

PROTOCOLLO DI RICERCA METODOLOGICO E ANALITICO PER L'ANALISI ECOACUSTICA DI UN'AREA NATURALE

METHODOLOGICAL AND ANALYTICAL RESEARCH PROTOCOL TO INVESTIGATE THE SOUNDSCAPE IN A NATURAL AREA

Roberta Righini *, Gianni Pavan

Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Pavia

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:

Via Taramelli n. 24, 27100 Pavia (Italia)

e-mail: righini.roberta@gmail.com, gianni.pavan@unipv.it

(Ricevuto il 30/04/2021, accettato il 17/11/2020)

RIASSUNTO

Il monitoraggio acustico passivo (PAM) consente di acquisire enormi quantità di dati acustici, grazie anche alla vasta disponibilità di strumenti di registrazione autonomi sempre più performanti, e la "computational bioacoustics" offre molteplici procedure di analisi e di generazione di "indici"; tuttavia, mancano linee guida di acquisizione e analisi condivise, con la conseguenza che i risultati spesso sono difficilmente comparabili. Le ricerche oggetto del lavoro sono improntate alla messa a punto di protocolli e metodologie di analisi quali-quantitative speditive ed accurate nell'ambito dell'ecoacustica, per lo studio e il monitoraggio degli ecosistemi naturali attraverso la registrazione e l'analisi dell'ambiente acustico. Il protocollo elaborato è stato applicato allo studio di un'area naturale di particolare importanza internazionale, la Riserva Naturale Integrale di Sasso Fratino, dimostrando la validità dell'analisi ecoacustica per il monitoraggio delle biodiversità e della qualità ambientale sia per fini gestionali che conservazionistici.

ABSTRACT

Passive acoustic monitoring (PAM) allows the acquisition of huge amounts of acoustic data, thanks also to the wide availability of increasingly performing autonomous recording tools, and the "computational bioacoustics" offers multiple analysis procedures and the generation of "indices"; however, there is a lack of acquisitions and analysis shared protocols and guidelines, with the consequence that the results are often difficult to compare each others. The current work is based on the development of a research protocol and methodologies of rapid and accurate qualitative-quantitative analysis in the field of eco-acoustics, for the study and monitoring of natural ecosystems by the recording and analysis of the acoustic environment. The protocol developed was applied to the study of a natural area of international importance, the Integral Nature Reserve of Sasso Fratino, demonstrating the validity of the eco-acoustic analysis for monitoring biodiversity and environmental quality for both management and conservation purposes.

Parole chiave: ecoacustica, ambiente sonoro, aree naturali, indici acustici.

Keywords: ecoacoustics, soundscape, natural areas, acoustic indices.

1 Introduzione

Il suono gioca un ruolo fondamentale in molti diversi aspetti delle specie animali (accoppiamento, socialità, allarmi, riconoscimento di altri individui appartenenti alla stessa specie, rilevamento dell'ambiente in modo passivo e attivo, tramite l'ecolocalizzazione) [1].

Lo studio dei suoni delle singole specie (Bioacustica) e, sempre più, di tutti i suoni che costituiscono l'intero ambiente acustico di un ecosistema (Ecoacustica, che coniuga bioacustica ed ecologia) si è rivelato un valido e potente strumento per il monitoraggio e la conservazione della biodiversità e la valutazione della qualità degli habitat, nonché per la raccolta di informazioni a lungo termine sulla distribuzione degli animali e sulle variazioni nelle dinamiche della comunità, compresi quelle legate agli effetti delle attività antropiche [2-6].

Lo scopo principale dell'Ecoacustica è l'analisi del paesaggio sonoro e dell'ambiente acustico (che si estende oltre la percezione umana comprendendo infrasuoni e ultrasuoni) analizzando i suoni naturali e antropici e il loro rapporto con l'ambiente, su una vasta gamma di scale spaziali e temporali e a diversi livelli (individuale, popolazione, specie, comunità) [7-9]. Attraverso il Monitoraggio Acustico Passivo (PAM) di un habitat è quindi possibile ottenere "un'immagine" del paesaggio sonoro (inteso ora in senso esteso a infrasuoni e ultrasuoni) costituito da tre diverse componenti: i suoni prodotti dagli animali (che compongono la *biofonia*, perlopiù tra 2.000-8.000 Hz ma che si estende fino a 120kHz), i suoni di eventi atmosferici e fisici (che compongono la *geofonia*: vento, pioggia, acque correnti, ecc.; essi sono compresi in un intervallo di frequenze più ampio, dalle basse frequenze che indicano la presenza del vento, per esempio, a frequenze più alte tipiche di eventi piovosi) e i rumori legati alla presenza dell'uomo (definiti *antropofonia*, o *tecnofonia* quando è dominante il rumore continuo dei sistemi di trasporto, automobili, treni, aeroplani, navi e delle attività industriali, che generalmente occupano le basse frequenze: 20 - 2.000 Hz) [10-13]. Ma se da un lato il PAM apre nuove prospettive di ricerca per il monitoraggio della biodiversità, poiché è possibile registrare continuamente e simultaneamente luoghi diversi, dall'altro esso genera un'enorme quantità di dati che devono essere analizzati e interpretati, richiedendo un grande sforzo sia in termini di tempo che di conoscenze per estrarre le informazioni utili [14].

La nuova sfida è quella di elaborare una metodologia di analisi per ottimizzare le risorse sia in campo (risparmio di schede di memoria e batterie) sia in laboratorio, riducendo tempo e impegno di analisi, pur mantenendo alta l'accuratezza delle informazioni.

Lo scopo di questo lavoro è quello di proporre un Protocollo di Ricerca Ecoacustica, metodologico e analitico per lo studio del paesaggio sonoro su più scale temporali e spaziali, sempre con un approccio combinato di bioacustica e ecoacustica.

Il protocollo così elaborato è composto da quattro sezioni principali: 1) selezione di siti di campionamento, 2) raccolta dati, 3) analisi qualitativa dei dati acustici e 4) analisi quantitativa dei dati acustici. La costruzione di un archivio di dati acustici è funzionale anche al monitoraggio della biofonia delle aree naturali: l'analisi dei suoni contribuisce ad aumentare la rintracciabilità di specie rare ed elusive (purché vocalizzanti) e a rilevare la presenza di specie aliene, soprattutto per i siti di riserva naturale integrale, dove la presenza umana è vietata, e le variazioni nella presenza e nella distribuzione delle specie sono legate a impatti indiretti e cambiamenti globali esterni, ad esempio indotti dai cambiamenti climatici. Inoltre, l'arricchimento del monitoraggio della biodiversità con l'approccio eco-acustico permette di ottenere informazioni non solo sulla diversità delle specie ma anche sulla densità e distribuzione della componente biofonica che, nel caso studio delle aree naturali con impatto antropico basso o nullo, come la RNI di Sasso Fratino, risulta essere predominante e continua per tutte le ore diurne [15;16] e i giorni della settimana (analisi in corso). In conclusione, l'Ecoacustica risulta essere un potente strumento per diverse tipologie di indagini ambientali e permette analisi su più scale temporali e spaziali. Per il suo grande

potenziale è urgente che questa tipologia di monitoraggio eco-acustico venga presa in considerazione e inserita nei piani di gestione delle aree protette e nei parchi nazionali e internazionali, anche considerando il potenziale educativo e informativo dei materiali acustici che vengono raccolti. Date le potenzialità dell'ecoacustica per il monitoraggio, la conservazione e anche la valorizzazione dei territori, si raccomanda lo sviluppo di linee guida per un approccio analitico il più possibile condivisibile e riproducibile nelle diverse tipologie di ambienti naturali, linee guida che si possono tradurre in protocolli di ricerca anche diversificati ma condivisi e coerenti.

2 Protocollo: teoria e metodologia

Il protocollo proposto è stato sviluppato in quattro parti principali:

1. selezione dei siti di raccolta dei dati acustici;
2. raccolta dati (scelta e programmazione dei dispositivi, metodologia di campionamento e di archiviazione);
3. analisi qualitativa dei dati acustici (generazione di spettrogrammi giornalieri compatti);
4. analisi quantitativa dei dati acustici (analisi bioacustica e identificazione degli eventi sonori; indici eco-acustici e analisi statistiche).

2.1 Selezione dei siti di raccolta dati acustici

Il monitoraggio eco-acustico di un'area naturale si traduce nella raccolta di un'enorme quantità di dati su grandi scale sia a livello temporale che spaziale, permettendo di studiare la variazione acustica sia all'interno di uno stesso sito con il passare del tempo (mediante il confronto di campionamenti mensili o annuali, per esempio) sia tra siti diversi nel medesimo intervallo temporale (mediante il confronto di campionamenti simultanei di siti diversi).

Un punto focale da considerare durante la fase della scelta dei siti di campionamento è che questi soddisfino almeno due condizioni: possono essere monitorati tutti simultaneamente e in modo continuo al fine di creare un archivio di riferimento di dati acustici sempre più cospicuo.

La scelta dei siti può insistere su habitat equivalenti in aree diverse, anche considerando habitat sottoposti a pressioni antropiche differenti (per valutarne gli effetti), oppure può includere habitat molto diversi (per esposizione, altitudine, struttura) al fine di valutare il rapporto fra le caratteristiche dell'habitat e la relativa espressione acustica. Un differente approccio può essere il monitoraggio continuo, annuale e pluriennale, di uno o più siti per studiare l'espressione stagionale del panorama acustico e potenzialmente osservare, nel corso degli anni, cambiamenti indotti dalle variazioni climatiche sulla composizione specifica [15,16].

2.2 Raccolta dati e archiviazione

Si consiglia di utilizzare dei registratori autonomi remoti programmabili e posizionarne almeno uno per sito di campionamento. Nel caso studio sono stati scelti i modelli della Wildlife Acoustics Song Meters (in particolare il modello SM3, ora obsoleto, e SM4, come mostrato in Figura 1). Ogni registratore dovrebbe essere posizionato sul tronco di un albero (ricorrendo anche all'uso di fascette plastiche autoserranti) ad almeno due metri di altezza, o anche più alto se possibile, in modo da prevenire furti o vandalismi. Nella scelta della posizione è opportuno tenere in considerazione anche la lontananza da fonti di disturbo locali (torrenti, cascate, sentieri frequentati), ad eccezione di casi studio in cui si voglia porre l'attenzione sulla componente geofonica, e scegliere una posizione possibilmente riparata dal vento. Per ogni registratore è importante annotare la posizione GPS, l'altitudine, l'orientamento e descrivere l'ambiente circostante. A completare la raccolta di dati ambientali, è consigliabile l'aggiunta di un *data logger* per registrare i dati di temperatura, umidità, precipitazioni e radiazione solare poiché tali fattori

potrebbero influenzare l'attività sonora e il comportamento di determinate specie animali [17]. Al fine di registrare l'ambiente sonoro di uno o più siti, ogni registratore può essere programmato per attivarsi per registrare fino a 24 kHz (campionamento a 48 kHz, 16 bit, stereo), 10 minuti ogni 30 minuti, 24 ore al giorno, in modo sincrono e continuativo (ottenendo in questo modo 48 files .wav al giorno, ovvero circa 5.60 GB/giorno, 170GB/mese). Questo intervallo di registrazione permette di ottenere un efficace campionamento acustico rappresentativo di un'intera giornata e allo stesso tempo di ridurre il consumo delle batterie e dello spazio di memoria dei registratori nonché successivamente il tempo di analisi dei dati stessi [18]. Rispetto alla scelta di intervalli più brevi ma ripetuti più frequentemente, la registrazione di 10 minuti consente di avere una "storia", seppur breve, degli eventi acustici e delle relazioni temporali fra di essi. È anche importante considerare che la registrazione stereofonica offre la possibilità di percezione spaziale, in ascolto, e quindi consente di percepire le direzioni di provenienza dei suoni consentendo una più completa percezione della distribuzione delle sorgenti sonore nello spazio acustico indagato. L'estensione a 24 kHz di banda, seppur non necessaria per la maggior parte delle specie canore, consente di rilevare i segnali sociali di diverse specie di pipistrelli, ma soprattutto consente di avere una adeguata registrazione degli insetti, perlopiù ortotteri, che emettono in bande superiori a 10 kHz e arrivano anche a oltre 50 kHz [19]. Una volta recuperati i dati dalle memory cards dei registratori è opportuno salvarli in un archivio unico, catalogarli, e organizzarli in cartelle sito-specifiche in modo da ottimizzare la successiva analisi. Al fine di ottimizzare l'organizzazione dell'archivio e rendere più rapida la ricerca di un determinato file, ogni singola registrazione contiene nel nome le seguenti informazioni di base: i) il codice univoco che identifica il punto di registrazione; ii) il modello di registratore usato (e un codice legato ad ogni registratore in caso di campionamenti sincroni con più strumenti); iii) il numero di microfoni con cui è stata effettuata la registrazione (mono o stereo); iv) la data (yyyymmdd); v) l'orario (hhmmss). Tale struttura è generata dai registratori della Wildlife Acoustics, con le prime due componenti che possono essere inserite a priori nella programmazione del recorder oppure aggiunte o modificate a posteriori con software specifici per rinominare i files.



Figura 1 - Diversi esempi di registratori (Song Meter acoustic recorder) con due microfoni stereo in commercio presso la Wildlife Acoustics: dal modello più vecchio SM3 (a) a quelli più recenti SM4 (b) e SM4 Bat Full Spectrum Ultrasonic Recorder (c), con un microfono singolo per registrare gli ultrasuoni, fino agli ultimi disponibili Song Meter Mini (d) e Song Meter Micro (e), caratterizzati da dimensioni molto ridotte e costi contenuti ma di alta qualità - Different examples of Wildlife Acoustics Song Meter Recorders with stereo microphones currently available: from the older model SM3 (a) to the more recent ones SM4 (b) and SM4 Bat Full Spectrum Ultrasonic Recorder (c), with a single microphone to record ultrasounds, up to the latest available Song Meter Mini (d) and Song Meter Micro (e), with very small dimensions and low costs, without sacrificing quality.

2.3 Analisi qualitativa dei dati acustici

È possibile ottenere un'immagine riassuntiva di ciò che acusticamente avviene nel sito di campionamento attraverso la generazione di spettrogrammi compatti, ottenuti mediante l'uso del programma SeaProSabiod, sviluppato presso il laboratorio di Cibra (Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali) dell'Università di Pavia [20] (Figura 2).

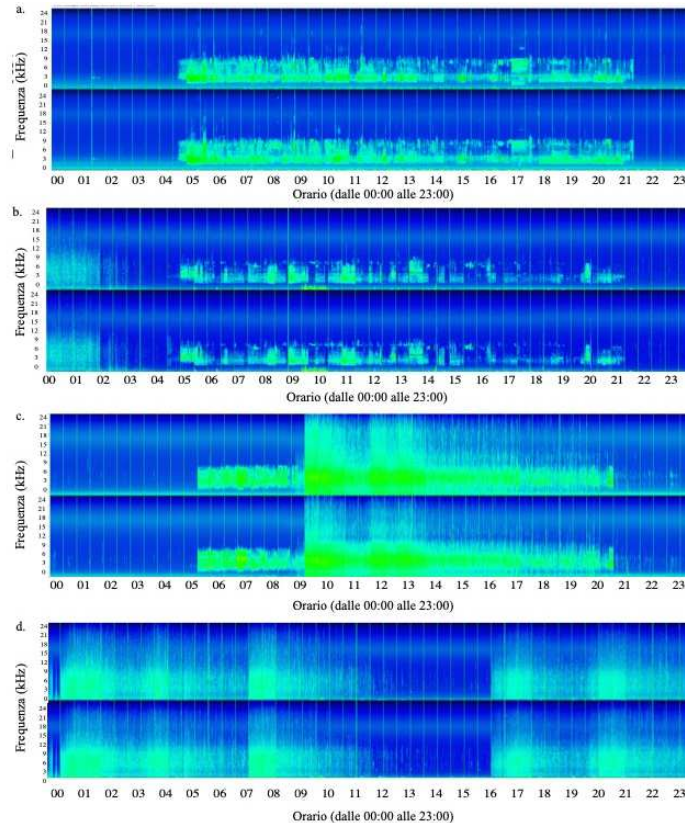


Figura 2 - Spettrogrammi compatti giornalieri ottenuti da registrazioni di 10 minuti ogni 30 minuti, per un totale di 48 segmenti per giorno: esempi di giorni con diverse condizioni meteorologiche campionate all'interno di aree naturali integrali (Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi); l'energia acustica è rappresentata in colore verde e la sua intensità dipende dai valori dell'energia spettrale registrata. a) rappresenta una giornata di tempo sereno, la biofonia risulta la componente predominante ed occupa dall'alba al tramonto l'intervallo di frequenza da 1500 a 9000Hz; b) è caratterizzato da una minor attività biofonica diurna e da presenza di vento nelle prime ore della notte; in c) sono presenti eventi di pioggia/vento durante i quali l'energia acustica si distribuisce in intervalli di frequenza più ampi; in d) la componente principale è quella geofonica (pioggia e vento) - Daily packed spectrograms: examples of different weather condition days (good and rain/wind) recording 10 min every half-hour (48 frames/day); acoustic energy is in green and its intensity depends on spectral energy values. In a) there is a good weather day, the visual predominant component is biophony and there are clear sharp transitions at dawn and dusk with (biological) acoustic energy mainly concentrated between 1500 and 9000 Hz; b. is a day characterized by less biophonic acoustic activity during the day and presence of wind during the night; c. is an example of a rain/wind day, the visual predominant component is geophony and acoustic energy is distributed over wider frequency ranges; d. is a day dominated by rain and wind, no biophony is recorded.

La visualizzazione spettrografica può essere effettuata su scale temporali differenti: dalla panoramica di tutti i 48 file giornalieri per ottenere uno spettrogramma compatto di ogni singola giornata, a visualizzazioni sempre più dettagliate, ad es. 10 minuti, 1 minuto, 10 secondi, 1 secondo, per esaminare serie di suoni o dettagli acustici specifici.

Uno dei vantaggi di effettuare un'analisi qualitativa di questo tipo è che mediante lo screening visivo degli spettrogrammi compatti giornalieri, è possibile verificare che le registrazioni di tutti i giorni siano complete e corrette e si può ottenere una prima panoramica delle varie componenti acustiche, identificando eventi acustici legati alla geofonia, alla biofonia e alla presenza umana, per poi analizzarli con maggior dettaglio.

Inoltre, è consigliato identificare alcuni spettrogrammi 'modello' che bene rappresentano paesaggi sonori specifici o eventi acustici specifici, per raccogliarli e archivarli come riferimenti per successive analisi sia sulla variabilità *intra-sito* (per lo stesso sito, confrontare più modelli che rappresentano giorni con condizione meteo diverse o modelli che mostrano come il paesaggio sonoro di un'area cambia con il susseguirsi delle ore, delle stagioni, o tra anni diversi) che sulla variabilità *inter-siti*: per lo stesso giorno, i modelli di spettrogrammi compatti di diversi siti possono essere comparati per far emergere la loro variabilità acustica).

2.4 Analisi quantitativa dei dati acustici

Il monitoraggio acustico di un ambiente permette di campionare in modo continuativo, anche a lungo termine, ma inevitabilmente ciò richiede l'archiviazione e l'elaborazione di un'enorme quantità di dati. Per questo motivo si è elaborato un approccio a diverse scale temporali e spaziali per ottenere informazioni a differenti livelli di precisione, in base all'analisi di serie annuali, mensili, giornalieri o fino al singolo minuto. Per ridurre lo sforzo di analisi, soprattutto in una prima fase di valutazione e affinamento, è consigliabile estrarre in maniera casuale un minuto per ogni file piuttosto che lavorare sull'intera registrazione di 10 minuti (per maggiori informazioni sul confronto di campionamenti a diversa scala temporale si fa riferimento al Capitolo 3 della tesi di dottorato da cui è tratto questo articolo, [21]). Per tutte le seguenti operazioni, si è scelto di utilizzare l'ambiente di programma R e Rstudio e varie sue librerie, tra cui Soundecology e Seewave, che permettono di ottenere sia parametri generali, come il valore dell'energia spettrale (minimo, massimo, medio) anche in bande definite, sia metriche acustiche specifiche (Indici acustici) per la stima delle differenze nell'ambiente acustico. Tra quest'ultime, per ogni minuto random estratto si possono calcolare determinati indici, tra i più utilizzati si ricordano: BI definito come indice bioacustico [22]; gli indici H e D rispettivamente per entropia e dissomiglianza acustica [2]; AR per la ricchezza acustica [23]; ACI ovvero l'indice di complessità acustica [24]; ADI e AEI, rispettivamente l'indice di diversità acustica e di uniformità acustica [25] e NDSI finalizzato a determinare il disturbo confrontando il rapporto tra biofonia e antropofonia in un determinato ambiente [26]. I valori degli indici di interesse estratti devono essere organizzati in tabelle contenenti per ciascuna riga (dato acustico) anche specifici attributi come il nome univoco del sito campionato, il tipo di registratore utilizzato, il mese, anno e ora.

L'analisi statistica può essere indirizzata per esplorare la variabilità *intra-sito* e *inter-siti* dei singoli indici su scale temporali differenti (annuale, stagionale, mensile, giornaliera, oraria, ecc.). È auspicabile anche la creazione di grafici sintetici che facilitino il più possibile la visione d'insieme dell'andamento dei vari indici in base al tipo di analisi perseguita (Figura 3).

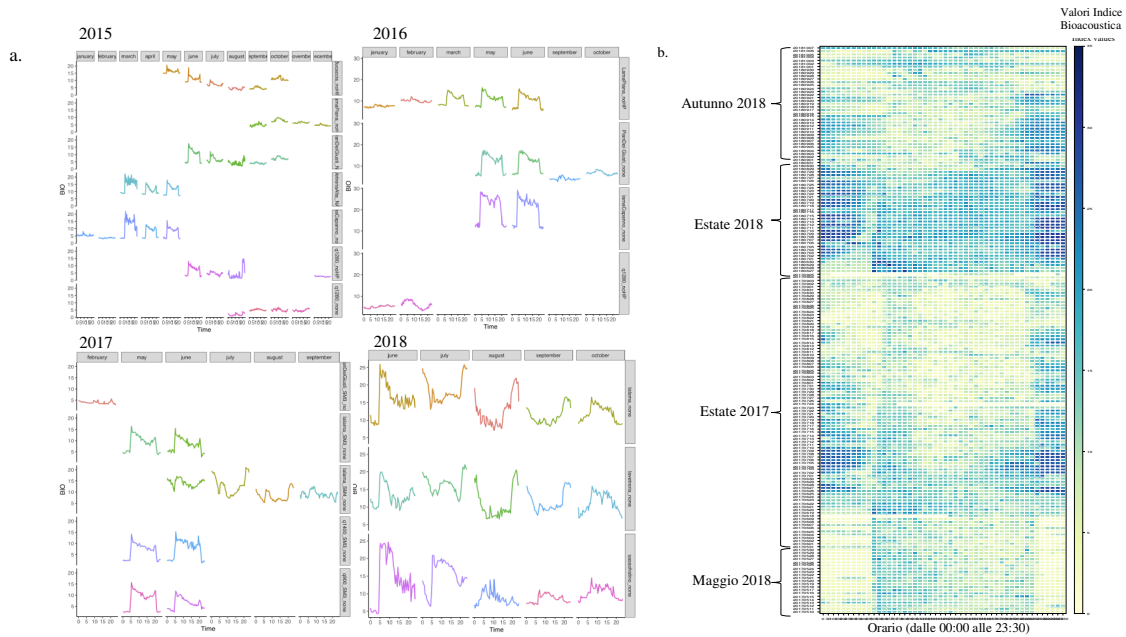


Figura 3 - Esempi di possibili grafici sintetici tratti dalla tesi di dottorato [19]. a. Rappresentazione della variazione annuale intra-sito per l'indice bioacustico per un singolo sito monitorato per più anni (2015-2018). L'indice è stato calcolato per la gamma di frequenze da 1500 a 9000 Hz (in cui è focalizzata la componente biofonica) e tutti i valori medi sono stati tracciati per mese / sito di campionamento. b. Rappresentazione della variazione giornaliera intra-sito per l'indice bioacustico: i valori orari sono stati tracciati insieme e ogni linea è un giorno di un singolo sito di campionamento (La Lama 2017-2018). Il grafico mostra la variazione delle effemeridi, l'ora dell'alba e del tramonto, che delimitano principalmente la biofonia diurna. La biofonia notturna ha maggiori variazioni, principalmente a causa del canto degli insetti nei mesi più caldi e del ruggito dei cervi a fine settembre - Examples of possible synthetic graphs taken from the PhD thesis [21]. a. Representation of the annual intra-site variation for the bioacoustic index for a single site monitored for several years (2015-2018). The index was calculated for the frequency range from 1500 to 9000 Hz (where the biophonic component is focused) and all average values were plotted by month / sampling site. b. Representation of daily intra site variation for the Bioacoustic Index: hourly values were plotted together, and each line is a day of a single sampling site (2017-2018). The graph shows the variation of the ephemerids, the time of dawn and dusk, that delimit the daylight biofony mainly. Night-time biofony has greater variations, mainly due to singing insects in warmer months and roaring deers in late September.

3 Protocollo: applicazione in un caso di studio

Il protocollo è stato applicato per descrivere il paesaggio sonoro di un ambiente di una riserva naturale integrale conosciuta a livello internazionale per l'importanza della sua conservazione e biodiversità [15; 21]. L'area di studio è situata all'interno del Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi (Appennino Tosco-Romagnolo, Italia) ed in particolare nella Riserva Naturale Integrale di Sasso Fratino: la sua peculiare struttura vegetazionale di foresta vetusta e la secolare gestione dell'area indirizzata verso una totale conservazione dell'ambiente, la candida ad essere un notevole modello per raccogliere registrazioni di alta qualità degli habitat naturali. Da un archivio quinquennale di registrazioni sonore raccolte in 12 punti diversi dal 2014 al 2018 nella

RNI che in altre zone limitrofe sempre all'interno dei confini del Parco (Figura 4), i dati acustici sono stati comparati sia in sezioni trasversali (orizzontali) e sia in serie temporali (verticali) al fine di esplorare le dinamiche spazio-temporali del paesaggio sonoro su diverse scale. Per l'analisi è stato adottato un doppio approccio, uno qualitativo, basato sullo screening visivo di spettrogrammi giornalieri compatti, e l'altro quantitativo, attraverso l'elaborazione dei dati con gli indici acustici.

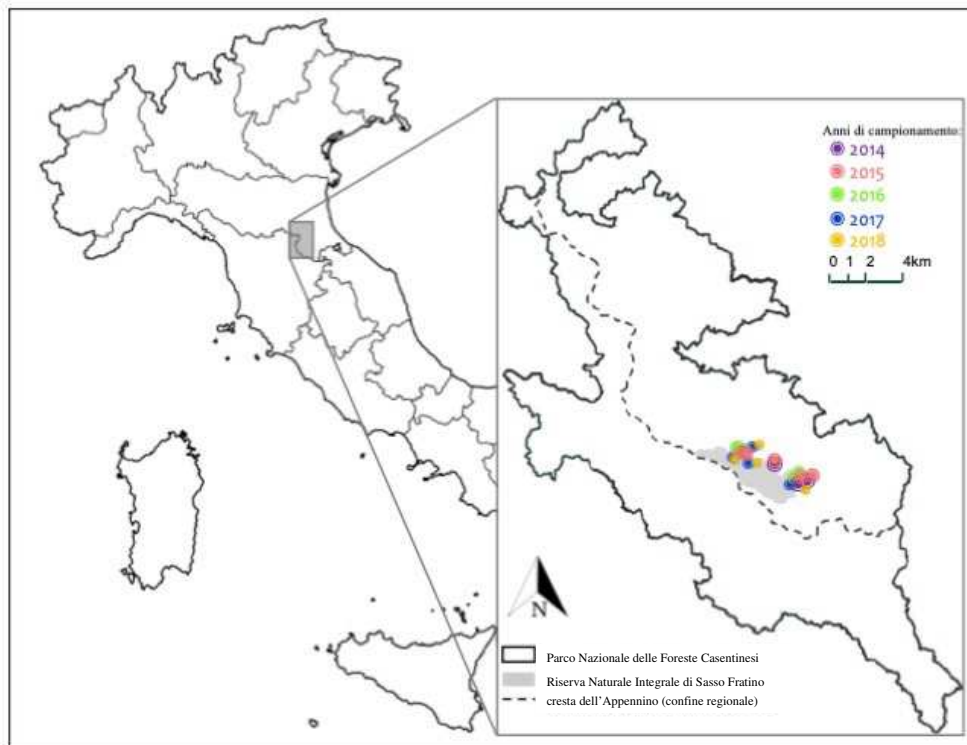


Figura 4 - Distribuzione dei siti campionati dal 2014 al 2018 all'interno del Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi e della Riserva Naturale Integrale di Sasso Fratino - Distribution of acoustic data recording sites inside the Casentinesi Forests National Park and the Integral Nature Reserve of Sasso Fratino from 2014 to 2018.

La prima fase ha previsto la generazione di spettri giornalieri compatti per ogni registrazione attraverso l'utilizzo del software SeaPro sviluppato da CIBRA (<http://www.unipv.it/cibra/>) al fine di verificare che i giorni registrati fossero tutti corretti e giorni completi (Figura 2). Successivamente, si è proceduto all'estrazione di un minuto casuale (per ogni file di 10 minuti) e quindi alla misurazione dei parametri acustici eseguita utilizzando l'ambiente R e varie librerie, tra cui Soundecology [28] e Seewave [29].

I risultati che si possono ottenere da questo protocollo di analisi sono di varia tipologia con differenti livelli temporali e spaziali (a seconda che i dati utilizzati derivano da uno o più siti, oppure dall'esplorazione dell'andamento annuale, mensile, dei singoli giorni o di ogni frame di 10 minuti).

Nei cinque anni di campionamento sono stati registrati oltre 77.000 file di 10 minuti ciascuno che si traducono in circa 9 terabyte di materiale analizzato e archiviato. Tutti i siti sono caratterizzati da notti quiete e ore diurne acusticamente molto dense, con una biofonia composta che occupa in modo predominante le frequenze da 1500 a 9000 Hz. Sebbene le tendenze degli indici acustici siano simili tra di loro, è tuttavia emerso che, attraverso l'analisi statistica delle

componenti principali, i siti all'interno e all'esterno della riserva sono ben differenziati e distintamente raggruppati in sonotopi particolari, e questo potrebbe essere dovuto ai diversi componenti della biofonia e alla loro eterogeneità ecologica e spaziale.

Conclusioni

L'Ecoacustica si rivela essere un potente strumento per gli sforzi di monitoraggio e gestione, in particolare nelle aree naturali: il Monitoraggio Acustico Passivo (PAM) consente di raccogliere dati ed informazioni a lungo termine sulla distribuzione degli animali e sulle variazioni nelle dinamiche comunitarie, comprese quelle guidate da attività antropiche.

Il risultato principale del lavoro presentato si concretizza nell'elaborazione di un protocollo di ricerca metodologico e analitico (campionamento, archiviazione e analisi qualitativa e quantitativa) e nello sviluppo di una procedura di analisi ecoacustica applicabile su più scale temporali e spaziali che si propone come uno strumento potente ed innovativo da affiancare ai metodi più tradizionali per il monitoraggio della biodiversità ed, in particolare, da essere utilizzato in modo trasversale dalle autorità che gestiscono le aree naturali protette al fine di creare una rete di monitoraggio nazionale ed europea.

È fondamentale continuare a documentare e descrivere i paesaggi sonori di determinati habitat (a diverso impatto antropico) ed integrare le procedure di analisi e di classificazione a più livelli che diventeranno sempre più automatizzate.

La raccolta sistematica e sincrona di registrazioni in più siti di un'area naturale, come nel caso studio all'interno di una Riserva Naturale Integrale (RNI), oltre a descrivere le caratteristiche temporali e strutturali di un particolare habitat ed ottenere una valida stima della sua diversità/ricchezza animale presente, può divenire un promettente strumento per il riconoscimento acustico delle specie sonifere presenti e fornire nuove informazioni sulla loro ecologia, nonché monitorare eventuali cambiamenti stagionali, la scomparsa di alcune specie e l'arrivo di altre, comprese quelle invasive.

La costruzione di un archivio di dati acustici e l'estensione del monitoraggio ad altre aree all'interno di un Parco Nazionale con diversi livelli di protezione fornirà anche dati sull'efficacia degli sforzi di conservazione messi in atto dall'ente competente.

Inoltre, l'arricchimento del monitoraggio della biodiversità con l'approccio ecoacustico (mediante spettrogrammi e indici acustici) consente di ottenere informazioni non solo sulla diversità delle specie ma anche sulla densità della componente biofonica che, nel caso della RNI di Sasso Fratino risulta essere predominante e continua per tutte le ore diurne.

Conclusions

Ecoacoustics proves to be a powerful tool for monitoring and management efforts, particularly in natural areas: Passive Acoustic Monitoring (PAM) allows data over large spatial and temporal scales to be recorded and long-term information on animal distribution and variations in community dynamics, including those driven by anthropogenic activities, to be collected.

The main result is the elaboration of the methodological and analytical research protocol (sampling, archiving and analysis) and the development of a multi-scale time ecoacoustics analysis procedure applied to the biodiversity monitoring in protected areas that can be adopted by park authorities for a national and European monitoring network. It is essential to continue to document and describe the soundscapes of different habitats (with different anthropic impact) and to integrate the protocol with newer analyses and multi-levels classification procedures that will become more and more automated. In this way, systematic and synchronous recordings collection in multiple sites of a natural area, as in the study case within an Integral Nature Reserve (RNI), can also become a promising tool for the acoustic recognition of the current avian species and can provide new information on the ecology of soniferous species, as well as tools for the monitoring

of any their changes, seasonal shifts and both the disappearance of species and the arrival of new species, including invasive ones.

The construction of an acoustic data repository and the extending the monitoring to other areas with different levels of protection will also provide cues about the gradients and effectiveness of the conservation efforts.

Furthermore, the enrichment of biodiversity monitoring with the eco-acoustic approach (using spectrograms and acoustic indices) allows to obtain information not only on the diversity of species but also on the density of the biophonic component which, in the case of the RNI of Sasso Fratino, is predominant. and continues throughout the day.

Ringraziamenti

Il lavoro proposto è parte di una tesi di dottorato [21] il cui progetto di ricerca rientra nel progetto SABIOD che ora appartiene all'EADM (Environmental Acoustics Data Mining) all'interno di MADICS (MAsseS des Données, Informations and Connasiances en Science) di CNRS (F). EADM è coordinato da H. Glotin e M. Asch.

Ringraziamo H. Glotin (LSIS, Università di Toloun) per il finanziamento supporto alle fasi iniziali di SABIOD-Italia (2014–2016) e un ringraziamento speciale va al 'Dipartimento dei Carabinieri per la Biodiversità' di Pratovecchio (AR, Italia) per il supporto nella raccolta dati e per i permessi di accesso alla RNI di Sasso Fratino.

Bibliografia

- [1] Bradbury, J. W., Vehrencamp, S. L. (1998). Principles of animal communication. Oxford: Sinauer Associates.
- [2] Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., Duvail, S. (2008). Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal PloS ONE, 3 (12) e4065.
- [3] Rodriguez, A., Gasc, A., Pavoine, S., Grandcolas, P., Gaucher, P., & Sueur, J. (2014). Temporal and spatial variability of animal sound within a neotropical forest. Ecological Informatics, 21, pp. 133-143.
- [4] Laiolo, P. (2010). The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. Biological conservation, 143(7), pp. 1635-1645.
- [5] Lucas, T. C. D., Moorcroft E. A., Freeman R., Rowcliffe J. M., and Jones K. E. (2015). A generalized random encounter model for estimating animal density with remote sensor data. Methods in Ecology and Evolution, 6, pp. 500–509.
- [6] Pieretti, N., & Farina, A. (2013). Application of a recently introduced index for acoustic complexity to an avian soundscape with traffic noise. Journal of the Acoustical Society of America, 134, pp. 891–900.
- [7] Farina, A., Gage, S.H. (2017). Ecoacoustics A new science. In Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds, edited by A. Farina and S. H. Gage, 1-11. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- [8] Pijanowski, B.C., Farina, A., Gage, S.H., Dumyahn, S.L., Krause, B.L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. Landscape Ecology, 26, pp.1213-1232.
- [9] Sugai, L. S. M., Desjonqueres, C., Silva, T. S. F., Llusia, D. (2020). A roadmap for survey designs in terrestrial acoustic monitoring. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 6(3), pp. 220-235.
- [10] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napolitano, B. M., Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience, 61(3), pp. 203-216.
- [11] Sueur J., and Farina A. (2015). Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound. Biosemiotics, 8(3), 493-502.

- [12] Towsey M., Parsons S., Sueur J. (2014). Ecology and acoustics at a large scale. *Ecological Informatics*, 21:1–3.
- [13] Pavan, G., Righini, R. (2017). Bioacustica e Ecoacustica per lo studio e la conservazione della biodiversità. *Associazione Italiana di Acustica* 44.
- [14] Marques, T.A., Thomas, L., Martin, S. W., Mellinger, D. K., Ward, J. A., Moretti, D.J., Tyack, P. L. (2013). Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews*, 88, pp. 287–309.
- [15] Righini, R., Pavan, G. (2020). A soundscape assessment of the Sasso Fratino integral nature reserve in the Central Apennines, Italy. *Biodiversity* 21(1), pp. 4-14.
- [16] Farina, A., Righini, R., Fuller, S., Li, P., Pavan, G. (2021). Acoustic complexity indices reveal the acoustic communities of the old-growth Mediterranean forest of Sasso Fratino Integral Natural Reserve (Central Italy). *Ecological Indicators*, 120, 106927.
- [17] Brumm, H., Naguib, M. (2009). Environmental acoustics and the evolution of bird song. *Advances in the Study of Behavior*, 40, pp. 1-33.
- [18] Pavan, G., Favaretto, A., Bovelacci, B., Scaravelli, D., Macchio, S., Glotin, H. (2015). Bioacustica e ecoacustica applicate al monitoraggio e alla gestione ambientale. *Bioacoustics and ecoacoustics applied to environmental monitoring and management. Rivista Italiana di Acustica*, 39(2), pp. 68-74.
- [19] Brizio, C., Buzzetti, F.M., & Pavan, G. (2020). Beyond the audible: wide band (0-125 kHz) field investigation on Italian Orthoptera (Insecta) songs *Biodiversity Journal*, 11(2), pp. 443–496.
- [20] Pavan, G. (2016). SeaPro SABIOD Software. <http://www.unipv.it/cibra/seapro.html>
- [21] Righini, R. (2020). Development of an eco-acoustic research protocol and its application for monitoring the acoustic environment in the Integral Nature Reserve of Sasso Fratino (Italy). *Tesi di Dottorato. Università di Pavia*.
- [22] Boelman, N.T., Asner, G.P., Hart, P.J., Martin, R.E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 17, pp. 2137-2144.
- [23] Depaetere, M., Pavoine, S., Jiguet, F., Gasc, A., Duvail, S., Sueur J. (2012). Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland, *Ecol. Indic.*, 13, pp. 46-54.
- [24] Pieretti, N., Farina A., Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the Acoustic Complexity Index (ACI), *Ecological Indicators* 11(3), pp. 868-873.
- [25] Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., Doucette, J., Pekin, J. (2011). A Primer of Acoustic Analysis for Landscape Ecologists. *Landscape Ecology* 26, pp. 1233–1246. doi:10.1007/s10980-011-9636-9.
- [26] Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, J., Joo, W. (2012). The Remote Environmental Assessment Laboratory's Acoustic Library: An Archive for Studying Soundscape Ecology. *Ecological Informatics*, 12, pp. 50–67. doi:10.1016/j.ecoinf.2012.08.001.
- [27] Pavan, G., Righini R., Priori P., Scaravelli D. (2018). Il paesaggio sonoro, capitolo del libro “La Riserva Integrale Naturale di Sasso Fratino”, stampato da Reparto Biodiversità Carabinieri Pratovecchio, seconda edizione.
- [28] Sueur, J., Aubin, T., Simonis, C. (2008). Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18, pp. 213-226.
- [29] Villanueva-Rivera, L.J., Pijanowsk, B.C. Doucette, J., Pekin B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology* 26, pp. 1233-1246.