

# Ottimizzazione dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici: applicazione al Parco Regionale della Valle del Ticino

Giorgia Guagliumi<sup>a\*</sup> | Roberto Benocci<sup>a</sup> | Andrea Potenza<sup>a</sup> | Valentina Zaffaroni-Caorsi<sup>a</sup> | Fabio Angelini<sup>a</sup> | Giovanni Zambon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università degli Studi Milano-Bicocca, Piazza dell'Ateneo Nuovo, 1, 20126 Milano

\* Autore di riferimento: g.guagliumi@campus.unimib.it

**Ricevuto:** 3/5/2024

**Accettato:** 26/8/2024

**DOI:** 10.3280/ria2-2024oa17780

**ISSN:** 2385-2615

La valutazione della qualità ambientale e l'identificazione precoce di effetti nefasti sono aspetti significativi per la conservazione degli ecosistemi e per la prevenzione del degrado dei diversi habitat. Nel suddetto contesto, la comprensione del paesaggio sonoro riveste un ruolo cruciale, in quanto fornisce potenziali indicatori dello stato di salute e dell'integrità degli ambienti naturali. Questo studio si propone di contribuire all'avanzamento di tale comprensione mediante l'introduzione di una nuova metodologia applicata ad una campagna di misurazione condotta in una zona umida presso il Parco Regionale della Valle del Ticino. Tale metodo consiste nella ottimizzazione della scelta dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici, offrendo un'analisi maggiormente accurata del soundscape e presentando nuove prospettive per una ricerca approfondita nell'ambito dell'ecologia del paesaggio sonoro. La validazione qualitativa di tali indici è stata condotta per mezzo di un protocollo, attraverso l'ascolto diretto delle tracce audio, con l'obiettivo di dettagliare le sorgenti antropofoniche presenti e di ottenere una maggiore oggettività della risposta.

**Parole chiave:** indici eco-acustici, rumore antropogenico, paesaggio sonoro, ascolto diretto, parco urbano

## **Optimization of the calculation parameters of the eco-acoustic indices: application to the Ticino Valley Regional Park**

The assessment of environmental quality and the early identification of harmful effects are significant aspects for the conservation of ecosystems and for the prevention of degradation of various habitats. In this context, understanding the soundscape plays a crucial role, as it provides potential indicator of the health and integrity of natural environments. This study aims to contribute to the advancement of this understanding through the introduction of a new methodology applied to a measurement campaign conducted in a wetland at the Ticino Valley Regional Park. This method consists in optimizing the choice of calculation parameters of the eco-acoustic indices, offering a more accurate analysis of the soundscape and presenting new perspectives for in-depth research in the field of soundscape ecology. The qualitative validation of these indices was conducted by means of a protocol, through direct listening to the audio tracks, with the aim of detailing the anthropophonic sources present and obtaining greater objectivity of the response.

**Keywords:** eco-acoustic indices, anthropogenic noise, soundscape, direct listening, urban park

## 1 | Introduzione

Nel vasto panorama delle scienze ambientali, il suono si configura come un elemento fondamentale per gli organismi che lo producono e che ne sono esposti. Lo studio dell'inquinamento acustico, dei suoi effetti sulla fauna selvatica e sugli ecosistemi terrestri risulta fondamentale per comprendere e preservare la biodiversità, la quale risulta principalmente minacciata dalle attività umane [1]. Il monitoraggio acustico passivo (PAM) è una tecnica che implica la registrazione e l'analisi dei suoni di un ambiente estraendo molteplici informazioni [2] ed emerge come la strategia più efficace per identificare e comprendere i primi segnali del degrado degli ecosistemi [3].

L'introduzione di indici eco-acustici semplifica le analisi in quanto questi si focalizzano su differenti caratteristiche del

suono [1]. Per questo motivo rappresentano un valido supporto per valutare la complessità dell'ambiente acustico e per monitorare la qualità ambientale [4].

In questo articolo si propone una nuova metodologia per la determinazione dei parametri necessari per il calcolo degli indici eco-acustici atta a rappresentare il paesaggio sonoro in maniera più corrispondente alla realtà rispetto a quanto ottenibile mediante approcci convenzionali esistenti in letteratura [5, 6, 7]. In particolare, esaminando parametri relativi alle frequenze biofoniche e antropiche presenti nell'area oggetto di studio, e non utilizzando parametri standardizzati, il suddetto approccio permette di fornire una rappresentazione più accurata e precisa della realtà sonora locale.

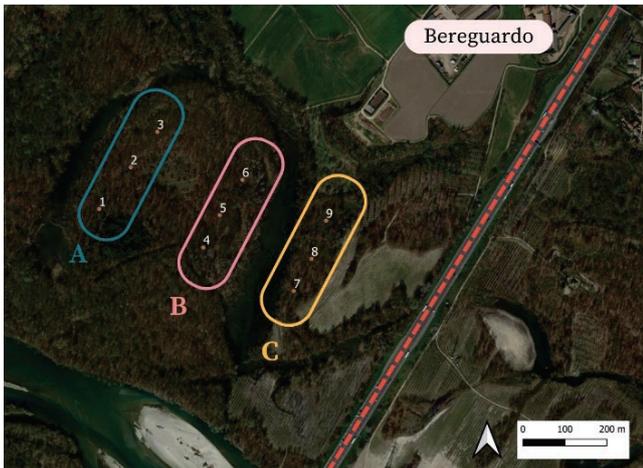
Per la loro validazione, è stata condotta un'analisi preliminare delle registrazioni audio attraverso ascolto diretto per

mezzo di un protocollo comune adottato da diversi operatori, con l'obiettivo di dettagliare le sorgenti antropofoniche presenti nell'ambiente.

## 2 | Materiali e metodi

### 2.1 | Area di studio

L'area oggetto di studio è situata presso la Lanca del Moriano (PV) nel Parco Naturale Lombardo della Valle del Ticino (Fig. 1). Tale area rientra nel Sito d'Interesse Comunitario "Basso Corso e Sponde del Ticino" e comprende sia la depressione valliva del fiume Ticino, sia parte della pianura in cui è inciso il solco fluviale, la cosiddetta "bassa pianura". Estendendosi su 39 ettari, uno degli elementi maggiormente impattanti a livello ambientale è l'autostrada A7, comunemente nota come "Autostrada dei Giovi", ovvero la principale arteria stradale che collega il capoluogo della Lombardia (Milano) a quello ligure (Genova).



**Fig. 1 – Area oggetto di studio e suddivisione dei siti di misura in fasce spaziali equidistanti dall'autostrada: I. fascia A (siti 1-2-3); II. fascia B (siti 4-5-6); fascia C (punti 7-8-9)**

**Area under study and subdivision of the measurement sites into spatial bands equidistant from the motorway: I. band A (sites 1-2-3); II. band B (sites 4-5-6); band C (sites 7-8-9)**

### 2.2 | La campagna di monitoraggio

Nell'area oggetto di studio, sono stati selezionati nove siti di misurazione collocati all'interno di una griglia che insiste su diverse tipologie di habitat con il fine di porre in essere la rilevanza dell'eterogeneità ambientale [8]. I siti di misurazione sono stati selezionati scegliendo la disposizione migliore all'interno della griglia regolare, la quale prevede gli strumenti allineati parallelamente alla sorgente maggiore di disturbo, ovvero l'autostrada. All'interno della lanca sono situate due fasce: la fascia A, comprendente i siti di misurazione 1-2-3, e la fascia B, che include i punti 4-5-6 (Fig. 1). Al di fuori del solco fluviale è presente la fascia C, contenente i siti 7-8-9

(Fig. 1), che permette di analizzare in maniera più accurata il rumore antropico prodotto dal traffico veicolare e relativi rumori stradali. Tali fasce presentano le seguenti distanze medie dall'autostrada: 762 m, 516 m, 284 m, rispettivamente per la Fascia A, B e C. Le suddette sono state determinate attraverso la funzione "v.distance" del software QGIS, la quale permette di calcolare con precisione la distanza minima tra i punti d'interesse (ossia i siti di misurazione) ed il poligono rappresentante l'autostrada.

Per quanto concerne il campionamento temporale, lo studio in esame è esteso a periodi di monitoraggio a lungo termine: per ogni stagione le registrazioni hanno una durata pari a due settimane e sono effettuate con il seguente schema:

- 1 minuto di registrazione;
- 5 minuti di pausa.

Nello specifico è stata analizzata la campagna primaverile 2022, dal 13 al 27 aprile.

### 2.3 | Strumenti di misurazione

I sensori impiegati per lo studio sono nove dispositivi di registrazione audio: otto Song Meter Micro (SMM, siti di misura n 1-8) della Wildlife Acoustic e un Soundscape Explorer Terrestrial (SET, sito di misura n 9) della Luniletronik, aventi una frequenza di campionamento pari a 48 kHz. I SMM sono registratori programmabili dotati di un microfono con una frequenza di campionamento massima di 96 kHz e possiedono una risposta in frequenza non lineare. Il SET è un registratore programmabile dotato di due microfoni con una frequenza di campionamento massima di 48 kHz e 192 kHz e diversi sensori ambientali (per umidità, temperatura, luminosità e pressione atmosferica), avente una risposta in frequenza quasi piatta fino a 6 kHz.

Nello specifico, da un'analisi spettrale delle registrazioni per i SMM è stato riscontrato un problema noto come Direct Current (DC) offset, il quale si riferisce alla presenza di una componente di corrente continua nel segnale audio. Tale fenomeno è stato osservato in tutti i SMM ad eccezione del dispositivo n.6, l'unico non affetto dal suddetto problema. Questa componente può derivare da differenti fattori e può causare diversi problemi, influenzando i risultati del calcolo degli indici eco-acustici, quali:

1. alterazione della forma d'onda, in quanto l'offset introduce una componente costante nel segnale di tensione;
2. alterazione del dominio delle frequenze, poiché la corrente continua si manifesta come un picco di intensità nel primo bin di frequenza nell'analisi spettrale del segnale.

Conseguentemente, per quanto concerne gli indici eco-acustici che tengono conto della distribuzione spettrale dell'energia, la presenza di tale picco influenza la valutazione degli indici stessi.

Il processo di rimozione della DC offset è stato fondamentale per correggere l'intera forma d'onda del segnale, riallineandola attorno al valore medio ideale pari a zero. Tale rimozione ha consistito nel calcolare il valore medio del se-

gnale audio, identificando l'entità dello spostamento verticale (lungo l'asse delle ordinate) presente nel segnale. Utilizzando il suddetto valore medio come riferimento, si è proceduto a sottrarre tale offset da ogni campione audio nella registrazione. Questo processo ha permesso di garantire una maggiore affidabilità nelle analisi ed elaborazioni successive, contribuendo a preservare la complessiva qualità delle registrazioni sonore.

## 2.4 | Calcolo degli indici eco-acustici

L'interesse sempre più crescente riguardo l'uso di indici eco-acustici nell'ambito ecologico è spinto dalla necessità di comprendere ed analizzare le variazioni dell'attività acustica in un determinato ambiente. Tali indici mirano a fornire una rapida analisi delle caratteristiche sonore di un ambiente enfatizzando proprietà diverse.

In questo studio, l'analisi e il calcolo degli indici sono stati eseguiti nell'ambiente 'R' [9], utilizzando i pacchetti "tuneR", "seewave" e "soundecology". In particolare, il calcolo della Fast Fourier Transform (FFT) è stato fissato a 1024 punti, in quanto il suddetto valore permette di conseguire una risoluzione spettrale ottimale, pari a 46,87 Hz, assicurando così una precisa analisi delle caratteristiche acustiche in questione.

La metodologia proposta non prevede l'utilizzo di un unico indice eco-acustico in quanto non rappresenterebbe la totalità delle caratteristiche del suono e limiterebbe la comprensione complessiva dell'ambiente acustico [10]. L'utilizzo di più indici consente, infatti, di ottenere più informazioni specifiche riguardanti diversi aspetti del suono, come la pressione acustica, la qualità e la direzionalità del suono; permette di adattare le analisi alle specifiche esigenze applicative, quali la valutazione del rumore ambientale o della qualità del suono; e riduce la probabilità di ottenere una interpretazione non esaustiva o distorta dell'ambiente sonoro.

Gli indici eco-acustici oggetto di studio sono otto: l'Acoustic Complexity Index (ACI) [11], l'Acoustic Diversity Index (ADI) [12], l'Acoustic Evenness Index (AEI) [12], il Bioacoustic Index (BI) [13], il Normalized Difference Soundscape Index (NDSI) [14], l'Acoustic Entropy (H) [15], il Dynamic Spectral Centroid (DSC) [12] e il Zero Crossing Rate (ZCR) [16]. Tali indici sono stati calcolati mediante due metodi distinti. La metodologia tradizionale, ampiamente adottata in letteratura, prevede per il calcolo di tali indici la selezione di valori standard di default, quali: I. la frequenza minima impostata a 100 Hz per permettere di catturare componenti sonore significative [5], come il rumore derivante principalmente dal traffico stradale a bassa frequenza; II. la frequenza massima in input utilizzata per studiare la componente biofonica, pari a 12 kHz [6]; il livello di soglia (dB\_threshold) per il calcolo degli indici ADI e AEI, che rappresenta il limite inferiore per considerare un suono rilevante nelle analisi acustiche e convenzionalmente fissata a -50dB o -30dB a seconda del contesto specifico [7].

In questo contesto viene proposta una ottimizzazione di tali parametri rispetto allo studio della biofonia. La metodologia sviluppata ha previsto in primo luogo la selezione di

una giornata con condizioni meteorologiche appropriate, quali assenza di pioggia (o durata temporale di precipitazioni ristretta) e presenza di vento moderato. La pioggia produce un suono caratteristico a seguito del suo impatto con differenti superfici (rami, foglie) e la presenza di gocce d'acqua nell'aria può alterare la percezione del suono e mascherare suoni da indagare, come le vocalizzazioni dell'avifauna. Dal punto di vista del traffico veicolare, la pioggia potrebbe aumentare l'area interessata dalla propagazione del rumore in quanto l'asfalto bagnato interagisce con gli pneumatici dei veicoli in movimento e agisce come una superficie riflettente.

Di concerto, il vento potrebbe provocare lo spostamento di elementi (come vegetazione od oggetti) ed interferire con il suono desiderato e mascherare o coprire altri suoni che si desidera registrare. Dal punto di vista veicolare, qualora il vento avesse la medesima direzione del rumore del traffico, quest'ultimo sarebbe trasportato a distanze maggiori e con una velocità più elevata, giungendo in maniera più rapida allo strumento di registrazione, rendendolo inoltre di maggiore intensità.

In ultima analisi, è stato scelto di condurre le analisi in un giorno festivo in modo tale da considerare lo scenario peggiore in termini di componente antropofonica, caratterizzato da un maggiore traffico e disturbi generati da passi, voci e rumore delle biciclette.

A seguito della selezione del giorno ottimale, le analisi delle registrazioni sono state condotte in tre fasce orarie: una rappresentante l'alba, in quanto momento della giornata in cui le specie di uccelli risultano essere più attive; una il tramonto, ovvero il periodo in cui alcune specie cantano per fini di corteggiamento o di comportamento territoriale; e una fascia oraria intermedia [17]. È stato analizzato lo spettrogramma delle registrazioni filtrando le frequenze tramite il software Kaleidoscope, col fine di determinare il valore della frequenza massima antropofonica, selezionando quella fascia di frequenze per le quali fossero presenti solo rumori antropofonici, scartando quindi ogni tipologia di biofonia. La frequenza ottenuta è stata determinata per tre fasce spaziali (A, B e C, Fig. 1), all'interno delle quali i siti di misurazione per ogni fascia sono equidistanti dalla sorgente di traffico. Per ciascun sito di misura è stato selezionato lo scenario peggiore e selezionato come valore finale il valore più elevato, identificando la soglia antropofonica.

A seguito dell'identificazione delle specie presenti in campo attraverso la tecnica del conteggio dei punti a distanza limitata [18], sono stati scaricati i canti relativi ad ogni specie dal database europeo Xeno-Canto [19], con lo scopo di identificare, per mezzo del programma Audacity [20], la maggior frequenza di canto specie-specifica. Tra tutte le frequenze rilevate, è stata selezionata quella più elevata al fine di determinare la frequenza massima da utilizzare nel calcolo degli indici acustici.

Nel processo di calcolo specifico per gli indici ADI e AEI, abbiamo apportato modifiche allo script originale degli indici, la cui versione originale è consultabile nel pacchetto R soundecology. Le suddette modifiche sono risultate necessarie per integrare il valore della frequenza minima all'interno

del calcolo degli indici, in modo da simulare il calcolo di altri indici, quali: ACI, BI, NDSI e DSC, che utilizzano tale parametro nel loro calcolo, consentendo di cogliere maggiormente le possibili variazioni indicate nel paesaggio sonoro. Gli indici di diversità e omogeneità acustica richiedono inoltre l'inserimento in input di uno specifico parametro, la `dB_threshold`, che definisce un livello minimo di intensità sonora in decibel al di sopra del quale i suoni vengono considerati rilevanti per il calcolo degli indici. Per ottenere il valore desiderato della `dB_threshold`, ci si è concentrati sull'analisi della biofonia presente in ogni registrazione, assicurandosi di non trascurare le vocalizzazioni più remote. Utilizzando il medesimo giorno e la stessa suddivisione oraria, gli spettrogrammi delle registrazioni sono stati esaminati tramite Kaleidoscope [21] e, identificando le vocalizzazioni più distanti dal registratore, è stato ottenuto il relativo livello di intensità sonora espresso in decibel (dB).

Infine, siccome sono stati utilizzati registratori differenti, si è provveduto all'equalizzazione delle registrazioni al fine di ottenere una risposta in frequenza equivalente a quella di un fonometro, permettendo una comparabilità dei livelli sonori e degli indici eco-acustici [22]. Al tal fine, è necessario confrontare le risposte in frequenza dei registratori con quella di un fonometro e generare un filtro che renda possibile l'equivalenza delle registrazioni. La procedura consiste di tre passaggi: I. misurare un rumore bianco con un fonometro e i registratori, II. generare un filtro nel dominio delle frequenze calcolando il rapporto tra il Power Spectral Density della registrazione acquisita dal fonometro e quello dal registratore in esame, III. applicare il suddetto filtro alle registrazioni effettuate in campo. I dettagli del procedimento seguiti per tali elaborazioni sono esposti nel recente studio di Potenza et al. [22], il cui script Matlab di esecuzione è presente nei Supplementary Materials del medesimo.

## 2.5 | Analisi statistica

Al fine di evidenziare l'importanza di una valutazione dettagliata dei dati di input e dell'uso corretto di varie tipologie di strumenti, è stato condotto un confronto tra la metodologia tradizionale e quella innovativa presentata in questo articolo, concentrandosi sugli andamenti temporali medi orari e sulle relative mappe spaziali per ciascun indice eco-acustico.

Per quanto riguarda l'analisi metodologica più approfondita, gli indici eco-acustici sono stati sottoposti ad una Analisi delle Componenti Principali (PCA). Il dataset è stato organizzato in maniera ottimale attraverso la realizzazione di una matrice, in cui  $n$  rappresenta i siti di misura (in questo studio 8, poiché il dispositivo n.5 è stato perso durante la campagna di misurazione) e  $k$  i differenti indici utilizzati (pari a 8 come spiegato in precedenza). Al fine di analizzare la distribuzione della componente biofonica, sono stati considerati gli intervalli temporali rappresentanti la massima attività canora dell'avifauna, ossia un'ora prima dell'alba e due ore dopo

di essa. È stata così organizzata una matrice, dove  $n$  indica gli otto siti di misurazione e  $k$  i valori dei diversi indici eco-acustici nell'intorno temporale delle albe. Successivamente, è stato eseguito un pretrattamento dei dati, consistente nella scalatura dei dati presenti nella matrice. Il processo di scalatura ha coinvolto l'utilizzo della funzione "prcomp" in R, con l'opzione "scale=TRUE". Questa operazione ha trasformato i dati di ciascuna variabile (ovvero gli indici eco-acustici utilizzati) in modo tale che abbiano una media pari a zero e una deviazione standard pari a uno. Tale operazione è stata fondamentale per uniformare le scale delle variabili, evitando che le differenze di ampiezza tra i valori delle variabili influenzassero in modo sproporzionato i risultati della PCA, non modificando il contenuto informativo. In seguito, è stata indagata la similitudine del soundscape registrato nei siti di misura applicando la Cluster Analysis sulla matrice, ottenuta tramite l'implementazione della PCA, in cui il termine  $c$  si riferisce alle componenti principali selezionate.

Al fine di validare gli indici eco-acustici, sono state condotte delle analisi sulle registrazioni audio, permettendo così di realizzare uno studio più dettagliato e oggettivo. Per realizzare la suddetta attività di ascolto è stata implementata una nuova metodologia, volta all'ottenimento di una maggiore oggettività nonostante la presenza di diversi operatori (ripetibilità di analisi di un singolo operatore e riproducibilità di analisi tra operatori diversi).

Sono state condotte diverse sessioni di training coinvolgendo due operatori con esperienze pregresse in prove di ascolto per progetti di ricerca simili in differenti parchi urbani. Gli operatori, nella fascia di età tra 25-35 anni, hanno partecipato a tali sessioni al fine di rendere i risultati delle analisi degli ascolti i più affini e simili possibili, migliorando così la coerenza e l'affidabilità delle valutazioni. Dal momento che il singolo individuo possiede una percezione a livello uditivo differente e soggettiva, l'addestramento congiunto ha permesso di standardizzare i risultati ed ottenere la più auspicabile uniformità. Durante le sessioni di training è stata utilizzata in maniera sincrona la medesima tipologia di cuffie acustiche, con il volume del supporto personale al 100% delle funzionalità e selezionando un ambiente di studio privo di rumore di fondo disturbante (come voci, passi, apparecchi o dispositivi rumorosi, impianti tecnici, ecc.). Il software utilizzato per l'addestramento e per i successivi ascolti delle campagne in esame è Kaleidoscope, il quale permette di ascoltare i file audio e al contempo visualizzarne a schermo lo spettrogramma. Al fine di quantificare le biofonie, le antroponie e le geofonie, è stata effettuata un'indagine uditiva secondo uno schema standardizzato [23, 24] e successivamente approfondito e dettagliato, come visibile in Tab. 1. Per ogni minuto di registrazione sono state condotte delle ricerche approfondite riguardanti le vocalizzazioni dell'avifauna e le fonti non biofoniche. Per quanto concerne le prime, è stata indagata la numerosità degli individui presenti (nessuno, pochi, molti), la diversità di specie (nessuna specie, 1 specie presente, >1 specie presenti), la vicinanza delle vocalizzazioni ai dispositivi di registrazione (nessun individuo, individui

vicini al sensore, lontani dal sensore, sia vicini che lontani dal dispositivo) e la durata del suono dell'avifauna espressa in termini di percentuale di attività di canto degli uccelli nel minuto considerato (0, 25, 50, 75, 100)%. I contributi non biofonici sono suddivisi in traffico stradale, passaggi di aerei, voci e/o passi, eventi geofonici e altre sorgenti di rumore. Il primo è suddiviso in due categorie, quali il livello di traffico (assenza di traffico, traffico vicino al dispositivo audio, lontano dal sensore) e la tipologia di traffico (traffico assente, continuo, intermittente). Le geofonie, quali pioggia e vento, sono state esaminate specificando la loro presenza o assenza e, quando necessario, specificando se fossero presenti livelli sonori così elevati da ostacolare un'analisi ottimale del paesaggio sonoro, in quanto mascheravano tutti gli altri suoni presenti. Infine, sono state esaminate altre fonti di rumore, annotando la loro assenza o presenza e specificando la loro origine, come movimenti della vegetazione, presenza di rametti spezzati o il passaggio di altri animali, quando possibile dettagliandone la specie (ad esempio, il ronzio degli insetti o la presenza di rane).

**Tab. 1 – Categorie sonore analizzate durante gli ascolti (raggruppati per tipologie)**  
**Sound categories analyzed during listening (grouped by types)**

<i>Sorgente Sonora</i>	<i>Identificazione</i>	<i>Parametri</i>
Numerosità aviaria	Nessuna specie	0
	Pochi individui	1
	Numerosi individui	2
Diversità di specie	Nessuna specie	0
	Una specie	1
	Più di una specie	2
Vicinanza degli individui	Nessun individuo	0
	Vicini al sensore	1
	Lontani dal sensore	2
	Sia vicini che lontani	3
Durata percentuale delle vocalizzazioni	Assente	0%
	Presente per 15s	25%
	Presente per 30s	50%
	Presente per 45s	75%
	Presente per 60s	100%
Livello di traffico	Assenza di traffico	0
	Vicino al sensore	1
	Distante dal sensore	2
Tipologia di traffico	Assenza di traffico	0
	Traffico continuo	1
	Traffico intermittente	2
Passaggio di aerei	Assenza di aerei	0
	Presenza di aerei	1
Voci	Assenza di voci	0
	Presenza di voci	1
Passi	Assenza di passi	0
	Presenza di passi	1
Pioggia	Assenza di pioggia	0
	Presenza di pioggia	1
Vento	Assenza di vento	0
	Presenza di vento	1
Altre sorgenti	Assenza di sorgenti	0
	Specifiche di sorgenti	1

Con l'obiettivo di ottimizzare e armonizzare la tecnica d'ascolto, le fasi di training sono state realizzate in giorni differenti, selezionando la stessa registrazione scelta in modo aleatorio. Al termine di tali ascolti, sono stati confrontati i risultati ottenuti dai diversi operatori e, qualora vi fossero delle differenze significative, veniva avviata una discussione per capire quale fosse l'approssimazione migliore al valore reale.

Gli ascolti diretti delle registrazioni risultano necessari per validare gli indici eco-acustici, al fine di comprendere quale metodologia sia la più accurata. A tale scopo, in via preliminare, è stato analizzato il livello di frequenza relativa di ciascun parametro durante gli ascolti diretti, in relazione al sito oggetto di studio (uno per ogni fascia spaziale A, B e C). Successivamente, tali valori sono stati confrontati qualitativamente con i risultati ottenuti dalla Cluster Analysis utilizzando i due metodi precedentemente descritti.

### 3 | Risultati

#### 3.1 | Parametri di calcolo

La soglia antropofonica, ovvero la frequenza minima per il calcolo degli indici, è stata calcolata per tre differenti fasce spaziali che differiscono unicamente per la loro distanza dall'autostrada: I. fascia A, comprendente i siti 1-3; II. fascia B, ossia i punti 4-6; III. fascia C, la più vicina all'autostrada, comprendente i siti 7-9. Il valore di frequenza che riflette lo scenario peggiore per ogni fascia, ossia il valore più elevato di frequenza attribuibile a sorgenti antropofoniche, è riportato in Tab. 2. Nella fascia A e nella fascia B, la frequenza massima antropofonica è pari a 1700 Hz, mentre nella fascia C è pari a 1750 Hz. È stato selezionato come valore caratteristico dell'area di studio il valore più elevato, pari a 1750 Hz.

Dai suddetti valori, si osserva come la frequenza massima attribuibile a sorgenti antropofoniche, costituita prevalentemente dal traffico veicolare dell'autostrada, rimanga sostanzialmente inalterata con l'aumentare della distanza dalle fasce spaziali. Tale comportamento può essere spiegato dal fatto secondo cui il rumore veicolare si propaga efficacemente nelle diverse fasce spaziali in quanto l'autostrada si colloca sul piano campagna e il terreno tra le fasce risulta pianeggiante. Conseguentemente, la propagazione del rumore tende a essere più uniforme e, senza variazioni di elevazione significative, può diffondersi su una vasta area con minori attenuazioni dovute a cambiamenti topografici. Inoltre, il suddetto comportamento è ulteriormente accentuato dall'assenza di barriere naturali o artificiali e dalla presenza di vegetazione rada nelle vicinanze dell'autostrada, che non offrono schermatura e assorbimento del rumore.

Le analisi degli spettri di frequenza, infatti, confermano che il traffico veicolare si manifesta principalmente nelle basse frequenze senza mostrare variazioni significative tra le diverse fasce spaziali. Tale risultato è stato confermato anche durante gli ascolti diretti delle registrazioni, dove la costante

presenza di basse frequenze indica come il rumore proveniente dall'autostrada sia predominante in queste bande.

Studi hanno dimostrato come la vegetazione possa influenzare significativamente l'ambiente sonoro, bensì la sua efficacia dipenda dalla densità e dalla tipologia delle specie vegetali presenti [25]. Per essere efficaci nel ridurre il rumore del traffico, le barriere naturali devono essere sufficientemente dense e alte [26]. Tale aspetto risulta coerente con le osservazioni effettuate nell'area di studio, dove le caratteristiche presenti non sono in grado di fornire un'adeguata attenuazione del rumore.

**Tab. 2 – Valori di frequenza antropofonica massima per ogni fascia spaziale**

*Maximum anthropophonic frequency values for each spatial band*

Fascia Spaziale	Frequenza massima [Hz]
A	1700
B	1700
C	1750

La frequenza massima biofonica identificata è stata ottenuta indagando le frequenze emesse dagli individui presenti nell'area di studio. L'intervallo di frequenza attribuibile alle specie aviarie locali è risultato compreso tra 1,75 kHz e 9 kHz.

Infine, per quanto concerne la dB\_threshold, è stata in seguito realizzata una media dei valori acquisiti rispetto alle tre differenti fasce orarie (6:00, 12:00, 19:00) in quanto la biofonia possiede delle caratteristiche differenti durante il corso della giornata. Dai risultati, presenti in Tab. 3, è stata effettuata la media di tali soglie ottenendo come valore finale -73 dB.

**Tab. 3 – Livelli di soglia in decibel medi per ogni fascia oraria**  
*Threshold levels in average decibels for each time slot*

Fascia oraria	dB_threshold [dB]
05:00 – 08:00	-71
11:00 – 14:00	-73
18:00 – 21:00	-72

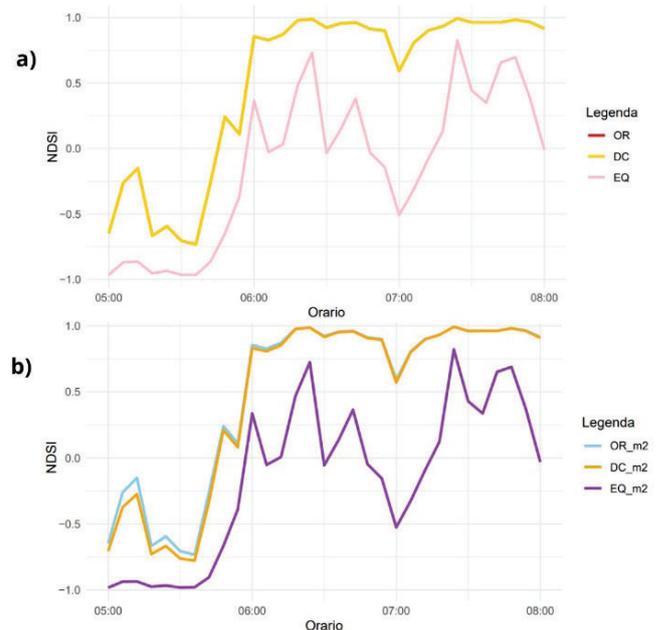
### 3.2 | Analisi statistica

Il calcolo degli indici eco-acustici è stato effettuato con entrambe le metodologie presentate, con l'obiettivo di confrontare tali approcci e determinarne eventuali differenze. In particolare, sono stati confrontati gli andamenti temporali per ogni indice, notando quali fossero le differenze principali e le relative conseguenze.

Nel presente studio è stato esaminato l'effetto del DC offset sugli indici eco-acustici, a titolo di esempio si riportano l'NDSI e il DSC, utilizzando dati acquisiti in una specifica giornata (il 25 aprile 2022, per un sito scelto in maniera casuale) durante il periodo dell'alba, noto per la sua elevata bio-

fonicità. Per valutare tale effetto, sono stati eseguiti calcoli sia per la metodologia tradizionale sia per quella ottimizzata, rappresentando graficamente i risultati (Figg. 2-3), mediante tre configurazioni distinte: I. utilizzo dei parametri in input per il calcolo dell'indice ("OR" e "OR\_m2"); II. rimozione del DC offset dalle registrazioni audio ("DC" e "DC\_m2"); III. equalizzazione delle registrazioni ("EQ" e "EQ\_m2").

Per quanto concerne l'andamento dell'NDSI (Fig. 2) risulta evidente come l'offset prodotto dalla corrente continua non influenzi significativamente i valori dell'indice quando confrontato con i risultati ottenuti con la rimozione di tale offset ("OR" e "DC", Fig. 2a). Ciononostante, l'ottimizzazione dei parametri evidenzia una lieve discrepanza tra le curve "OR\_m2" e "DC\_m2" (Fig. 2b), in maniera più marcata nel periodo temporale compreso tra le 5:00 e le 6:30. Inoltre, l'equalizzazione delle registrazioni permette di risolvere il problema legato alla non linearità della risposta in frequenza dello strumento, fornendo delle curve maggiormente accurate ("EQ" e "EQ\_m2", Fig. 2).



**Fig. 2 – Andamento dell'NDSI durante un'alba calcolato mediante il metodo tradizionale (a) e il metodo ottimizzato (b).**

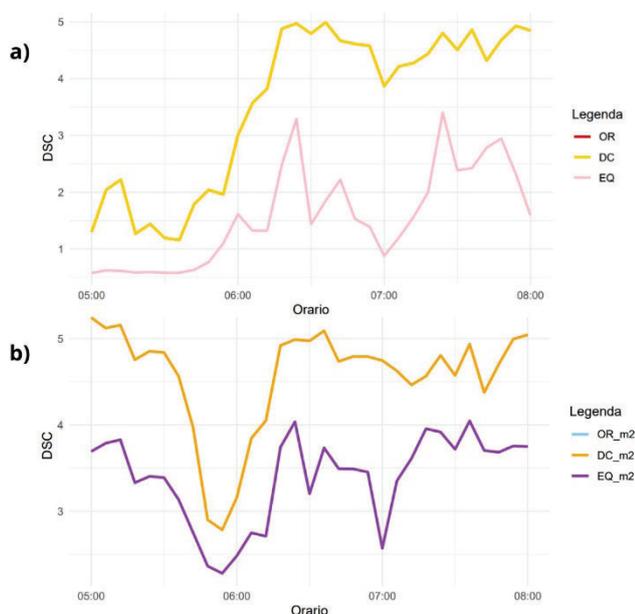
**Nelle metodologie presentate, si distinguono tre configurazioni: I. OR, che mantiene i parametri originali in input; II. DC, in cui viene risolto il DC offset; III. EQ, in cui si equalizzano le registrazioni**  
**Trend of the NDSI during a sunrise calculated using the traditional method (a) and the optimized method (b). In the methodologies presented, three configurations can be distinguished: I. OR, which maintains the original input parameters; II. DC, where the DC off-set is resolved; III. EQ, where you equalize your recordings**

Di concerto, l'ottimizzazione dei parametri di input ed il processo di equalizzazione hanno dimostrato di influenzare significativamente i valori del DSC in quanto esso, considerando la distribuzione spettrale del segnale, risulta maggiormente reattivo alle modifiche di tali parametri, influenzando la risoluzione temporale e frequenziale dell'analisi. Inoltre, siccome il DSC si basa su una media ponderata, risulta influenzato dalle

componenti a bassa energia tanto quanto dalle componenti ad alta energia. Conseguentemente l'ottimizzazione dei parametri migliora la rilevazione delle componenti più deboli, che contribuiscono significativamente al valore dell'indice stesso.

L'analisi delle curve equalizzate ottenute mediante il metodo tradizionale (EQ, Fig. 3a) e quello ottimizzato (EQ\_m2, Fig. 3b) evidenzia in maniera più specifica i benefici dell'ottimizzazione dei parametri. La suddetta metodologia, infatti, migliora la stabilità e la precisione delle curve del DSC, riducendo la variabilità e migliorando la qualità del segnale audio, rilevando con accuratezza le differenti componenti sonore significative.

In contrasto, sebbene l'NDSI sia anch'esso sensibile ai cambiamenti nei parametri di input, risulta meno influenzato dalle variazioni frequenziali e più concentrato sulla segregazione delle componenti biofoniche e antropofoniche, rendendolo meno reattivo ai miglioramenti nella qualità del segnale audio derivanti dall'ottimizzazione dei parametri, rispetto a quanto invece riscontrato dagli andamenti del DSC (Fig. 3).

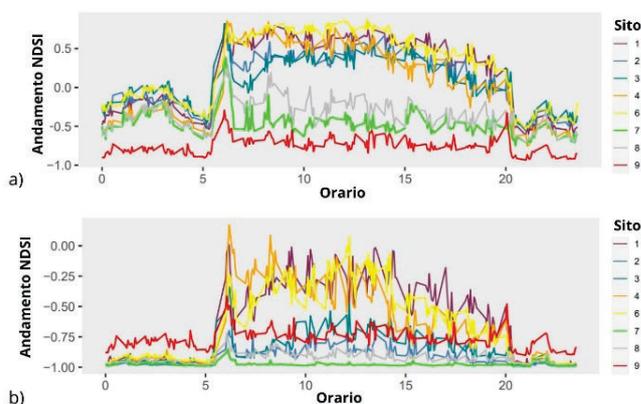


**Fig. 3 – Andamento del DSC durante un'alba calcolato mediante il metodo tradizionale (a) e il metodo ottimizzato (b). Nelle metodologie presentate, si distinguono tre configurazioni: I. OR, che mantiene i parametri originali in input; II. DC, in cui viene risolto il DC offset; III. EQ, in cui si equalizzano le registrazioni DSC trend during a sunrise calculated using the traditional method (a) and the optimized method (b). In the methodologies presented, three configurations can be distinguished: I. OR, which maintains the original input parameters; II. DC, where the DC off-set is resolved; III. EQ, where you equalize your recordings**

Quindi, l'ottimizzazione dei parametri di input e l'equalizzazione delle registrazioni hanno dimostrato di influenzare in maniera sostanziale i valori dei diversi indici. Per le suddette ragioni sono stati studiati gli andamenti degli indici durante l'intera campagna di misura, confrontando le metodologie presentate, non discutendo il caso riguardante la rimozione dell'offset dovuto alla corrente continua in quanto possiede minime discrepanze rispetto al caso originale.

Per quanto concerne l'NDSI, inizialmente è stato effettuato il calcolo mediante le impostazioni di default, in cui: la frequenza minima riferita alle sorgenti antropofoniche è pari a 100 Hz, la frequenza di ripartizione corrispondente alla frequenza massima antropofonica e alla frequenza minima biofonica è pari a 2000 Hz, e la frequenza massima biofonica è pari a 1200 Hz. Si nota come l'andamento dell'indice durante le ore notturne (Fig. 4a) presenti valori negativi in quanto nel paesaggio sonoro prevale la componente antropofonica. Si osservano lievi incrementi prima delle 05:00, i quali sono attribuibili alle vocalizzazioni di uccelli notturni e alla presenza di un traffico particolarmente intenso che determina un significativo aumento del rumore alle basse frequenze. Nell'intorno temporale dell'alba, si osserva un picco nell'andamento, caratterizzato dai valori più elevati, i quali sono attribuibili alla predominanza della componente biofonica. Tale fenomeno si verifica poiché il periodo temporale considerato rappresenta il momento della giornata in cui l'avifauna risulta più attiva. Durante le ore diurne, si registra un calo dell'indice dei siti 7, 8 e 9 (rispettivamente in verde, grigio e rosso in Fig. 4a) rispetto agli altri punti di misura, poiché più vicini all'autostrada e risultano pertanto influenzati da una maggiore componente antropofonica. Nel grafico si nota un incremento dell'indice durante le ore pomeridiane, il quale è attribuibile a una diminuzione del traffico nelle ore centrali della giornata.

Al contrario, ottimizzando i parametri di calcolo e correggendo il problema inerente alla corrente continua, l'andamento dell'NDSI (Fig. 4b) evidenzia una predominanza antropica nel paesaggio sonoro, in quanto il suddetto presenta, nella sua quasi totalità, valori negativi. L'andamento generale presenta valori più bassi nella fase notturna ed un aumento nella fase diurna, attribuibile alla presenza prevalente della componente biofonica, la quale emerge nei siti 1, 4 e 6 (rispettivamente in viola, blu e azzurro in Fig. 4b). Nei punti di misura più prossimi all'autostrada, in particolare il sito 7 e 8 (in verde, grigio in Fig. 4b), si osserva un andamento dell'indice particolarmente basso, tendente a valori vicini a -1, indicando un paesaggio sonoro dominato completamente dall'antropofonia.



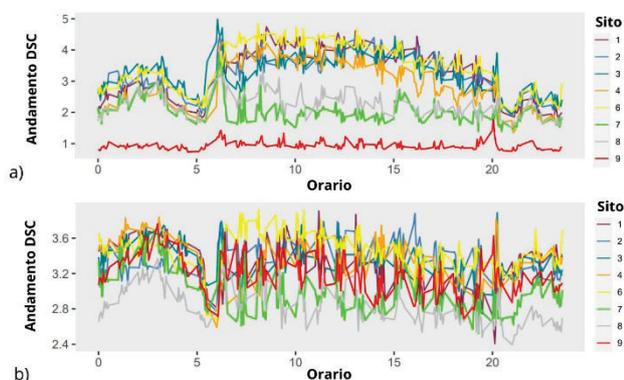
**Fig. 4 – Andamento temporale dell'NDSI mediato sulle ore di ogni giorno per ciascun sito con la metodologia tradizionale (a) e innovativa (b) Temporal trend of NDSI averaged over the hours of each day for each site using traditional (a) and innovative (b) methodologies**

Al contrario, sebbene il sito 9 rientri nella fascia spaziale più vicina alla sorgente di traffico (in rosso in Fig. 4b), esso risulta caratterizzato da un andamento più elevato.

Attraverso l'analisi delle due metodologie, si è osservato un aumento dell'indice durante le ore di maggiore attività canora. Tuttavia, è emerso che i valori dell'NDSI calcolati ottimizzando i parametri di input risultino essere significativamente inferiori rispetto all'utilizzo dei parametri di default. Questo suggerisce che tale ottimizzazione possa influenzare in maniera sostanziale i risultati delle analisi, portando ad una differente interpretazione della realtà.

Per quanto concerne il Dynamic Spectral Centroid, tale indice è stato inizialmente calcolato utilizzando i parametri di input predefiniti, con una frequenza minima pari a 100 Hz e una frequenza massima di 12 kHz (Fig. 5a). L'andamento del DSC durante le ore notturne mostra valori inferiori, poiché il centroide è influenzato principalmente dal rumore del traffico veicolare, che domina in questa fascia oraria. Eventuali aumenti sono attribuibili alle vocalizzazioni di uccelli notturni. Durante le ore diurne, il DSC presenta valori più elevati dovuti alle vocalizzazioni dell'avifauna, che raggiungono il loro picco durante l'alba e successivamente diminuiscono a causa della riduzione delle vocalizzazioni. Il grafico evidenzia come i siti 7, 8 e 9 (rispettivamente in verde, grigio e rosso, Fig. 5a) mostrino andamenti del DSC inferiori rispetto agli altri punti di misura, poiché sono maggiormente influenzati dalle frequenze del traffico stradale. Inoltre, un andamento particolarmente basso e diversificato è quello del punto 9 che, essendo il SET l'unico strumento di misura diverso dagli altri (SMM) non possiede l'errore strumentale dei Song Meter Micro che possiedono un picco a 6 kHz nella sensibilità, il quale provoca un aumento degli andamenti temporali.

Ottimizzando i parametri di input, il DSC è stato ricalcolato con una frequenza minima di 1750 Hz e una frequenza massima di 9 kHz. Il suddetto processo ha portato a una diversa distribuzione dei valori dell'indice (Fig. 5b). Durante le ore notturne, il DSC continua a mostrare valori inferiori, legati prevalentemente al rumore del traffico. Tuttavia, durante le

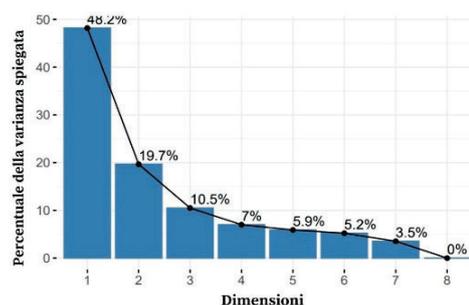


**Fig. 5 – Andamento temporale del DSC mediato sulle ore di ogni giorno per ciascun sito con la metodologia tradizionale (a) e innovativa (b)**

**Temporal trend of DSC averaged over the hours of each day for each site using traditional (a) and innovative (b) methodologies**

ore diurne, i valori del DSC ottimizzato risultano più uniformi e leggermente più bassi rispetto a quelli calcolati con il metodo tradizionale, a causa della miglior risoluzione delle componenti biofoniche. In particolare, durante l'alba l'andamento risulta più marcato e preciso, evidenziando le variazioni nelle vocalizzazioni dell'avifauna. I siti 7, 8 e 9 mostrano valori inferiori, ma l'ottimizzazione dei parametri consente una migliore distinzione tra le componenti biofoniche e antropiche, permettendo di ottenere una rappresentazione più accurata del paesaggio sonoro, facilitando l'interpretazione dei dati e la distinzione tra le diverse sorgenti sonore.

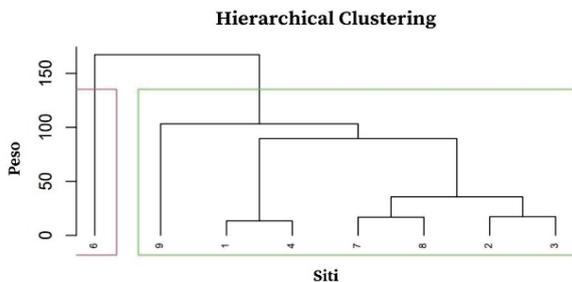
A seguire, gli indici sono stati sottoposti ad analisi maggiormente approfondita mediante la PCA. Utilizzando il primo metodo, i risultati (Fig. 6) hanno permesso di selezionare tre dimensioni che spiegano il 78,4% della varianza.



**Fig. 6 – Percentuale della varianza spiegata in funzione delle nuove componenti: risultati della PCA utilizzando i parametri di default per il calcolo degli indici eco-acustici**  
**Percentage of variance explained as a function of the new components: PCA results using the default parameters for calculating the eco-acoustic indices**

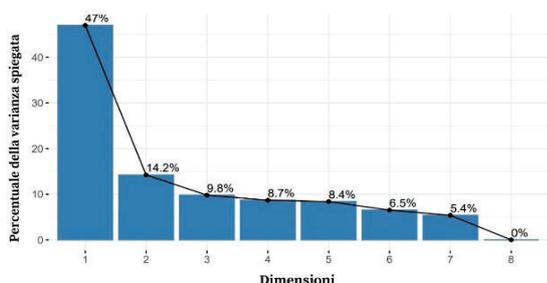
Successivamente, è stata indagata la dissimilarità del soundscape nei siti di misura applicando la Cluster Analysis sulla matrice ottenuta tramite l'implementazione della PCA. Si è proceduto a esplorare diverse tipologie di clustering attraverso il pacchetto R "Clvalid" [27], il quale fornisce suggerimenti sui metodi di clustering e sul numero di raggruppamenti più appropriati per il dataset considerato. Tale strumento ha selezionato per un'analisi ottimale due cluster e il metodo gerarchico agglomerativo noto come Hierarchical Clustering. La validazione delle differenti soluzioni di clustering è stata condotta sulla base di parametri che misurano la compattezza, la connessione e la separazione dei cluster ottenuti. I metodi considerati per determinare la soluzione ottimale forniti in input alla funzione clValid sono i seguenti: Divisive ANalysis clustering (DIANA) [28], K-means [gan], Partitioning Around Medoids (PAM), Clustering LARge Applications (CLARA) e Hierarchical Clustering. La distanza tra le osservazioni è stata calcolata utilizzando la metrica euclidea, impiegata per valutare a livello statistico la dissimilarità tra punti nello spazio euclideo. Per quanto concerne il clustering gerarchico, è stato adottato il metodo di Ward per l'elaborazione del dendrogramma, in particolare è stata utilizzata la funzione "hclust" con il parametro "ward.D" per implementare il metodo di Ward.

Tale approccio ha rivelato una distinzione significativa del sito 6 (Fig. 7) rispetto agli altri siti di misurazione.



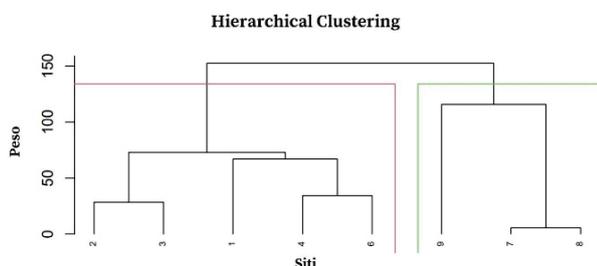
**Fig. 7 – Suddivisione del dataset ottenuto col metodo tradizionale in due cluster secondo il metodo Hierarchical: cluster 1 composto dal sito 6, cluster 2 composto da tutti gli altri punti di misura**  
**Subdivision of the dataset obtained with the traditional method into two clusters according to the Hierarchical method: cluster 1 composed of site 6, cluster 2 composed of all the other measurement points**

Al contrario, ottimizzando i parametri di calcolo, i risultati della PCA (Fig. 8) hanno permesso di selezionare quattro componenti principali che spiegano il 79,7% della varianza.



**Fig. 8 – Percentuale della varianza spiegata in funzione delle nuove componenti: risultati della PCA utilizzando i parametri ottimizzati per il calcolo degli indici eco-acustici**  
**Percentage of variance explained as a function of the new components: PCA results using the optimized parameters for the calculation of the eco-acoustic indices**

A seguire, è stata applicata la Cluster Analysis sulla matrice ottenuta tramite l'implementazione della PCA e, utilizzando il pacchetto "Clvalid", è stato selezionato il metodo gerarchico agglomerativo per la suddivisione dei siti in due cluster. I risultati (Fig. 9) mostrano come i siti 7-8-9 risultino isolati rispetto agli altri punti di misurazione.



**Fig. 9 – Suddivisione del dataset ottenuto col metodo ottimizzato in due cluster secondo il metodo Hierarchical: cluster 1 composto dai siti 1-2-3-4-6, cluster 2 composto dai siti 7-8-9.**  
**Subdivision of the dataset obtained with the optimized method into two clusters according to the Hierarchical method: cluster 1 composed of sites 1-2-3-4-6, cluster 2 composed of sites 7-8-9**

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli derivanti dall'analisi delle registrazioni effettuate tramite ascolto diretto. Per ciascuna delle fasce spaziali A, B e C, distinte in base alla distanza dall'autostrada, sono stati selezionati i punti di misura 3, 4 e 7. Inoltre, è stato condotto uno studio aggiuntivo sul sito P1, poiché le registrazioni hanno mostrato un paesaggio sonoro differente rispetto agli altri punti della fascia A, la più distante dalla principale fonte di rumore antropico.

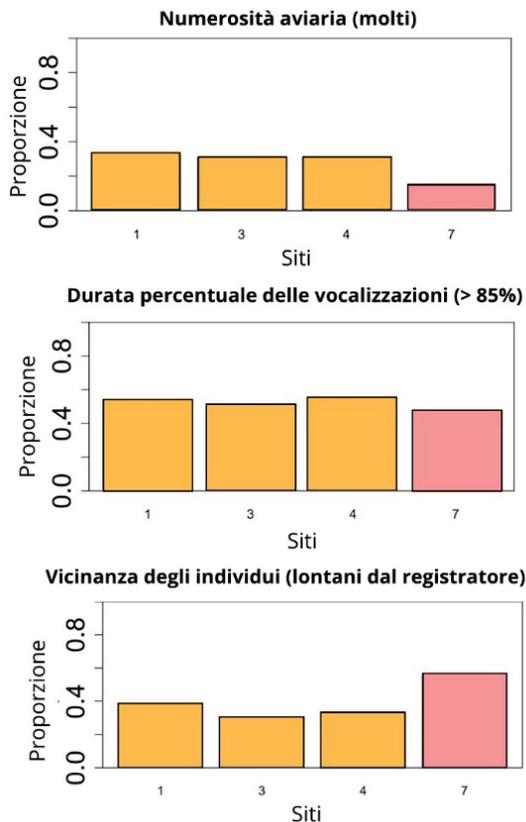
Successivamente, è stata calcolata la frequenza di occorrenza delle diverse sorgenti sonore per i punti analizzati. I risultati, riportati nella Tab. 4, sono stati elaborati in istogrammi relativi ai parametri dell'ascolto e riferiti ai singoli siti (Fig. 10), come realizzato in studi precedenti [29], mettendo in evidenza:

- Una minore presenza di individui nel sito vicino alle sorgenti di traffico veicolare (P7, fascia C) e, al contrario, una maggiore presenza nelle fasce spaziali B e C (ovvero i siti P1, P3 in fascia A e P4 in fascia B).
- In prossimità di sorgenti antropofoniche si osserva una maggiore distanza degli individui dai registratori (P7), a differenza degli altri tre siti in cui l'attività canora risulta più vicina agli strumenti di misura (P1, P3 e P4).
- La durata delle vocalizzazioni sembra non essere influenzata particolarmente dalla distanza dalle sorgenti di traffico, sebbene il sito 7 risulti lievemente inferiore rispetto agli altri punti.
- La diversità delle specie non provoca variazioni tra i diversi siti: questo potrebbe essere attribuibile al fatto che, durante l'attività di ascolto, si considerano solo tre parametri: l'assenza di specie, la presenza di una singola specie

**Tab. 4 – Frequenza relativa alle diverse sorgenti sonore per i punti in esame: sito 1 (fascia A), sito 4 (fascia B) e sito 7 (fascia C)**  
**Frequency relating to the different sound sources for the points in question: site 1 (band A), site 4 (band B) and site 7 (band C)**

Sorgente Sonora	Parametri	Freq sito 1	Freq sito 4	Freq sito 7
Numerosità aviaria	0	61	65	66
	1	100	101	137
	2	79	74	37
Diversità di specie	0	61	65	66
	1	21	20	23
	2	158	155	151
Vicinanza degli individui	0	61	65	66
	1	2	96	1
	2	93	79	136
	3	84	0	37
Durata percentuale delle vocalizzazioni	0%	61	65	66
	25%	24	18	21
	50%	8	10	8
	75%	17	14	30
	100%	130	133	115
Livello di traffico	0	2	0	0
	1	8	0	240
	2	230	240	0
Tipologia di traffico	0	2	0	0
	1	8	240	240
	2	230	0	0

e la presenza di più di una sola specie. Poiché tale valutazione non risulta particolarmente accurata in termini di ricchezza di specie, il parametro indagato può non produrre risultati significativi.

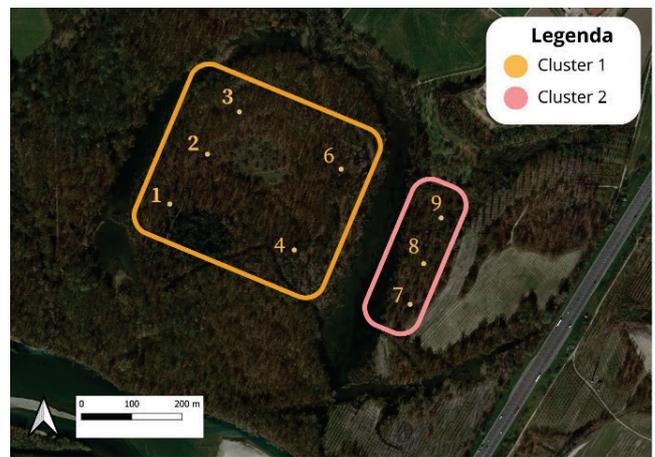


**Fig. 10 – Proporzioni dei parametri dell'ascolto riferiti ai singoli siti rientranti in ciascun cluster e in ciascun intervallo di: numerosità di specie aviarie, durata percentuale delle vocalizzazioni e vicinanza degli individui. (In arancione il cluster 1, in rosa il cluster 2)**

**Proportion of listening parameters and referring to the individual sites falling within each cluster and in each interval of: number of avian species, percentage duration of vocalizations and proximity of individuals. (Cluster 1 in orange, cluster 2 in pink)**

I risultati presenti nella Tab. 4 e negli istogrammi in Fig. 10 confermano la suddivisione in cluster ottenuta tramite l'approccio ottimizzato (Fig. 11) e dimostrano coerenza con le osservazioni qualitative effettuate durante l'ascolto diretto delle registrazioni. In dettaglio:

- I siti P1, P3 e P4 presentano caratteristiche simili (Fig. 10), corrispondendo al cluster 1 ottenuto dalle analisi statistiche (Fig. 11, in arancione).
- Il sito P7 mostra andamenti differenti rispetto ai punti precedenti, evidenziando una netta distinzione dovuta principalmente al rumore antropico generato dal traffico veicolare, come confermato dalla Cluster Analysis del paesaggio sonoro (cluster 2 in Fig. 11, in rosa).
- Il traffico veicolare emerge come una problematica predominante in tutti i siti di misurazione, in linea con le osservazioni fatte durante l'ascolto delle registrazioni.



**Fig. 11 – Rappresentazione della suddivisione in cluster dell'area di studio mappata con il software QGIS**

**Representation of the clustering of the study area mapped with the QGIS software**

## 4 | Discussione

Il metodo proposto permette di ottimizzare l'analisi delle registrazioni audio al fine di migliorare l'interpretazione delle sorgenti sonore presenti e quindi caratterizzare il soundscape in maniera statistica. La metodologia proposta non può essere applicata mediante l'utilizzo di un unico indice [10] in quanto non rappresenterebbe la completezza e la totalità delle caratteristiche del suono, come la frequenza, la durata, la direzione e l'intensità, e non descriverebbe la complessità e diversità degli ambienti acustici. Inoltre, le considerazioni effettuate non valutano l'impiego di tutti gli indici al contempo [30] poiché potrebbe causare ridondanza o alterare l'interpretazione dei risultati in quanto tali indici potrebbero risultare correlati.

L'inclusione di una pluralità di indici [31] e l'adozione di due diverse metodologie di analisi hanno consentito una discriminazione più accurata tra i vari scenari del paesaggio sonoro. La necessità di utilizzare parametri ottimizzati per ciascun indice eco-acustico non è ampiamente documentata nella letteratura scientifica. Nelle loro recenti pubblicazioni Metcalf et al. [32] hanno sottolineato l'importanza di applicare bande di frequenza specifiche in relazione ai gruppi tassonomici monitorati, limitandosi però ad un gruppo ristretto di indici, quali ACI e BI. Anche altri lavori, come quello pubblicato da Bradfer-Lawrence et al. [33], ribadiscono la suddetta necessità seppure in misura minore rispetto alle altre raccomandazioni esplicitate nello studio.

Nonostante tali raccomandazioni, una parte significativa della comunità scientifica prosegue ad utilizzare parametri di default per il calcolo degli indici acustici. Tale riscontro è evidente in numerosi articoli, come ad esempio quello presentato da Chen et al. [34] in cui non vengono specificati i criteri per la scelta dei valori di calcolo. In altri studi, i valori non vengono riportati affatto, come [35] e [36], nei quali si omette la descrizione dei parametri e valori utilizzati per i calcoli, sia nel corpus dell'articolo sia nei materiali supplementari.

La mancanza di trasparenza e standardizzazione nella selezione dei parametri rappresenta un ostacolo significativo per il progresso della ricerca eco-acustica. L'utilizzo indiscriminato di parametri di default o la mancata documentazione dei criteri adottati rende difficoltosa la comparabilità dei risultati tra studi diversi e può portare a interpretazioni errate. Esempi emblematici sono rappresentati dalla problematica della dB\_threshold per gli indici ADI e AEI, spesso trascurata o non specificata. Anche l'indice più impiegato, l'ACI, quando applicato a 12kHz senza considerare il contesto ecologico, può fornire risultati poco rappresentativi, come visibile nei recenti studi di Droge et al. [37].

È dunque evidente la necessità di criteri chiari e condivisi per la selezione dei parametri eco-acustici, come suggerito dagli studi citati, che permettano di garantire la riproducibilità e la comparabilità dei risultati, contribuendo a una migliore comprensione e protezione della biodiversità acustica a livello globale.

L'analisi spettrale preliminare, accompagnata da corrispondenti analisi statistiche, ha rivelato come la rimozione del DC offset non incida significativamente sui trend osservati (Fig. 2 e Fig. 3). I risultati indicano infatti che i suddetti trend non differiscono in modo sostanziale rispetto ai dati originali (OR- DC in Fig. 2, OR\_m-DC\_m2 in Fig. 3), portando a escludere tale casistica dalle analisi successive. Al contrario, la differenza sostanziale è determinata dall'equalizzazione e dall'ottimizzazione dei parametri.

Questo ha consentito di individuare quale fosse la metodologia ottimale, evidenziata dagli andamenti degli indici, in particolare NDSI e DSC, ottenuti mediante l'ottimizzazione dei parametri in input (Fig. 4b, 5b) in accordo con i risultati degli ascolti (Tab. 4 e Fig. 10). Tali risultati, rappresentati dagli istogrammi in Fig. 10, hanno validato la cluster analysis, dimostrando la coerenza presente tra i risultati numerici e le percezioni qualitative. Quest'ultima analisi ha permesso di determinare la reale suddivisione del paesaggio in termini di similitudini acustiche (Fig. 9, 11), portando a una distinzione chiara tra due estremi del paesaggio sonoro oggetto di studio: gli habitat interni alla Lanca e la macchia marginale influenzata dall'autostrada. Tali risultati sono stati corroborati dall'analisi diretta delle registrazioni audio, evidenziando ulteriormente come il paesaggio sonoro sia negativamente influenzato dal traffico veicolare e da altre fonti di disturbo antropico. Conseguentemente risulta auspicabile implementare misure di mitigazione del rumore in tale area, valutando attentamente il rapporto costi-benefici per determinare l'efficacia delle soluzioni proposte. La silvicoltura attuale, infatti, potrebbe non fornire un'ottimale schermatura e assorbimento del rumore, a causa dei tagli e della ridotta vegetazione. In aggiunta, un miglioramento del monitoraggio del Parco dovrebbe riguardare il controllo dell'attività venatoria che, sebbene risulti illegale secondo la legge, è stata dimostrata essere presente tramite l'ascolto delle registrazioni e il ritrovamento di bossoli durante le campagne di monitoraggio.

## 5 | Conclusioni

Nel corso dell'ultimo secolo, l'espansione demografica ha avuto un impatto significativo sull'equilibrio ecologico, portando ad un aumento accelerato delle pressioni sulla biodiversità, alterando fortemente gli ecosistemi della Terra e portando a impatti drammatici sulle comunità ecologiche [38]. Comprendere i cambiamenti della biodiversità e prevedere gli scenari futuri è quindi urgente per sviluppare programmi di conservazione adeguati [39].

I recenti progressi tecnologici hanno spinto il monitoraggio della biodiversità ad un livello superiore, con nuovi strumenti per la valutazione spaziale e temporale degli ecosistemi su scala globale [40]. In tale ottica, il lavoro svolto in questa attività ha sviluppato una metodologia di analisi del soundscape direzionata al raffinamento delle analisi e a consentire una più efficace comparabilità delle ricerche in tale ambito, partendo da indagini condotte presso l'area umida di un Parco regionale contiguo a sorgenti di rumore antropico.

La metodologia di analisi è stata implementata calcolando gli otto indici eco-acustici sulle registrazioni relative alle albe (in cui è presente maggiore attività biofonica aviaria). Tali indici sono stati inizialmente calcolati utilizzando impostazioni standard e successivamente ottimizzando le impostazioni attraverso l'analisi degli spettrrogrammi. Questo ha permesso un'interpretazione più realistica degli indici eco-acustici (Fig. 4b, 5b) e ha evidenziato una suddivisione tra i siti nell'area di studio in funzione della distanza dall'infrastruttura stradale, generando una divisione coerente con l'ascolto delle registrazioni (Tab. 4 e Fig. 10). Nelle suddette suddivisioni emergono, infatti, diverse caratteristiche sonore: I. nelle aree interne alla lanca, ossia i punti 1-2-3-4-6, si osserva una maggiore attività biofonica, sia in termini di numerosità degli individui sia per quanto concerne la durata percentuale delle vocalizzazioni, mentre l'intensità del traffico veicolare risulta minore; II. al di fuori del solco fluviale, ossia in concomitanza dei siti 7-8-9 vicini all'autostrada, le vocalizzazioni risultano meno frequenti e più distanti dai registratori, e si registra un traffico veicolare intermittente e più intenso.

In conclusione, l'indagine del soundscape si dimostra essere uno strumento utile per lo studio della biodiversità e dell'impatto dell'uomo su di essa attraverso l'acquisizione dei dati tramite sistemi di monitoraggio passivo, capaci di minimizzare l'impatto sulla fauna e sugli ecosistemi. Gli studi condotti hanno contribuito a determinare un metodo innovativo per l'indagine del paesaggio sonoro, permettendo di elaborare future mappature degli indici eco-acustici e migliorare la comprensione della struttura del paesaggio sonoro. Tale approccio potrebbe costituire un solido fondamento per future indagini e ricerche nel campo della conservazione della biodiversità e dello studio dell'ecologia acustica, nonché a fornire una base scientifica per pianificare le strategie di conservazione ed identificare le azioni necessarie per proteggere e gestire in modo sostenibile l'ambiente e la sua biodiversità.

## Conclusions

Over the last century, population expansion caused a significant impact on ecological balance, leading to an accelerated increase in pressures on biodiversity, strongly altering the Earth's ecosystems and leading to dramatic impacts on ecological communities [38]. Understanding changes in biodiversity and predicting future scenarios is therefore urgent to develop adequate conservation programs [39].

Recent technological advances have pushed biodiversity monitoring to the next level, with new tools for spatial and temporal assessment of ecosystems on a global scale [40]. From this perspective, the work carried out in this activity has developed a soundscape analysis methodology aimed at refining the analyzes and allowing for more effective comparability of research in this area, starting from investigations conducted in the wetland area of a regional park adjacent to sources of anthropogenic noise.

The analysis methodology was implemented by calculating the eight eco-acoustic indices through the recordings obtained during the entire measurement campaign, in the time period relating to dawns (in which there is greater avian biophonic activity). These indices were initially calculated using standard settings and subsequently calculated by optimizing the settings through an analysis of the spectrograms. This allowed a more realistic interpretation of the eco-acoustic indices (Fig. 4b, 5b) and highlighted a subdivision between the sites in the study area according to the distance from the road infrastructure, generating a division consistent with listening to the recordings (Tab.4 e Fig.10). In fact, in the aforementioned subdivisions, various sound characteristics emerge: I. in the areas inside the oxbow, i.e. points 1-2-3-4-6, a greater biophonic activity is observed, both in terms of the number of individuals and in terms of the percentage duration of vocalizations, while the intensity of vehicular traffic is lower; II. outside the river channel, i.e. in conjunction with sites 7-8-9 close to the motorway, the vocalizations are less frequent and further away from the recorders, and there is intermittent and more intense vehicular traffic.

In conclusion, the investigation of soundscape proves to be a useful tool for the study of biodiversity and the impact of man on it through the acquisition of data through passive monitoring systems, capable of minimizing the impact on fauna and ecosystems. The studies conducted have contributed to determining an innovative method for investigating the soundscape, which will allow us to produce appropriate mappings of eco-acoustic indices and improve understanding of the structure of the soundscape. Such an approach could provide a solid foundation for future investigations and research in the field of biodiversity conservation and the study of acoustic ecology, as well as providing a scientific basis for planning conservation strategies and identifying the actions necessary to protect and sustainably manage the environment and its biodiversity.

## Bibliografia

- [1] R. Benocci, G. Brambilla, A. Bisceglie, G. Zambon, Eco-acoustic indices to evaluate soundscape degradation due to human intrusion, *Sustainability*. 12(2020) 10455. <https://doi.org/10.3390/su122410455>.
- [2] D.T. Blumstein, D.J. Mennill, P. Clemins, L. Girod, K. Yao, G. Patricelli, J.L. Deppe, A.H. Krakauer, C. Clark, K.A. Cortopassi, S.F. Hanser, B. McCowan, A.M. Ali, A.N.G. Kirschel, Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus, *Journal of Applied Ecology*. 48 (2011) 758-767. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01993.x>.
- [3] P.M. Vitousek, H.A. Mooney, J. Lubchenco, J.M. Melillo, Human domination of Earth's ecosystems, *Science*. 277 (1997) 494-499. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494>.
- [4] M. Depraetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J.Sueur, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, *Ecological Indicators*. 13 (2012) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>.
- [5] A. Farina, *Soundscape ecology: principles, patterns, methods and applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [6] B.C. Pijanowski, L.J. Villanueva-Rivera, S.L. Dumyahn, A. Farina, B.L. Krause, B.M. Napoletano, S.H. Gage, N. Pieretti, *Soundscape ecology: the science of sound in the landscape*, *BioScience*. 61(2011) 203-216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
- [7] L.J. Villanueva-Rivera, B. C. Pijanowski, J. Doucette, B. Pekin, A primer of acoustic analysis for landscape ecologists, *Landscape ecology*. 26 (2011) 1233-1246. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>.
- [8] M. Campos-Cerqueira, J.L. Mena, V. Tejada-Gómez, N. Aguilar-Amuchastegui, N. Gutierrez, T.M. Aide, How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru?, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 6 (2020) 274-285. <https://doi.org/10.1002/rse2.120>.
- [9] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, (2018). [www.r-project.org/](http://www.r-project.org/) (accessed April 15, 2024).
- [10] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, S. Pavoine, Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation, *Acta Acustica united with Acustica*. 100 (2014) 772-781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.
- [11] N. Pieretti, A. Farina, D. Morri, A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI), *Ecological indicators*. 11 (2011) 868-873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- [12] W. Yang, J. Kang, Soundscape and sound preferences in urban squares: A case study in Sheffield, *Journal of urban design*. 10 (2005) 61-80. <https://doi.org/10.1080/13574800500062395>.
- [13] N.T. Boelman, G.P. Asner, P.J. Hart, R.E. Martin, Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing, *Ecological Applications*. 17 (2007) 2137-2144. <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>.
- [14] J.M. Grey, J.W. Gordon, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 63(1978) 1493-1500. <https://doi.org/10.1121/1.381843>.
- [15] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal, *PloS one*. 3 (2008) e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.
- [16] V.S. Ramaiah, R.R. Rao, Multi-speaker activity detection using zero crossing rate. In 2016 International Conference on Communication and Signal Processing. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCSP.2016.7754232>.
- [17] R.D. Beason, R. Riesch, J. Koricheva, Investigating the effects of tree species diversity and relative density on bird species richness with acoustic indices, *Ecological Indicators*. 154 (2023) 110652. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110652>.
- [18] L. Fornasari, L. Bani, E. de Carli, R.I. Massa, Optimum design in monitoring common birds and their habitat, *GIBIER FANE SAUVAGE-GAME AND WILDLIFE*. 15 (1998) 309-322.

- [19] xeno-canto: Sharing wildlife sounds from around the world, (2005). <https://xeno-canto.org/collection/area/europe> (accessed April 25, 2024).
- [20] Audacity: free software for recording and editing audio. [www.audacityteam.org/](http://www.audacityteam.org/) (accessed April 25, 2024).
- [21] Wildlife acoustic, Kaleidoscope Lite: View your wildlife recordings to identify species and more. [www.wildlifeacoustics.com/products/kaleidoscope/kaleidoscope-lite](http://www.wildlifeacoustics.com/products/kaleidoscope/kaleidoscope-lite) (accessed April 25, 2024).
- [22] A. Potenza, V. Zaffaroni-Caorsi, R. Benocci, G. Guagliumi, J.M. Fouani, A. Bisceglie, G. Zambon, Biases in Ecoacoustics Analysis: A Protocol to Equalize Audio Recorders. *Sensors*, 24 (2024) 4642. <https://doi.org/10.3390/s24144642>.
- [23] R. Benocci, H.E. Roman, A. Bisceglie, F. Angelini, G. Brambilla, G. Zambon, Auto-correlations and long time memory of environment sound: The case of an Urban Park in the city of Milan (Italy), *Ecological Indicators*. 134 (2022) 108492. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108492>.
- [24] R. Benocci, A. Afify, A. Potenza, H. E. Roman, G. Zambon, Self-consistent soundscape ranking index: the case of an urban park, *Sensors*. 23 (2023) 3401. <https://doi.org/10.3390/s23073401>.
- [25] E. Margaritis, J. Kang, K. Filipan, D. Botteldooren, The influence of vegetation and surrounding traffic noise parameters on the sound environment of urban parks. *Applied geography*, 94 (2018) 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.02.017>.
- [26] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K. Verheyen, Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. *Journal of Sound and Vibration*, 331 (2012) 2404–2425. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.01.006>.
- [27] G. Brock, V. Pihur, S. Datta: clValid: An R Package for Cluster Validation. *Journal of Statistical Software*, 25 (2008) 1–22. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i04>.
- [28] G. Goujun, M. Chaoqun, J. Wu, Data clustering: theory, algorithms and applications, American Statistical Association and Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [29] R. Benocci, A. Potenza, A. Bisceglie, H.E. Roman, G. Zambon: Mapping of the acoustic environment at an Urban Park in the City Area of Milan, Italy, using very low-cost sensors. *Sensors*, 22 (2022) 3528. <https://doi.org/10.3390/s22093528>.
- [30] T. Bradfer-Lawrence, N. Gardner, L. Bunnefeld, N. Bunnefeld, S.G. Willis, D.H. Dent, Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research, *Methods Ecol. Evol.* 10 (2019) 1796–1807. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254>.
- [31] R. Benocci, G. Brambilla, A. Bisceglie, G. Zambon, Sound ecology indicators applied to urban parks: A preliminary study. *Asia-Pac. J. Sci. Technol.* 25 (2020) 1–10.
- [32] O.C. Metcalf, J. Barlow, C. Devenish, S. Marsden, E. Berenguer, A.C. Lees: Acoustic indices perform better when applied at ecologically meaningful time and frequency scales. *Methods in Ecology and Evolution*, 12 (2021) 421–431. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13521>.
- [33] T. Bradfer-Lawrence, C. Desjonqueres, A. Eldridge, A. Johnston, O. Metcalf: Using acoustic indices in ecology: Guidance on study design, analyses and interpretation. *Methods in Ecology and Evolution*, 14 (2023) 2192–2204. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14194>.
- [34] Y. F. Chen, Y. Luo, C. Mammides, K.F. Cao, S. Zhu, E. Goodale: The relationship between acoustic indices, elevation, and vegetation, in a forest plot network of southern China. *Ecological Indicators*, 129 (2021) 107942. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107942>.
- [35] S. Galappaththi, E. Goodale, J. Sun, A. Jiang, C. Mammides: The incidence of bird sounds, and other categories of non-focal sounds, confound the relationships between acoustic indices and bird species richness in southern China. *Global Ecology and Conservation*, 51 (2024) e02922. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02922>.
- [36] M. Latifi, S. Fakheran, M. Moshtaghie, M. Ranaie, P.M. Tussi: Soundscape analysis using eco-acoustic indices for the birds biodiversity assessment in urban parks (case study: Isfahan City, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195 (2023) 629. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11237-2>.
- [37] S. Dröge, D.A. Martin, R. Andriafanomezantsoa, Z. Burivalova, T.R. Fulgence, K. Osen, H. Kreft: Listening to a changing landscape: Acoustic indices reflect bird species richness and plot-scale vegetation structure across different land-use types in north-eastern Madagascar. *Ecological Indicators*, 120 (2021) 106929. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106929>.
- [38] T. Newbold, L.N. Hudson, A.P. Arnell, S. Contu, A. De Palma, S. Ferrier, S.L.L. Hill, A.J. Hoskins, I. Lysenko, H.R.P. Phillips, V.J. Burton, C.W.T. Chng, S. Emerson, D. Gao, G. Pask-Hale, J. Hutton, M. Jung, K. Sanchez-Ortiz, B.I. Simmons, S. Whitmee, H. Zhang, J.P.W. Scharlemann, A. Purvis, Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment, *Science*. 353 (2016) 288–291. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2201>.
- [39] H.M. Pereira, S. Ferrier, M. Walters, G.N. Geller, R.H.G. Jongman, R.J. Scholes, M.W. Bruford, N. Brummitt, S.H.M. Butchart, A.C. Cardoso, N.C. Coops, E. Dulloo, D.P. Faith, J. Freyhof, R.D. Gregory, C. Heip, R. Höft, G. Hurtt, W. Jetz, D.S. Karp, M.A. McGeoch, D. Obura, Y. Onoda, N. Pettorelli, B. Reyers, R. Sayre, J.P.W. Scharlemann, S.N. Stuart, E. Turak, M. Walpole e M. Wegmann, Essential Biodiversity Variables, *Science* 339 (2013) 277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>.
- [40] I. Alcocer, H. Lima, L.S.M. Sugai, D. Llusia, Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis, *Biological Reviews*. 97 (2022) 2209–2236. <https://doi.org/10.1111/brv.12890>.

