

Impatto degli stressori ambientali su cognizione e percezione del paesaggio sonoro: un'analisi preliminare delle differenze legate all'età

Matteo Pellegatti^{a*} | Chiara Visentin^a | Simone Torresin^b | Francesco Babich^c | Nicola Prodi^a

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli Studi di Ferrara,
Via G. Saragat, 1, 44122 Ferrara

^b Dipartimento di Ingegneria Civile
Ambientale e Meccanica,
Università di Trento,
Via Mesiano, 77, 38123 Trento

^c Istituto per le energie rinnovabili,
Eurac Research,
Via A. Volta, 13/A, 39100 Bolzano

* Autore di riferimento:
matteo.pellegatti@unife.it

Ricevuto: 16/2/2026

Accettato: 5/5/2026

DOI: 10.3280/ria2026oa22073

ISSN: 2385-2615

Gli studenti trascorrono in aula tra il 27 e il 41% della loro giornata. Diventa quindi necessario che l'ambiente sia confortevole e di supporto per l'apprendimento, tramite il controllo dei quattro domini ambientali: termico, qualità dell'aria, acustico e visivo. Sebbene la letteratura di recente abbia iniziato a studiare questi domini congiuntamente, l'interazione tra qualità dell'aria e acustica rimane poco esplorata, con una significativa carenza di studi sugli studenti in età scolare. In questo studio sono stati comparati i risultati di due gruppi di studenti di età diversa: universitari e alunni della Scuola Secondaria di I Grado. L'obiettivo è indagare se e come l'età degli studenti medi gli effetti degli stimoli sonori e della qualità dell'aria sulle prestazioni e sulla percezione sonora degli stessi. I risultati hanno evidenziato come l'età influisca solamente su come le condizioni acustiche impattino sulle prestazioni di calcolo e sulle valutazioni di paesaggio sonoro. Non sono state trovate interazioni tra età e qualità dell'aria interna.

Parole chiave: paesaggio sonoro, abilità cognitive, studenti, comparazione età

Impact of Environmental Stressors on Cognition and Soundscape assessments: A preliminary analysis of age-related differences

Students spend approximately between the 27 and the 41% of their day in the classroom. Consequently, it is imperative that the environment supports both learning and comfort through the control of the four key environmental domains: thermal environment, indoor air quality, acoustics, and lighting.

Although recent literature has begun to investigate these domains jointly, the interaction between indoor air quality and acoustics remains under-explored, with a significant paucity of studies focusing on school-age children. This study compares the results obtained from two distinct age groups: university students and lower secondary school pupils. The aim is to investigate whether and how student age mediates the effects of acoustic stimuli and indoor air quality on students' performance and sound perception. The results indicate that age influences the impact of acoustic conditions on calculation performance and on soundscape assessments. No interaction between age and indoor air quality had been identified.

Keywords: soundscape, cognitive abilities, students, age comparison

1 | Introduzione

Secondo quanto espresso in letteratura, emerge che gli individui trascorrono circa il 90% della propria giornata in ambienti interni [1,2]. In particolare, gli studenti trascorrono in media tra il 27 e il 41% della giornata nelle aule di scuole o università [3]. Di conseguenza, garantire un'elevata qualità ambientale interna (IEQ) diviene fondamentale per assicurare ambienti che siano confortevoli e di supporto all'apprendimento. La letteratura scientifica ha ampiamente dimostrato come i quattro domini costitutivi della IEQ (termico, acustico, qualità dell'aria (IAQ) e visivo) influenzino significativamente sia le prestazioni scolastiche che il comfort degli studenti [4]. Recentemente, la ricerca ha esteso l'indagine alle interazioni tra tali fattori, evidenziando come queste possano alterare gli effetti dei singoli domini [1]. In tale contesto, si distinguono due principali ca-

tegorie: gli effetti combinati e gli effetti cross-modal. I primi descrivono come due o più domini influenzino congiuntamente un parametro terzo, quali ad esempio, le abilità cognitive. I secondi, invece, analizzano l'influenza di un dominio sulla valutazione percettiva di un altro, come, ad esempio, l'effetto della qualità dell'aria sulla percezione del comfort acustico. Si parla invece di effetti cross-modal di interazione quando si studia il modo in cui due o più domini influenzano congiuntamente la percezione. Per una definizione rigorosa si rimanda al lavoro di Chinazzo et al. [5]. Tra i vari domini gli effetti combinati e cross-modal di qualità dell'aria ed acustica sono quelli meno investigati [6], con solamente tre studi di letteratura sugli effetti combinati [7–9] e quattro sugli effetti cross-modal [7–10]. Inoltre, per entrambi gli effetti, le evidenze disponibili in letteratura non sono univoche, riportando sia la presenza che l'assenza di tali effetti. In dettaglio i) assenza di effet-

ti combinati sulle prestazioni cognitive [7,8], ii) assenza di effetti cross-modal sulla percezione della qualità dell'aria e dell'ambiente sonoro [7-9], iii) mediazione della qualità dell'aria sull'effetto degli stimoli sonori in relazione a prestazioni cognitive di calcolo [9], iv) mediazione del livello sonoro sulla percezione della qualità dell'aria [10]. Inoltre, tutti gli studi presentati sugli effetti cross-modal e combinati si sono concentrati esclusivamente su una popolazione di studenti universitari, trascurando gli studenti di età inferiore. La letteratura, tuttavia, suggerisce che l'età influenzi l'effetto del rumore sulle prestazioni cognitive. Connolly et al. [11], ad esempio, hanno studiato gli effetti del rumore su lettura e comprensione, per studenti di due fasce di età (11-13 e 14-16 anni). È stato osservato come gli studenti più grandi abbiano prestazioni migliori degli studenti più giovani, ma anche come i primi siano maggiormente influenzati dal rumore rispetto ai secondi. Nello specifico, un incremento del livello sonoro da 50 a 64 dB(A) o da 50 a 70 dB(A) corrisponde ad una diminuzione della prestazione maggiore degli studenti più grandi rispetto ai loro compagni di età inferiore. Loh et al. [12] confronta le prestazioni di bambini di 6-10 anni con quelle di studenti universitari in riferimento ad un compito di attenzione uditiva. In questo caso gli adulti risultano non solo più accurati e veloci nel risolvere il compito, ma anche meno affetti dal rumore rispetto i bambini. Agli Autori non sono noti studi che abbiano indagato come l'età possa modificare gli effetti della qualità dell'aria sulle abilità cognitive e sul comfort in ambito scolastico. Risulta quindi evidente la mancanza di un confronto che analizzi come l'età possa interagire con gli stressori ambientali, sia in termini di effetti combinati che di effetti cross-modal, relativamente alla qualità dell'aria e alle condizioni acustiche. Questo lavoro vuole essere un primo contributo volto a colmare questa lacuna, attraverso un confronto esplorativo tra due gruppi di studenti di età diversa. Nello specifico, sono stati messi a confronto studenti di Scuola Secondaria di I Grado (SSIG) e studenti universitari, con l'obiettivo di verificare se e quanto l'età possa modificare gli effetti degli stressori ambientali legati all'acustica e alla qualità dell'aria. Il lavoro risponde alle seguenti due domande di ricerca.

1. In che modo l'età dei partecipanti modifica l'impatto che le condizioni acustiche e di IAQ hanno sulle prestazioni cognitive di calcolo?
2. In che modo l'età dei partecipanti interagisce con le condizioni acustiche e di IAQ sulla valutazione del paesaggio sonoro?

Il confronto tra le due età diverse è stato fatto in maniera esplorativa utilizzando i dati provenienti da due esperimenti svolti durante un percorso di dottorato, volto a determinare gli effetti combinati e cross-modal della qualità dell'aria e dei suoni della ventilazione sugli studenti. Poiché questo studio è incentrato esclusivamente sul confronto verranno date al lettore informazioni di base su come siano stati raccolti i dati rimandando ai lavori [9,13] per una descrizione completa e dettagliata. Al fine di comprendere al meglio le domande di ricerca le ultime due sottosezioni di questa introduzione presenteranno brevemente che cosa siano le abilità cognitive e il paesaggio sonoro.

1.1 | Definizione di abilità cognitive

Le abilità cognitive vengono definite dal dizionario dell'Associazione Americana di Psicologia [14] come "le abilità coinvolte nell'esecuzione dei compiti associati a percezione, apprendimento, memoria, comprensione, consapevolezza, ragionamento, giudizio, intuizione e linguaggio". Possono essere classificate in due sottogruppi: semplici e complesse. Le prime, di cui fanno parte attenzione e memoria, rappresentano il livello più basso e riguardano lo studio di una singola funzione specifica. Nel caso della memoria, ad esempio, si distinguono la memoria a lungo termine e quella a breve termine. Le abilità cognitive semplici sono alla base di quelle complesse, che rappresentano le operazioni normalmente svolte in aula dagli studenti. Tra di esse rientrano, ad esempio, il calcolo, la lettura e la comprensione del testo.

1.2 | Definizione del paesaggio sonoro

Il Paesaggio sonoro (Soundscape) viene definito nella norma ISO 12913-1 [15] come l'ambiente sonoro come percepito da un individuo in un contesto. In quest'ottica tutti gli stimoli sonori possono essere considerati come positivi o negativi a seconda che migliorino o peggiorino la percezione dell'ambiente in uno specifico contesto. Nel caso degli edifici scolastici i contesti possono essere vari, come ad esempio, svolgere un esame, una verifica o seguire una lezione. Strumenti e metodologie per lo studio del paesaggio sonoro sono stati inizialmente formulati in riferimento all'ambiente esterno, anche se recentemente sono stati estesi all'ambiente interno. La valutazione del paesaggio sonoro avviene tramite otto attributi disposti radialmente su un diagramma definito circomplesso. Gli attributi da valutare cambiano a seconda che la valutazione sia fatta per l'ambiente esterno [16,17] o per quello interno [18]. Per l'ambiente interno, tuttavia, gli attributi sono presenti solo per gli ambienti residenziali [18] e gli uffici [19].

2 | Materiali e metodi

2.1 | Partecipanti e laboratori

Lo studio ha coinvolto due gruppi di partecipanti: 165 studenti della Scuola Secondaria di I Grado e 29 studenti universitari. Gli studenti delle scuole secondarie sono stati reclutati in istituti della Provincia di Bolzano e hanno svolto i test presso il Façade System Interaction Lab di Eurac [20,21]. Gli studenti universitari, invece, sono stati selezionati all'interno dell'Università Tecnica della Danimarca (DTU) e hanno partecipato ai test nei Field Labs della stessa università [22]. Entrambi i laboratori sono stati selezionati in quanto presentano caratteristiche tali da poter essere facilmente adattati a un contesto di aula scolastica o universitaria, ma soprattutto per la possibilità di regolare i parametri ambientali termoisolometrici e

di portata d'aria attraverso sistemi di ventilazione meccanica centralizzati. Tutti e due i laboratori erano dotati di una finestra da cui poteva entrare la luce naturale; tuttavia, per garantire una uniformità visiva è stato utilizzato anche il sistema di illuminazione artificiale. In entrambi i laboratori sono state posizionate sonde termoigrometriche e sensori di CO₂. Le prime per monitorare temperatura e umidità relativa, i secondi per il controllo della qualità dell'aria. Fig. 1 mostra i due laboratori mentre gli studenti stavano eseguendo il test.



Fig. 1 – Partecipanti mentre eseguivano il test nei rispettivi laboratori a) Façade System Interaction Lab - Eurac, b) Field Labs - DTU

Participants performing the test in their respective laboratories: a) Façade System Interaction Lab - Eurac, b) Field Labs - DTU

2.2 | Condizioni di test

I partecipanti sono stati esposti a quattro condizioni acustiche e a due condizioni di qualità dell'aria. Le condizioni acustiche simulavano possibili scenari sonori legati alla ventilazione naturale o meccanica dell'aula. Nello specifico gli studenti sono stati esposti ad una condizione di controllo, definita come quiete (rumore di fondo del laboratorio), ad un rumore antropico, al rumore della ventilazione meccanica e a dei suoni naturali (canto degli uccelli). Il rumore antropico è stato adattato in base all'età dei partecipanti al fine di garantire un rumore ecologico. Gli studenti in età scolastica sono stati esposti al suono di bambini che giocano nel cortile della scuola, mentre agli studenti universitari è stato presentato il rumore di altri studenti che chiacchierano nel giardino della facoltà. Tutti i suoni ad eccezione della quiete sono stati registrati utilizzando cuffie binaurali (Head Acoustics BHS II). Nello specifico il rumore antropico dei bambini e i suoni naturali sono stati registrati in una stanza nei pressi di una scuola primaria. L'edificio era antistante al cortile della scuola e attorniato da un giardino

alberato. Le registrazioni sono state effettuate con l'orecchio sinistro rivolto verso una finestra aperta. Per quanto riguarda il rumore antropico adulto la tecnica di registrazione è stata la medesima dei due suoni precedenti, tuttavia l'ambiente di registrazione era diverso, ovvero un'aula universitaria con una finestra aperta verso il giardino della facoltà. Il rumore della ventilazione meccanica infine è stato registrato all'interno del Façade System Interaction Lab con il sistema di ventilazione settato a 160 L/s ovvero al valore minimo richiesto dalla norma EN 16798-1 [23] per avere un'aula in categoria (I) qualora il laboratorio fosse usato come aula scolastica (10 L/s x persona). Gli audio sono stati editati per eliminare gli elementi sonori di disturbo, quali ad esempio, passaggio di automobili nella registrazione dei suoni naturali. In totale sono state ottenute registrazioni univoche della durata di 10 minuti. Tutte le registrazioni sono poi state riprodotte in cuffia a 47 dB(A). Il livello è stato calcolato effettuando il livello equivalente su una registrazione di un minuto effettuata riproducendo il segnale dalle cuffie e registrando con una testa binaurale (Head Acoustics HMS II.3 LN HEC). Ai partecipanti è stato chiesto di indossare le cuffie per tutte le condizioni acustiche anche per la condizione in quiete. Per quanto riguarda le condizioni di qualità dell'aria, invece, sono state scelte due concentrazioni di CO₂ rappresentanti una buona ed una scadente qualità dell'aria e realisticamente trovabili all'interno di aule scolastiche ed universitarie. Nella prima condizione i partecipanti sono stati esposti ad una concentrazione di 800 ppm di CO₂. La seconda condizione invece era diversa tra studenti della scuola secondaria ed universitari. I bambini sono stati esposti ad una concentrazione di 2000 ppm, mentre gli adulti a 3000 ppm. Concentrazioni inferiori ai 3000 ppm non sono infatti sufficienti ad influenzare le prestazioni cognitive degli adulti [24]. Per contestualizzare meglio i valori adottati, si precisa che la soglia per distinguere tra una buona e una scarsa IAQ in un ambiente di "Categoria (I)" (secondo la norma EN 16798-1 [23]) è fissata a 1000 ppm. Inoltre, i limiti estremi di riferimento sono rappresentati dai 400 ppm (concentrazione tipica dell'aria esterna) e dai 5000 ppm, identificato come livello limite per la salute umana. Gli esperimenti dei due gruppi presentavano inoltre design sperimentali differenti: completamente *within-subject* per gli universitari e *split-plot* per SSIG. I bambini, infatti, sono stati suddivisi in due gruppi ciascuno dei quali ha sostenuto solamente una delle condizioni di CO₂, ma tutte quelle acustiche.

2.3 | Analisi: abilità di calcolo

A tutti gli studenti è stato presentato il medesimo test di calcolo, per studiare l'impatto degli stressori sulle abilità cognitive. Il test consisteva nella verifica di 24 equivalenze (solo somme e sottrazioni) per ogni combinazione di condizione di ascolto e di concentrazione di CO₂ e quindi 4 per SSIG e 8 per gli universitari. Tutte le equivalenze sono state presentate sullo schermo di un tablet contestualmente a due pulsanti di risposta (vero o falso). Ai partecipanti è stato chiesto di ve-

rificare se l'equivalenza fosse corretta o meno premendo su uno dei due pulsanti di risposta. A tal scopo sono state create otto liste equivalenti delle 24 operazioni. L'ordine delle liste e delle condizioni sostenute è stato bilanciato tra i partecipanti di ciascun esperimento. L'intero test è stato realizzato usando la piattaforma online Gorilla.sc [25] la quale ha permesso di gestire automaticamente la presentazione delle equivalenze, dello stimolo sonoro e di registrare l'accuratezza e il tempo di risposta, in ms, per ciascuna equivalenza. L'accuratezza è stata scelta come misura diretta della prestazione, mentre il tempo di risposta è stato scelto come metrica dello sforzo impiegato dai partecipanti [26]. A tal scopo si è utilizzato il tempo di risposta delle sole equazioni corrette aggiustato secondo quanto espresso in [27] per evitare effetti di *accuracy trade-off*, ovvero aumento della velocità a discapito dell'accuratezza. L'esposizione alle condizioni di test è stata contestuale alla presentazione delle equivalenze. Per maggiori informazioni sulla struttura delle equivalenze si rimanda ai lavori [9,28]. L'analisi dei dati è stata condotta utilizzando modelli lineari generalizzati ad effetti misti, in R (ver. 4.5.2) [29] (pacchetto lme4 (ver 1.1-37) [30]. Accuratezza e tempo di risposta sono stati analizzati in funzione dell'età dei partecipanti (due livelli: Universitari o SSIG), delle condizioni acustiche (Quiete, Antropico, Ventilazione Meccanica, Suoni naturali) e di qualità dell'aria (Buona, Scadente) e delle interazioni doppie tra età e condizioni acustiche ed età e qualità dell'aria. Le interazioni doppie tra i domini e quella tripla non sono state inserite poiché l'interazione tra i domini a età fissata è già stata studiata in lavori precedenti [9,13]. Le equazioni (1) e (2) riportano la struttura dei modelli utilizzati con la notazione di Wilkinson [31]. Per le sole grandezze significative è stata realizzata un'analisi post-hoc con un confronto a coppie utilizzando il pacchetto emmeans [32] di R. Per tali confronti è stata calcolato anche l'effect-size del confronto tramite d di Cohen [33]. In tabella Tab.1 vengono forniti al lettore i criteri interpretativi per la dimensione dell'effetto.

$$\begin{aligned} \text{Accuratezza} \sim & \text{Età} + \text{Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Condizioni IAQ} + \text{Età: Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Età: Condizioni IAQ} + (1 | \text{Partecipante}), \dots \end{aligned} \quad (1)$$

,family = binomial

$$\begin{aligned} \text{Tempo Risposta} \sim & \text{Età} + \text{Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Condizioni IAQ} + \text{Età: Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Età: Condizioni IAQ} + (1 | \text{Partecipante}), \dots \end{aligned} \quad (2)$$

,family = binomial

Tab. 1 – Tabella interpretativa dell'effect size calcolato tramite d di Cohen

Table for interpreting the effect size calculated via Cohen's d

<i>d</i>	<i>Effect size</i>
0,2	Piccolo
0,5	Medio
0,8	Grande

2.4 | Analisi: paesaggio sonoro

Le valutazioni del paesaggio sonoro sono stante condotte anch'esse in laboratorio. Poiché nella valutazione del soundscape il contesto ha una componente importante è stato chiesto ai partecipanti di immaginarsi di effettuare una verifica o un esame in aula durante la percezione delle condizioni acustiche. Tale richiesta è stata fatta in modo da risultare coerente con il test di calcolo precedentemente somministrato. Le valutazioni sono state raccolte sulla piattaforma Gorilla.sc [25] utilizzando dei tablet. Non essendo ancora presente un set di attributi per gli ambienti educativi, all'atto delle misurazioni si è optato per utilizzare il metodo A della ISO/TS 12913-2 [17], in lingua inglese per gli universitari e in lingua italiana [34] per i bambini. In sintesi, i partecipanti hanno valutato, usando una scala Likert a 5 punti, quanto per loro l'ambiente sonoro fosse: i) piacevole/confortevole, ii) vivace/stimolante, iii) dinamico/vario, iv) caotico/confuso, v) spiacevole/irritante, vi) monotono/noioso, vii) stabile/stazionario e viii) calmo/tranquillo. Per le analisi gli otto attributi sono stati convertiti nei due costrutti di *ISOPleasantness* ed *ISOeventfulness*. La conversione è stata effettuata mediante le formule descritte nella ISO/TS 12913-3 [35]. I due nuovi parametri sono quindi stati investigati usando R con due modelli lineari ad effetti misti. La struttura dei modelli è riportata nelle equazioni (3) e (4). Come per le prestazioni di calcolo, le analisi *post-hoc* e gli *effect size* sono stati calcolati solamente per i parametri e i confronti significativamente impattanti nel modello.

$$\begin{aligned} \text{ISOPleasantness} \sim & \text{Età} + \text{Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Condizioni IAQ} + \text{Età: Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Età: Condizioni IAQ} + (1 | \text{Partecipante}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ISOEventfulness} \sim & \text{Età} + \text{Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Condizioni IAQ} + \text{Età: Condizioni Acustiche} + \\ & + \text{Età: Condizioni IAQ} + (1 | \text{Partecipante}) \end{aligned} \quad (4)$$

3 | Risultati

3.1 | Risultati: abilità di calcolo

Il modello per l'accuratezza ha identificato un effetto principale dell'età ($\chi^2(1) = 115.65$, $p < 0.001$) indicando come gli universitari abbiano un'accuratezza superiore (95%) rispetto ai bambini (79%) nel compito proposto ($d = 0.9$). Non è stato trovato alcun effetto degli stressori ambientali (acustica, qualità dell'aria) né principale (condizioni di ascolto: $\chi^2(3) = 7.76$ $p = 0.06$; IAQ: $\chi^2(1) = 1.45$, $p = 0.23$), né in interazione con l'età (età * Condizioni di ascolto: $\chi^2(3) = 7.76$, $p = 0.99$; età * IAQ: $\chi^2(1) = 0.10$, $p = 0.74$). Si ricorda ai lettori che affinché un parametro del modello o un confronto sia significativo il p. value deve essere minore o uguale a 0.05. Per quanto riguarda il tempo di risposta il modello ha mostrato sia un effetto dell'età ($\chi^2(1) = 61.86$, $p < 0.001$) che un'interazione tra età e condi-

zione di ascolto ($\chi^2(3) = 19.82$, $p < 0.001$), ma nessun effetto principale ($\chi^2(1) = 0.035$, $p = 0.85$) o di interazione della qualità dell'aria ($\chi^2(1) = 1.97$, $p = 0.16$) e nessun effetto principale delle condizioni di ascolto ($\chi^2(3) = 2.50$, $p = 0.47$). Poiché l'effetto dell'età è contenuto già nell'interazione, è stata analizzata solamente quest'ultima nei test *post-hoc*. Gli studenti universitari hanno impiegato meno tempo di quelli della scuola secondaria in tutte le condizioni di ascolto (tutti i $ps < 0.001$ ed effect size minimo $d = 0.94$). Per le comparazioni a età fissata, invece, gli studenti in età scolare hanno mostrato che il rumore di natura antropica (7.16 s) è la condizione che richiede i tempi di risposta più lunghi sia rispetto alla quiete (6.26 s) che alla ventilazione meccanica (6.85 s). Gli studenti universitari hanno mostrato un andamento opposto, con i tempi di risposta minori identificati nella condizione di rumore antropico (4.26 s) rispetto a tutte le altre condizioni acustiche [vs quiete (4.46 s), vs ventilazione meccanica (4.50 s), vs suoni naturali (4.55 s)]. I risultati per il tempo di risposta sono riportati per via grafica attraverso dei diagrammi scatole e baffi in Fig. 2. Tutti i dati statistici sono riassunti in Tab. 2.

Tab. 2 - Confronti a coppie relativi all'interazione tra condizioni acustiche ed età sul tempo di risposta, calcolati ad età fissata. Le colonne, indicano: età (SSIG = Studenti di Scuola Secondaria di I Grado, Uni = Universitari), confronto tra condizioni con i valori stimati, valore del test statistico, il p. value ed infine effect size come d di Cohen. Il confronto è significativo quando p. value ≤ 0.05
Pairwise comparisons relating to the interaction between acoustic conditions and age on response time, calculated at fixed age levels. The columns indicate: Age (SSIG = Schoolchildren, Uni = University students), comparison between conditions with estimated values, test statistic value, p. value, and finally the effect size as Cohen's d. The comparison is significant when the p. value ≤ 0.05

Età	Confronto	z	p. value	d
SSIG	Antropico (7.16) > Quiete (6.26)	2.53	0.02	0.07
	Antropico (7.16) > Naturale (7.01)	0.87	0.5	0.02
	Antropico (7.16) > Vent. Mec. (6.85)	2.57	0.02	0.07
	Quiete (6.26) < Naturale (7.01)	1.64	0.1	0.05
	Quiete (6.26) < Vent. Mec. (6.85)	0.10	0.9	0.003
	Naturale (7.01) > Vent. Mec. (6.85)	1.71	0.1	0.05
	Antropico (4.26) > Quiete (4.46)	2.34	0.03	0.09
Uni	Antropico (4.26) > Naturale (4.55)	2.60	0.02	0.1
	Antropico (4.26) > Vent. Mec. (4.50)	2.90	0.01	0.11
	Quiete (4.46) < Naturale (4.55)	0.24	0.8	0.009
	Quiete (4.46) < Vent. Mec. (4.50)	0.56	0.7	0.02
	Naturale (4.55) > Vent. Mec. (4.50)	0.31	0.8	0.01

3.2 | Risultati: paesaggio sonoro

Il modello per la *ISO Pleasantness* ha mostrato la presenza di un effetto principale della condizione acustica ($\chi^2(3) = 550.08$, $p < 0.001$) e un'interazione tra condizione acustica ed età ($\chi^2(3) = 13.33$, $p = 0.003$). La qualità dell'aria invece parrebbe non incidere sulle valutazioni del paesaggio sonoro in quanto non sono stati identificati né effetti principali ($\chi^2(1) = 0.01$, $p = 0.9$) né di interazione ($\chi^2(1) = 0.28$, $p = 0.6$). Le analisi sull'interazione hanno mostrato come gli studenti universitari tendano ad avere valutazioni inferiori rispetto ai bambini nelle condizioni di quiete (Uni ($M = 0.23$) < SSIG ($M = 0.39$), $t = 2.78$, $p = 0.008$, $d = 0.46$) e dei suoni naturali (Uni ($M = 0.34$) < SSIG ($M = 0.39$), $t = 2.66$, $p = 0.01$, $d = 0.44$), mentre non sono state trovate differenze per la ventilazione meccanica ($p = 0.6$, $d = 0.08$) e il rumore antropico ($p = 0.3$, $d = 0.17$). In aggiunta l'ordine di piacevolezza dei suoni, dal più basso al più alto, rimane inalterato nei due gruppi. Tuttavia, mentre per gli studenti della Scuola Secondaria di I Grado è presente una differenza tra le condizioni di quiete e i suoni naturali, tale differenza non risulta significativa per gli studenti universitari. Tutte le comparazioni sono riassunte in Tab. 3.

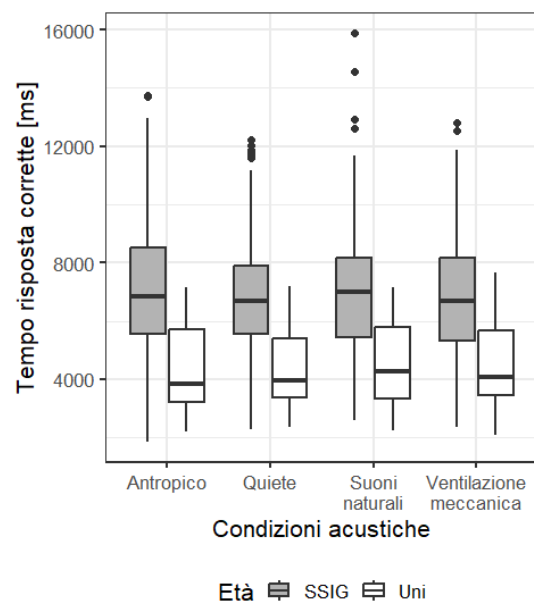


Fig. 2 – Diagramma scatole e baffi sull'interazione tra età (SSIG = Studenti di Scuola Secondaria di I Grado, Uni = Universitari) e condizioni acustiche (Asse X) sul tempo di risposta delle risposte corrette

Boxplot representing the interaction effect of age (fill: SSIG = Schoolchildren, Uni = University students) and Acoustic conditions (X axis) on the response time of correct answers only

Il modello per *ISO Eventfulness* ha mostrato gli effetti dell'età, ($\chi^2(1) = 31.71$, $p < 0.001$), delle condizioni acustiche ($\chi^2(3) = 427.93$, $p < 0.001$) e dell'interazione tra età e condizioni di ascolto ($\chi^2(3) = 41.90$, $p < 0.001$), ma nessun effetto della qualità dell'aria, né principale ($\chi^2(1) = 0.88$, $p = 0.35$) né di interazione con l'età ($\chi^2(1) = 1.38$, $p = 0.24$). Le analisi *post-hoc* hanno rivelato valutazioni maggiori per

gli adulti rispetto ai bambini, con differenze significative solamente nelle condizioni di quiete (Uni (−0.73) < SSIG (−0.34), $t = 7.94$, $p < 0.001$, $d = 1.3$) e di ventilazione meccanica (Uni (−0.35) < SSIG (−0.17), $t = 3.57$, $p < 0.001$, $d = 0.58$). Non sono invece emerse differenze per il rumore antropico ($t = 0.15$, $p = 0.8$, $d = 0.02$) e per i suoni naturali ($t = 0.74$, $p = 0.4$, $d = 0.12$). Per quanto riguarda il confronto ad età fissata, invece, l'ordine assoluto di *ISOEventfulness*, dalla minore alla maggiore, rimane invariato. In Tab. 4 sono riportate tutte le informazioni statistiche dei confronti per età fissata. Infine, in Fig. 3 e 4 vengono rappresentati i contorni del 50-esimo percentile della distribuzione spaziale dei costrutti di *ISOPleasantness* ed *ISOEventfulness* all'interno del diagramma circomplesso assieme alle valutazioni dei singoli partecipanti. In sintesi, le ellissi in figura contengono il 50% della distribuzione bidimensionale dei due costrutti di *ISOPleasantness* ed *ISOeventfulness*. Il grafico è stato realizzato in R utilizzando però i criteri di rappresentazione espressi in Mitchell et al. [36].

Tab. 3 – Confronti a coppie relativi all'interazione tra condizioni acustiche ed età su ISOPleasantness, calcolati ad età fissata. Le colonne, indicano: età (SSIG = Studenti di Scuola Secondaria di I Grado, Uni = Universitari), confronto tra condizioni con i valori stimati, valore del test statistico, il p. value ed infine effect size come d di Cohen. Il confronto è significativo quando p. value ≤ 0.05.

Pairwise comparisons of the interaction between acoustic conditions and age on ISOPleasantness, computed with age held constant. The columns indicate: Age (SSIG = Schoolchildren, Uni = University students), comparison between conditions with estimated values, test statistic value, p. value, and finally the effect size as Cohen's d. The comparison is significant when the p. value ≤ 0.05

Età	Confronto	t	p. value	d
SSIG	Antropico (−0.29) < Quiete (0.39)	15.76	< 0.001	1.92
	Antropico (−0.29) < Suoni Naturali (0.5)	18.15	< 0.001	2.21
	Antropico (−0.29) < Vent. Mec. (−0.12)	4.01	< 0.001	0.49
	Quiete (0.39) < Suoni Naturali (0.5)	2.33	0.02	0.28
	Quiete (0.39) > Vent. Mec. (−0.12)	11.80	< 0.001	1.44
	Suoni Naturali (0.5) > Vent. Mec. (−0.12)	14.18	< 0.001	1.71
	Suoni Naturali (0.5) > Vent. Mec. (−0.12)	14.18	< 0.001	1.71
Uni	Antropico (−0.23) < Quiete (0.23)	6.81	< 0.001	1.29
	Antropico (−0.23) < Suoni Naturali (0.34)	8.42	< 0.001	1.60
	Antropico (−0.23) < Vent. Mec. (−0.09)	2.06	0.04	0.39
	Quiete (0.23) > Suoni Naturali (0.34)	4.75	0.1	0.30
	Quiete (0.23) > Vent. Mec. (−0.09)	1.61	< 0.001	0.90
	Suoni Naturali (0.34) > Vent. Mec. (−0.09)	6.36	< 0.001	1.2
	Suoni Naturali (0.34) > Vent. Mec. (−0.09)	6.36	< 0.001	1.2

Tab. 4 – Confronti a coppie dell'interazione tra condizioni acustiche ed età su ISOEventfulness, calcolati ad età fissata. Le colonne, indicano: età (SSIG = Studenti di Scuola Secondaria di I Grado, Uni = Universitari), confronto tra condizioni con i valori stimati, valore del test statistico, il p. value ed infine effect size come d di Cohen. Il confronto è significativo quando p. value ≤ 0.05

Pairwise comparisons of the interaction between acoustic conditions and age on ISOEventfulness computed with age held constant. The columns indicate: Age (SSIG = Schoolchildren, Uni = University students), comparison between conditions with estimated values, test statistic value, p. value, and finally the effect size as Cohen's d. The comparison is significant when the p. value ≤ 0.05

Età	Confronto	t	p. value	d
SSIG	Antropico (0.20) > Quiete (−0.34)	13.52	< 0.001	1.65
	Antropico (0.20) > Suoni Naturali (−0.03)	6.06	< 0.001	0.74
	Antropico (0.20) > Vent. Mec. (−0.17)	9.69	< 0.001	1.18
	Quiete (−0.34) < Suoni Naturali (−0.03)	7.51	< 0.001	0.91
	Quiete (−0.34) < Vent. Mec. (−0.17)	3.88	< 0.001	0.17
	Suoni Naturali (−0.03) > Vent. Mec. (−0.17)	3.64	< 0.001	0.44
	Suoni Naturali (−0.03) > Vent. Mec. (−0.17)	3.64	< 0.001	0.44
Uni	Antropico (0.21) > Quiete (−0.73)	15.72	< 0.001	2.98
	Antropico (0.21) > Suoni Naturali (−0.07)	4.66	< 0.001	0.88
	Antropico (0.21) > Vent. Mec. (−0.35)	9.43	< 0.001	1.79
	Quiete (−0.73) < Suoni Naturali (−0.07)	11.06	< 0.001	2.09
	Quiete (−0.73) < Vent. Mec. (−0.35)	6.29	< 0.001	1.19
	Suoni Naturali (−0.07) > Vent. Mec. (−0.35)	4.77	< 0.001	0.90
	Suoni Naturali (−0.07) > Vent. Mec. (−0.35)	4.77	< 0.001	0.90

I grafici permettono di comprendere meglio quanto osservato nei confronti a coppie; ovvero: i) il rumore antropico viene riconosciuto da bambini ed adulti come caotico (II quadrante di Fig. 3) con le distribuzioni quasi del tutto sovrapposte; ii) i suoni naturali sono percepiti come piacevoli per entrambe le età con le valutazioni che variano prevalentemente sull'asse della *ISOEventfulness* (presenza di eventi nello stimolo sonoro); iii) il rumore della ventilazione meccanica è percepito come monotono (III quadrante del grafico di Fig. 4) dagli studenti universitari, mentre gli studenti della scuola secondaria lo percepiscono un po' più neutro per via di valutazioni più estese ma senza differenze eccessive; iv) la condizione di quiete infine viene percepita come calma (IV quadrante del diagramma) per entrambi i gruppi di età, con una presenza maggiore di eventi per i bambini.

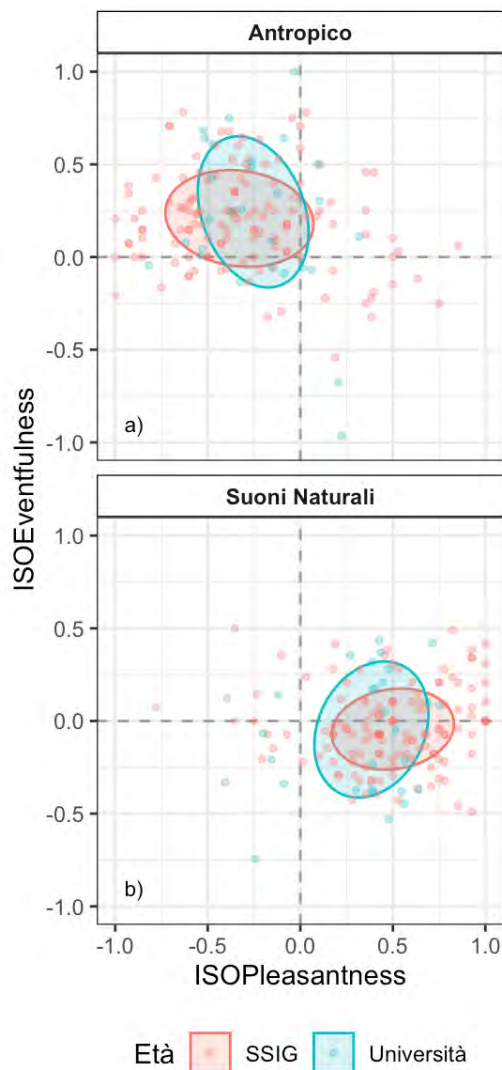


Fig. 3 – Contorno del 50-esimo percentile della distribuzione spaziale di ISO Pleasantness ed ISO Eventfulness per entrambi i gruppi di età (SSIG = Scuola Secondaria di I Grado, Università).
a) Antropico, b) Suoni naturali

50th percentile contour of the spatial distribution of ISO Pleasantness and ISO Eventfulness for both age groups (SSIG = Lower Secondary School, University).
a) Anthropogenic, b) Natural sounds.

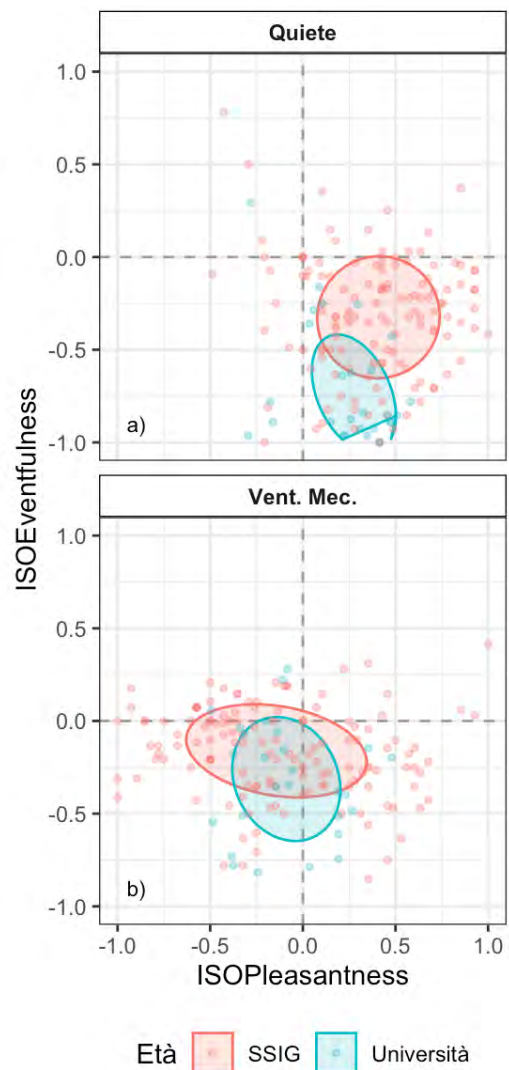


Fig. 4 – Contorno del 50-esimo percentile della distribuzione spaziale di ISO Pleasantness ed ISO Eventfulness per entrambi i gruppi di età (SSIG = Scuola Secondaria di I Grado, Università).
a) Quiet, b) Ventilazione Meccanica

50th percentile contour of the spatial distribution of ISO Pleasantness and ISO Eventfulness for both age groups (SSIG = Lower Secondary School, University).
a) Quiet, b) Mechanical ventilation

4 | Discussioni

Il lavoro ha cercato di indentificare in via preliminare se l'età possa o meno giocare un ruolo sugli effetti dell'acustica e della qualità dell'aria su abilità di calcolo e sulla percezione del paesaggio sonoro. I risultati hanno confermato che, in un compito di calcolo, gli universitari non solo risultano più accurati, ma anche più veloci rispetto agli studenti in età scolare, in linea con quanto riportato in letteratura [11,12,27]. Tale vantaggio, tuttavia, parrebbe essere indipendente dalla IAQ in quanto non è stato riscontrato alcun effetto principale o di interazione della IAQ. L'assenza di un'influenza della IAQ non è comunque escludibile con certezza per come gli esperimenti sono stati realizzati e maggiori informazioni sono presenti nella sezione limitazioni. Si è osservata invece un'interazione

tra l'età e le condizioni di ascolto, in riferimento al tempo di risposta nel compito. Gli studenti della Scuola Secondaria di I Grado presentano infatti tempi di risposta complessivamente più lunghi in presenza di rumore di natura antropica, mentre per gli studenti universitari si osserva un andamento opposto. Questi risultati trovano parziale conferma nella letteratura relativa ai processi attentivi in bambini e adulti [12,37]. Dalla letteratura è emerso che i bambini sono più soggetti a distrazioni rispetto agli adulti specialmente nel caso di stimoli sonori che siano ricchi di eventi salienti. In questo studio, tale differenza emerge in particolare per il rumore antropico, il quale tra i vari stimoli sonori proposti è quello con il maggior numero di eventi salienti. Ciò è confermato anche dai valori più elevati di *ISO Eventfulness* riportati da entrambi i gruppi di studenti. Un'ulteriore interpretazione riguarda un possibile effetto sulla

memoria di lavoro, necessaria per mantenere mentalmente l'equazione e i risultati intermedi. Le abilità di memoria sono infatti strettamente correlate alle abilità matematiche [38,39] e il rumore antropico utilizzato in questo studio risulta simile agli stimoli sonori descritti in letteratura come ricchi di eventi o contenenti parlato non intelligibile, i quali hanno mostrato effetti negativi sulla memoria nei bambini [37]. La riduzione dell'attenzione o la degradazione della memoria potrebbero quindi aver indotto gli studenti più giovani a leggere più lentamente l'operazione e rileggere parti di essa, determinando di conseguenza un incremento dei tempi di risposta. Per quanto riguarda gli effetti positivi di un rumore antropico sugli adulti, si rimanda al lavoro di Pellegatti *et al.* [9] per una spiegazione completa e dettagliata. In sintesi, il rumore antropico potrebbe aver innalzato lo stato di attivazione degli studenti universitari, favorendo così un miglioramento delle prestazioni. È noto, infatti, che gli stimoli sonori sono in grado di aumentare il livello di attivazione di base degli individui [40]; tuttavia, quelli caratterizzati da un numero maggiore di eventi salienti risultano avere un effetto più marcato [41,42]. Lo stato di attivazione e le prestazioni cognitive sono tra loro legati secondo la legge di Yerkes-Dodson [43,44] che descrive una relazione ad U rovesciata, con un massimo delle prestazioni raggiunto per livelli intermedi di attivazione. Infine, per quanto riguarda le valutazioni del paesaggio sonoro il confronto mostra come sia presente un effetto di interazione tra età e stimoli sonori sia per la *ISO Pleasantness* che per la *ISO Eventfulness*. Le differenze tra i due gruppi riguardano tuttavia principalmente l'ampiezza di utilizzo della scala di valutazione. Gli adulti tendono a fornire giudizi più contenuti rispetto ai bambini nella valutazione della piacevolezza, mentre, nella valutazione dell'*ISO Eventfulness*, si osserva un andamento opposto, con una maggiore variabilità nelle risposte degli adulti rispetto agli studenti più giovani. La posizione nel diagramma circomplesso, tuttavia, rimane invariata per tutte le condizioni acustiche, indicando che entrambi i gruppi valutano l'ambiente sonoro in modo sostanzialmente simile a meno di piccole differenze sulla ventilazione meccanica e la quiete. La prima potrebbe essere spiegata dall'abitudine a quello stimolo sonoro: tutte le aule dei bambini erano infatti dotate di finestre per la ventilazione, mentre nelle aule universitarie è più facile trovare sistemi di ventilazione meccanica. Per quanto riguarda la quiete invece l'ambiente sonoro del Field Labs è risultato essere più quieto di quello nel Façade System Interaction Lab. Nonostante siano state prese precauzioni come l'utilizzo in entrambi i casi di cuffie il numero di eventi salienti del Façade System Interaction Lab era maggiore a causa della sua locazione. In generale i risultati suggeriscono quindi che l'età influisce più sull'intensità con cui vengono espressi i giudizi percettivi, piuttosto che sulla struttura complessiva della valutazione del paesaggio sonoro, illustrando come la valutazione data utilizzando gli attributi per l'ambiente esterno parrebbe mantenersi inalterata per le due fasce di età, cosa che invece non accadrebbe nel caso dell'utilizzo dei parametri sviluppati per l'ambiente interno [45].

5 | Limitazioni

Il lavoro è soggetto a diverse limitazioni che hanno reso questa comparazione puramente di natura esplorativa. In primo luogo, il confronto è stato effettuato utilizzando dati di due esperimenti diversi, caratterizzati da un numero differente di partecipanti, ambienti e contesti; la realizzazione di un unico esperimento avrebbe garantito risultati più robusti e non esclusivamente di carattere esplorativo. Si è cercato di ridurre al minimo le possibili differenze. Ad esempio, per minimizzare quelle legate all'ambiente, sono state prese precauzioni quali applicare la medesima metodologia e far indossare le cuffie durante l'esecuzione delle condizioni di quiete. Tuttavia, nella condizione di quiete non è stato possibile rendere perfettamente identici i due ambienti, e questo è emerso chiaramente nei risultati della valutazione del paesaggio sonoro. Sempre in merito agli ambienti, sono state controllate solamente le condizioni acustiche e di qualità dell'aria, mentre tutti gli altri parametri ambientali sono stati solamente monitorati. Poiché tutti i parametri dell'ambiente interno possono influenzare sia le abilità cognitive che il comfort percepito, anche variazioni di lieve entità tra le diverse sessioni sperimentali e tra i due laboratori potrebbero aver influenzato, almeno in parte, i risultati osservati. Un'altra limitazione, riconducibile all'utilizzo di due esperimenti differenti, è il diverso disegno sperimentale: di tipo *split-plot* per la SSIG e *full-within* per gli universitari, il quale ha ridotto la potenza statistica nell'identificare gli effetti dell'IAQ.

Sempre in merito alla mancanza di effetti significativi legati all'IAQ, per il gruppo SSIG si è utilizzata dapprima CO₂ pura per raggiungere la concentrazione di test, mentre per gli universitari solamente bioeffluenti. La letteratura mostra come per gli adulti la CO₂ pura non abbia alcun effetto, e questo potrebbe aver influenzato anche i risultati relativi alla SSIG. Un'ulteriore limitazione riguarda i fattori sociali e culturali, come ad esempio il Paese di origine degli studenti, che potrebbero influenzare sia la percezione dell'ambiente sonoro sia le abilità cognitive [46–48]. I risultati, infatti, non sono stati controllati per tali fattori. Sebbene entrambe le istituzioni siano caratterizzate da un forte profilo internazionale, la composizione dei due gruppi presentava alcune differenze: il campione della SSIG era a prevalenza italiana, mentre gli studenti della DTU provenivano da tutta l'Eurasia. In ogni caso, l'elevata multiculturalità, specialmente di quello universitario ha reso impossibile garantire un'univocità culturale. La sesta limitazione riguarda il fatto che gli studenti della Scuola Secondaria di Primo Grado avevano già svolto in precedenza l'esperimento in classe [28] prima di ripeterlo in laboratorio. Questa familiarità con il protocollo sperimentale potrebbe aver influenzato gli effetti osservati nella sessione laboratoriale. Di conseguenza, risulterebbe opportuno prevedere in futuro una comparazione diretta tra i risultati ottenuti in aula e quelli raccolti in laboratorio. La penultima limitazione riguarda il test utilizzato che è risultato troppo facile specialmente per gli adulti, tale limitazione è già stata ampiamente affrontata in Ref. [9]. In sintesi, un test troppo facile può aver compromesso lo studio

dell'influenza dell'età sull'accuratezza del compito di calcolo. Infine, come ultima limitazione, gli effetti identificati degli stimoli sonori sono stati spiegati con variazioni dei livelli di attivazione. Tuttavia, tale spiegazione, seppur ragionevole, rimane solamente a livello ipotetico poiché non sono state effettuate misure comportamentali o fisiologiche dei livelli di attivazione delle persone.

6 | Conclusioni

Il presente studio ha confrontato due gruppi di studenti, universitari e alunni della Scuola Secondaria di I Grado, con l'obiettivo di verificare in via esplorativa se l'età influenzi gli effetti dei suoni della ventilazione e della qualità dell'aria sulle prestazioni cognitive e sulla valutazione del paesaggio sonoro. L'analisi parrebbe non aver individuato effetti significativi della qualità dell'aria anche se quest'ultima è soggetta diverse limitazioni come indicato nella sezione precedente. Sono emerse invece interazioni significative tra l'età e le condizioni acustiche, sia per le prestazioni di calcolo che per la percezione del paesaggio sonoro. Per quanto riguarda le prestazioni cognitive, si conferma che gli adulti ottengono risultati migliori dei bambini, con una maggiore accuratezza e tempi di risposta più brevi. È probabile che gli studenti più giovani non abbiano ancora sviluppato una piena "resistenza al rumore", risultando così più soggetti alle distrazioni causate da stimoli sonori ricchi di eventi, come il rumore di natura antropica. Curiosamente, questa stessa ricchezza di eventi sembra invece avere un effetto stimolante sugli adulti, contribuendo a un miglioramento delle prestazioni in questa condizione acustica. Per quanto riguarda la valutazione del paesaggio sonoro, le differenze osservate tra adulti e ragazzi risultano essere principalmente legate a tre aspetti: l'utilizzo della scala di valutazione, l'abitudine a stimoli sonori specifici e l'ambiente di test. I risultati però mostrano come, in generale, i diversi stimoli sonori vengono percepiti in modo sostanzialmente analogo dai due gruppi, suggerendo come i metodi di valutazione del paesaggio sonoro validati per gli adulti potrebbero funzionare anche per popolazioni di bambini della Secondaria di I Grado.

Conclusions

The present study compared two groups of students – university students and lower secondary school pupils – with the exploratory aim of determining whether age influences the effects of ventilation noise and air quality on cognitive performance and soundscape assessment. The analysis did not appear to identify any significant effects of air quality, although the latter is subject to several limitations, as indicated in the preceding section. Conversely, significant interactions emerged between age and acoustic conditions for both calculation performance and soundscape perception. Regarding cognitive performance, the findings confirm that adults achieve better results than children, demonstrating greater accuracy and shorter response times. It is probable that younger students have not yet developed

full "noise resilience", thus making them more susceptible to distractions caused by event-rich acoustic stimuli, such as anthropogenic noise. Interestingly, this same richness of events appears to exert a stimulating effect on adults, contributing to improved performance under this acoustic condition. Concerning soundscape assessment, the differences observed between adults and adolescents appear to be primarily linked to three aspects: the use of the rating scale, habituation to specific acoustic stimuli, and the testing environment. However, the results demonstrate that, in general, the various acoustic stimuli are perceived in a substantially similar manner by both groups, suggesting that soundscape assessment methods validated for adults could also be effective for lower secondary school populations.

Bibliografia

- [1] M. Schweiker, E. Ampatzi, M.S. Andargie, R.K. Andersen, E. Azar, V.M. Barthelmes, C. Berger, L. Bourikas, S. Carlucci, G. Chinazzo, L.P. Edappilly, M. Favero, S. Gauthier, A. Jamrozik, M. Kane, A. Mahdavi, C. Piselli, A.L. Pisello, A. Roetzel, A. Rysanek, K. Sharma, S. Zhang, Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour, *Build. Environ.* 176 (2020) 106804. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106804>.
- [2] N.E. Klepeis, W.C. Nelson, W.R. Ott, J.P. Robinson, A.M. Tsang, P. Switzer, J. V. Behar, S.C. Hern, W.H. Engelmann, The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 11 (2001) 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>.
- [3] Education at a Glance 2025, OECD Publishing, 2025. <https://doi.org/10.1787/1c0d9c79-en>.
- [4] B. Du, M.C. Tandoc, M.L. Mack, J.A. Siegel, Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review, *Indoor Air* 30 (2020) 1067–1082. <https://doi.org/10.1111/ina.12706>.
- [5] G. Chinazzo, R.K. Andersen, E. Azar, V.M. Barthelmes, C. Becchio, L. Belussi, C. Berger, S. Carlucci, S.P. Corgnati, S. Crosby, L. Danza, L. de Castro, M. Favero, S. Gauthier, R.T. Hellwig, Q. Jin, J. Kim, M. Sarey Khanie, D. Khovalyg, C. Lingua, A. Luna-Navarro, A. Mahdavi, C. Miller, I. Mino-Rodriguez, I. Pigliautile, A.L. Pisello, R.F. Rupp, A.-M. Sadick, F. Salamone, M. Schweiker, M. Syndicus, G. Spigiantini, N.G. Vasquez, D. Vakalis, M. Vellei, S. Wei, Quality criteria for multi-domain studies in the indoor environment: Critical review towards research guidelines and recommendations, *Build. Environ.* 226 (2022) 109719. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109719>.
- [6] M. Pellegatti, S. Torresin, C. Visentin, F. Babich, N. Prodi, Indoor soundscape, speech perception, and cognition in classrooms: A systematic review on the effects of ventilation-related sounds on students, *Build. Environ.* 236 (2023) 110194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110194>.
- [7] I. Balazova, G. Clausen, D.P. Wyon, The influence of exposure to multiple indoor environmental parameters on human perception, performance and motivation., in: CLIMA 2007.WellBeing Indoors: Proceedings Congress., FINVAC, Helsinki, 2007.
- [8] Z. Pan, S.K. Kjaergaard, L. Mølhave, A chamber-experiment investigation of the interaction between perceptions of noise and odor in humans, *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 76 (2003) 598–604. <https://doi.org/10.1007/s00420-003-0464-3>.

- [9] M. Pellegatti, C. Visentin, S. Torresin, F. Babich, P. Wargocki, N. Prodi, Combined and cross-modal effects of acoustic and indoor air quality conditions on sensory and cognitive responses of university students, *Build. Environ.* 288 (2026) 114005. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.114005>.
- [10] G. Clausen, L. Carrick, P.O. Fanger, S.W. Kim, T. Poulsen, J.H. Rindel, A Comparative Study Of Discomfort Caused By Indoor Air Pollution, Thermal Load And Noise, *Indoor Air* 3 (1993) 255–262. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1993.00006.x>.
- [11] D. Connolly, J. Dockrell, B. Shield, R. Conetta, C. Mydlarz, T. Cox, The effects of classroom noise on the reading comprehension of adolescents, *J. Acoust. Soc. Am.* 145 (2019) 372–381. <https://doi.org/10.1121/1.5087126>.
- [12] K. Loh, E. Fintor, S. Nolden, J. Fels, Children's intentional switching of auditory selective attention in spatial and noisy acoustic environments in comparison to adults., *Dev. Psychol.* 58 (2022) 69–82. <https://doi.org/10.1037/dev0001239>.
- [13] M. Pellegatti, C. Visentin, S. Torresin, F. Babich, N. Prodi, Soundscape and indoor air quality in naturally ventilated educational environments: a multi-domain study, in: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2024: pp. 2419–2425. https://doi.org/10.3397/IN_2024_3180.
- [14] American Psychological Association - Dictionary of Psychology, Cognitive ability, (2023).
- [15] International Organization for Standardization, ISO 12913-1:2014 Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework, (2014).
- [16] Ö. Axelsson, M.E. Nilsson, B. Berglund, A principal components model of soundscape perception, *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (2010) 2836–2846. <https://doi.org/10.1121/1.3493436>.
- [17] International Organization for Standardization, ISO - ISO/TS 12913-2:2018 – Acoustics – Soundscape – Part 2: Data collection and reporting requirements, (2018). <https://www.iso.org/standard/75267.html> (accessed July 21, 2022).
- [18] S. Torresin, F. Aletta, T. Oberman, V. Vinciotti, R. Albatici, J. Kang, Measuring, representing and analysing indoor soundscapes: A data collection campaign in residential buildings with natural and mechanical ventilation in England, *Build. Environ.* 243 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110726>.
- [19] B. West, A. Deuchars, I. Ali-MacLachlan, Office soundscape assessment: A model of acoustic environment perception in open-plan offices, *J. Acoust. Soc. Am.* 156 (2024) 2949–2959. <https://doi.org/10.1121/10.0034230>.
- [20] A. Gupta, G. Torriani, S. Torresin, L. Pistore, M. Pellegatti, L. Piazza, F. Miorin, W. Pasut, A. Belleri, R. Lollini, F. Babich, Thermal comfort and perceived air quality (PAQ) using automatic ceiling fans in residential buildings, *Energy Build.* 330 (2025) 115317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115317>.
- [21] F. Babich, R. Pinotti, R. Gazzin, C. Visentin, R. Lollini, From single tests to a test-chain: A comprehensive approach for evaluating the interaction between the building envelope and the IEQ, *E3S Web of Conferences* 523 (2024) 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452301001>.
- [22] J. Toftum, G. Langkilde, P.O. Fanger, New indoor environment chambers and field experiment offices for research on human comfort, health and productivity at moderate energy expenditure, *Energy Build.* 36 (2004) 899–903. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.02.001>.
- [23] European Committee for Standardization, CEN EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6, (2019).
- [24] X. Zhang, P. Wargocki, Z. Lian, C. Thyregod, Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance, *Indoor Air* 27 (2017) 47–64. <https://doi.org/10.1111/INA.12284>.
- [25] A.L. Anwyl-Irvine, J. Massonnié, A. Flitton, N. Kirkham, J.K. Evershed, Gorilla in our midst: An online behavioral experiment builder, *Behav. Res. Methods* 52 (2020) 388–407. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01237-x>.
- [26] M.K. Pichora-Fuller, S.E. Kramer, M.A. Eckert, B. Edwards, B.W.Y. Hornsby, L.E. Humes, U. Lemke, T. Lunner, M. Matthen, C.L. Mackersie, G. Naylor, N.A. Phillips, M. Richter, M. Rudner, M.S. Sommers, K.L. Tremblay, A. Wingfield, Hearing impairment and cognitive energy: The framework for understanding effortful listening (FUEL), in: *Ear Hear.*, Lippincott Williams and Wilkins, 2016: pp. 5S-27S. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000312>.
- [27] B. Meinhardt-Injac, S. Schlittmeier, M. Klatte, A. Otto, M. Persike, M. Imhof, Auditory Distraction by Meaningless Irrelevant Speech: A Developmental Study, *Appl. Cogn. Psychol.* 29 (2015) 217–225. <https://doi.org/10.1002/acp.3098>.
- [28] M. Pellegatti, C. Visentin, S. Torresin, F. Babich, N. Prodi, The effect of ventilation-related sound stimuli on 11–14 years students' cognition and soundscape assessments, *Applied Acoustics* 245 (2026) 111206. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111206>.
- [29] R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, (2025). <https://www.r-project.org/>
- [30] D. Bates, M. Mächler, B. Bolker, S. Walker, Fitting Linear Mixed-Effects Models Using **lme4**, *J. Stat. Softw.* 67 (2015). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- [31] G.N. Wilkinson, C.E. Rogers, Symbolic Description of Factorial Models for Analysis of Variance, 1973. <https://www.jstor.org/stable/2346786>.
- [32] R. V. Lenth, emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means, (2025). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.emmeans>
- [33] J. Cohen, Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, Routledge, 2013. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>.
- [34] F. Aletta, Ö. Axelsson, H. Xie, Soundscape assessment: Towards a validated translation of perceptual attributes in different languages Impact and outreach of soundscape studies View project Urban Design for Sustainable Built Environment View project, n.d. <https://www.researchgate.net/publication/343892927>.
- [35] International Organization for Standardization, ISO - ISO/TS 12913-3:2019 – Acoustics – Soundscape – Part 3: Data analysis, (2019).
- [36] A. Mitchell, F. Aletta, J. Kang, How to analyse and represent quantitative soundscape data, *JASA Express Lett.* 2 (2022) 037201. <https://doi.org/10.1121/10.0009794>.
- [37] M. Klatte, K. Bergström, T. Lachmann, Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children, *Front. Psychol.* 4 (2013). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00578>.
- [38] I. Friso-van den Bos, E. van de Weijer-Bergsma, Classroom versus individual working memory assessment: predicting academic achievement and the role of attention and response

- inhibition, *Memory* 28 (2020) 70–82. <https://doi.org/10.1080/09658211.2019.1682170>.
- [39] P. Peng, J. Namkung, M. Barnes, C. Sun, A meta-analysis of mathematics and working memory: Moderating effects of working memory domain, type of mathematics skill, and sample characteristics., *J. Educ. Psychol.* 108 (2016) 455–473. <https://doi.org/10.1037/edu0000079>.
- [40] A. Alvar, A.L. Francis, Effects of background noise on autonomic arousal (skin conductance level), *JASA Express Lett.* 4 (2024). <https://doi.org/10.1121/10.0024272>.
- [41] Y. Lu, K.J. Jaquess, B.D. Hatfield, C. Zhou, H. Li, Valence and arousal of emotional stimuli impact cognitive-motor performance in an oddball task, *Biol. Psychol.* 125 (2017) 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2017.02.010>.
- [42] J. Posner, J.A. Russell, B.S. Peterson, The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology, *Dev. Psychopathol.* 17 (n.d.) 715–734. <https://doi.org/10.1017/S0954579405050340>.
- [43] K.H. Teigen, Yerkes-Dodson: A Law for all Seasons, *Theory Psychol.* 4 (1994) 525–547. <https://doi.org/10.1177/0959354394044004>.
- [44] R.M. Yerkes, J.D. Dodson, The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation, *Journal of Comparative Neurology and Psychology* 18 (1908) 459–482. <https://doi.org/10.1002/CNE.920180503>.
- [45] H.K. Cal, F. Aletta, J. Kang, P. Clarke, Student perception of school soundscapes and wellbeing: A mixed methods examination of natural and musical sounds, *Build. Environ.* 277 (2025) 112946. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112946>.
- [46] M.M. Haines, S.A. Stansfeld, R.F.S. Job, B. Berglund, J. Head, Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children, *Psychol. Med.* 31 (2001) 265–277. <https://doi.org/10.1017/S0033291701003282>.
- [47] C. Clark, R. Crombie, J. Head, I. Van Kamp, E. Van Kempen, S.A.A. Stansfeld, Does traffic-related air pollution explain associations of aircraft and road traffic noise exposure on children's health and cognition? A secondary analysis of the United Kingdom sample from the RANCH project, *Am. J. Epidemiol.* 176 (2012) 327–337. <https://doi.org/10.1093/aje/kws012>.
- [48] S.A.A. Stansfeld, B. Berglund, C. Clark, I. Lopez-Barrio, P. Fischer, E. Öhrström, M.M.M. Haines, J. Head, S. Hygge, I. Van Kamp, I. Van Kamp, B.F.F. Berry, Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: A cross-national study, *Lancet* 365 (2005) 1942–1949. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)66660-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)66660-3).