC stilato

nel 2023 (IPCC, 2023) è chiaro come il riscaldamento globale stia aumentando in maniera preoccupante. Esso è quantificabile ad oggi in un innalzamento medio di 1,1°C rispetto all'epoca preindustriale.

## ***1.2 Impatto sulla biodiversità***

Tutte le componenti degli ecosistemi, compreso l'Uomo, devono fare i conti con il cambiamento climatico e ad esso rispondono in modo variegato e specifico. In questa prima parte della tesi verranno descritte, attraverso alcuni esempi, le risposte al cambiamento climatico adottate dalle specie selvatiche sia animali che vegetali, ponendo infine maggiore attenzione sulle specie aviarie alle quali appartiene la specie modello utilizzata. Nonostante tutte le specie debbano far fronte alle modificazioni del loro habitat, ci sono contesti ecologici maggiormente influenzati dal mutamento del clima e nei quali l'impatto che questo ha su una specie ha ripercussioni su altre ad essa legate. Uno di questi casi è rappresentato dallo sbiancamento della barriera corallina che è dovuto a complessi fattori, tra i quali il riscaldamento dei mari è probabilmente molto importante. Questa condizione si accompagna ad una cospicua perdita in biodiversità delle comunità ittiche, come rilevato a seguito delle ondate di calore che hanno interessato l'oceano Pacifico e Atlantico nord-occidentale dal 2012 al 2016 (Bond et al., 2015). Il fenomeno è amplificato dalla fitta trama di interazioni presente in questi ambienti, che ospitano il più alto grado di biodiversità tra tutti gli ecosistemi, pur ricoprendo solo lo 0,1% del fondale oceanico (IUCN, 2017). L'impoverimento in specie indebolisce ulteriormente l'ecosistema che rischia di andare incontro ad un declino, in quanto reti di comunità povere in specie sono meno resistenti e resilienti (Cardinale, 2011; Truchy et al., 2015). L'aumento delle temperature oceaniche è causa dell'alterazione nella fioritura del fitoplankton (Wasmund et al., 2019), che è influenzata dalle variazioni nei tempi dei driver abiotici stagionali (Thomas et al., 2017) e che ha ripercussioni sulla catena alimentare dei consumatori secondari (Post, 2017; Sundby et al., 2016) e sull'intero ecosistema marino (IPCC, 2013; Cardinale et al., 2011). In generale, il calo o l'estinzione di specie chiave, alterano il normale equilibrio degli ecosistemi e possono causare mancanza di risorse, alterazione dei rapporti interspecifici e intraspecifici, calo del successo

riproduttivo e aumento di competizione (Visser & Gienapp, 2019), spesso compromettendo la crescita, la riproduzione e la sopravvivenza delle specie coinvolte. Per effetto del cambiamento climatico, infatti, si assiste a variazioni nella distribuzione delle popolazioni o, in casi più estremi, al loro declino (Beever et al., 2017). Il cambiamento fenologico associato al cambiamento del clima che ha interessato la popolazione del salmone chum (*Oncorhynchus. keta*), per esempio, ha comportato una variazione anche nella fenologia del suo predatore, l'aquila di mare testabianca (*Haliaeetus leucocephalus*) (Rubenstein et al., 2019). In questo quadro, la probabilità di estinzione di una specie, o di una popolazione, dipenderà dalla sua capacità di rispondere al cambiamento climatico. Queste risposte possono essere legate alla plasticità fenotipica degli individui o, in tempi più lunghi, ad un loro cambiamento evolutivo legato alla maggiore sopravvivenza di individui che possiedono caratteristiche ereditabili meglio adatte alle nuove condizioni climatiche. Data la rapidità del cambiamento climatico, per la maggior parte degli organismi viventi, le possibilità di sopravvivenza dipendono, in larga misura, dalla loro plasticità fenotipica e, nel caso degli animali, in particolare dalle loro risposte comportamentali.

### ***1.3 Risposte ecologiche***

Per quanto riguarda le risposte ecologiche delle specie, troviamo principalmente due strategie: la modificazione dell'interazione con le componenti abiotiche e biotiche dell'habitat e lo spostarsi in ambienti meno ostili. Ne sono un esempio l'anguilla europea (*Anguilla anguilla*), che presenta una riduzione dei fenomeni migratori e gli uccelli dell'emisfero nord, tra cui il falco grillaio, il cui areale si sta riducendo a livello dei bordi inferiori ed ampliando verso quelli superiori (Ralston et al., 2017). Nel Nord America il 55% delle specie ha traslato il proprio areale verso il bordo più fresco, verso i poli, ad altitudini più elevate o a profondità maggiori (Wiens, 2016). Questi spostamenti sono affiancati alla possibilità dell'instaurarsi di specie invasive, spesso con abilità competitive più forti delle autoctone e che apportano un'ulteriore modifica all'ecosistema minando la biodiversità (Bradley et al., 2019). Ne è esempio l'invasione ad alta quota di



numerose piante dei climi caldi avvenuta in Sud America e Scandinavia (Lembrechts et al., 2016).

La risposta ad un clima che cambia, oltre ad essere specie specifica, dipende anche dal ciclo vitale. La tendenza a salire verso quote e latitudini più elevate, infatti, è meno repentina nelle specie longeve rispetto a quelle a vita breve (Couet et al., 2022). Come ribadito in precedenza, le interazioni tra specie sono dipendenti dal clima e subiscono quindi variazioni in presenza del suo cambiamento. In quelle che caratterizzano gli erbivori, per esempio, l'aumento di temperatura, la siccità ed elevate concentrazioni di CO<sub>2</sub>, aumentano il consumo di piante da parte di quest'ultimi (Hamann et al., 2021). Lo stesso impatto lo si trova in rapporti di facilitazione, competizione e predazione che si sono instaurati nelle specie del picchio nero (*Dryocopus martius*), del gufo boreale (*Bubo bubo*), e dell'alocco degli urali (*Strix uralensis*), che tendono a sovrapporre i loro areali a seguito dell'innalzamento delle temperature, con il rischio di un aumento di competizione e di una sovrapposizione di areale con quello dell'alocco comune (*Strix aluco*) (Brambilla et al., 2019). Anche la simbiosi corallina con l'alga *Symbiodinium* è destabilizzata dal riscaldamento oceanico; in queste condizioni si verifica una riduzione della fitness dei coralli poiché queste alghe dinoflagellate ne sequestrano parte dell'energia parassitandoli (Baker et al., 2018). Per finire, anche i rapporti intraspecifici in termine di riproduzione sono alterati in presenza del cambiamento climatico. L'alterazione ambientale e l'inquinamento delle acque possono, per esempio, comportare un'alterata selezione sessuale, come nel caso della falena indiana della farina (*Plodia interpunctella*) e nello scarabeo rosso della farina (*Tribolium castaneum*) (Parrett & Knell, 2018; Moiron et al., 2022) e casi di ibridazione (Vallejo-Marín & Hiscock, 2016).

#### **1.4 Risposte fenologiche**

L'innalzamento delle temperature e la modificazione delle precipitazioni comportano l'anticipazione di alcuni eventi fenologici come, nel caso degli animali, modificazioni temporali di migrazione e riproduzione (Lany et al., 2016). Si può verificare in tal senso una ridefinizione dei ritmi circadiani o circannuali, che comporta variazioni nelle tempistiche di ibernazione e migrazione (Beever et al.,

2017; Bradshaw e Holzapfel, 2007; McCann et al., 2017). Anche le interazioni tra specie in rapporti simbiotici, mutualistici e parassitari sono fortemente sbilanciate nel caso in cui le variazioni fenologiche delle specie coinvolte non siano più allineate. Di fatto, questo si verifica nel rapporto tra la farfalla arancione (*Anthocharis cardamines*) e la sua pianta ospite, che vede la farfalla anticipare la data di comparsa e di volo, interagendo così solo con ospiti con fenologia di fioritura ad essa allineata (Navarro-Cano et al., 2015). Infine, anche a livello di comunità, si verificano cambi nella fenologia come evidenziato in una popolazione di farfalle in Pennsylvania. In questo caso, specie con differenti tipologie di alimentazione e di riproduzione tendono ad accorciare o prolungare il loro periodo di volo in presenza di variazioni ambientali. Differenti caratteristiche delle specie, quindi, possono modellare le risposte fenologiche e impattare sulla composizione della comunità (Zografou et al., 2021).

### ***1.5 Risposte fisiologiche***

Ulteriori risposte attuate dagli organismi riguardano aspetti fisiologici, come per esempio, la termoregolazione, la regolazione della pressione, del flusso sanguigno e del respiro, il metabolismo e l'attivazione di pathway di risposta allo stress associato ad elevate temperature. Per quanto riguarda la termoregolazione, questa viene svolta in modo differente in base alle caratteristiche della specie. Gli omeotermi devono bilanciare la produzione e la perdita di calore, mantenendo la temperatura corporea costante pur interagendo con l'ambiente esterno (Tansey et al., 2015). Essi devono dunque attuare la termoregolazione, che si rende ancora più necessaria in condizioni di ipotermia o ipertermia. Questa pratica viene generalmente coordinata a livello ipotalamico e coinvolge pathway neuro-endocrini, funzioni metaboliche (Shokri et al. 2022), apparati e strutture corporee. Le pratiche termoregatorie sono specie specifiche e sono spesso strettamente collegate alla disponibilità di acqua corporea. Nel caso di passeriformi e rapaci, per esempio, la dissipazione del calore risulta dall'evaporazione dell'acqua corporea attraverso l'apparato respiratorio associata ad una accelerazione della frequenza respiratoria (McKechnie et al., 2021; Mosher, 1976). Se da un lato questa risposta consente di dissipare il calore in eccesso, essa è dispendiosa in termini energetici e

di perdita d'acqua ed è associata ad un aumento della produzione di calore metabolico (Angilletta et al., 2010; Smit et al., 2016; Whitfield et al., 2015; Wolf & Walsberg, 1996). Per questa ragione, i costi del mantenimento della temperatura corporea attraverso l'evaporazione attiva sono elevati e possono diventare insostenibili in condizioni termiche elevate e prolungate. Per questa ragione la prima risposta degli animali a temperature critiche è di tipo comportamentale (Ruuskanen et al., 2021) (si veda il paragrafo successivo). Questo permette all'animale di ridurre il costo energetico e di disidratazione per il controllo della temperatura corporea (Cunningham et al., 2015; van de Ven et al., 2019).

### ***1.6 Risposte etologiche***

Gli esempi di risposte comportamentali alle temperature critiche sono numerosi. Tra questi troviamo il ripararsi all'ombra, la scelta nei nidi e tane ombreggiate o sotterranee (Abayarathna & Webb, 2022) e lo spostamento delle attività più dispendiose nelle ore più fresche della giornata (Van De Ven et al., 2020). Il fringuello zebrato (*Taeniopygia guttata*), per esempio, in presenza di ondate di calore, concentra l'attività di ricerca del cibo all'alba e al tramonto e rimane inattivo nelle ore più calde della giornata (Dall & Witter, 1998).

Il cambiamento climatico influenza anche altri tipi di comportamento quali quello di dispersione, migrazione, riproduzione e predazione (Tylianakis et al., 2008). Nel caso degli organismi acquatici, il riscaldamento delle acque può avere un effetto sul riconoscimento e la fuga dal predatore (Dixson et al., 2010; Munday et al., 2014). Nei rettili con determinazione del sesso dipendente dalla temperatura, come la testuggine palustre dipinta (*Chrysemys picta*), il riscaldamento globale rischia di comportare uno squilibrio tra i sessi. Questa specie, come molte altre ad essa affini, risponde alla presenza di stagioni riproduttive troppo calde modificando la scelta del sito di nidificazione a favore di siti ombreggiati (Refsnider & Janzen 2012).

### ***1.7 Risposte degli uccelli al cambiamento climatico***

Gli uccelli hanno generalmente un'elevata mobilità e per questo possono rispondere velocemente al cambiamento climatico variando la loro distribuzione geografica o la loro posizione nell'ambiente a seconda della temperatura. Questa capacità di

risposta è dimostrata, in molte delle specie volatrici, dallo spostamento dell'areale verso climi più idonei, dalla modificazione delle attività migratorie e dalla messa in atto di comportamenti per incrementare la sopravvivenza in ambienti sempre più caldi (Naimi et al., 2022). Il cambiamento climatico è spesso associato infatti alla modificazione delle rotte migratorie (Clairbaux et al., 2019) e anche ad una variazione delle strategie di scelta dei siti di nidificazione (Carroll et al., 2015), degli schemi di comunicazione, del canto, della composizione delle comunità canore (Pandit et al., 2022) e delle abitudini alimentari degli uccelli che, come nel caso di molte specie insettivore, sono costretti ad attuare cambi nella dieta come sostituire ad insetti acquatici più energetici, insetti terrestri meno calorici (Shipley et al., 2022).

Per quanto riguarda la distribuzione geografica, molte specie di uccelli stanno spostando il loro areale verso zone meno calde del pianeta ad altitudini più elevate o a latitudini più settentrionali, che un tempo ospitavano climi troppo rigidi, ma che oggi sono caratterizzate da un clima adatto per molte specie. Il falco grillaio, ad esempio, nidifica in ambienti agricoli dell'Italia meridionale che stanno andando incontro ad un rapido riscaldamento climatico e che si prevede che entro pochi decenni saranno probabilmente inadatti alla specie. In questo scenario si sta verificando uno spostamento delle popolazioni del sud Italia verso nord (Morganti et al., 2017). La pianura Padana viceversa, si sta riscaldando e il clima sta diventando adatto al rapace. Dal 2014 il falco grillaio ha iniziato a riprodursi in queste zone e in futuro si prevede che in quest'area sarà presente la maggior popolazione di questa specie in Italia (Cioccarelli et al., 2022).

Il riscaldamento nelle latitudini temperate, affiancato dalle ondate di calore, ha causato anche cambiamenti fenologici a livello di riproduzione, in alcuni casi mettendo a repentaglio la sopravvivenza di molte specie di uccelli (Andreasson et al., 2020). La fenologia degli uccelli ha subito diverse modificazioni che riguardano tempi di comparsa, di muta e di riproduzione che risultano anticipati rispetto a quelli passati. Presentano inoltre modificazioni nelle tempistiche e nelle traiettorie di migrazione come avviene nella balia nera (*Ficedula hypoleuca*) (Helm et al., 2019). Tali spostamenti fenologici, in alcuni casi, sono atti a sincronizzare la stagione riproduttiva con la comparsa delle prime foglie, della fioritura e con il momento in

cui le prede sono maggiormente presenti (Crick et al., 1997). L'innalzamento delle temperature primaverili può infatti comportare l'anticipazione delle stagioni riproduttive. In questo caso le conseguenze sulla riproduzione sono specie specifiche; è possibile il registrarsi di un calo della sopravvivenza dei nuovi nati come avviene per la popolazione del fagiano di monte (*Lyrurus tetrix*) in Finlandia, oppure l'incremento delle dimensioni della covata come registrato invece per il gallo cedrone (*Tetrao urogallus*) in Norvegia (Wegge et al., 2017).

Nelle strategie comportamentali il fattore temperatura è cruciale. Essendo necessario svolgere un'attività dispendiosa come la termoregolazione, la disponibilità di energie per attività costose deve essere ridimensionata (Cunningham et al., 2015). A temperature troppo elevate corrispondono per esempio periodi di caccia più brevi e meno efficienti che sono limitati nelle ore più fresche della giornata, all'alba o al tramonto (Cecere et al., 2020). Ad una caccia povera corrisponde un approvvigionamento insufficiente al nido e di conseguenza una crescita meno rapida e un calo nel tasso di sopravvivenza della nidata (Cecere et al., 2020). Un esempio del compromesso tra termoregolazione ed efficienza di caccia lo si trova in una averla africana (*Lanius collaris*) che nelle ore più calde non smette l'attività, ma caccia da posatoi ombreggiati. Se da un lato questi posatoi sono associati ad un successo di cattura dimezzato, dall'altro consentono all'uccello di stare in condizione meno stressante rispetto ai posatoi esposti e destinare meno energia alla termoregolazione (Cunningham et al., 2015).

In presenza di ondate di calore, molti vertebrati stanno spostando le loro attività quando c'è meno luce, avvicinandosi alla vita notturna. Questa tendenza è già ampiamente studiata nei piccoli mammiferi come roditori e pipistrelli (Van De Ven et al., 2020) anche se è meno comune negli uccelli che tendono invece a privilegiare momenti di luce come quelli poco dopo l'alba ed appena prima del tramonto (Cecere et al., 2020). Essendo omeotermi, gli uccelli sono costretti a termoregolare. Questo avviene principalmente attraverso comportamenti come quelli illustrati sopra oppure aumentando la dissipazione di calore per evaporazione attraverso le vie aeree tramite l'aumento della frequenza della respirazione e di una pratica simile all'ansimare che si osserva, per esempio, nel cane ("panting").

Quando la temperatura corporea supera la soglia fisiologica tollerata si osservano danni alle membrane cellulari, l'instaurarsi di stress ossidativo (Lin et al., 2006) fino alla morte dell'organismo (Albright et al., 2017). La riduzione della temperatura per evaporazione può viceversa causare la disidratazione (Andreasson et al., 2018; Ricklefs & Hainsworth, 1968), la quale a sua volta limita la capacità di termoregolare correttamente. In mancanza di acqua sufficiente per mantenere una temperatura corporea entro i limiti tollerabili, infatti, l'uccello va incontro a ipertermia letale (Albright et al., 2017; McKechnie & Wolf, 2010).

Nelle risposte al cambiamento climatico degli uccelli è necessario distinguere tra adulti e pulcini. I primi hanno un potenziale range di risposte comportamentali più ampio dei secondi. Nella maggioranza degli uccelli, infatti, la prole è confinata nel nido dal momento della deposizione e quindi dall'inizio dello sviluppo embrionale fino all'involo ed è sottoposta al variare delle condizioni termiche. Fanno eccezione le poche specie che usano nidi sotterranei o in grotta che, come i rettili, sfruttano microclimi sotterranei pressoché costanti (Angilletta et al., 2006). La sopravvivenza dei pulcini, dunque, dipende in buona parte dalla scelta del sito di nidificazione del genitore e dalle cure parentali. La scelta del nido dipende da fattori come l'illuminazione, l'esposizione alla predazione (Gloutney & Clark, 1997) e il profilo termico del territorio (per esempio nel pollo della prateria (*Tympanuchus cupido*), Carroll et al., 2015).

In molti uccelli, i nuovi nati sono vulnerabili alle alte temperature date le loro ridotte dimensioni (McKechnie & Wolf, 2019) e la loro quasi totale impossibilità di spostarsi dal nido prima della fase dell'involo. Ondate di calore durante le stagioni riproduttive determinano pertanto una elevata mortalità dei pulcini (Catry et al., 2011, 2015; Conradie et al., 2020). Ne sono un esempio il colino della Virginia (*Colinus virginianus*) e il falco grillaio, caratterizzati rispettivamente da una mortalità del 50% delle uova esposte per almeno un'ora a 46°C (Lusk & DeMaso., 2001) e una mortalità dei pulli del 55% se la temperatura interna al nido supera i 44°C (Corregidor-Castro et al., 2023).

Dopo la schiusa si rende necessaria anche per i pulcini la termoregolazione. Questa risposta è dispendiosa e rischia di compromettere la crescita e la sopravvivenza della nidiata in quanto parte dell'energia proveniente dal cibo deve essere destinata

alla dissipazione del calore tramite “panting” (Mitchell et al., 2018; Andreasson et al., 2018; Ricklefs & Hainsworth, 1968; Mosher, 1976). Stagioni riproduttive che terminano con scarsità della prole possono indebolire a tal punto la popolazione che a lungo andare rischia di andare incontro al declino (Iknayan & Beissinger, 2018). Nonostante gli uccelli abbiano buoni mezzi per non soccombere al riscaldamento climatico, nelle specie caratterizzate da pulcini atriciali, sia i pulcini che gli adulti nel periodo della riproduzione sono legati al sito di nidificazione e quindi maggiormente esposti alle alte temperature (Bourne, et al., 2021).

### ***1.8 Obiettivo dello studio***

L’obiettivo di questa tesi è quello di valutare l’effetto della temperatura sul comportamento e le interazioni dei pulcini nel falco grillaio. Per questo ho confrontato nidi sperimentalmente ombreggiati, in cui la temperatura interna era mediamente più bassa, con nidi di controllo, con temperature in media più alte. A questo scopo ho valutato le interazioni comportamentali tra pulcini e genitori e tra i pulcini stessi nel momento in cui i genitori portavano le prede al nido nei due gruppi sperimentali. A sostegno dell’analisi comportamentale, ho indagato anche la condizione fisiologica dei pulcini all’aumentare della temperatura e lo sforzo parentale da essi ricevuto. La prima ha fornito indicazione sulla differente allocazione delle risorse energetiche in presenza di alte temperature, mentre la seconda ha fornito dati relativi alla monopolizzazione del boccone strettamente legata alla competizione.

Lo studio di questo rapace è utile per capire come una specie longeva e migratoria risponde ai cambiamenti climatici in atto durante la sua stagione riproduttiva e quali sono le conseguenze di ondate di calore sempre più frequenti.

La scelta di questa specie si basa su:

- 1) Motivi di interesse generale: l’area mediterranea, dove nidifica il falco grillaio, si sta surriscaldando ad un ritmo di circa il doppio rispetto alla media del pianeta (WWF, 2021).
- 2) Possibilità di valutare sperimentalmente, ma in condizioni naturali, l’effetto diretto della temperatura rispetto ad altri effetti indiretti del cambiamento climatico sugli ambienti. Il falco grillaio nidifica ad alta densità in cassette nido

artificiali poste nell'ambiente urbano. Questo rende la raccolta dati più semplice e la statistica più robusta grazie ad un numero significativo di dati raccolti, condizioni difficili da ottenere con altre specie di dimensioni simili. Le specie finora studiate sono di ridotte dimensioni corporee, come i passeriformi, e le informazioni relative ad uccelli di dimensioni maggiori e differente life-history sono praticamente assenti. Specie divergenti in life-history, infatti, tollerano in maniera differente l'innalzamento di temperatura (Martin & Mouton, 2020). Specie longeve con tasso di sviluppo lento e covate di ridotte dimensioni possono allocare le risorse spalmandole in diverse stagioni riproduttive e quindi non sembrano subire grossi danni se costrette a destinarle alla termoregolazione; cosa che invece è deleteria, in termini di fitness, in specie che hanno a disposizione una o poche stagioni riproduttive. Inoltre, i passeriformi hanno schiusa sincrona delle uova e presentano un livello ridotto di competizione tra pulcini della stessa nidiata.

Più specificatamente, questa tesi si focalizza proprio su questo aspetto: qual è l'effetto della temperatura sul comportamento di competizione al nido dei pulcini? Dato che le ondate di calore corrispondono ad un aumento del consumo di energia ed acqua da parte dei pulcini, ci si aspetta un aumento della competizione entro nidiata e una ripartizione delle risorse alimentari tra pulcini meno omogeneo. Questo effetto aumenterebbe le possibilità di sopravvivenza di almeno una parte della nidiata anche in situazioni critiche. D'altra parte, le ondate di calore potrebbero al contrario attenuare la competizione tra i pulcini se il costo energetico o le condizioni di stress limitassero la capacità dei pulcini di competere attivamente per la spartizione del cibo. In questo caso, le ondate di calore potrebbero comportare la perdita completa della nidiata o determinare l'involo di giovani tutti in cattive condizioni corporee. Questo studio ha lo scopo quindi di contribuire ad una migliore comprensione di come gli uccelli rispondono ai cambiamenti climatici, in particolare durante una stagione delicata e fondamentale come quella riproduttiva e di utilizzare queste informazioni per prevedere il destino delle popolazioni delle specie di uccelli esposte al rapido cambiamento del clima e informare le politiche di conservazione.



## **2. Materiali e Metodi**

### **2.1 Biologia della specie: il falco grillaio**

La specie oggetto dello studio è il falco grillaio, rapace della famiglia dei Falconidi di ridotte dimensioni che può raggiungere un peso compreso tra i 120 e i 160 grammi, una lunghezza di 27-33 cm e che presenta apertura alare di 58-72 cm (Cramp & Simmons, 1980). Può vivere fino a 10 anni d'età, ma a causa dell'elevata mortalità, la durata media della vita è normalmente inferiore. Il falco grillaio è caratterizzato da un alto grado di dimorfismo sessuale: le femmine, infatti, hanno un peso del 15% (Cramp & Simmons, 1980) maggiore rispetto ai maschi, possono raggiungere i 160 grammi contro i 140 medi nel maschio e sono caratterizzate da differenti colorazioni. La femmina presenta un piumaggio a macchie marrone scuro che vira al color sabbia e risulta di un marroncino chiaro sull'addome; esso è nocciola con barre scure su dorso, ali e capo. Il maschio invece è caratterizzato da un piumaggio con tinte uniformi di colore grigio ardesia nella zona della testa e della coda, quest'ultima bordata di nero; petto e addome sono color bianco crema con macchie nere, mentre le ali e il dorso sono color mattone uniforme senza barrature.



Fig.1: femmina (A) e maschio (B) adulti.

La specie predilige ambienti caldi e asciutti, aree steppiche o semi-steppiche dove la vegetazione è rada. Si stabilisce in zone collinari o pianeggianti sotto i 1000 m slm ed è coloniale e migratrice. È caratterizzata da un areale di riproduzione che si

sviluppa alle medie e basse latitudini in Nord Africa ed Eurasia. Attualmente l'Italia meridionale presenta il 15% della popolazione mondiale (Cioccarelli et al., 2022). Gli inverni vengono trascorsi, dalla maggior parte degli esemplari, in Africa, nella regione a sud del deserto del Sahara e in rari casi nel Sud dell'Europa, dell'Asia o in Nord Africa (Conference et al.,1991). La migrazione inizia con l'avvento della primavera tra la fine di febbraio e l'inizio di aprile, ne segue la riproduzione che si svolge a partire da maggio. Dopo la stagione riproduttiva (maggio - fine luglio) affrontano un periodo di "ingrassamento pre-migratorio" prima di ritornare nelle regioni sopracitate per svernare. Tra la fine di luglio e l'inizio di agosto abbandonano le colonie per riunirsi in gruppi numerosi e stabilirsi in zone ricche di cibo. Con l'arrivo di agosto inizia la migrazione autunnale che perdura fino a novembre e porta nuovamente i falchi delle aree di svernamento (Conference et al.,1991). Il falco grillaio ha una dieta piuttosto variegata basata principalmente su ortotteri, termiti, coleotteri, artropodi, ma anche piccoli roditori, uccelli e rettili. In particolare, tra gli insetti che rappresentano circa il 60% delle prede, una ricerca sulla dieta di questo falco ha identificato tra le specie più comuni il grillo comune (*Acheta domesticus*), il grillo talpa (*Gryllotalpa gryllotalpa*) e la cavalletta (*Anacridium aegyptium*); tra i rettili le lucertole (*Podarcis muralis*) e gli orbettini (*Anguis fragilis*) e tra i mammiferi le arvicole (*Arvicola amphibius*) e il topo comune (*Mus musculus*) (Selçuk et al.,2021). Tuttavia, essendo un rapace opportunista, queste percentuali possono variare in maniera consistente in base alla disponibilità delle risorse, condizioni metereologiche e stagionali, ma anche alle caratteristiche individuali legate al sesso, alla condizione e all'età (Cecere et al.,2020). In media, una coppia di falchi arriva a catturare fino a 30/40 prede al giorno, la caccia può avvenire in solitaria o in gruppo e si svolge per la maggior parte a pochi km dal nido (Sarasola et al.,2018). Si registrano due strategie di caccia: il foraggiamento dinamico, che avviene perlustrando il territorio, e quello statico, nel quale il rapace rimane su un posatoio elevato (esempio un albero secco o un palo della luce) e plana sulla preda una volta identificata. Il primo, più dispendioso per l'adulto, è preferito durante la fase di crescita dei nidiacei ed è correlato ad un incremento rapido in massa dei pulcini grazie alla cattura di prede più energetiche. Il foraggiamento statico invece, è meno dispendioso ma permette la cattura di prede

meno caloriche (Cecere et al.,2020). Il tipo di foraggiamento cambia nel corso delle stagioni e quindi segue le fasi di vita del nidiaceo. Nel sud Italia, le colture di cereali sono i siti di caccia sfruttati nella stagione riproduttiva media e tardiva. In questa fase i rapaci prediligono la caccia in campi di erba medica, legumi, carciofi e cereali invernali, mentre evitano frutteti, campi di mais e boschi. Il falco grillaio è una specie monogama, anche se data l'elevata mortalità, spesso il partner viene sostituito nel corso delle successive stagioni riproduttive. Arriva nei luoghi di nidificazione tra febbraio e aprile (Sarà et al., 2019) e il maschio inizia il corteggiamento portando prede come doni nuziali al nido. La deposizione di 3-5 uova, ad un intervallo di 2-3 giorni, avviene tra fine aprile e metà maggio ed è seguita dall'incubazione che dura circa 30 giorni. L'incubazione inizia con la deposizione dell'ultimo uovo, la schiusa è asincrona e tra la schiusa del primo e dell'ultimo uovo possono passare fino a 5 giorni (Aparicio, 1997; Podofillini et al., 2018). Come conseguenza, all'interno della nidiata ci sono differenze di dimensioni tra i pulcini schiusi per primi (rango 1) e i pulcini nati più tardi (Corregidor-Castro et al., 2023).

L'aggressività tra fratelli di nidiata è molto diffusa nei grandi uccelli predatori tra i quali aironi, pellicani, sule e uccelli rapaci come il falco grillaio (Drummond, 2002; Mock et al., 1990; Mock & Parker, 1997). In particolare, nei rapaci, gli adulti spesso non riescono a portare cibo in quantità sufficiente per l'intera nidiata e le prede sono monopolizzabili da un singolo pulcino; questo può comportare la morte per inedia di una parte della nidiata (Brown et al.,1990). Nei rapaci è presente un diverso grado di competizione che nel falco grillaio si manifesta soprattutto per accesso al cibo, mentre in altre specie può comprendere il fratricidio senza condizioni come nell'aquila coronata (*Stephanoaetus coronatus*) o che avviene in condizioni di scarsità di risorse come negli astori (*Accipiter gentilis*) (Brown et al.,1990).

Le cure parentali sono svolte da entrambi i genitori, dall'incubazione delle uova alla nutrizione dei pulcini al nido. Tuttavia, nel periodo iniziale dello sviluppo dei pulcini, è l'alimentazione materna quella maggiormente frequente (Sarasola et al.,2018).

L'approvvigionamento al nido viene svolto per i primi 30-35 giorni d'età dei pulcini, ovvero fino a che non raggiungono la fase dell'involo. Dopo 15 giorni dalla schiusa, i pulcini sono in grado di uscire dal nido, ma non di volare. Passate tra le 6 e le 8 settimane dall'involo, i nuovi nati seguiranno i genitori nella migrazione per poi cercare un sito di riproduzione l'anno seguente, anche se la prima riproduzione avviene normalmente al secondo anno di età (Sarasola et al., 2018).

## **2.2 Disegno sperimentale e attività di campo**

La ricerca è stata condotta nella città di Matera in Basilicata (40°66' N, 16°61'), dove una parte della popolazione di circa 1000 coppie di falco grillaio nidifica in cassette nido artificiali (La Gioia et al., 2017). Una parte di queste cassette sono state utilizzate per condurre un esperimento che prevedeva la manipolazione sperimentale delle temperature interne al nido mediante l'ombreggiatura di una parte delle cassette nido, mentre altre sono state mantenute non manipolate come controllo (Corregidor-Castro et al., 2023). Uno dei limiti delle ricerche sugli effetti delle ondate di temperatura sui nidiacei, infatti, risiede nell'impossibilità di separare l'effetto diretto della temperatura sul comportamento e la fisiologia dei pulcini rispetto agli effetti che essa può avere (e di fatto ha) sugli adulti. Per esempio, se in occasione di un'ondata di calore si osserva una maggiore mortalità dei pulcini o un loro sviluppo rallentato, non è possibile determinare se esso dipende dal fatto che gli adulti portano al nido meno cibo o dal maggior consumo energetico e di acqua da parte dei pulcini per effetto della termoregolazione attiva. Le differenze osservate tra gruppi sperimentali possono invece essere ricondotte all'effetto diretto della temperatura sui pulcini, dato che gli adulti trascorrono il loro tempo al di fuori del nido quando i pulcini sono più sviluppati e sono quindi tutti sottoposti alle stesse condizioni di temperatura esterna, indipendentemente dalla manipolazione sperimentale del nido. Ho condotto il mio lavoro di campo nella stagione riproduttiva del 2023, ma ho analizzato i dati raccolti (con la stessa procedura descritta qui di seguito) da altri collaboratori del progetto nel 2022.

Nel 2022 l'area è stata interessata da un'ondata di calore con picco tra il 27 e il 28 giugno. In questo periodo è stata registrata una temperatura massima esterna superiore a 37°C per almeno due giorni consecutivi. Quest'ondata di calore

rappresenta un'anomalia termica di +3,5°C rispetto alla media di riferimento 1991-2020 (ISAC,2022). Pur condotta in un solo anno, questa ricerca è significativa perché ha permesso di valutare la risposta a condizioni climatiche che saranno sempre più frequenti in futuro. Ho considerato i dati raccolti nel 2022 da 34 cassette nido (17 Controlli e 17 Ombreggiate) poste sulle terrazze dei tetti di due edifici (sede della Provincia della Basilicata, superficie del tetto di 600 m<sup>2</sup>, e sulla sede del Genio Civile, di 300 m<sup>2</sup>). Le cassette sono a forma di parallelepipedo (300 x 300 x 370 mm), ottenute da sezioni cave di canna fumaria in materiale refrattario con bordi spessi circa 5 cm, disposte orizzontalmente. Nella parte posteriore, in legno, sono presenti cinque fori con un diametro di circa 4 cm per consentire il passaggio dell'aria, mentre sulla parte anteriore si trova un altro pannello in legno che presenta al centro un'apertura circolare di accesso al nido di circa 6.5 cm di diametro. Il pannello frontale è mantenuto in posizione da una molla che può essere sganciata e che consente allo sperimentatore di aprire facilmente la cassetta. All'interno è presente una lettiera, formata dagli escrementi delle nidiate degli anni precedenti, oppure sostituita da terriccio nel caso non vi fossero residui sufficienti dall'anno prima; questo consente la protezione delle uova (Podofillini et al.,2018). Nella parte posteriore delle cassette è posta una piastrella in cemento, inclinata di circa 30°, che poggia sulla parte alta della cassetta e che crea un cono d'ombra limitando il surriscaldamento (Corregidor-Castro et al.,2023).

Nell'ultima settimana di febbraio le cassette nido vengo allestite, numerate e posizionate nelle terrazze a 2 metri l'una dall'altra. Esse sono state poi divise in due gruppi sperimentali: le cassette di controllo e quelle ombreggiate. Le prime erano prive di qualsiasi copertura, le seconde sono state riparate dalla luce solare diretta tramite una copertura fatta da pannelli di compensato spessi 5mm (410 x 360 x 450) che coprivano il tetto e i due lati della cassetta. Le cassette nido sono state ombreggiate al momento della schiusa delle uova. Due nidi sincroni (stessa data di schiusa) e posizionati nella stessa zona del tetto sono stati assegnati, casualmente, uno al gruppo di controllo e uno al gruppo ombreggiato. In questo modo, i due gruppi sperimentali non differivano in media per nessun parametro riproduttivo (qualità dei genitori, dimensione della covata e data di schiusa), ma solo per le temperature registrate dentro al nido.

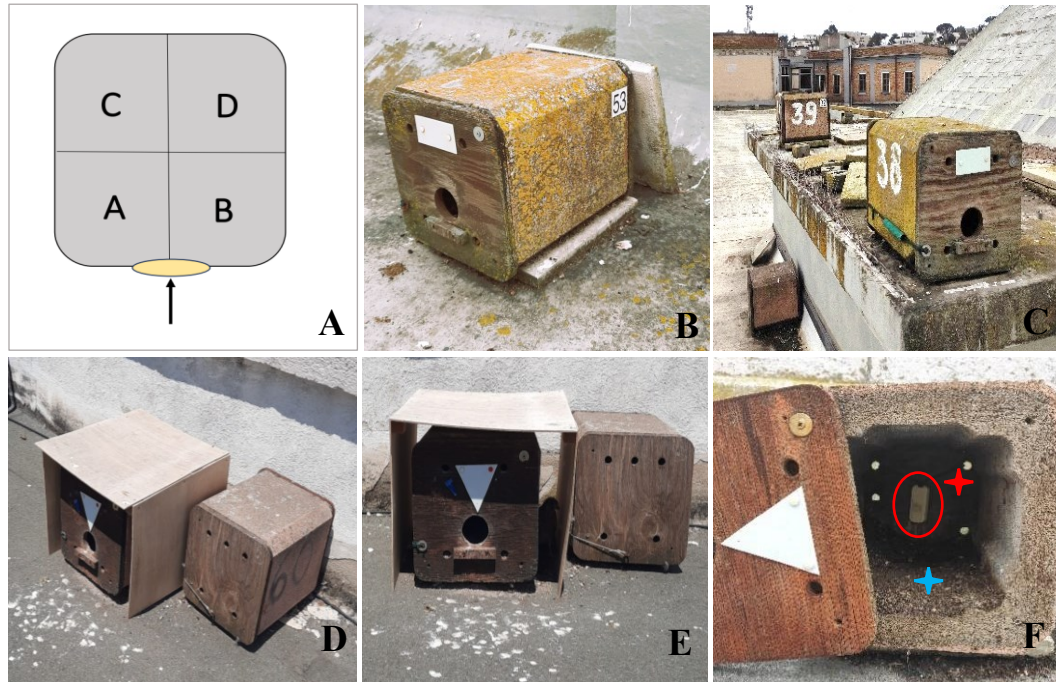


Fig.2: suddivisione figurativa dell'area interna alla cassetta nido (A); cassette nido Controllo con piastrella posteriore (B); disposizione delle cassette nido sulla terrazza (C); cassette nido Ombreggiate con copertura (D)(E); cassetta nido aperta (F), con lettiera (+) e datalogger all'interno (+).

Durante l'intera stagione riproduttiva è stata misurata la temperatura interna al nido per alcune di queste cassette tramite un datalogger (Elitech RC-5+, Elitech, Regno Unito; precisione  $0,5 \text{ } ^\circ \text{C}$ ) che registrava la temperatura ogni 15 minuti. Questi rilevatori sono stati installati previa calibrazione da parte del fornitore in camera termostatica per 12 ore. Ognuno di questi è stato posizionato all'interno della cassetta nido, agganciato alla parte posteriore.

I dati di temperatura dell'aria esterna sono stati ottenuti dalla stazione meteo di Matera (<http://www.centrofunzionalebasilicata.it/>, stazione meteo Matera). All'interno dei nidi è stata posizionata una microcamera, modello mini IP cam INSYGROW, agganciata ad una delle due pareti laterali che registra il comportamento di adulti e pulcini all'interno del nido.



Fig.3: datalogger.

Durante il periodo di deposizione delle uova, due volte alla settimana a partire dai primi giorni di maggio, sono stati registrati: la data di deposizione, il numero di uova, la data di schiusa, il numero di uova eventualmente non schiuse e il numero di pulcini. Alla schiusa i pulcini sono contrassegnati con dei simboli che indicano il loro ordine di nascita o rango, posti con un pennarello indelebile nero sulla testa dell'animale (Podofillini et al.,2018).

Fig.4: identificativo ordine di nascita (rango)

Rango 1: Pulcino nato per primo	●	Rango 2: Pulcino nato per secondo	● ●
Rango 3	● ● ●	Rango 4	● ● ● ●
Rango 5	✕	Rango 6	

Sono state effettuate 5 visite per ogni nido, dalla schiusa al quindicesimo giorno di vita dei pulcini. Durante le visite i pulcini sono stati pesati tramite bilancia elettronica (precisione 0.1 g), ne è stato fotografato il becco e misurata la lunghezza dell'ala e del tarso tramite calibro (precisione 0.01 mm). Nella prima visita è stato eseguito anche un prelievo di sangue (~ 50  $\mu$ L) da ogni pulcino dalla vena brachiale, utilizzando un ago sterile e un capillare. Il sessaggio molecolare avviene, in seguito in laboratorio, tramite amplificazione PCR del gene sesso specifico CHD-1 con protocollo standard (Griffiths et al., 1998; Podofillini et al., 2018). A circa dieci giorni d'età i pulcini sono stati inanellati con anelli permanenti che portano un codice alfanumerico unico che ne permette l'indentazione individuale per il resto della vita.

Per quanto riguarda gli adulti, se presenti nel nido al momento del controllo, viene bloccata loro l'uscita per minimizzare il disturbo. In questo caso, i pulcini vengono prelevati scostando appena la porta del nido e tastando la lettiera a mano nuda evitando di stressare e di far fuoriuscire l'adulto. Dopo le misurazioni vengono riposti con la medesima accortezza. Se l'adulto presente non risulta inanellato, lo si preleva, lo si inserisce in un sacchetto di cotone bianco traspirante con l'identificativo del nido e del sesso, lo si inanella e vengono svolte le misurazioni morfometriche utilizzando, se necessario, un cappuccio che gli impedisca la vista.





Fig.5: misurazione del tarso dei pulcini (A); pulcino alla visita 5 (B); misurazione della seconda primaria di un maschio adulto (C); valutazione della placca d'incubazione nell'adulto (D).

I dati sono stati raccolti nel contesto di un progetto PRIN con la partecipazione dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e l'Università degli studi di Milano (UMIL).

### **2.3. Analisi video**

La prima parte dell'analisi è stata svolta esaminando 105 video provenienti dalle camere spia di 34 nidi diversi, 17 di controllo e 17 con copertura, in più giornate di registrazione. Per ogni giornata si esamina una media di circa quattro ore di registrato, svolto nelle ore mattutine, solitamente dalle 8.00 alle 12.00. Sono state successivamente analizzate un totale di circa 420 h di registrato ed una media di 12,3 h per nido. Vengono presi in considerazione i dati di temperatura e analizzati video ottenuti dalle camere spia installate all'interno dei nidi.

Ogni 30 minuti viene preso nota per un minuto di:

- Data e ora della registrazione
- Temperatura interna al nido
- L'area occupata dai pulcini
- Presenza di "panting"
- Tasso respiratorio (respirazioni al minuto)

All'arrivo dell'adulto (per tutta la durata del video) viene invece analizzato l'evento di alimentazione dei pulcini e preso nota di:

- Durata dell'evento
- Sesso del genitore
- Area occupata da genitore e pulcini
- Comportamento dei pulcini
- Modalità di distribuzione della preda

Lo sperimentatore lavora alla cieca nell'esaminare i video, non essendo a conoscenza di quali siano i nidi dei due gruppi sperimentali, né del sesso dei pulcini.

Fig.6: Comportamento dei pulcini durante la visita del genitore che porta il cibo

Comportamento	Descrizione
Competizione	Il pulcino è molto competitivo, lotta con i compagni per il boccone e talvolta strappa la preda di bocca al genitore o ai compagni di nido.

Alimentazione	Il pulcino mangia
“Begging”	Il pulcino picchietta con il becco contro quello del genitore o emette un verso di richiamo (“begging call”) chiedendo più cibo.

Fig.7: Modalità di distribuzione della preda

Punteggio assegnato	Descrizione
1	Il pulcino riceve dei piccoli bocconi di cibo.
2	Il pulcino riceve circa $\frac{1}{4}$ della preda.
3	Il pulcino riceve la $\frac{1}{2}$ della preda.
4	Il pulcino riceve circa $\frac{3}{4}$ della preda.
5	Il pulcino riceve l'intera preda.

#### 2.4 Analisi statistiche

Per le analisi statistiche viene considerato un campione di 34 nidi di cui si hanno diverse giornate di registrazione in diversi orari. I dati ottenuti dall'analisi video sono stati inseriti in un database *Microsoft Excel*® e processati tramite il programma *R* (versione 4.3.0; R Core Team 2023). Modelli lineari misti (LMM) e modelli lineari generalizzati misti (GLMM) sono stati adattati utilizzando le librerie "lme4" e "glmmTMB" (Bates et al., 2014; Brooks et al., 2017). Con tali modelli vengono svolte le analisi statistiche descritte in seguito. Il livello di significatività utilizzato è  $\alpha=0,05$  e viene, per ogni valore medio, calcolato l'errore standard (SE) corrispondente.

Per la realizzazione degli elementi grafici è stato utilizzato il pacchetto: *ggplot2* e *sjplot*.

Sono stati costruiti modelli LMM per indagare la relazione tra la temperatura massima interna al nido e il gruppo sperimentale, per l'analisi riguardante la durata della visita dei genitori e per analizzare il tasso respiratorio dei pulcini. I modelli GLMM, invece, sono stati utilizzati nell'analisi riguardante il "panting" e il comportamento dei pulcini (variabili di tipo binomiale). In tutti i modelli è stata utilizzata la variabile Nido come effetto di intercetta casuale.

Le variabili prese in considerazione sono state ricavate durante il lavoro di campo, le analisi video e il sessaggio in laboratorio. Nelle mie analisi, oltre alle variabili sopracitate, ho considerato l'identificativo del nido, l'età, il sesso e il rango del pulcino, il sesso del genitore e l'area occupata nel nido.

#### ***2.4.1 Temperatura massima nei due gruppi sperimentali***

Per prima cosa è stata calcolata la temperatura massima registrata in ogni ora riferita a ciascuna combinazione di giorno, nido e gruppo sperimentale. Viene poi testata, tramite il modello lineare misto, la significatività della differenza tra i due gruppi sperimentali delle temperature massime così ottenute. Nella costruzione, la temperatura massima rappresenta la variabile dipendente, mentre il gruppo sperimentale, l'ora e il giorno giuliano (numero del giorno dell'anno a partire dal 1° gennaio), quelle indipendenti.

L'analisi successiva ha come scopo l'osservazione dei comportamenti tra pulcini durante l'alimentazione. In essa si tiene conto sia delle condizioni fisiologiche dei pulcini che della lunghezza della visita dei genitori durante l'alimentazione. Data la differenza di temperatura nei due gruppi, ogni modello viene eseguito inserendo tra le variabili indipendenti il gruppo sperimentale e, nel caso questo non influenzasse la variabile oggetto, viene sostituito nel modello dalla temperatura osservata nel momento in cui il comportamento è registrato (che in parte covaria con il gruppo sperimentale).

#### ***2.4.2 Durata della visita dei genitori***

Viene svolta un'analisi utilizzando il modello lineare misto (usando il nido come fattore casuale) considerando la durata media della visita dei genitori come variabile dipendente ed il gruppo sperimentale, l'età dei pulcini, il sesso del genitore e la modalità di distribuzione della preda come variabili indipendenti. Si calcola poi la durata della visita media nei due sessi e nei due gruppi sperimentali con i relativi errori standard. Questa analisi permetterà di ottenere informazioni sullo sforzo parentale ricevuto dai pulcini nelle due condizioni sperimentali, dato prezioso nello studio della competizione per il boccone.

#### ***2.4.3 Respirazione dei pulcini***

Al fine di ottenere informazioni sulla condizione fisiologica dei pulcini al variare della temperatura, viene analizzata la presenza di “panting” (variabile binomiale: 0 = assenza di “panting”; 1 = presenza di “panting”) e il tasso respiratorio (variabile continua). Si indaga in primis la dipendenza della variabile “panting” dal gruppo sperimentale, dall'età, dal rango, dal sesso del pulcino e dall'area nel nido occupata. Viene così costruito un modello GLMM di tipo binomiale utilizzando il nido come variabile ad effetto casuale. Data la mancata dipendenza della variabile “Panting” dal gruppo sperimentale, il modello è poi replicato sostituendo al gruppo sperimentale la temperatura massima registrata nel nido nel momento in cui il comportamento di “panting” è stato osservato (oppure no).

Per il tasso respiratorio viene costruito un modello LMM che prevede il gruppo sperimentale, il rango, il sesso del pulcino, l'età e l'area occupata come variabili indipendenti e il nido come variabile ad effetto casuale. Viene infine calcolato il tasso respiratorio medio caratterizzante i due gruppi sperimentali e il relativo errore standard.

#### ***2.4.4 Comportamento***

Per analizzare il comportamento dei pulcini, vengono utilizzate le variabili che descrivono il comportamento tenuto durante la visita dell'adulto: Competizione, “Begging” e Alimentazione. Per ognuna delle tre analisi viene costruito un modello GLMM binomiale utilizzando la variabile comportamento come dipendente e il

gruppo sperimentale, il rango, il sesso del pulcino, l'età e l'area occupata come variabili indipendenti. La variabile Nido è utilizzata come variabile ad effetto casuale. In assenza di dipendenza della variabile dal gruppo sperimentale, viene replicato il modello utilizzando la temperatura massima.

### ***2.5 Nota etica***

La cattura e la manipolazione sono state effettuate dall'ISPRA su autorizzazione ai sensi della legge 157/1992 [art. 4 (1) e art. 7 (5)] e nessuna mortalità aggiuntiva può essere attribuita alla manipolazione da parte dello sperimentatore.

### 3. Risultati

Di seguito vengono mostrati i risultati delle analisi effettuate, mentre si rimanda all'Appendice per le tabelle contenenti le stime dei coefficienti sui quali sono costruiti i modelli statistici.

#### 3.1 Temperatura massima nei due gruppi sperimentali

La differenza tra le temperature massime nei due gruppi sperimentali risulta significativa ( $p = 0.011$ ) con una riduzione media di  $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  nel gruppo Ombreggiato rispetto al Controllo. La temperatura cresce inoltre con il passare delle ore ( $p < 0.001$ ) e dei giorni ( $p < 0.001$ ) analizzati. Vengono mostrate nella Tabella 1 la temperatura massima media caratterizzante il gruppo sperimentale (Media Tmax) ottenuta dai dati sulla temperatura registrati in diverse giornate dal 15/6/2022 al 5/7/2022, periodo durante il quale le camere spia interne al nido erano in funzione. Sono evidenziate anche la temperatura minima ( $T_{\min}$ ) e massima ( $T_{\max}$ ) assolute raggiunte nei due casi.

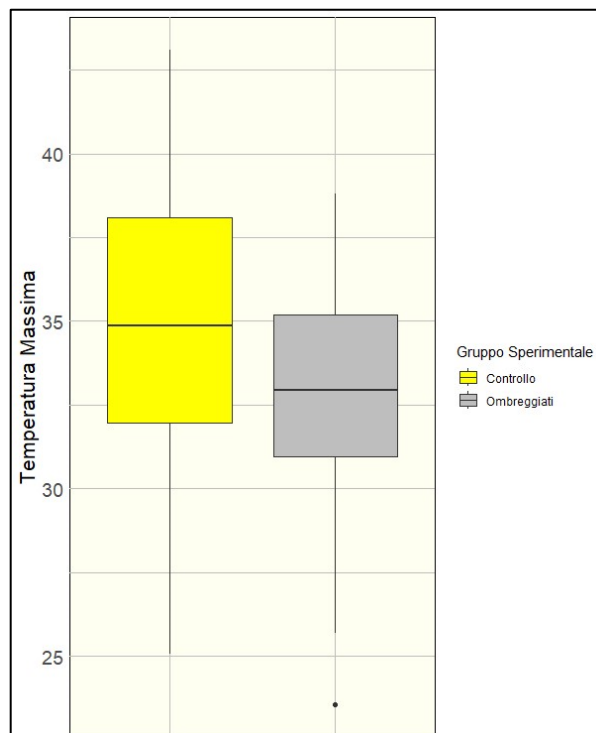


Fig.8: boxplot rappresentante la distribuzione delle temperature massime nei due gruppi sperimentali.

Tabella 1: temperatura interna al nido nei due gruppi sperimentali.

Gruppo sperimentale	Media Tmax	T MIN	T MAX
Controllo	35.4 ± 0.8°C	29.4 ± 0.5°C	40.1 ± 0.5°C
Ombreggiato	32.6 ± 0.6°C	28.6 ± 0.5°C	38.2 ± 0.5°C

### 3.2 Durata della visita dei genitori.

Il modello indica che la lunghezza della visita del genitore è dipendente dal gruppo sperimentale ( $p = 0.015$ ), dal sesso del genitore ( $p < 0.001$ ) e dalla modalità di distribuzione della preda ( $p = 0.013$ ). In particolare, la lunghezza della visita del genitore è più prolungata nel gruppo di controllo rispetto al gruppo ombreggiato. Ad una distribuzione della preda intera o semi intera corrispondono visite più brevi e sono le femmine ad attuare visite più prolungate.

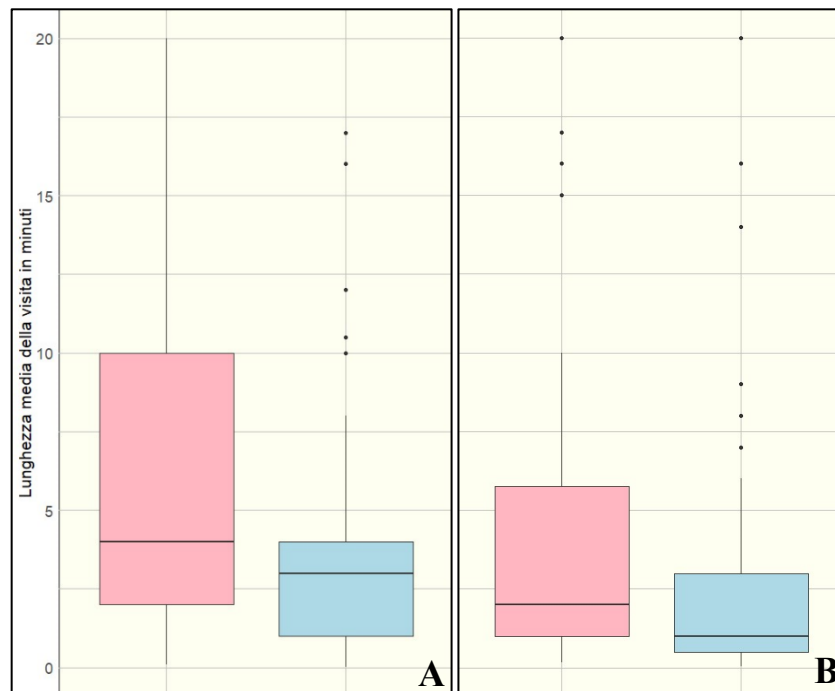


Fig. 9: boxplot rappresentante la distribuzione della lunghezza delle visite, svolte dal genitore maschio (in azzurro) e femmina (in rosa), nel gruppo sperimentale di controllo (A) ed ombreggiato (B). Il grafico è stato derivato dal modello LMM descritto nel paragrafo 2.4.2 rimuovendo gli outliers con valori superiori al novantacinquesimo percentile.



Tabella 2: durata media della visita dei genitori nei due gruppi sperimentali.

Sesso del genitore	Controllo	Ombreggiato
F	8.6 ± 0.8 min	4.9 ± 0.4 min
M	4.8 ± 0.5 min	2.9 ± 0.3 min

Si ha una differenza di 3.8 minuti nella lunghezza della visita tra i due sessi nei nidi controllo e di 2 minuti negli ombreggiati. Le femmine dei nidi controllo spendono in media 3.7 minuti a visita in più rispetto alle femmine degli ombreggiati, mentre i maschi del gruppo controllo fanno visite più prolungate di 1.9 minuti rispetto ai maschi dei nidi coperti.

### ***3.3 Respirazione dei pulcini***

Dall'analisi sulla presenza di "panting" non risulta esserci una differenza significativa nei due gruppi sperimentali anche se è presente una leggera tendenza, non significativa, alla diminuzione di "panting" nei nidi ombreggiati ( $p = 0.09$ ). Si è quindi costruito un secondo modello per indagare il rapporto diretto con la temperatura. Ne risulta che la temperatura ha un effetto positivo sulla presenza di "panting" ( $p < 0.001$ ), così come l'età del pulcino ( $p = 0.002$ ) e l'occupazione dell'area B ( $p = 0.047$ ). In particolare, all'aumentare della temperatura e dell'età, si registra un aumento di "panting" nei pulcini, pratica che risulta particolarmente presente nell'area B.

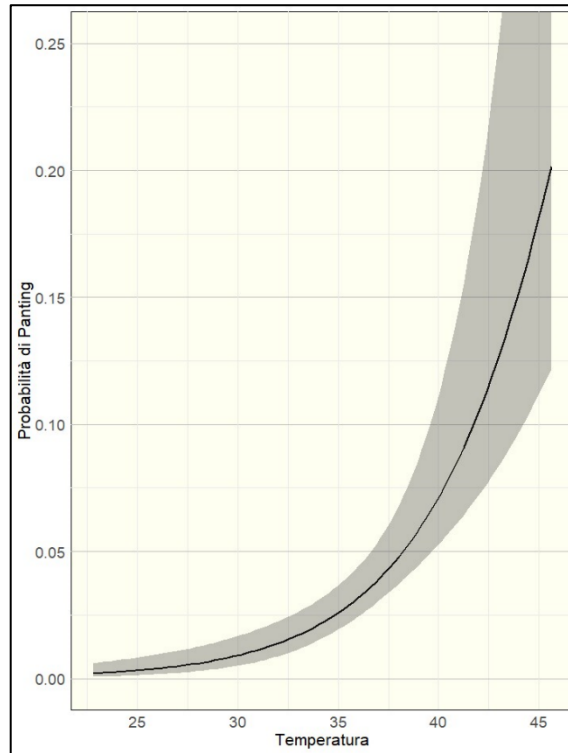


Fig. 10: il grafico mostra la relazione tra la temperatura e la presenza di “panting” con intervallo di confidenza al 95%. I dati utilizzati derivano da un adattamento del modello GLMM descritto nel paragrafo 2.4.3.

Tabella 3: probabilità di osservare il “panting” in corrispondenza della temperatura massima media dei due gruppi sperimentali.

Gruppo sperimentale	Media Tmax	Probabilità di “panting”
Controllo	35.4 ± 0.8°C	2.8 ± 0.4%
Ombreggiato	32.6 ± 0.6°C	1.6 ± 0.3%

Il tasso respiratorio invece, è influenzato dal gruppo sperimentale ( $p=0.029$ ), dall’età, che ha un effetto positivo ( $p=0.003$ ) e dall’occupazione dell’area C e D (entrambi  $p < 0.001$ ) con effetto negativo. La respirazione risulta quindi accelerata nei nidi controllo rispetto a quelli ombreggiati, aumenta con l’età ed è ridotta quando il pulcino si trova nelle aree C e D.

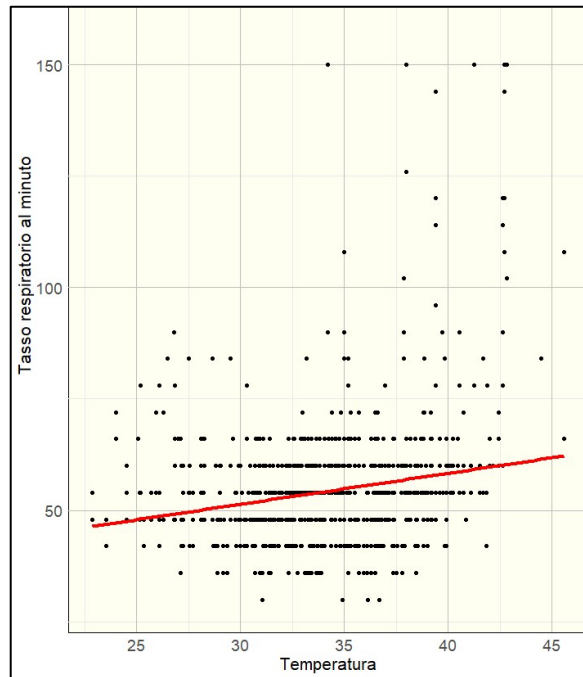


Fig.11: grafico a dispersione con retta di regressione (in rosso) dei valori assunti dal tasso respiratorio al variare della temperatura massima interna al nido.

Tabella 4: tasso respiratorio medio nei due gruppi sperimentali

Gruppo sperimentale	Tasso respiratorio medio al minuto
Controllo	$57.2 \pm 0.7$ resp. /min
Ombreggiato	$52.1 \pm 0.3$ resp. /min

### 3.4. Comportamento

Viene analizzato il comportamento dei pulcini durante l'alimentazione descritto dalle variabili binomiali: Competizione, "Begging" e Alimentazione. Da una prima analisi, il comportamento competitivo non risulta essere influenzato dal gruppo sperimentale. Viene dunque riproposto il modello con la temperatura. Essa risulta avere un effetto significativo e negativo sulla presenza di competizione ( $p < 0.001$ ). Il rango e l'età hanno un effetto positivo (entrambi,  $p < 0.001$ ) e la competizione risulta influenzata dal sesso dei pulcini e più pronunciata nelle femmine ( $p < 0.001$ ). La presenza di competizione, quindi, diminuisce al crescere della temperatura mentre è più accentuata all'aumentare dell'età, nei pulcini subordinati (di rango inferiore) e nelle femmine.

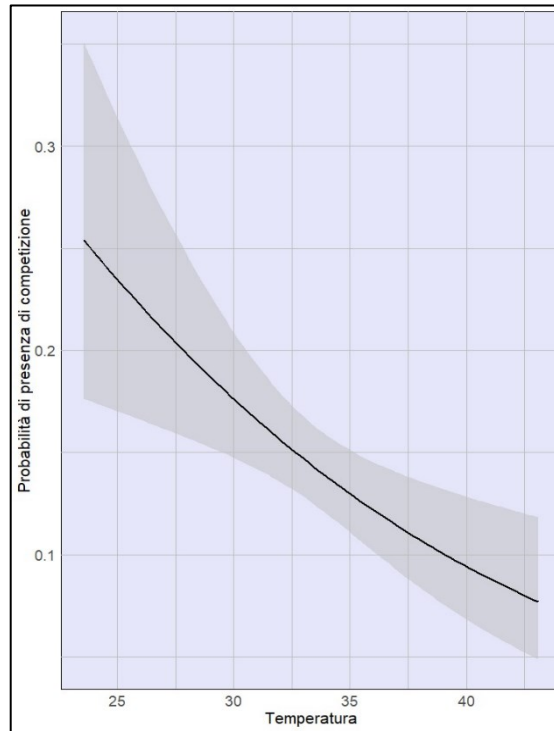


Fig.12: relazione tra temperatura e presenza di competizione con intervallo di confidenza del 95%. Il grafico è ottenuto da un adattamento dal modello GLMM descritto nel paragrafo 2.4.4.

Tabella 5: probabilità di osservare competizione tra i pulcini in corrispondenza della temperatura massima media nei due gruppi sperimentali.

Gruppo sperimentale	Media Tmax	Probabilità presenza di competizione
Controllo	35.4 ± 0.8°C	12.6 ± 1.0%
Ombreggiato	32.6 ± 0.6°C	15.0 ± 1.0%

Il comportamento di richiesta di cibo al genitore (“begging”) è influenzato in maniera significativa dal gruppo sperimentale ( $p = 0.030$ ), dal rango con effetto positivo ( $p=0.003$ ) e dalla presenza del pulcino nell’area B con effetto negativo ( $p =0.026$ ). In particolare, il “begging” risulta meno presente nei nidi controllo, nei ranghi superiori e in prossimità dell’area B. Tuttavia, dal modello costruito utilizzando la temperatura come variabile indipendente, risulta che la relazione tra la presenza di “begging” e la temperatura non è significativa ( $p= 0.135$ ).

L'attività alimentare dei pulcini non dipende dal gruppo sperimentale. Perciò, viene riproposto un secondo modello utilizzando la temperatura come predittore. Quest'ultima ha effetto positivo sull'assunzione di cibo ( $p = 0.016$ ), mentre non sembra esserci influenza da parte del rango, del sesso dei pulcini o dell'età (anche se per quest'ultima è presente una leggera tendenza positiva non significativa ( $p = 0.058$ )). La presenza dei pulcini nell'area B, infine, è positivamente associata all'assunzione di cibo ( $p = 0.007$ ). In particolare, i pulcini aumentano l'attività alimentare in presenza di alte temperature e in prossimità dell'area B, indipendentemente dal rango di nascita.

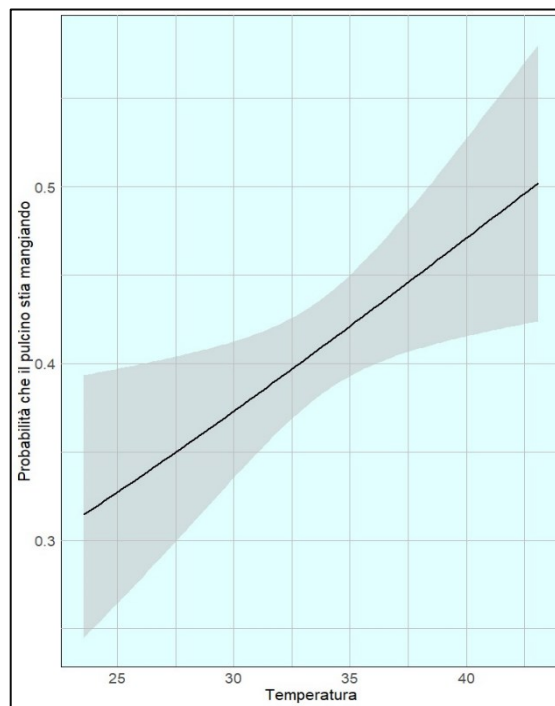


Fig. 13: relazione tra l'attività alimentare e la temperatura con intervallo di confidenza del 95%. Il grafico è ottenuto da un adattamento del modello GLMM descritto nel paragrafo 2.4.4.

Tabella 6: probabilità che il pulcino si stia alimentando in corrispondenza della temperatura massima media nei due gruppi sperimentali.

Gruppo sperimentale	Media Tmax	Probabilità presenza attività alimentare
Controllo	$35.4 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$	$42.5 \pm 1.5\%$
Ombreggiato	$32.6 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$	$39.8 \pm 1.4\%$

## ***4. Discussione***

Nell'analisi svolta si sono prese in considerazione le risposte etologiche e fisiologiche che caratterizzano il falco grillaio durante la sua stagione riproduttiva in presenza di ondate di calore. La differenza nella temperatura interna nei nidi dei due gruppi sperimentali è risultata significativa. Questo ha posto le basi per le analisi svolte in seguito, nelle quali si intendeva verificare se, e in che modalità, lo sforzo parentale, la fisiologia ed in particolare il comportamento dei nidiacei si modificassero all'interno dei due gruppi e al variare della temperatura.

Vengono interpretati di seguito i risultati ottenuti.

### ***4.1 Durata della visita dei genitori.***

Il tempo speso nel nido dal genitore durante l'alimentazione è influenzato dal gruppo sperimentale. Nei nidi di controllo entrambi i genitori svolgono visite più prolungate rispetto ai nidi con copertura. Questo dà indicazione di come il falco grillaio non riduca le cure parentali in presenza di una situazione termicamente svantaggiosa, ma che al contrario incrementi lo sforzo parentale cercando di sopperire ad una situazione sfavorevole sperimentata dai pulcini. Tale risultato è interessante e presenta una tendenza opposta rispetto alla letteratura, dove spesso viene riportata una riduzione delle cure parentali in condizioni termiche critiche (van de Ven et al., 2020; Wiley & Ridley, 2016). La durata della visita differisce significativamente tra i due sessi e sono le femmine a trascorrere più tempo nel nido. Tale risultato è in linea con il fatto che nella stagione riproduttiva lo sforzo parentale dei falconidi è eterogeneamente distribuito tra i due sessi e vede, nella fase di crescita dei pulcini, il maschio portare più frequentemente le prede al nido e la femmina spendere più energie nell'accudimento diretto dei nidiacei (Hernández-Pliego et al., 2017; Kujala et al., 2022). A visite più prolungate corrisponde una distribuzione della preda in pezzi più numerosi e quindi meno monopolizzabili dal singolo pulcino. I dati ottenuti da questa parte di analisi saranno utili nello spiegare la competizione per il boccone discussa in seguito.

#### **4.2 Respirazione dei pulcini**

La presenza di “panting” aumenta con la temperatura, con l’età dei pulcini e risulta particolarmente presente nei pulcini che si trovano nell’area B, vicina all’apertura del nido. La correlazione è molto stretta con la temperatura. Il fatto che non ci sia una differenza significativa nella presenza di “panting” nei due gruppi sperimentali è riconducibile al fatto che nelle tre ore di registrazione video le temperature (e il “panting”) aumentano solo verso la fine della mattinata. Il “panting” favorisce il raffreddamento del corpo tramite la perdita di calore per evaporazione d'acqua dalle vie aeree. Si tratta di una pratica dispendiosa che necessita di una allocazione delle risorse da parte dei pulcini che rischia di comprometterne la crescita e la sopravvivenza (Angilletta et al., 2010; Smit et al., 2016; Whitfield et al., 2015; Wolf & Walsberg, 1996 ; Corregidor-Castro et al., 2023). Pulcini anagraficamente più grandi, sono più propensi al “panting”, questo potrebbe essere ricondotto ad un aumento del piumaggio che, nei primi giorni di vita è totalmente assente e che risulta sempre più abbondante con il passare delle settimane. Si può ipotizzare che questo piumaggio, se da un lato protegge il pulcino dalle basse temperature, dall’altro non possiede ancora le caratteristiche del piumaggio da adulto in grado di impedire il surriscaldamento (Mota-Rojas et al., 2021). I pulcini sono più inclini al “panting” quando si trovano nell’area B nella parte anteriore del nido. Nonostante non ci siano studi in merito, si può ipotizzare che le aree A e B, prossime all’apertura, siano più calde in quanto maggiormente esposte alla luce solare diretta, mentre quelle C e D, sul retro della cassetta, siano più fresche. Viceversa, è possibile che i pulcini più stressati termicamente e quindi più bisognosi di cibo (l’acqua viene ottenuta dalle prede) si avvicinino all’entrata per aumentare la probabilità di ottenere il boccone.

Il tasso respiratorio è influenzato dal gruppo sperimentale e risulta incrementato in media di circa 5 resp/min nei nidi di controllo rispetto ai nidi ombreggiati. La frequenza del respiro aumenta con l’età e risulta in calo quando i pulcini si trovano nelle aree C e D. L’aumento del tasso respiratorio permette una dissipazione del calore tramite le vie aeree e costituisce dunque una importante risposta termoregolatoria (Randall, 1943). Come descritto in precedenza per la presenza di “panting” con l’avanzare dell’età i pulcini aumentano la copertura del piumaggio andando incontro ad una maggiore difficoltà nel dissipare il calore rispetto ai primi

giorni di vita. Inoltre, all'aumentare delle dimensioni diminuisce la superficie relativa del corpo e quindi l'efficienza di dissipazione termica passiva. La frequenza respiratoria è una risposta ad elevato costo energetico (Angilletta et al., 2010; Smit et al., 2016; Whitfield et al., 2015; Wolf & Walsberg, 1996) ed è probabilmente la ragione principale del minor sviluppo corporeo dei pulcini di falco grillaio esposti alle ondate di calore (Corregidor-Castro et al. 2023). "Panting" e frequenza di respirazione sono un chiaro indice di come il rapace si trovi in una condizione termica critica (Simide et al., 2016).

### **4.3 Comportamento**

Il primo comportamento preso in considerazione è quello di tipo competitivo, associato a pulcini che cercano di primeggiare sui compagni di nidiata per ottenere più cibo dai genitori. La competitività non dipende significativamente dal gruppo sperimentale, ma è fortemente e negativamente influenzata dalla temperatura. La competizione dipende inoltre dal rango, dall'età e dal sesso del pulcino. I pulcini nati per ultimi tendono ad essere esclusi dall'accesso al cibo e tendono a compiere più tentativi aggressivi e di furto del cibo rispetto ai ranghi superiori. I pulcini sembrano infatti tentare di sopperire all'inferiorità della taglia, dovuta all'ordine di nascita, con una competizione per il boccone molto accesa. In generale però, con il passare dei giorni i pulcini aumentano la competizione al nido, fatto probabilmente correlato con lo sviluppo motorio che viene acquisito col tempo. Infine, i pulcini femmina risultano essere più aggressivi nei confronti dei fratelli, confermando i risultati ottenuti nel gheppio americano (*Falco sparverius*, Anderson et al., 1993). All'aumentare della temperatura la competizione cala. Tra le due ipotesi oggetto di verifica sperimentale quindi, i risultati ottenuti dimostrano che, quando i pulcini di falco grillaio si trovano in una condizione critica per le elevate temperature al nido, la competizione, molto diffusa nei falconidi e in altri uccelli predatori con nidiate numerose ed asincrone (Confernce et al., 1993), è probabilmente troppo dispendiosa e viene complessivamente ridotta. Parte dell'energia risparmiata in questo caso, infatti, potrebbe essere necessaria per termoregolare (Mitchell et al., 2018). Unitamente a questo, le alte temperature sono correlate a visite più lunghe e ad una distribuzione da parte del genitore di numerosi bocconi, poco monopolizzabili dal singolo pulcino, che riduce la necessità di competizione.



Questa, infatti, risulterebbe più accesa con prede intere o semi-interi come osservato anche in altre specie (Steen & Slagsvold., 2012; Brown et al, 1990).

La seconda variabile presa in considerazione è il “begging” che risulta dipendere dal gruppo sperimentale, dal rango e dall’area interessata. Tuttavia, non è influenzata in modo significativo dalla temperatura. Questo risultato suggerisce che il “begging” sia determinato dalla condizione generale dei pulcini (associata alle condizioni termiche medie sperimentate) piuttosto che da una risposta immediata alle variazioni termiche nell’ambito della stessa giornata. Tale pratica è costosa e risulta da un bilancio tra lo stato di bisogno del pulcino e la probabilità di ottenere del cibo in funzione dell’investimento nel “begging” (Rodríguez-Gironés & Lachmann 2001). I risultati suggeriscono indirettamente che i pulcini di rango inferiore dei nidi ombreggiati possano investire maggiormente nel “begging” in linea con quanto trovato nell’analisi sulla competizione. A differenza dei comportamenti aggressivi, però, il “begging” non cala all’aumentare della temperatura. Una spiegazione di questa differenza è che il “begging” è rivolto ai genitori, e il suo successo dipende dall’intensità della richiesta. Viceversa, il comportamento aggressivo è rivolto ai fratelli di rango maggiore e i pulcini di rango inferiore hanno una ridotta aspettativa di successo quando le condizioni termiche sono stressanti. Il comportamento di “begging” potrebbe quindi contrastare la tendenza del genitore ad attuare una selezione indiretta verso i pulcini in condizioni fisiche migliori, tale per cui è più propenso ad alimentare i pulcini più grossi (per esempio nell’upupa (*Upupa epops*); Paula Ferrer-Pereira et al., 2023).

Prendendo in considerazione l’alimentazione, è stato rilevato che essa non è influenzata dal gruppo sperimentale, ma dipende dalla temperatura e dall’area del nido interessata. All’aumentare della temperatura l’attività alimentare cresce, indipendentemente dal rango. Questo non sembra però essere sufficiente per riequilibrare la situazione critica della nidata. Nonostante nei nidi controllo i pulcini intensifichino l’alimentazione, infatti, dalla letteratura si evince che essi presentano una crescita ridotta, ridotte dimensioni e struttura scheletrica deficitaria rispetto ai pulcini nella condizione ombreggiata (Corregidor-Castro et al., 2023). Questo comporta presumibilmente la compromissione della loro sopravvivenza e del successo riproduttivo (Magrath, 1991; Haywood & Perrins, 1992; Schwagmeyer & Mock, 2008). Si registra infine un incremento dell’attività

alimentare in corrispondenza dell'area B. Questo dato suggerisce che i pulcini si avvicinino all'uscita per ottenere maggior accesso al cibo.

## ***5. Conclusioni***

In conclusione, i risultati ottenuti dimostrano che, all'aumentare della temperatura al nido, i pulcini vanno incontro a stress termico, come suggerito dalla maggior presenza di "panting" e dal maggior tasso respiratorio. Sia la competitività che il "begging" sono maggiormente presenti nei pulcini subordinati (= rango di schiusa alto/ inferiore). In risposta allo stress termico i pulcini riducono la competizione e tale riduzione suggerisce che il rapporto costi/benefici ad essa associati si modifica alle alte temperature, in particolar modo nei pulcini subordinati. Viceversa, essi non riducono il loro comportamento di "begging" durante le ore/giornate più calde. Il ridimensionamento della competitività da parte dei pulcini, che si verifica nei nidi più caldi, è compensato da visite più prolungate da parte dei genitori e quindi da una distribuzione del boccone in numerosi pezzi, non monopolizzabili, che riduce la necessità di competizione.

Dall'analisi appare infine che l'attività alimentare aumenta con la temperatura e che non dipende dal rango. Nonostante i dati finora ottenuti suggeriscano la mancata relazione tra l'assunzione di cibo e il rango, un'estensione dell'analisi del grado di omogeneità nella ripartizione del cibo tra i pulcini sarà necessaria per verificare se le elevate temperature portano ad una distribuzione del cibo più o meno diseguale tra i ranghi. In ultima analisi quindi, si potrà verificare se le ondate di calore abbiano un effetto negativo simile (= proporzionale) su tutti i pulcini o se esse abbiano un effetto sproporzionatamente negativo sui pulcini più piccoli. Questo effetto ridurrebbe il numero di pulcini involati (maggior mortalità, Corregidor-Castro et al., 2023), ma quelli involati potrebbero essere in condizioni migliori di quanto ci si potrebbe aspettare nel caso di una suddivisione più equa del cibo tra i pulcini della stessa nidiata.

## **6. Appendice**

Sono di seguito riportate le stime dei coefficienti utilizzati per la costruzione dei modelli statistici utilizzati nella tesi, in grassetto sono indicati i p-value statisticamente significativi, minori di 0.05.

**Tabella A:** risultato del modello lineare misto relativo alla temperatura massima interna nei due gruppi sperimentali.

Dimensione campione: 204 osservazioni;  $R^2 = 0.315$ .

<b>Temperatura massima interna</b>	Estimate (SE)	t-value	Pr(>  t  )
Gruppo sperimentale (ombreggiato)	-2.71 (1.06)	-2.56	<b>0.011</b>
Ora	1.68 (0.17)	10.08	<b>&lt; 0.001</b>
Giorno giuliano	0.35 (0.05)	7.23	<b>&lt; 0.001</b>

**Tabella B:** risultato del modello lineare misto relativo alla durata media della visita dei genitori al nido.

Dimensione campione: 769 osservazioni;  $R^2 = 0.091$ .

<b>Durata della visita dei genitori</b>	Estimate (SE)	t-value	Pr(>  z  )
Gruppo sperimentale (ombreggiato)	-3.74 (1.54)	-2.43	<b>0.015</b>
Età del pulcino	-0.19 (0.15)	-1.21	0.225
Sesso del genitore (Maschio)	-2.22 (0.45)	-4.91	<b>&lt; 0.001</b>
Modalità di distribuzione della preda	-0.495 (0.20)	-2.48	<b>0.013</b>

**Tabella C:** risultato del modello lineare generalizzato misto relativo alla presenza di “panting” nei pulcini, utilizzando tra le variabili indipendenti: il gruppo sperimentale (i) e la temperatura (ii). Il “panting” si è verificato in 49 casi su 1753 casi analizzati (2.79 % dei casi).

i) Dimensione campione: 1753 osservazioni;  $R^2 = 0.196$ .

“Panting”	Estimate (SE)	z-value	Pr(>  z   )
Gruppo sperimentale (ombreggiato)	-1.34 (0.80)	-1.67	0.094
Età del pulcino	0.26 (0.06)	4.38	<b>&lt; 0.001</b>
Rango	0.21 (0.22)	0.95	0.342
Sesso del pulcino (Maschio)	-0.20 (0.43)	-0.46	0.645
Area B	1.08 (0.67)	1.61	0.108
Area C	-0.71 (0.54)	-1.31	0.188
Area D	-0.87 (0.56)	-1.55	0.120

ii) Dimensione campione: 1753 osservazioni;  $R^2 = 0.232$ .

“Panting”	Estimate (SE)	z-value	Pr(>  z   )
Temperatura	0.27 (0.06)	4.42	<b>&lt; 0.001</b>
Età del pulcino	0.19 (0.06)	3.16	<b>0.002</b>
Rango	0.12 (0.21)	0.55	0.579
Sesso del pulcino (Maschio)	-0.28 (0.42)	-0.66	0.506
Area B	1.42 (0.71)	1.98	<b>0.047</b>
Area C	-0.01 (0.58)	-0.01	0.989
Area D	-0.20 (0.61)	-0.33	0.738

**Tabella D:** risultato del modello lineare misto relativo al tasso respiratorio dei pulcini.

Dimensione campione: 1581 osservazioni; R2= 0.080.

<b>Tasso respiratorio</b>	Estimate (SE)	t-value	Pr(>  z   )
Gruppo sperimentale (ombreggiato)	-0.83 (0.38)	-2.19	<b>0.029</b>
Età del pulcino	0.05 (0.02)	2.96	<b>0.003</b>
Rango	-0.04 (0.05)	-0.79	0.429
Sesso del pulcino (Maschio)	0.05 (0.12)	0.45	0.651
Area B	0.09 (0.31)	0.31	0.757
Area C	-1.40 (0.23)	-6.18	<b>&lt; 0.001</b>
Area D	-1.27 (0.22)	-5.61	<b>&lt; 0.001</b>

**Tabella E:** risultato del modello lineare generalizzato misto relativo alla presenza di competizione tra pulcini, utilizzando tra le variabili indipendenti: il gruppo sperimentale (i) e la temperatura (ii).

i) Dimensione campione: 1287 osservazioni; R2 = 0.053.

<b>Competizione</b>	Estimate (SE)	z-value	Pr(>  z   )
Gruppo sperimentale (ombreggiato)	0.49 (0.60)	0.82	0.423
Età del pulcino	0.015 (0.09)	0.16	0.872
Rango	0.03 (0.13)	0.23	0.821
Sesso del pulcino (Maschio)	-0.12 (0.21)	-0.56	0.578
Area B	-0.99 (0.32)	-3.13	<b>0.002</b>
Area C	-1.56 (0.31)	-4.97	<b>&lt; 0.001</b>
Area D	-0.89 (0.28)	-3.16	<b>0.002</b>

ii) Dimensione campione: 1287 osservazioni; R2 = 0.045.

<b>Competizione</b>	Estimate (SE)	z-value	Pr(>  z   )
Temperatura	-0.02 (0.001)	-16.00	< <b>0.001</b>
Età del pulcino	0.02 (0.01)	18.16	< <b>0.001</b>
Rango	0.04 (0.001)	35.98	< <b>0.001</b>
Sesso del pulcino (Maschio)	-0.11 (0.001)	-99.53	< <b>0.001</b>
Area B	-0.99 (0.001)	-881.18	< <b>0.001</b>
Area C	-1.56 (0.001)	-1373.25	< <b>0.001</b>
Area D	-0.89 (0.001)	-784.50	< <b>0.001</b>

**Tabella F:** risultato del modello lineare generalizzato misto relativo alla presenza di “begging” nei pulcini, utilizzando tra le variabili indipendenti: il gruppo sperimentale (i) e la temperatura (ii).

i) Dimensione campione: 1287 osservazioni; R2 = 0.064.

<b>“Begging”</b>	Estimate (SE)	z-value	Pr(>  z   )
Gruppo sperimentale (ombreggiato)	0.67 (0.31)	2.17	<b>0.030</b>
Età del pulcino	0.04 (0.06)	0.73	0.464
Rango	0.26 (0.09)	2.90	<b>0.003</b>
Sesso del pulcino (Maschio)	-0.18 (0.17)	-1.04	0.298
Area B	-0.69 (0.31)	-2.23	<b>0.026</b>
Area C	-0.17 (0.27)	-0.61	0.540
Area D	-0.40 (0.27)	-1.49	0.135

ii) Dimensione campione: 1287 osservazioni; R2 = 0.041.

<b>“Begging”</b>	Estimate (SE)	z-value	Pr(> z )
Temperatura	0.05 (0.33)	1.49	0.135
Età del pulcino	0.05 (0.06)	0.76	0.445
Rango	0.28 (0.09)	2.93	<b>0.003</b>
Sesso del pulcino (Maschio)	-0.18 (0.17)	-1.02	0.306
Area B	-0.72 (0.31)	-2.33	<b>0.020</b>
Area C	-0.19 (0.27)	-0.69	0.489
Area D	-0.46 (0.27)	-1.70	0.089

**Tabella G:** risultato del modello lineare generalizzato misto relativo all’attività alimentare, utilizzando tra le variabili indipendenti: il gruppo sperimentale (i) e la temperatura (ii).

i) Dimensione campione: 1287 osservazioni; R2= 0.037.

<b>Alimentazione</b>	Estimate (SE)	z-value	Pr(> z )
Gruppo sperimentale ( ombreggiato)	0.34 (0.34)	0.95	0.343
Età del pulcino	0.10 (0.06)	1.70	0.089
Rango	-0.03 (0.08)	-0.41	0.682
Sesso del pulcino (Maschio)	0.17 (0.14)	1.23	0.220
Area B	0.62(0.23)	2.69	<b>0.007</b>
Area C	-0.09 (0.22)	-0.40	0.687
Area D	0.04 (0.21)	0.19	0.846

ii) Dimensione campione: 1287 osservazioni;  $R^2 = 0.040$ .

<b>Alimentazione</b>	Estimate (SE)	z-value	Pr(>  z   )
Temperatura	0.06 (0.02)	2.41	<b>0.016</b>
Età del pulcino	0.11 (0.06)	1.89	0.059
Rango	-0.02 (0.08)	-0.26	0.792
Sesso del pulcino (Maschio)	0.17 (0.14)	1.22	0.222
Area B	0.62(0.23)	2.68	<b>0.007</b>
Area C	-0.08 (0.22)	-0.36	0.720
Area D	0.04 (0.21)	0.21	0.832



## **7. Bibliografia**

Abayarathna, T., & Webb, J. K. (2022). Consequences of Oviposition Site Choice for Geckos in Changing Environments. *Biology*, 11(9), 1281.

<https://doi.org/10.3390/biology11091281>

Albright, T. P., Mutiibwa, D., Gerson, A. R., Smith, E. K., Talbot, W. A., O'Neill, J. J., ... & Wolf, B. O. (2017). Mapping evaporative water loss in desert passerines reveals an expanding threat of lethal dehydration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(9), 2283-2288.

Anderson, D. J., Budde, C., Apanius, V., Gomez, J. E. M., Bird, D. M., & Weathers, W. W. (1993). Prey size influences female competitive dominance in nestling American kestrels (*Falco sparverius*). *Ecology*, 74(2), 367-376.

Andreasson, F., Nilsson, J., & Nord, A. (2020). Avian Reproduction in a Warming World. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8.

<https://doi.org/10.3389/fevo.2020.576331>

Andreasson, F., Nord, A., & Nilsson, J. Å. (2018). Experimentally increased nest temperature affects body temperature, growth and apparent survival in blue tit nestlings. *Journal of Avian Biology*, 49(2), e01620.

<https://doi.org/10.1111/jav.01620>

Angilletta, M. J., Jr, Sears, M. W., & Pringle, R. M. (2009). Spatial dynamics of nesting behavior: lizards shift microhabitats to construct nests with beneficial thermal properties. *Ecology*, 90(10), 2933–2939. <https://doi.org/10.1890/08-2224.1>

Angilletta, M. J., Jr., Cooper, B. S., Schuler, M. S., & Boyles, J. G. (2010). The evolution of thermal physiology in endotherms. *Frontiers in Bioscience-Elite*, 2(3), 861–881. <https://doi.org/10.2741/E148>

Aparicio, J. M. (1997). Costs and benefits of surplus offspring in the lesser kestrel (*Falco naumanni*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 41, 129–137.

<https://doi.org/10.1007/s002650050372>

Arct, A., Drobniak, S. M., Dubiec, A., Martyka, R., Sudyka, J., Gustafsson, L. L., & Cichoń, M. (2022). The interactive effect of ambient temperature and brood size manipulation on nestling body mass in blue tits: an exploratory analysis of a long-term study. *Frontiers in Zoology*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12983-022-00456-x>

Ardia, D. R., Ramenofsky, M., & Clotfelter, E. D. (2010). Experimental cooling during incubation leads to reduced innate immunity and body condition in nestling tree swallows. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1689), 1881–1888. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.2138>

Aurette, D., Thomas, S., Albert, C., Bally, M., Bondeau, A., Boudouresque, C. F., Cahill, A. E., Carlotti, F., Chenuil, A., Cramer, W., Davi, H., de Jode, A., Ereskovsky, A., Farnet, A.-. M., Fernandez, C., Gauquelin, T., Mirleau, P., Monnet, A.-. C., Prévosto, B., & Fady, B. (2022). Biodiversity, climate change, and adaptation in the Mediterranean. *Ecosphere*, 13(4), e3915. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3915>

Baker, D., Freeman, C., Wong, J. C. Y., Fogel, M. L., & Knowlton, N. (2018). Climate change promotes parasitism in a coral symbiosis. *The ISME Journal*, 12(3), 921–930. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0046-8>

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.

Beever, E. A., Hall, L. E., Varner, J., Loosen, A. E., Dunham, J. B., Gahl, M. K., ... & Lawler, J. J. (2017). Behavioral flexibility as a mechanism for coping with climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(6), 299-308.

Boncoraglio, G., Caprioli, M., & Saino, N. (2009). Fine-tuned modulation of competitive behaviour according to kinship in barn swallow nestlings. *Proceedings. Biological sciences*, 276(1664), 2117–2123. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0085>

- Bond, N. A., Cronin, M. F., Freeland, H., & Mantua, N. (2015). Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3414-3420.
- Bortolotti, G. R. (1984). Physical development of nestling bald eagles with emphasis on the timing of growth events. *The Wilson Bulletin*, 524-542.
- Bradley, B. A., Laginhas, B. B., Whitlock, R., Allen, J. M., Bates, A. E., Bernatchez, G., ... & Sorte, C. J. (2019). Disentangling the abundance–impact relationship for invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(20), 9919-9924.
- Bradshaw, W. E., & Holzapfel, C. M. (2007). Evolution of animal photoperiodism. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 38, 1-25.
- Brambilla, M., Scridel, D., Bazzi, G., Ilahiane, L., Iemma, A., Pedrini, P., Bassi, E., Bionda, R., Marchesi, L., Genero, F., Teufelbauer, N., Probst, R., Vrezec, A., Kmecl, P., Mihelič, T., Bogliani, G., Schmid, H., Assandri, G., Pontarini, R., . . . Chamberlain, D. E. (2020). Species interactions and climate change: How the disruption of species co-occurrence will impact on an avian forest guild. *Global Change Biology*, 26(3), 1212–1224. <https://doi.org/10.1111/gcb.14953>.
- Brooks, M. E., Kristensen, K., Van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Machler, M., & Bolker, B. M. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling *The R Journal*, 9, 378–400. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000240890>
- Brown, C. M. (1990). Breeding biology of the bearded vulture in southern Africa, part I: The prelaying and incubation period. *Ostrich*, 61(1–2), 24–32. <https://doi.org/10.1080/00306525.1990.9633934>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C. H., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C. D., . . . Ha, M. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023:

Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

<https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>

Campobello, D., Lindström, J., Di Maggio, R., & Sarà, M. (2017). An integrated analysis of micro- and macro-habitat features as a tool to detect weather-driven constraints: A case study with cavity nesters. *PLOS ONE*, 12(3), e0174090.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174090>

Cardinale, B. J., Matulich, K. L., Hooper, D. U., Byrnes, J. E., Duffy, E., Gamfeldt, L., ... & Gonzalez, A. (2011). The functional role of producer diversity in ecosystems. *American journal of botany*, 98(3), 572-592.

Carroll, J. A., Davis, C. A., Elmore, R. D., & Fuhlendorf, S. D. (2015). A Ground-Nesting Galliform's Response to Thermal Heterogeneity: Implications for Ground-Dwelling Birds. *PLOS ONE*, 10(11), e0143676.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143676>

Catry, I., Catry, T., Patto, P., Franco, A. M., & Moreira, F. (2015). Differential heat tolerance in nestlings suggests sympatric species may face different climate change risks. *Climate Research*, 66(1), 13–24. <https://doi.org/10.3354/cr01329>

Cecere, J. G., Bondì, S., Podofillini, S., Imperio, S., Griggio, M., Fulco, E., Curcio, A. A., Ménard, D., Mellone, U., Saino, N., Serra, L., Sarà, M., & Rubolini, D. (2018). Spatial segregation of home ranges between neighbouring colonies in a diurnal raptor. *Scientific Reports*, 8(1).

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-29933-2>

Cecere, J. G., De Pascalis, F., Imperio, S., Ménard, D., Catoni, C., Griggio, M., & Rubolini, D. (2020). Inter-individual differences in foraging tactics of a colonial raptor: consistency, weather effects, and fitness correlates. *Movement Ecology*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40462-020-00206-w>

Choi, I. H., & Bakken, G. S. (1990). Begging response in nestling red-winged blackbirds (*Agelaius phoeniceus*): Effect of body temperature. *Physiological Zoology*, 63(5), 965–986. <https://doi.org/10.1086/physzool.63.5.30152624>

Cioccarelli, S., Terras, A., Assandri, G., Berlusconi, A., Grattini, N., A, M., Pazhera, A., Sbrilli, A., Cecere, J. G., Rubolini, D., & Morganti, M. (2022). Vegetation height and structure drive foraging habitat selection of the lesser kestrel (*Falco naumanni*) in intensive agricultural landscapes. *PeerJ*, 10, e13979. <https://doi.org/10.7717/peerj.13979>

Clairbaux, M., Fort, J., Mathewson, P. D., Porter, W. P., Strøm, H., & Grémillet, D. (2019). Climate change could overturn bird migration: Transarctic flights and high-latitude residency in a sea ice free Arctic. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54228-5>

Conference, H. a. O. T., Nicholls, M. K., & Clarke, R. (1993). *Biology and conservation of small falcons: Proceedings of the Hawk and Owl Trust Conference, Hosted by the Durrell Institute of Conservation and Ecology at the University of Kent at Canterbury, 6th-8th September, 1991.*

Conradie, S. R., Woodborne, S. M., Wolf, B. O., Pessato, A., Mariette, M. M., & McKechnie, A. E. (2020). Il rischio di mortalità aviaria durante le ondate di calore aumenterà notevolmente nell'arida Australia durante il 21 ° secolo. *Fisiologia della conservazione*, 8(1), coaa048. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa048>

Coral reefs and climate change. (n.d.). IUCN. <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/coral-reefs-and-climate-change>, November 2017.

Corregidor-Castro, A., Morinay, J., McKinlay, S. E., Ramellini, S., Assandri, G., Bazzi, G., ... & Rubolini, D. (2023). Experimental nest cooling reveals dramatic effects of heatwaves on reproduction in a Mediterranean bird of prey. *Global Change Biology*, 29(19), 5552-5567.

Couet, J., Marjakangas, E., Santangeli, A., Kålås, J. A., Lindström, Å., & Lehikoinen, A. (2022). Short-lived species move uphill faster under climate change. *Oecologia*, 198(4), 877–888. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-05094-4>

Cramp, S., & Simmons, K. (1980). *The Birds of the West Palearctic (Vol. II: Hawks to Bustard)*. Oxford University Press, pp: 282-289.

Crick, H. Q. P., Dudley, C., Glue, D. E., & Thomson, D. J. (1997). UK birds are laying eggs earlier. *Nature*, 388(6642), 526. <https://doi.org/10.1038/41453>

Cunningham, S. J., Martin, R. O., & Hockey, P. A. (2015). Il comportamento può tamponare gli impatti dei cambiamenti climatici su un uccello della zona arida? *Struzzo*, 86(1–2), 119–126. <https://doi.org/10.2989/00306525.2015.10164>.

Dall, S. R., & Witter, M. S. (1998). Feeding interruptions, diurnal mass changes and daily routines of behaviour in the zebra finch. *Animal Behaviour*, 55(3), 715-725.

Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Guèze, M., & Agard, J. (2020). & Zayas, C.(2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

Dickson, A. G. (2010). The carbon dioxide system in seawater: equilibrium chemistry and measurements. *Guide to best practices for ocean acidification research and data reporting*, 1, 17-40.

Drummond, H. (2002). Begging versus aggression in avian broodmate competition. In *The evolution of begging: competition, cooperation and communication* (pp. 337-360). Dordrecht: Springer Netherlands.

Eyring, V., N.P. Gillett, K.M. Achuta Rao, R. Barimalala, M. Barreiro Parrillo, N. Bellouin, C. Cassou, P.J. Durack, Y. Kosaka, S. McGregor, S. Min, O. Morgenstern e Y. Sun, 2021: Influenza umana sul sistema climatico. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contributo del gruppo di lavoro I alla*

sesta relazione di valutazione del gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu e B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 423–552, doi: 10.1017/9781009157896.005.

Ferrari, M. C., Manassa, R. P., Dixon, D. L., Munday, P. L., McCormick, M. I., Meekan, M. G., ... & Chivers, D. P. (2012). Effects of ocean acidification on learning in coral reef fishes. *PloS one*, 7(2), e31478.

Ferrarini, A., Giglio, G., Pellegrino, S. C., & Gustin, M. (2021). Measuring the Degree of Overlap and Segregation among Multiple Probabilistic Home Ranges: A New Index with Illustrative Application to the Lesser Kestrel *Falco naumanni*. *Animals*, 11(10), 2913. <https://doi.org/10.3390/ani11102913>

Foden, W. B., & Young, B. E. (2016). IUCN SSC guidelines for assessing species' vulnerability to climate change. Cambridge, England and Gland, Switzerland: IUCN.

Gloutney, M. L., & Clark, R. G. (1997). Nest-site selection by Mallards and Blue-winged Teal in relation to microclimate. *The Auk*, 114(3), 381-395.

Gray, S., & Brady, S. M. (2016). Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*, 419(1), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>

Greig-Smith, P. (1985). Differenze di peso, riduzione della covata e competizione tra fratelli tra i nidiacei *Saxicola torquata* (Aves: Turdidae). *Giornale di zoologia*, 205 (3), 453-465.

Griffiths, R., Double, M. C., Orr, K., & Dawson, R. J. (1998). A DNA test to sex most birds. *Molecular Ecology*, 7(8), 1071–1075. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.1998.00389.x>

- Hamann, E., Blevins, C., Franks, S. J., Jameel, M. I., & Anderson, J. T. (2021). Climate change alters plant–herbivore interactions. *New Phytologist*, 229(4), 1894–1910. <https://doi.org/10.1111/nph.17036>
- Haywood, S., & Perrins, C. M. (1992). Is clutch size in birds affected by environmental conditions during growth? *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 249(1325), 195–197. <https://doi.org/10.1098/rspb.1992.0103>
- Helm, B., Van Doren, B. M., Hoffmann, D., & Hoffmann, U. (2019). Evolutionary Response to Climate Change in Migratory Pied Flycatchers. *Current Biology*, 29(21), 3714–3719.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.072>
- Hernández-Pliego, J., Rodríguez, C., & Bustamante, J. (2017). A few long versus many short foraging trips: different foraging strategies of lesser kestrel sexes during breeding. *Movement Ecology*, 5(1), 1–16.
- Iknayan, K. J., & Beissinger, S. R. (2018). Collapse of a desert bird community over the past century driven by climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(34), 8597–8602. <https://doi.org/10.1073/pnas.1805123115>
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi,



R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

ISAC. 2022. URL consultato l'8 luglio 2022, da [https://www.isac.cnr.it/climstor/DPC/ARCHIVIO/TMX/2021/TMX\\_ANOM\\_ITA\\_2021\\_06.png](https://www.isac.cnr.it/climstor/DPC/ARCHIVIO/TMX/2021/TMX_ANOM_ITA_2021_06.png)

ISPRA - <https://www.isprambiente.gov.it/it>. (n.d.). ISPRA.

Kovács-Hostyánszki, A., Földesi, R., Báldi, A., Endrédi, A., & Jordán, F. (2019). The vulnerability of plant-pollinator communities to honeybee decline: A comparative network analysis in different habitat types. *Ecological indicators*, 97, 35-50.

Kujala, I., Pöysä, H., & Korpimäki, E. (2022). Poor reproductive success of polygynously mated female birds with obligatory bi-parental care: a result of deceptive behaviour of males?. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 76(10), 131.

La Gioia, G., Melega, L., & Fornasari, L. (2017). Piano d'Azione Nazionale per il grillaio Falco naumanni. Quaderni di Conservazione della Natura 41 MATTM—ISPRA, Roma.

Lany, N. K., Ayres, M. P., Stange, E. E., Sillett, T. S., Rodenhouse, N. L., & Holmes, R. T. (2016). Breeding timed to maximize reproductive success for a migratory songbird: the importance of phenological asynchrony. *Oikos*, 125(5), 656-666.

Lembrechts, J. J., Pauchard, A., Lenoir, J., Nuñez, M. A., Geron, C., Ven, A., ... & Milbau, A. (2016). Disturbance is the key to plant invasions in cold environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(49), 14061-14066.

Lin, H., Decuypere, E., & Buyse, J. (2006). Acute heat stress induces oxidative stress in broiler chickens. *Comparative Biochemistry and Physiology A-molecular & Integrative Physiology*, 144(1), 11–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.01.032>

Lipu. (2023). <http://www.lipu.it/>.

Lusk, J. J., Guthery, F. S., & DeMaso, S. J. (2001). Northern bobwhite (*Colinus virginianus*) abundance in relation to yearly weather and long-term climate patterns. *Ecological Modelling*, 146(1-3), 3-15.

Magrath, R. D. (1991). Nestling weight and juvenile survival in the blackbird, *Turdus merula*. *The Journal of Animal Ecology*, 60(1), 335–351.  
<https://doi.org/10.2307/546>

Martin, T. R., & Mouton, J. C. (2020). Longer-lived tropical songbirds reduce breeding activity as they buffer impacts of drought. *Nature Climate Change*, 10(10), 953–958. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0864-3>

McCann, N. P., Zollner, P. A., & Gilbert, J. H. (2017). Temporal scaling in analysis of animal activity. *Ecography*, 40(12), 1436-1444.

McKechnie, A. E. e Wolf, B. O. (2019). The Physiology of Heat Tolerance in Small Endotherms 34, 302-313 <https://doi.org/10.1152/physiol.00011.2019>

McKechnie, A. E., & Wolf, B. O. (2010). Climate change increases the likelihood of catastrophic avian mortality events during extreme heat waves. *Biology letters*, 6(2), 253-256

McKechnie, A. E., Gerson, A. R., & Wolf, B. O. (2021). Thermoregulation in desert birds: Scaling and phylogenetic variation in heat tolerance and evaporative cooling. *Journal of Experimental Biology*, 224, jeb229211.  
<https://doi.org/10.1242/jeb.229211>

- Milne, R., Cunningham, S. J., Lee, A. T. K. e Smit, B. (2015). Il ruolo della fisiologia termale nel recente declino degli uccelli in un hotspot di biodiversità. *Fisiol.* 3, cov048. <https://doi.org/10.1093/conphys/cov048>
- Mitchell, D., Snelling, E. P., Hetem, R. S., Maloney, S. K., Strauss, W. M., & Fuller, A. (2018). Revisiting concepts of thermal physiology: Predicting responses of mammals to climate change, *87* (4), 956-973. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12818>
- Mock, D. W., & Parker, G. A. (1997). *Evolution in nestlings competition*, Oxford, Regno Unito: Oxford University Press.
- Mock, D. W., Drummond, H., & Stinson, C. H. (1990). *Avian Siblicide*, 78, 438–449.
- Moiron, M., Winkler, L., Martin, O. Y., & Janicke, T. (2022). Sexual selection moderates heat stress response in males and females. *Functional Ecology*, 36(12), 3096–3106. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14204>
- Morandini, V., & Ferrer, M. (2017). How to plan reintroductions of long-lived birds. *PLOS ONE*, 12(4), e0174186. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174186>
- Morganti, M., Preatoni, D., & Sarà, M. (2017). Climate determinants of breeding and wintering ranges of lesser kestrels in Italy and predicted impacts of climate change. *Journal of Avian Biology*, 48(12), 1595–1607. <https://doi.org/10.1111/jav.01179>
- Mosher, J. A. (1976). Raptor energetics: A review. *Journal of Raptor Research*, 10(4), 97–107
- Mosher, J. A. (1976). Raptor energetics: A review. *Journal of Raptor Research*, 10(4), 97–107.
- Mota-Rojas, D.; Titto, C.G.; de Mira Geraldo, A.; Martínez-Burnes, J.; Gómez, J.; Hernández-Ávalos, I.; Casas, A.; Domínguez, A.; José, N.; Bertoni, A.; et al. Efficacy and Function of Feathers, Hair, and Glabrous Skin in the

Thermoregulation Strategies of Domestic Animals. *Animals* 2021, 11, 3472.  
<https://doi.org/10.3390/ani11123472>

Munday, P. L., Cheal, A. J., Dixon, D. L., Rummer, J. L., & Fabricius, K. E. (2014). Behavioural impairment in reef fishes caused by ocean acidification at CO<sub>2</sub> seeps. *Nature Climate Change*, 4(6), 487-492.

Navarro-Cano, J. A., Karlsson, B., Posledovich, D., Toftegaard, T., Wiklund, C., Ehrlén, J., & Gotthard, K. (2015). Climate change, phenology, and butterfly host plant utilization. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 44(S1), 78–88.  
<https://doi.org/10.1007/s13280-014-0602-z>

Nilsson, J.-Å. e Nord, A. (2018). Testing the heat dissipation limit theory in a breeding passerine. *R. Soc. B* 285, 20180652.

Nord, A., & Nilsson, J. (2011). Incubation Temperature Affects Growth and Energy Metabolism in Blue Tit Nestlings. *The American Naturalist*, 178(5), 639–651. <https://doi.org/10.1086/662172>

Pandit, M., Bridge, E. S., & Ross, J. A. (2022). Environmental conditions lead to shifts in individual communication, which can cause cascading effects on soundscape composition. *Ecology and Evolution*, 12(10).  
<https://doi.org/10.1002/ece3.9359>

Parrett, J. M., & Knell, R. J. (2018). The effect of sexual selection on adaptation and extinction under increasing temperatures. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1877), 20180303.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0303>

Paula Ferrer-Pereira, Ester Martínez-Renau, Manuel Martín-Vivaldi, Juan José Soler, Food supply and provisioning behavior of parents: Are small hoopoe nestlings condemned to die?, *Behavioral Ecology*, 2023;, arad067,  
<https://doi.org/10.1093/beheco/arad067>

Peck, L.S. Prospects for surviving climate change in Antarctic aquatic species. *Front Zool* 2, 9 (2005). <https://doi.org/10.1186/1742-9994-2-9>

Podofillini, S., Cecere, J. G., Griggio, M., Curcio, A., De Capua, E. L., Fulco, E., Pirrello, S., Saino, N., Serra, L., Visceglia, M., & Rubolini, D. (2018). Home, dirty home: effect of old nest material on nest-site selection and breeding performance in a cavity-nesting raptor. *Current zoology*, 64(6), 693–702.

<https://doi.org/10.1093/cz/zoy012>

Podofillini, S., Cecere, J. G., Griggio, M., Curcio, A., De Capua, E. L., Fulco, E., Pirrello, S., Saino, N., Serra, L., Visceglia, M., & Rubolini, D. (2018). Home, dirty home: Effect of old nest material on nest-site selection and breeding performance in a cavity-nesting raptor. *Current Zoology*, 64(6), 693–702.

<https://doi.org/10.1093/cz/zoy012>

Post, E. (2017). Implications of earlier sea ice melt for phenological cascades in arctic marine food webs. *Food Webs*, 13, 60-66.

Ralston, J., DeLuca, W. V., Feldman, R. E., & King, D. I. (2017). Population trends influence species ability to track climate change. *Global Change Biology*, 23(4), 1390-1399.

Randall, W. C. (1943). Factors influencing the temperature regulation of birds. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 139(1), 56-63.

Redondo, T., & Castro, F. (1992). The increase in risk of predation with begging activity in broods of magpies *Pica pica*. *Ibis*, 134(2), 180-187.

Redondo, T., Romero, J. R., Díaz-Delgado, R., & Nagy, J. (2019). Broodmate aggression and life history variation in accipitrid birds of prey. *Ecology and Evolution*, 9(16), 9185–9206. <https://doi.org/10.1002/ece3.5466>

Refsnider, J. M., & Janzen, F. J. (2012). Behavioural plasticity may compensate for climate change in a long-lived reptile with temperature-dependent sex determination. *Biological Conservation*, 152, 90-95.

Ricklefs, R. E., & Hainsworth, F. R. (1968). Temperature regulation in nestling cactus wrens: The development of homeothermy. *The Condor*, 70(2), 121–127. <https://doi.org/10.2307/1365955>

Rodríguez-Gironés, M. A., Enquist, M., & Lachmann, M. (2001). Role of begging and sibling competition in foraging strategies of nestlings. *Animal Behaviour*, 61(4), 733-745.

Rossi, T., Nagelkerken, I., Simpson, S. D., Pistevo, J. C., Watson, S. A., Merillet, L., ... & Connell, S. D. (2015). Ocean acidification boosts larval fish development but reduces the window of opportunity for successful settlement. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1821), 20151954.

Rubenstein, M. A., Christophersen, R., & Ransom, J. I. (2019). Trophic implications of a phenological paradigm shift: Bald eagles and salmon in a changing climate. *Journal of Applied Ecology*, 56(3), 769-778.

Ruuskanen, S., Hsu, B. Y., & Nord, A. (2021). Endocrinology of thermoregulation in birds in a changing climate. *Molecular and cellular endocrinology*, 519, 111088. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2020.111088>

Ruuskanen, S., Hsu, B., & Nord, A. (2021b). Endocrinology of thermoregulation in birds in a changing climate. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 519, 111088. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2020.111088>

Sáez-Ventura, Á., López-Montoya, A. J., Luna, Á. F., Romero-Vidal, P., Palma, A., Tella, J. L., Carrete, M., Liébanas, G., & Pérez, J. M. (2022). Drivers of the Ectoparasite Community and Co-Infection Patterns in Rural and Urban Burrowing Owls. *Biology*, 11(8), 1141

Salewski, V., Siebenrock, K., Hochachka, W. M., Woog, F., & Fiedler, W. (2014). Morphological Change to Birds over 120 Years Is Not Explained by Thermal Adaptation to Climate Change. *PLOS ONE*, 9(7), e101927. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101927>

Sarà, M., Bondi, S., Bermejo, A., Bourgeois, M., Bouzin, M., Bustamante, J., de la Puente, J., Evangelidis, A., Frassanito, A., Fulco, E., Giglio, G., Gradev, G., Griggio, M., López-Ricarte, L., Kordopatis, P., Marin, S., Martínez, J., Mascara, R., Mellone, U., ... Rubolini, D. (2019). Broad-front migration leads to strong

migratory connectivity in the lesser kestrel (*Falco naumanni*), 46 (12), 2663-2677.  
<https://doi.org/10.1111/jbi.13713>

Sarasola, J. H., Grande, J. M., & Negro, J. J. (2018). *Birds of Prey: Biology and conservation in the XXI century*. Springer

Schwagmeyer, P. L., & Mock, D. W. (2008). Parental provisioning and offspring fitness: Size matters. *Animal Behaviour*, 75(1), 291–298.  
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.05.023>

Selçuk, A. Y., Özkoç, Ö. Ü., Zeybekoğlu, Ü., & Kefelioğlu, H. (2021). Preliminary data on diet of the Lesser Kestrel (*Falco naumanni* Fleischer) in Aralık, Iğdır province (Eastern Anatolia Region, Turkey) *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.  
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.741149>

Sharpe, L. L., Bayter, C., & Gardner, J. L. (2021). Too hot to handle? Behavioural plasticity during incubation in a small, Australian passerine. *Journal of Thermal Biology*, 98, 102921.

Shiple, J. R., Twining, C. W., Mathieu-Resuge, M., Parmar, T. P., Kainz, M. J., Martin-Creuzburg, D., Weber, C., Winkler, D. A., Graham, C. H., & Matthews, B. (2022). Climate change shifts the timing of nutritional flux from aquatic insects. *Current Biology*, 32(6), 1342-1349.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.01.057>

Shokri, M., Cozzoli, F., Vignes, F., Bertoli, M., Pizzul, E., & Basset, A. (2022). Metabolic rate and climate change across latitudes: evidence of mass-dependent responses in aquatic amphipods. *The Journal of Experimental Biology*, 225(22).  
<https://doi.org/10.1242/jeb.244842>

Shrestha, S., Mahat, J., Shrestha, J., K C, M., & Paudel, K. (2022). Influenza dello stress ad alta temperatura sulla crescita e lo sviluppo del riso. Una recensione. *Heliyon*, 8(12), e12651. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12651>

Simide, R., Richard, S., Prévot-D'Alvise, N., Miard, T., & Gaillard, S. (2016). Assessment of the accuracy of physiological blood indicators for the evaluation of stress, health status and welfare in Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) subject to

chronic heat stress and dietary supplementation. *International Aquatic Research*, 8, 121-135.

Smit, B., Zietsman, G., Martin, R. O., Cunningham, S. J., McKechnie, A. E., & Hockey, P. A. R. (2016). Behavioural responses to heat in desert birds: Implications for predicting vulnerability to climate warming. *Climate Change Responses*, 3, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40665-016-0023-2>

Steen, R., Sonerud, G. A., & Slagsvold, T. (2012). Parents adjust feeding effort in relation to nestling age in the Eurasian Kestrel (*Falco tinnunculus*), 153, 1087-1099.

Sundby, S., Drinkwater, K. F., & Kjesbu, O. S. (2016). The North Atlantic spring-bloom system—Where the changing climate meets the winter dark. *Frontiers in Marine Science*, 3, 28.

Sundell, E., Morgenroth, D., Brijs, J., Ekström, A., Gräns, A., & Sandblom, E. (2018). Seawater acclimation affects cardiac output and adrenergic control of blood pressure in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)—implications for salinity variations now and in the future. *Conservation Physiology*, 6(1). <https://doi.org/10.1093/conphys/coy061>

Susan J Cunningham, Rowan O Martin & Philip AR Hockey (2015) Can behaviour buffer the impacts of climate change on an arid-zone bird?, *Ostrich*, 86:1-2, 119-126, DOI: 10.2989/00306525.2015.1016469

Svensson, L., Grant, P. J., Mullarney, K., & Zetterström, D. (2011). Guida agli uccelli d'Europa, Nord Africa e vicino oriente. Ricca ).

Thomas, A. C., Pershing, A. J., Friedland, K. D., Nye, J. A., Mills, K. E., Alexander, M. A., ... & Henderson, M. E. (2017). Seasonal trends and phenology shifts in sea surface temperature on the North American northeastern continental shelf. *Elem Sci Anth*, 5, 48.

Tylianakis JM, Didham RK, Bascompte J, Wardle DA (2008) Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 1351–1363.



Vallejo-Marín, M., & Hiscock, S. J. (2016). Hybridization and hybrid speciation under global change. *New Phytologist*, 211(4), 1170–1187.

<https://doi.org/10.1111/nph.14004>

Van De Ven, T. M. F. N., McKechnie, A. E., Er, S., & Cunningham, S. A. (2020). High temperatures are associated with substantial reductions in breeding success and offspring quality in an arid-zone bird. *Oecologia*, 193(1), 225–235.

<https://doi.org/10.1007/s00442-020-04644-6>

Visser, M. E., & Gienapp, P. (2019). Evolutionary and demographic consequences of phenological mismatches. *Nature ecology & evolution*, 3(6), 879–885. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0880-8>

Wasmund, N., Nausch, G., Gerth, M., Busch, S., Burmeister, C., Hansen, R., & Sadkowiak, B. (2019). Extension of the growing season of phytoplankton in the western Baltic Sea in response to climate change. *Marine Ecology Progress Series*, 622, 1-16.

Wegge, P., & Rolstad, J. (2017). Climate change and bird reproduction: warmer springs benefit breeding success in boreal forest grouse 284(1866), 20171528.

<https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1528>

Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., ... & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733, 137782.

Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *The Science of the total environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>

Whitfield, M. C., Smit, B., McKechnie, A. E., & Wolf, B. O. (2015). Avian thermoregulation in the heat: Scaling of heat tolerance and evaporative cooling capacity in three southern African arid-zone passerines. *Journal of Experimental Biology*, 218(11), 1705–1714. <https://doi.org/10.1242/jeb.121749>

Wiebe, K. L., & Slagsvold, T. (2014). Prey size increases with nestling age: are provisioning parents programmed or responding to cues from offspring?. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 68, 711-719.

Wiley, E. M., & Ridley, A. R. (2016). The effects of temperature on offspring provisioning in a cooperative breeder. *Animal Behaviour*, 117, 187-195.

Wolf, B., & Walsberg, G. (1996). Respiratory and cutaneous evaporative water loss at high environmental temperatures in a small bird. *Journal of Experimental Biology*, 199(2), 451–457. <https://doi.org/10.1242/jeb.199.2.451>

[www.lifefalcon.eu/it/](http://www.lifefalcon.eu/it/) LIFE FALKON – Fostering the breeding range expansion of central-eastern Mediterranean Lesser Kestrel populations

[www.lifefalcon.eu/it/](http://www.lifefalcon.eu/it/) LIFE FALKON –Il documentario ufficiale del progetto LIFE FALKON (LIFE17 NAT/IT/000586), [www.lifefalcon.eu/it](http://www.lifefalcon.eu/it)

Zografou, K., Swartz, M., Adamidis, G. C., Tilden, V. P., McKinney, E. N., & Sewall, B. J. (2021). Species traits affect phenological responses to climate change in a butterfly community. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82723-1>