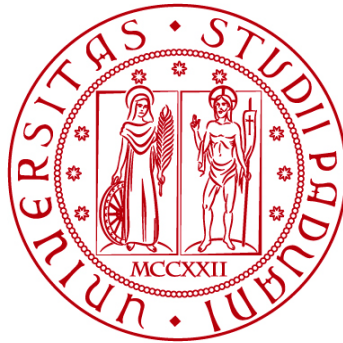


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**ANALISI COMPARATIVA DI TECNICHE DI
MITIGAZIONE DELL'IMPATTO ACUSTICO DEL
TRAFFICO STRADALE.
CASO STUDIO**

Relatore:
Chiar.mo PROF. Ing. Marco Pasetto

Laureando:
Alberto Toffoletto

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. INQUINAMENTO ACUSTICO	2
1.1 VARIABILI FONDAMENTALI	2
1.2 IL LIVELLO EQUIVALENTE	9
1.3 FENOMENI DI INTERAZIONE ACUSTICA	11
2.INQUADRAMENTO NORMATIVO	13
3.TECNICHE DI MITIGAZIONE DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO	21
3.1 INTERVENTI ATTIVI	22
3.2 INTERVENTI PASSIVI	23
3.3 BARRIERE ACUSTICHE ARTIFICIALI	26
3.4 BARRIERE NATURALI	29
4. CASO STUDIO – VIA POSTUMIA (S.P. 102)	32
4.1 DESCRIZIONE AREA DI STUDIO	32
4.2 RILEVAZIONI FONOMETRICHE	35
4.2.1 INDAGINI PRELIMINARI	35
4.2.2 METODOLOGIA DI MISURA	37
4.2.3 FONOMETRO	38
4.2.4 RECETTORI RILEVATI	41
4.3 ANALISI COMPARATIVA	47
4.3.1 STRUMENTO DI SIMULAZIONE ACUSTICA - SOUNDPLAN	47
4.3.2 MODELLO DIGITALE DELL'AREA STUDIO	47
4.3.3 MODELLO SORGENTE ACUSTICA	50
4.3.4 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE	52
CONCLUSIONI	64
ALLEGATI	66
1. ESTRATTO DATI RILEVATI SULLA POSTAZIONE 1	66
2. ESTRATTO DATI RILEVATI SULLA POSTAZIONE 2	67
BIBLIOGRAFIA	68
SITOGRAFIA	69

INDICE FIGURE

FIGURA 1 INTERVALLO DI FREQUENZE UDIBILI	4
FIGURA 2 RELAZIONE FRA FREQUENZA E LUNGHEZZA D'ONDA	5
FIGURA 3 FATTORI DI DIRETTIVITÀ	7
FIGURA 4 CURVE ISOFONICHE	8
FIGURA 5 CURVE DI PONDERAZIONE	9
FIGURA 6 SCHEMA PER IL DIMENSIONAMENTO DI UNA BARRIERA ACUSTICA.....	24
FIGURA 7 SCHEMA DI PERCORSO DELL'ONDA DIRETTA E DIFFRATTA	25
FIGURA 8 SCHEMI FUNZIONALI PER LA MITIGAZIONE DELL'EFFETTO DI DIFFRAZIONE	25
FIGURA 9 ELEMENTI COSTRUTTIVI BARRIERA ACUSTICA.....	26
FIGURA 10 BARRIERA CON PANNELLI IN LAMIERA METALLICA IN ALLUMINIO.....	27
FIGURA 11 BARRIERA CON PANNELLI IN LEGNO.....	27
FIGURA 12 BARRIERA CON PANNELLI IN CALCESTRUZZO E ARGILLA ESPANSA	28
FIGURA 13 BARRIERA IN PMMA	28
FIGURA 14 BARRIERA CON PANNELLI IN POLICARBONATO.....	29
FIGURA 15 BARRIERA CON QUINTE VEGETALI	30
FIGURA 16 SEZIONE STRADALE IN TRINCEA CON SCARPATE IN TERRA RINFORZATA.....	31
FIGURA 17 FOTO SATELLITARE SVILUPPO PLANIMETRICO S.P. 102.....	32
FIGURA 18 SEZIONE IN TRINCEA S.P. 102	33
FIGURA 19 SCHEMA GEOMETRICO STRADA TIPO C (DM 05/11/2001)	33
FIGURA 20 IMMAGINE SATELLITARE AREA DI STUDIO.....	35
FIGURA 21. ESTRATTO MAPPA DI CLASSIFICAZIONE ACUSTICA DEL COMUNE DI PAESE.....	36
FIGURA 22 SCHEDA TECNICA FONOMETRO RØDE VIDEOMIC GO.....	39
FIGURA 23 INTERFACCIA UTENTE APPLICAZIONE OPENOISE	40
FIGURA 24 INQUADRAMENTO PLANIMETRICO POSTAZIONI DI MISURA.....	41
FIGURA 25 VISTA PROSPETTICA DEL MODELLO DIGITALE DELLA SOLUZIONE 1.....	48
FIGURA 26 VISTA SULLA SEZIONE IN TRINCEA DEL MODELLO DIGITALE DELLA SOLUZIONE 1.....	48
FIGURA 27 VISTA PROSPETTIVA DEL MODELLO DIGITALE DELLA SOLUZIONE 2	49
FIGURA 28 VISTA PROSPETTICA SULLE BARRIERE ACUSTICHE DELLA SOLUZIONE 2	49

INDICE TABELLE

TABELLA 1 LIVELLI DI POTENZA DELLE SORGENTI SONORE	6
TABELLA 2 LIMITI DI IMMISSIONE	15
TABELLA 3 LIMITI DI EMISSIONE	15
TABELLA 4 VALORI DI QUALITÀ	15
TABELLA 5 VALORI LIMITE PER LE FASCE DI PERTINENZA DI STRADE DI NUOVA COSTRUZIONE	16
TABELLA 6 VALORI LIMITE DELLE FASCE DI PERTINENZA DI INFRASTRUTTURE ESISTENTI	17
TABELLA 7. FASCE TEMPORALI PER LO SVOLGIMENTO DEI RILEVAMENTI ACUSTICI IN RELAZIONE ALLA TIPOLOGIA DI STRADA	38
TABELLA 8 CLASSIFICAZIONE FONOMETRI	38
TABELLA 9 DATI POSTAZIONI DI RILEVAMENTO	42
TABELLA 10 DATI FLUSSI VEICOLARI RILEVATI.....	43
TABELLA 11 LIVELLI EQUIVALENTI RILEVATI NELLA POSTAZIONE 1 E 2	46
TABELLA 12 VALORI DI L_{AEQ} DEI RICEVITORI DELLA SOLUZIONE 1	55
TABELLA 13 VALORI DI L_{AEQ} DEI RICEVITORI DELLA SOLUZIONE 2.....	58
TABELLA 14 VALORI DI L_{AEQ} DEI RICEVITORI DELLA SOLUZIONE 3.....	61
TABELLA 15 VALORI DI L_{AEQ} RILEVATI E STIMATI.....	62

INDICE MAPPE

MAPPA 1 RAPPRESENTAZIONE L_{AEQ} SOLUZIONE 1 PERIODO DIURNO	53
MAPPA 2 RAPPRESENTAZIONE L_{AEQ} SOLUZIONE 1 PERIODO NOTTURNO	54
MAPPA 3 VALORI DI L_{AEQ} DEI RICETTORI DELLA SOLUZIONE 1	55
MAPPA 4 RAPPRESENTAZIONE L_{AEQ} SOLUZIONE 2 PERIODO DIURNO	56
MAPPA 5 RAPPRESENTAZIONE L_{AEQ} SOLUZIONE 2 PERIODO NOTTURNO	57
MAPPA 6 VALORI DI L_{AEQ} DEI RICETTORI DELLA SOLUZIONE 2	58
MAPPA 7 RAPPRESENTAZIONE L_{AEQ} SOLUZIONE 3 PERIODO DIURNO	59
MAPPA 8 RAPPRESENTAZIONE L_{AEQ} SOLUZIONE 3 PERIODO NOTTURNO	60
MAPPA 9 VALORI DI L_{AEQ} DEI RICETTORI DELLA SOLUZIONE 3	61

INDICE GRAFICI

GRAFICO 1 LIVELLO EQUIVALENTE RILEVATO NELLA POSTAZIONE 1	44
GRAFICO 2 LIVELLO EQUIVALENTE RILEVATO NELLA POSTAZIONE 2	45

INTRODUZIONE

L'inquinamento acustico è dato da un'eccessiva esposizione a suoni e rumori di intensità superiore a 65 decibel. Le attività antropiche sono le principali sorgenti di rumore alle quali l'uomo è esposto nella sua quotidianità e il settore dei trasporti rappresenta la fonte di maggiore entità. Nelle nostre città l'impatto acustico da traffico stradale è la seconda fonte di inquinamento, seconda solo alle emissioni di polveri sottili. Il fenomeno è in continua crescita a causa dell'aumento della domanda di trasporto e del tasso di motorizzazione. L'esposizione prolungata a rumori al di sopra di una certa soglia può causare nel lungo periodo dei danni alla salute dell'uomo. Risulta di fondamentale importanza prevedere una serie di interventi atti a ridurre l'esposizione a questa fonte inquinante. L'adozione di pavimentazioni stradali con superfici più lisce, l'utilizzo di veicoli elettrici e la riduzione delle velocità in area urbana sono delle soluzioni che contribuiscono ad una riduzione del fenomeno ma non forniscono un'azione risolutiva al problema.

Le barriere acustiche sono gli strumenti attualmente disponibili di maggiore efficacia per la mitigazione dell'inquinamento acustico stradale. Si propone di seguito una comparazione, mediante modello di simulazione acustica, di due diverse tipologie di barriere antirumore applicate in un tronco stradale della S.P. 102 all'altezza di Postioma, frazione del comune di Paese. L'attendibilità del modello viene verificata sul campo attraverso rilievi fonometrici del tratto di strada in esame.

Nel primo capitolo vengono trattate le grandezze fondamentali che caratterizzano il suono e i fenomeni che ne governano la propagazione nell'ambiente.

Nel secondo capitolo, con riferimento alle sorgenti acustiche stradali, viene riportato il quadro normativo a livello nazionale che determina i valori limite di esposizione al rumore e le linee guida per la mitigazione dell'inquinamento acustico.

Nel terzo capitolo vengono descritte le principali tecniche di riduzione dell'impatto acustico generato dai flussi veicolari per le infrastrutture stradali.

Nel quarto capitolo viene analizzato il caso studio riguardante il tratto di strada S.P. 102 con riferimento all'effetto di mitigazione delle scarpate inerbite della sezione stradale in trincea che verrà confrontato con il beneficio ottenuto da un'ipotetica sezione stradale a raso con barriere acustiche artificiali.

1. INQUINAMENTO ACUSTICO

1.1 VARIABILI FONDAMENTALI

Il suono è un'onda di pressione con un profilo di intensità periodica che si ripete in modo regolare in un certo intervallo di tempo. Viceversa, il rumore è costituito da un'onda di pressione irregolare, non periodica, che oscilla con molte frequenze diverse tra loro.

In acustica il decibel (dB) è l'unità di misura delle grandezze energetiche del suono come la densità di energia, l'intensità e la potenza sonora.

Il suono, che viene percepito dall'orecchio umano come variazione di pressione sonora, è un'onda creata dalla vibrazione di un corpo in oscillazione che si propaga all'interno di un mezzo materiale senza trasporto di materia. È caratterizzato da alcune grandezze fondamentali quali l'ampiezza, la frequenza, la lunghezza d'onda e la velocità di propagazione.

L'**ampiezza**, che in pratica chiamiamo volume, rappresenta la potenza dell'onda. La percezione del suono sarà tanto più forte quanto è grande l'ampiezza d'onda e viceversa. Tale grandezza viene misurata attraverso il livello di pressione sonora SPL che si basa sulla scala logaritmica dei decibel e si ricava attraverso la seguente formula:

$$SPL = 10 * \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \quad [\text{dB}]$$

dove:

- p è lo scarto quadratico medio della pressione;
- p_0 è il valore di riferimento per la pressione sonora pari a $20 \mu\text{PA}$.

Data la natura complessa delle forme d'onda emesse da più sorgenti all'interno di uno stesso ambiente diventa difficile valutare l'ampiezza media del segnale attraverso il valore massimo istantaneo. Di fatto il valore istantaneo risulterebbe poco rappresentativo della reale percezione umana. Perciò si fa riferimento al valore medio efficace RMS (root mean square):

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T [p(t)]^2 dt}$$

Dove:

- $p(t)$ è la funzione di pressione;
- T è l'intervallo temporale.

La scala dei decibel rappresenta al meglio la reale percezione di un suono poiché la risposta dell'orecchio umano è di tipo logaritmico. Grazie ai primi tentativi di descrizione della relazione tra la portata fisica di uno stimolo e la percezione umana di tale stimolo, da parte di Weber-Fechner nel 1860, si scoprì che la sensazione uditiva è proporzionale al $\log(J/J_0)$ dove J è una grandezza che misura il fenomeno fisico che agisce sull'organo dell'udito espressa in termini di livello (dB) e J_0 è il valore di riferimento pari alla soglia di udibilità. La percezione sonora L_J è data dalla seguente relazione:

$$L_J = 10 \log \left(\frac{J}{J_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

Analogamente correlando l'intensità dell'onda sonora I (W/m^2) alla percezione del suono si ottiene il livello di intensità sonora L_I :

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

- I (W/m^2) intensità sonora della sorgente;
- I_0 (W/m^2) intensità sonora di riferimento corrispondente alla soglia di udibilità.

La percezione di un suono è legata alla frequenza e alla relativa pressione acustica. Questo vuol dire che data una pressione sonora di 0 dB quest'ultima è udibile solo se la frequenza è maggiore o uguale a 1000 Hz. Aumentando il livello di pressione sonora potremmo percepire un suono ad una frequenza inferiore.

La **frequenza** (f) di un'onda sonora è data dal numero di oscillazioni in un dato tempo e si ricava attraverso la seguente espressione:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [\text{Hz}]$$

dove ω è la *velocità angolare*.

L'unità di misura della frequenza è l'Hertz che corrisponde ad un'oscillazione completa in un periodo della durata di un secondo.

Un suono sarà tanto più acuto quanto più numerose sono le oscillazioni. L'orecchio umano può percepire un intervallo di oscillazioni compreso tra 16 e 20000 Hz.

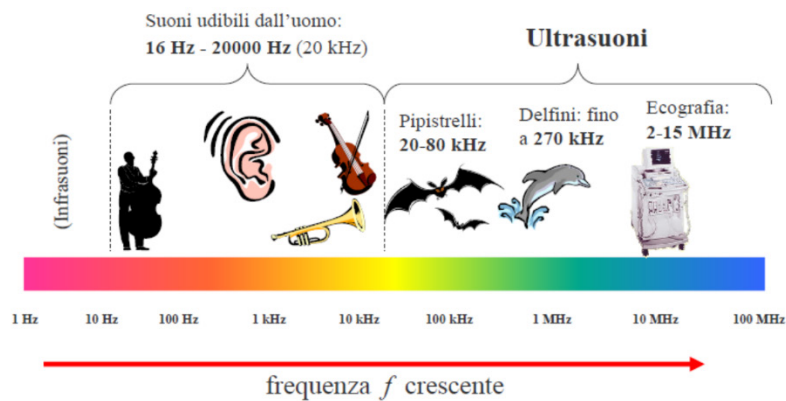


Figura 1 Intervallo di frequenze udibili

La **lunghezza d'onda** (λ) è la distanza che separa due massimi consecutivi di un'onda sinusoidale nel suo sviluppo spaziale in un dato istante. Si calcola come rapporto tra la velocità del suono c_0 e la frequenza:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad [\text{dB}]$$

La **velocità** del suono c_0 è dipendente dalla temperatura dell'aria e si calcola attraverso la seguente formula:

$$c_0 = \sqrt{\gamma * R * T} \quad [\text{m/s}]$$

- γ *coefficiente di dilatazione adiabatica* ($\gamma=1.41$);
- R *costante universale dell'aria* ($R=287 \text{ [J/KgK]}$);
- T *temperatura assoluta* ($T=273+t(K)$).

Esiste un rapporto di proporzionalità inversa tra la frequenza e la lunghezza d'onda. Al raddoppio della frequenza si dimezza la lunghezza d'onda e viceversa. Il rapporto risulta costante e uguale alla velocità di propagazione dell'onda.

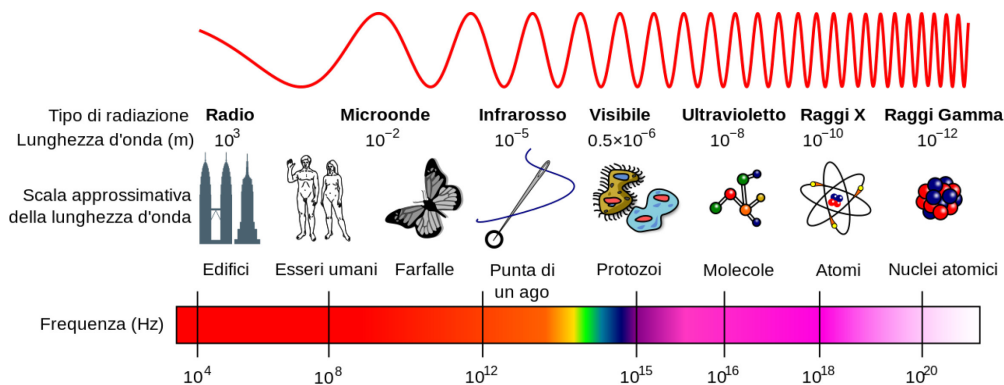


Figura 2 Relazione fra frequenza e lunghezza d'onda

L'inquinamento acustico ambientale ha origine da un insieme di sorgenti acustiche. L'energia emessa da tali sorgenti nell'unità di tempo rappresenta la potenza sonora. L'unità di misura è il Watt [W]. Questa grandezza fisica, essendo indipendente dall'ambiente in cui è posizionata, permette di descrivere univocamente le caratteristiche di una fonte acustica. Risulta utile correlare la grandezza fisica W alla percezione umana attraverso il livello di potenza sonora L_w che si ricava dalla seguente espressione:

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) [\text{dB}]$$

Dove:

- W è la potenza sonora della sorgente;
- W_0 è la potenza sonora di riferimento pari a 10^{-12} watt corrispondente alla soglia di udibilità alla frequenza di 1000 Hz.

Sorgente di rumore	Livello sonoro (dB)	Percezione umana
Fruscio di foglie, bisbiglio, ambiente abitativo silenzioso di notte	20-25	Calma, silenzio
Ambiente abitativo silenzioso di notte, biblioteca, ambiente rurale notte	25-35	
Ambiente domestico di giorno, strada tranquilla, conversazione tranquilla	40-50	Possibile deconcentrazione, inizio disturbi del sonno
Conversazione normale, ufficio rumoroso, strada trafficata, ristorante, Tv e radio ad alto volume	60-70	Interferenza nelle conversazioni, fastidio, telefono difficile da usare
Sveglia, asciugacapelli, autostrada	80	Fastidio
Camion nelle vicinanze, macchinari industria e artigianato, passaggio treno, motosega	90	Molto fastidio
Discoteca, carotatrice, concerto rock, autobetoniera, martello pneumatico	100-110	
Sirena, clacson a 1 metro,	120	Dolore
Decollo aereo	130	

Tabella 1 Livelli di potenza delle sorgenti sonore

Data una sorgente puntiforme le onde sonore generate sono di tipo sferico. L'energia emessa si distribuirà su di una superficie sempre maggiore al propagarsi dell'onda. L'intensità sonora è quindi proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente e pari a:

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Dove:

- W è la potenza sonora della sorgente [W];
- d è la distanza dalla sorgente [m].

Il livello di potenza sonora di una sorgente varia in funzione del fattore di direttività Q che è pari al rapporto tra l'intensità sonora I in un determinato punto dello spazio alla distanza r dalla sorgente che emette con potenza W e I_0 ovvero l'intensità sonora di riferimento. Più si focalizza la direzione di una sorgente, tanto maggiore sarà la sua potenza. L'indice di

direttività q esprime l'aumento in decibel del livello di potenza dovuto alla direttività della sorgente considerata rispetto al livello che, a parità di potenza sonora, si ottiene nello stesso punto dello spazio se la sorgente fosse omnidirezionale. La sua espressione è la seguente:

$$q = 10 \log Q = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ [dB]}$$

In funzione delle differenti configurazioni che si possono ottenere tra la sorgente e la presenza di superfici riflettenti si ricavano diversi fattori di direttività.

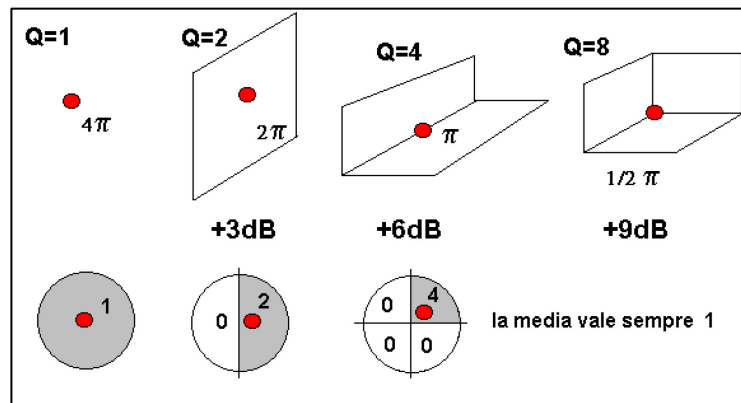


Figura 3 Fattori di direttività

Conoscendo il coefficiente di direzionalità e la potenza della sorgente puntiforme si può ricavare l'intensità sonora ad una qualsiasi distanza d da quest'ultima attraverso la seguente formula:

$$I = \frac{WQ}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Il livello di potenza sonora di una sorgente si misura attraverso degli strumenti che simulano la capacità dell'orecchio umano di percepire il rumore alle varie frequenze. Essendo la sensibilità dell'apparato uditivo non costante a tutte le frequenze è necessario ricostruire la sensibilità di questo organo per ciascun valore di frequenza. Per fare ciò si utilizzano le isofoniche ossia delle curve di uguale intensità sonora che rappresentano la pressione

acustica al variare della frequenza. Il phon determina il livello di pressione sonora che il suono di riferimento alla frequenza di 1KHz deve avere al fine di provocare la stessa sensazione uditiva di un suono con andamento sinusoidale ad una determinata frequenza.

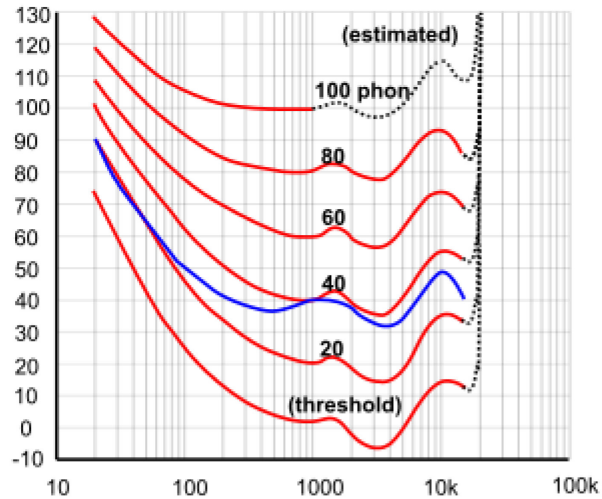


Figura 4 Curve isofoniche

I fonometri sono degli strumenti in grado di misurare il livello di pressione acustica. Il dato ottenuto deve essere mediato attraverso le curve di ponderazione. Esistono tre tipologie di curve di ponderazione, la tipo A,B e C. La curva tipo A, che è costruita sull'isofonica a 40 phon, è la più utilizzata e corrisponde ad un filtro avente una risposta in frequenza le cui componenti del segnale sono attenuate di una quantità pari alla differenza fra il valore in dB della isofonica a 40 phon e 40 dB. Questo tipo di ponderazione rispecchia al meglio la sensibilità uditiva dell'orecchio umano alle basse frequenze. Di conseguenza si ottiene una forte attenuazione delle frequenze inferiori a 1KHz e un'accentuazione di quelle comprese tra 1KHz e 5KHz.

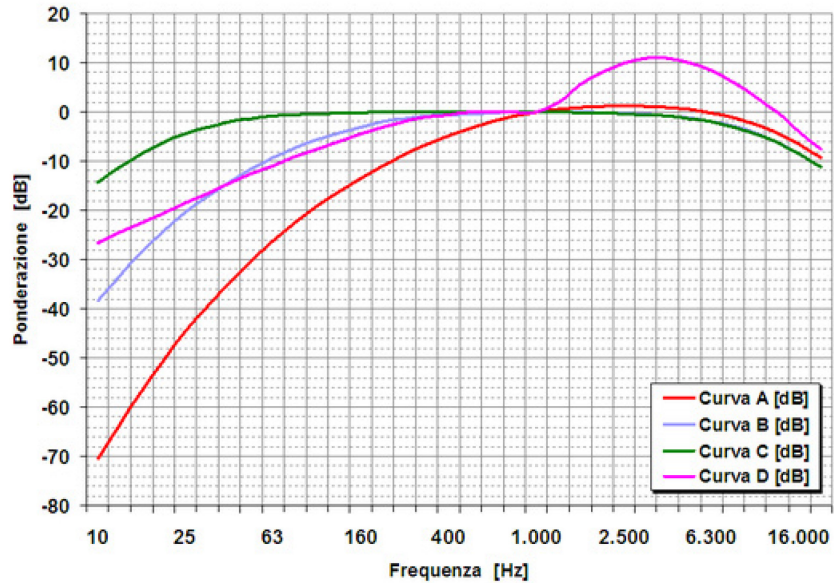


Figura 5 Curve di ponderazione

1.2 IL LIVELLO EQUIVALENTE

Il livello di pressione acustica di un rumore variabile nel tempo misurato dal fonometro è espresso in termini di livello equivalente (L_{eq}) ponderato A, ovvero quell'ipotetico rumore costante che produce, nel medesimo intervallo di tempo, la stessa quantità di energia sonora del rumore reale ponderato secondo la curva di tipo A. Attraverso questo indicatore possiamo definire con un solo dato un livello sonoro variabile per periodi di lunga durata. I fonometri forniscono la misura del livello sonoro secondo una determinata costante. Per il calcolo del livello equivalente corrispondente al numero totale di campioni rilevati in un determinato arco temporale è necessario applicare la seguente formula:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^N N_i 10^{\frac{L_i}{10}}}{N} \right) \quad [\text{dB}]$$

Con:

- L_i Livello campionato in dB;
- N_i n° di campioni rilevati per il livello L_i .

Per caratterizzare eventi sonori di breve durata si utilizza il **SEL** ovvero il livello sonoro del singolo evento. Il SEL è definito come il livello di rumore continuo della durata di un secondo che possiede lo stesso contenuto energetico dell'evento considerato, ovvero il livello sonoro che avrebbe il singolo evento se la sua energia sonora fosse concentrata nella durata di un secondo.

L'espressione algebrica del SEL è la seguente:

$$SEL = 10 \log \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{(L_p(t)/10)} dt \right) \quad [\text{dB}]$$

Dove $L_p(t)$ rappresenta il livello di pressione all'istante t .

Dato un insieme di eventi sonori dei quali si conoscono i relativi SEL è possibile calcolare il livello equivalente, sull'intervallo temporale T considerato, come:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^N 10^{\frac{SEL_i}{10}}}{T} \right) \quad [\text{dB}]$$

La relazione che correla il SEL e il $L_{eq,T}$ è:

$$SEL = L_{eq,T} + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

Dove:

- T è l'intervallo di tempo a cui si riferisce $L_{eq,T}$;
- T_0 è il tempo di riferimento di un secondo.

1.3 FENOMENI DI INTERAZIONE ACUSTICA

Nella sua propagazione il suono può imbattersi in vari ostacoli. Le interazioni che si sviluppano dipendono dalle dimensioni e tipologie dei materiali degli oggetti incontrati.

La riflessione è il fenomeno acustico che si verifica quando l'onda sonora incontra un ostacolo e cambiando direzione torna indietro. La direzione di ritorno dipenderà dall'angolo di incidenza tra la normale alla superficie e la direzione di propagazione dell'onda. In particolare, una superficie convessa ha la proprietà di diffondere in un più ampio campo l'onda riflettente. Questo fenomeno, in ambienti chiusi, può dar origine all'eco ovvero una percezione sfalsata in ordine temporale dell'onda sonora riflessa che, percorrendo più strada, raggiunge in un secondo momento l'ascoltatore rispetto all'onda diretta. La percezione di onde sovrapposte di tipo dirette e riflesse da origine al riverbero. L'effetto sarà tanto maggiore quanto più paragonabili sono le dimensioni di lunghezza d'onda e di irregolarità della superficie dell'ostacolo. Nell'edilizia architettonica si cerca di evitare questa sovrapposizione delle onde in modo tale da migliorare il confort acustico degli ambienti.

La diffrazione è quel fenomeno per cui un'onda sonora è in grado di oltrepassare un ostacolo raggiungendo punti inaccessibili a onde di tipo rettilinee. In prima fase avviene una rottura dell'onda che successivamente si ricompone al di là dell'ostacolo. Se la dimensione dell'ostacolo risulta inferiore alla lunghezza d'onda quest'ultima avrà una maggiore capacità nell'aggirare il corpo stesso. Un analogo ragionamento può essere effettuato nel caso di passaggio dell'onda sonora attraverso una fenditura.

A parità di dimensioni, un corpo è più facilmente aggirabile da onde più gravi ovvero con lunghezza d'onda maggiore. Nel caso di suoni acuti è possibile determinare la direzione della sorgente di origine. Questa è una diretta conseguenza della scarsa capacità dei suoni acuti di oltrepassare gli oggetti.

La diffrazione, al passaggio delle onde sul bordo di un corpo, causa una curvatura puntuale della direzione di propagazione del suono. In funzione della geometria dell'ostacolo le onde possono essere ridirezionate all'interno della zona d'ombra dell'oggetto. Questo fenomeno è di fondamentale importanza nella progettazione delle barriere acustiche. Attraverso il numero di Fresnel N è possibile quantificare la diffrazione:

$$N = 2 * \frac{D}{L}$$

Dove:

- *D è la differenza di lunghezza del percorso diffratto da quello diretto del suono per raggiungere il ricevitore;*
- *L è la lunghezza d'onda del suono.*

La direzione di propagazione di un suono varia a seconda della natura del mezzo in cui si diffonde. Ad ogni cambiamento di mezzo si avrà una variazione della direzione dell'onda.

Questo fenomeno prende il nome di rifrazione.

2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

Da un punto di vista normativo la legge quadro sull'inquinamento acustico del 26 ottobre 1995, n. 447 stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico. La legge fa particolare riferimento alle mansioni spettanti agli organi competenti e introduce alcune terminologie che saranno utili alla comprensione del quadro normativo.

Definizioni:

- Ambiente abitativo: *“Ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o di comunità ed utilizzato per le diverse attività umane”* (ad eccezione delle attività produttive);
- Sorgenti sonore fisse: *“Gli impianti tecnici degli edifici e le altre installazioni unite agli immobili anche in via transitoria il cui uso produca emissioni sonore”*. Sono comprese nella definizione anche le *“infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali, marittime, industriali, artigianali, commerciali ed agricole”*, nonché *“i parcheggi; le aree adibite a stabilimenti di movimentazione merci; i depositi dei mezzi di trasporto di persone e merci; le aree adibite ad attività sportive e ricreative”*;
- Sorgenti sonore mobili: *“tutte le sorgenti sonore non comprese nelle sorgenti sonore fisse”*;
- Valori limite di emissione: *“Il valore massimo di rumore che può essere emesso da una sorgente sonora, misurato in prossimità della sorgente stessa”*;
- Valori limite di immissione: *“Valore massimo di rumore che può essere immesso da una o più sorgenti sonore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno, misurato in prossimità dei ricettori”*.

I valori limite di immissione sono distinti in:

- valori limite assoluti, determinati con riferimento al livello equivalente di rumore ambientale;
- valori limite differenziali, determinati con riferimento alla differenza tra il livello equivalente di rumore ambientale ed il rumore residuo;
- Valori di attenzione: *“Valore di rumore che segnala la presenza di un potenziale rischio per la salute umana o per l'ambiente”*;

- Valori di qualità: *“Valori di rumore da conseguire nel breve, nel medio e nel lungo periodo con le tecnologie e le metodologie di risanamento disponibili, per realizzare gli obiettivi di tutela previsti dalla presente legge”.*

I comuni sulla base della legge n° 447/1995 suddividono il territorio comunale in sei classi aventi destinazione d'uso differente. Viene di seguito proposta la classificazione territoriale secondo il D.P.C.M. 14/11/1997:

- Classe I: Aree particolarmente protette nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.;
- Classe II: Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale interessate da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali ed artigianali;
- Classe III: Aree urbane di tipo misto interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali: aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici;
- Classe IV: Aree di intensa attività umana interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali ed uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali; le aree con limitata presenza di piccole industrie;
- Classe V: Aree prevalentemente industriali con scarsità di abitazioni;
- Classe VI: Aree esclusivamente industriali prive di insediamenti abitativi.

Per ogni destinazione vengono individuati i seguenti tre valori limite dal D.P.C.M. 01/03/1991:

- Limite di immissione assoluto;

	Classi di destinazione d'uso del territorio	Tempo di riferimento diurno L_{eq} [dB(A)]	Tempo di riferimento notturno L_{eq} [dB(A)]
I	Aree particolarmente protette	50	40
II	Aree prevalentemente residenziali	55	45
III	Aree di tipo misto	60	50
IV	Aree di intensa attività umana	65	55
V	Aree prevalentemente industriali	70	60
VI	Aree esclusivamente industriali	70	70

Tabella 2 Limiti di immissione

- Limite di emissione;

	Classi di destinazione d'uso del territorio	Tempo di riferimento diurno L_{eq} [dB(A)]	Tempo di riferimento notturno L_{eq} [dB(A)]
I	Aree particolarmente protette	45	35
II	Aree prevalentemente residenziali	50	40
III	Aree di tipo misto	55	45
IV	Aree di intensa attività umana	60	50
V	Aree prevalentemente industriali	65	55
VI	Aree esclusivamente industriali	65	65

Tabella 3 Limiti di emissione

- Valori di qualità.

	Classi di destinazione d'uso del territorio	Tempo di riferimento diurno L_{eq} [dB(A)]	Tempo di riferimento notturno L_{eq} [dB(A)]
I	Aree particolarmente protette	47	37
II	Aree prevalentemente residenziali	52	42
III	Aree di tipo misto	57	47
IV	Aree di intensa attività umana	62	52
V	Aree prevalentemente industriali	67	57
VI	Aree esclusivamente industriali	70	70

Tabella 4 Valori di qualità

Per quanto riguarda le immissioni sonore derivanti dalle infrastrutture stradali si fa riferimento al d.P.R. n° 142 del 30/03/2004 “Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell’inquinamento acustico derivante dal traffico stradale” che prevede la definizione di fasce di pertinenza. All’interno di questa fascia valgono, per la sorgente acustica stradale i seguenti valori limite definiti dal d.P.R. 142/2004:

- Valore limite per strade di nuova costruzione;

Tipo di strada (secondo codice della strada)	Sottotipi a fini acustici (secondo d.M. 05/11/2001 - Norme funz. e geom. per la costruzione delle strade)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno [dB(A)]	Notturmo [dB(A)]	Diurno [dB(A)]	Notturmo [dB(A)]
A autostrada		250	50	40	65	55
B extraurbana principale		250	50	40	65	55
C extraurbana secondaria	C 1	250	50	40	65	55
	C 2	150	50	40	65	55
D urbana di scorrimento		100	50	40	65	55
E urbana di quartiere		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in Tabella C allegata			
F locale		30	al d.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			

* per le scuole vale il solo limite diurno

Tabella 5 Valori limite per le fasce di pertinenza di strade di nuova costruzione

- valore limite per strade esistenti.

Tipo di strada (secondo codice della strada)	Sottotipi a fini acustici (secondo Norme CNR 1980 e direttive PUT)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno [dB(A)]	Notturmo [dB(A)]	Diurno [dB(A)]	Notturmo [dB(A)]
A autostrada		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
B extraurbana principale		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
C extraurbana secondaria	Ca (strade a carreggiate separate e tipo IV CNR 1980)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
	Cb (tutte le altre strade extraurbane secondarie)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		50 (fascia B)			65	55
D urbana di scorrimento	Da (strade a carreggiate separate e interquartiere)	100	50	40	70	60
	Db (tutte le altre strade urbane di scorrimento)	100	50	40	65	55
E urbana di quartiere		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in Tabella C allegata al d.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995			
F locale		30				

Tabella 6 Valori limite delle fasce di pertinenza di infrastrutture esistenti

Per le altre tipologie di sorgenti acustiche all'interno delle fasce di rispetto bisogna verificare i valori limite di immissione ed emissione definiti dal d.P.C.M. 14/11/1997.

Qualora non fosse possibile rispettare i limiti prescritti è necessario procedere ad interventi diretti sui recettori assicurando il rispetto dei seguenti limiti:

- 35 dB(A) L_{eq} notturno per ospedali, case di cura e case di riposo;
- 40 dB(A) L_{eq} notturno per tutti gli altri ricettori di carattere abitativo;
- 45 dB(A) L_{eq} diurno per le scuole.

Il decreto del 16 marzo 1998 stabilisce le tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento da rumore specificando le caratteristiche prestazionali delle strumentazioni di rilievo e le metodologie da applicare in funzione del contesto e della tipologia di sorgente.

Inoltre, individua le seguenti norme tecniche per l'esecuzione delle misure:

1. *“Prima dell'inizio delle misure è indispensabile acquisire tutte le informazioni che possono condizionare la scelta del metodo, dei tempi e delle posizioni di misura. I rilievi di rumorosità devono pertanto tenere conto delle variazioni sia dell'emissione sonora delle sorgenti che della loro propagazione. Devono essere rilevati tutti i dati che conducono ad una descrizione delle sorgenti che influiscono sul rumore ambientale nelle zone interessate dall'indagine. Se individuabili, occorre indicare le maggiori sorgenti, la variabilità della loro emissione sonora, la presenza di componenti tonali e/o impulsive e/o di bassa frequenza.*
2. *“La misura dei livelli continui equivalenti di pressione sonora ponderata "A" nel periodo di riferimento ($L_{Aeq,TR}$)*

$$T_R = \sum_{i=1}^n (T_0)_i$$

può essere eseguita:

a) per integrazione continua Il valore di $L_{Aeq,TR}$ viene ottenuto misurando il rumore ambientale durante l'intero periodo di riferimento, con l'esclusione eventuale degli intervalli in cui si verificano condizioni anomale non rappresentative dell'area in esame;

b) con tecnica di campionamento Il valore $L_{Aeq,TR}$ viene calcolato come media dei valori del livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo agli interventi del tempo di osservazione $(T_0)_i$. Il valore di $L_{Aeq,TR}$ è dato dalla relazione:”

$$L_{Aeq,TR} = 10 * \log \left[\frac{1}{T_R} \sum_{i=1}^n (T_0)_i * 10^{0,1L_{Aeq}(T_0)_i} \right] \quad [\text{dB(A)}]$$

3. *“La metodologia di misura rileva valori di ($L_{Aeq,TR}$) rappresentativi del rumore ambientale nel periodo di riferimento, della zona in esame, della tipologia della sorgente e della propagazione dell'emissione sonora. La misura deve essere arrotondata a 0,5 dB.”*

4. *“Il microfono da campo libero deve essere orientato verso la sorgente di rumore; nel caso in cui la sorgente non sia localizzabile o siano presenti più sorgenti deve essere usato un microfono per incidenza casuale. Il microfono deve essere montato su apposito sostegno e collegato al fonometro con cavo di lunghezza tale da consentire agli operatori di porsi alla distanza non inferiore a 3 m dal microfono stesso.”*

5. *“Misure all'interno di ambienti abitativi.
Il microfono della catena fonometrica deve essere posizionato a 1,5 m dal pavimento e ad almeno 1 m da superfici riflettenti. Il rilevamento in ambiente abitativo deve essere eseguito sia a finestre aperte che chiuse, al fine di individuare la situazione più gravosa. Nella misura a finestre aperte il microfono deve essere posizionato a 1 m dalla finestra; in presenza di onde stazionarie il microfono deve essere posto in corrispondenza del massimo di pressione sonora più vicino alla posizione indicata precedentemente. Nella misura a finestre chiuse, il microfono deve essere posto nel punto in cui si rileva il maggior livello della pressione acustica.”*

6. *“Misure in esterno.
Nel caso di edifici con facciata a filo della sede stradale, il microfono deve essere collocato a 1 m dalla facciata stessa. Nel caso di edifici con distacco dalla sede stradale o di spazi liberi, il microfono deve essere collocato nell'interno dello spazio fruibile da persone o comunità e, comunque, a non meno di 1 m dalla facciata dell'edificio. L'altezza del microfono sia per misure in aree edificate che per misure in altri siti, deve essere scelta in accordo con la reale o ipotizzata posizione del ricettore.”*

7. *“Le misurazioni devono essere eseguite in assenza di precipitazioni atmosferiche, di nebbia e/o neve; la velocità del vento deve essere non superiore a 5 m/s. Il microfono deve essere comunque munito di cuffia antivento. La catena di misura deve essere compatibile con le condizioni meteorologiche del periodo in cui si effettuano le misurazioni e comunque in accordo con le norme CEI 29-10 ed EN 60804/1994.”*

8. *“Rilevamento strumentale dell'impulsività dell'evento.*

Ai fini del riconoscimento dell'impulsività di un evento, devono essere eseguiti i rilevamenti dei livelli LAImax e LASmax per un tempo di misura adeguato. Detti rilevamenti possono essere contemporanei al verificarsi dell'evento oppure essere svolti successivamente sulla registrazione magnetica dell'evento.”

3.TECNICHE DI MITIGAZIONE DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO

Gli interventi di mitigazione del rumore da traffico stradale possono essere classificati, in linea generale, nelle seguenti tre macrocategorie in accordo con il decreto ministeriale del 29 novembre 2000:

- interventi alla sorgente che agiscono direttamente sulle cause di origine del rumore. Nell'ambito dei trasporti una possibile soluzione è data dall'utilizzo di manti di usura con "superficie liscia" al posto delle tradizionali pavimentazioni stradali. Dall'interazione tra pneumatico e pavimentazione si originerà un rumore di minore intensità.
- gli interventi sulla via di propagazione del rumore che agiscono come schermo interposto tra la sorgente e il ricettore. La diffusione dell'utilizzo di barriere acustiche per la riduzione del rumore è da imputare alla loro efficacia nonostante gli elevati costi di installazione. La classica colorazione verde svolge una funzione mimetica dei confronti dell'ambiente circostante. Infatti, uno dei maggiori problemi nell'adozione di questa soluzione è l'impatto visivo che comporta l'intera struttura;
- opere di miglioramento acustico al ricettore: sono degli interventi di tipo puntuale con efficacia limitata alla singola area di intervento. La tecnica prevede il miglioramento del confort acustico degli ambienti interni attraverso l'aumento del potere fonoisolante delle facciate degli edifici esposte.

Nell'ambito delle infrastrutture di trasporto stradali gli interventi sopra citati appartengono alla famiglia degli interventi di tipo passivo, ovvero quelle soluzioni che fungono da ostacolo alla propagazione del suono. Esistono anche delle tecniche di tipo attivo finalizzate a ridurre le cause di origine delle sorgenti sonore. Queste soluzioni vengono poco spesso utilizzate perché forniscono un effetto di mitigazione inferiore rispetto alle tecniche passive.

Un'ulteriore classificazione degli interventi di riduzione del rumore può essere effettuata in funzione della tipologia di approccio.

Si individuano le seguenti categorie:

- interventi preventivi: insieme di soluzioni applicabili in fase progettuale con lo scopo di ridurre il rumore alla sorgente prevenendo la nascita di problematiche legate all'inquinamento acustico. In questa fase il progettista, avendo una maggiore libertà progettuale, può individuare delle soluzioni che minimizzano l'impatto acustico dell'infrastruttura. Per esempio, l'adozione di un tracciato stradale in trincea rispetto a una via sopraelevata o a raso comporta una minore estensione della fascia di disturbo acustica dovuta all'infrastruttura;
- interventi di risanamento: soluzioni indirizzate alla mitigazione di problematiche sorte successivamente alla realizzazione dell'opera.

3.1 INTERVENTI ATTIVI

L'esposizione all' inquinamento acustico si verifica principalmente in ambiente urbano. I veicoli stradali come autovetture, motocicli e camion ne sono la principale causa. Il rumore generato dal passaggio di questi ultimi è da attribuire alle componenti meccaniche, al rotolamento degli pneumatici e alla resistenza aerodinamica. Queste fonti sonore sono direttamente proporzionali alle dimensioni, alle masse e alle velocità dei veicoli stessi.

Il rumore prodotto dal motore può essere contenuto con rivestimenti fonoassorbenti delle sue parti esterne e con silenziatori installati nello scarico.

L'adozione di pneumatici con apposite nervature attenua il rumore da contatto tra ruota e pavimentazione con efficacia inversamente proporzionale allo stato di usura del battistrada. La regolamentazione del traffico stradale attraverso la restrizione della circolazione per fasce temporali o spaziali di determinate categorie di veicoli agisce in maniera indiretta sull'emissione sonora prodotta dai mezzi di trasporto. La mitigazione ottenuta è da attribuire alla riduzione del numero di veicoli circolanti in area urbana. Non è sempre possibile adottare questa tecnica per mancanza, per esempio, di percorsi alternativi economicamente sostenibili o per un'eccessiva riduzione dell'accessibilità dei centri urbani alla popolazione.

3.2 INTERVENTI PASSIVI

Gli interventi di mitigazione passiva vengono spesso preferiti a quelli attivi per ragioni tecniche ed economiche. Di seguito sono riportate le soluzioni più comunemente utilizzate:

- Pavimentazione fonoassorbente: grazie all'utilizzo di bitumi modificati si possono ottenere dei conglomerati bituminosi caratterizzati da un'elevata porosità. I vuoti d'aria presenti, una volta incanalata l'onda, dissipano l'energia sonora in calore;
- Interventi sugli edifici: l'installazione di materiali con proprietà fonoisolanti e assorbenti permette di migliorare il confort acustico degli ambienti civili interni;
- Barriere antirumore: oggetti aventi la funzione di schermare le onde sonore provenienti da una sorgente. Questa tecnica è indicata nel caso in cui non sia possibile intervenire direttamente in modo efficace alla fonte del disturbo.

In valore assoluto, la terza soluzione presentata, fornisce una migliore efficacia. L'*insertion loss* (perdita di inserzione) si calcola come differenza dei livelli di pressione acustica prima e dopo l'installazione della barriera.

Ai fini del suo funzionamento, una barriera antirumore deve rispondere ai seguenti requisiti:

- Capacità di isolamento e/o assorbimento acustico;
- resistenza meccanica agli agenti atmosferici e agli urti;
- resistenza chimica agli agenti atmosferici;
- minima riflessione luminosa;
- antivibrazione;
- semplicità di installazione.

Da un punto di vista progettuale bisogna definire la dimensione e la posizione della barriera che dipenderà dalla distanza e dall'altezza del ricettore dalla fonte sonora. È possibile ricavare l'altezza minima della barriera che garantisce la protezione del ricettore dall'esposizione al rumore con la seguente formula:

$$h_{min} = \frac{H*(0.5*L+B)}{e} \quad [m]$$

Con:

- **H** distanza tra piano stradale e altezza edificio;
- **e** distanza tra asse stradale e facciata edificio;
- **L** larghezza strada;
- **B** distanza tra ciglio stradale e barriera antirumore.

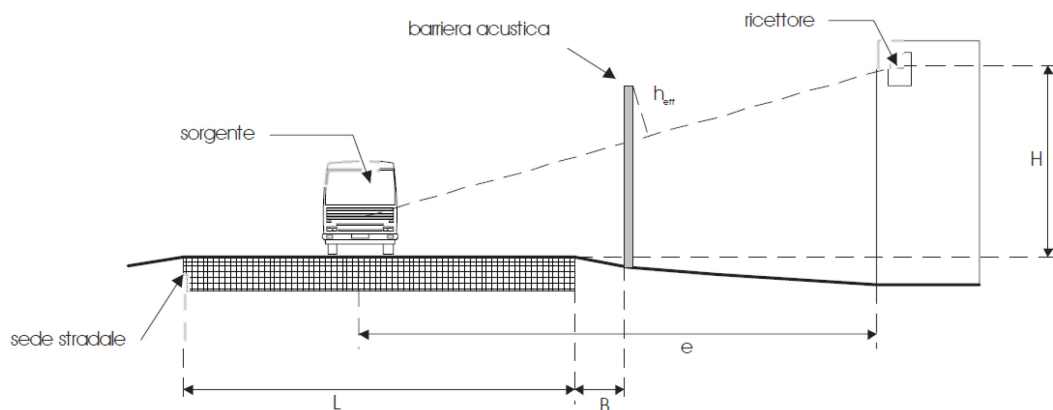


Figura 6 Schema per il dimensionamento di una barriera acustica

Le barriere acustiche schermano il ricettore attraverso il fenomeno di diffrazione dell'onda incidente. Nell'ipotesi di sorgente puntiforme e schermo infinitamente lungo l'*insertion loss* è quantificabile con la seguente formula:

$$\Delta L = 5 + 20 * \log_{10} \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right)$$

Con:

- **N** numero di Fresnel $N = 2 \frac{(a+b-d)}{\lambda}$;
- **λ** lunghezza d'onda.

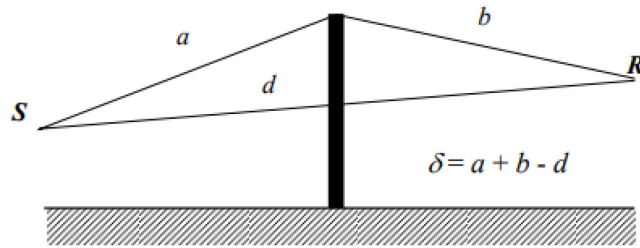


Figura 7 Schema di percorso dell'onda diretta e diffratta

Un'opportuna sagomatura del bordo superiore della barriera può migliorare l'effetto schermante. Questi oggetti fungendo da dispositivi diffrattivi permettono degli incrementi mitigativi modesti.

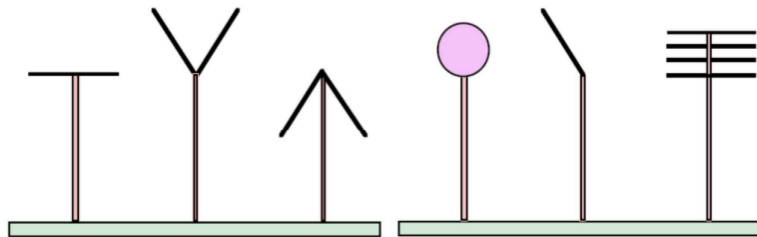


Figura 8 Schemi funzionali per la mitigazione dell'effetto di diffrazione

In funzione dei materiali utilizzati le barriere antirumore vengono classificate nelle seguenti categorie:

- Barriere antirumore artificiali: sono realizzate con materiali ad alta densità come legno, vetro e ferro con la possibilità di essere abbinata a materiali porosi;
- Barriere naturali: realizzate attraverso terrapieni inerbiti;
- Barriere Vegetali: fascia di terreno alberata con vegetazione molto fitta.

3.3 BARRIERE ACUSTICHE ARTIFICIALI

I materiali utilizzati per la realizzazione dei pannelli costituenti la barriera acustica si differenziano in due categorie in funzione della resistenza che oppongono al passaggio di un'onda sonora.

Si distinguono i materiali:

- fonoisolanti per la loro impermeabilità al suono. L'elevata densità conferisce a questi materiali la capacità di riflettere le onde sonore incidenti;
- fonoassorbenti per la capacità dissipativa del suono. La bassa densità del materiale è dovuta alla presenza di vuoti d'aria che incanalano l'onda sonora trasformando l'energia trasportata in calore.

Le barriere acustiche sono realizzate generalmente con materiale fonoisolante alle quali può essere abbinato il potere fonoassorbente dei materiali porosi.

La struttura è composta da pannelli di vario materiale e misure fissati ad un telaio in acciaio zincato imbullonato alla base con la fondazione opportunamente dimensionata.

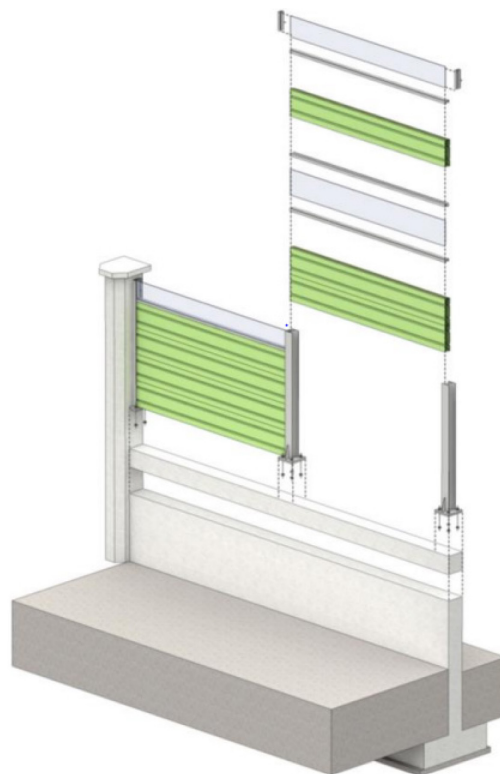


Figura 9 Elementi costruttivi barriera acustica

Di seguito vengono riportate le tipologie di pannelli più frequentemente utilizzati:

- Pannelli in lamiera metallica di alluminio: sono protetti dalla corrosione da una verniciatura in polvere poliestere. La superficie del pannello rivolta verso la sorgente è forata in modo tale da incanalare l'onda sonora all'interno dove si trova uno strato di fibre minerali o di vetro ad alta densità. Si contraddistingue per la buona qualità data dalla leggerezza e resistenza alla corrosione in relazione al prezzo;



Figura 10 Barriera con pannelli in lamiera metallica in alluminio

- Pannelli in legno: sono realizzati con legno di buona qualità impregnato con sali organici. La superficie rivolta verso la sorgente presenta delle decorazioni a forma di griglia in legno mentre la parte posteriore è costituita da tavole ad incastro. All'interno il pannello è composto da uno strato di fibre minerali protette da un telo siliconico. Dato gli elevati costi, la soluzione viene utilizzata solo nei casi in cui sia necessario garantire un ottimo inserimento ambientale in particolari contesti paesaggistici;



Figura 11 Barriera con pannelli in legno

- Pannelli a struttura portante in calcestruzzo armato e parte fonoassorbente in materiale alleggerito: sono costituiti da una lastra portante in calcestruzzo armato abbinata, dal lato della sorgente, ad uno strato di argilla espansa fonoassorbente;



Figura 12 Barriera con pannelli in calcestruzzo e argilla espansa

- Pannelli in polimetilmetacrilato: sono realizzati con lastre di plexiglass trasparente dello spessore minimo di 20 mm che garantisce una maggiore visibilità paesaggistica e una migliore sicurezza data dalla riduzione di formazione di ghiaccio nelle zone d'ombra della sede stradale.

A differenza delle altre tipologie, i pannelli in plexiglass non hanno proprietà fonoassorbenti;



Figura 13 Barriera in PMMA

- Pannelli trasparenti risonanti in policarbonato: sono realizzati mediante due lastre in policarbonato, fissate in un telaio in alluminio e separate da un'intercapedine d'aria. La lastra esposta alla sorgente sonora è forata. Nonostante i costi elevati, questi pannelli sono apprezzati per le capacità fonoassorbenti, oltre che isolanti e per la trasparenza.



Figura 14 Barriera con pannelli in policarbonato

3.4 BARRIERE NATURALI

Le barriere naturali offrono una soluzione ecologica e di minor impatto ambientale rispetto alla classica barriera acustica. L'utilizzo di una fitta vegetazione arborea funge da schermo alle onde sonore che attraversando le folte chiome dissipano la propria energia sotto forma di calore. Gli effetti di assorbimento dipendono dall'altezza e profondità dello schermo protettivo. Data la forte disomogeneità dell'apparato fogliare in termini di densità, dimensione e durata di fogliazione si può ottenere una mitigazione acustica paragonabile alle soluzioni più tradizionali attraverso delle ampie fasce piantumate. Da un punto di vista pratico, l'applicabilità di questa tecnica è legata alla disponibilità di fasce non urbanizzate sufficientemente ampie a lato strada. Per questi motivi le barriere naturali sono poco utilizzate per interventi di risanamento acustico su infrastrutture esistenti.

In relazione allo schema funzionale si distinguo due categorie di barriere:

- Quinte vegetali: barriera acustica realizzata mediante piantumazione di alberi, in singola fila, di una o più specie a rapida crescita. L'effetto schermante, che è dato dalla disposizione perpendicolare delle foglie alla direzione di propagazione dell'onda sonora, è raggiungibile solo a completa formazione di un fronte continuo e omogeneo delle chiome che richiede diversi anni;



Figura 15 Barriera con quinte vegetali

- Rilevati con copertura vegetale: sono realizzati mediante cumuli lineari in terra disposti parallelamente al bordo strada ricoperti con vegetazione erbacea e arborea. Il terreno inerbito, presentando una maggiore omogeneità rispetto alle chiome arboree, garantisce una migliore capacità fonoassorbente. Nella pratica, la difficoltà di inserimento di un simile schema funzionale a lato strada ha portato allo sviluppo di una soluzione più compatta in termini di consumo del suolo. Le terre armate, sfruttando l'inserimento di reti elettrosaldate all'interno del terreno, permettono la realizzazione di un cumulo a sezione trapezoidale molto più compatta rispetto ad un rilevato non rinforzato. La semina di vegetazione erbacea a lento accrescimento nella superficie del rilevato, non richiedendo particolari manutenzioni, conferisce una maggiore competitività a questa soluzione naturale nei confronti delle più pratiche tecniche convenzionali;



Figura 16 Sezione stradale in trincea con scarpate in terra rinforzata

4. CASO STUDIO – VIA POSTUMIA (S.P. 102)

4.1 DESCRIZIONE AREA DI STUDIO

Il presente lavoro ha come obiettivo la comparazione di due tecniche di mitigazione dell'impatto acustico da traffico stradale attraverso un modello di simulazione della propagazione delle onde sonore in ambiente esterno. L'inquinamento acustico emesso dai veicoli di trasporto viene ridotto, al di sotto dei limiti di legge, attraverso l'installazione di barriere acustiche. L'effetto schermante di queste opere viene valutato attraverso *l'insertion loss* ovvero quel valore dato dalla differenza della pressione sonora rilevata prima e dopo l'installazione dei manufatti. Per valutare l'affidabilità dei risultati prodotti dal modello di simulazione si sono effettuate delle rilevazioni fonometriche nel tratto di strada provinciale 102 all'altezza di Postioma, frazione del comune di Paese. La strada S.P. 102, denominata Postumia Romana, ha origine all'altezza del chilometro 9 della SP 57 nella città di Maserada sul Piave e attraversando trasversalmente la provincia Trevigiana termina nella strada provinciale SR53 all'altezza del comune di Castelfranco Veneto. La via Postumia si caratterizza per il suo particolare tracciato rettilineo.

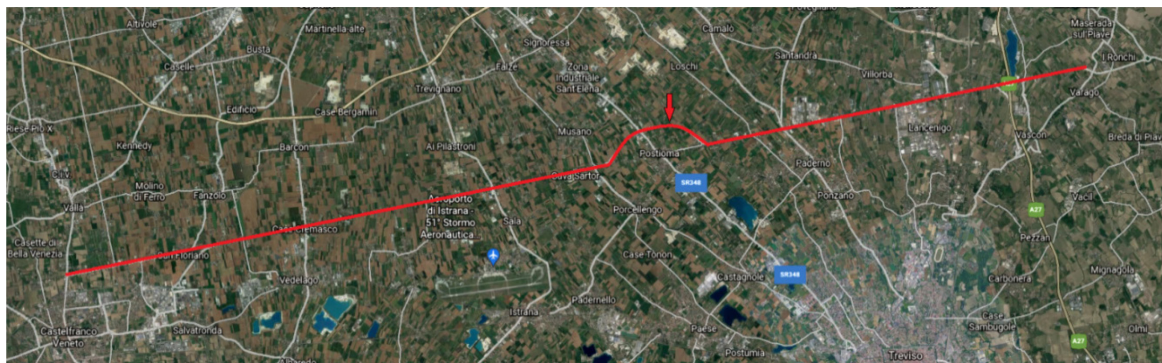


Figura 17 Foto satellitare sviluppo planimetrico S.P. 102

Con uno sviluppo di 30,8 Km fa parte dei pochi tratti percorribili dell'antica via consolare romana costruita nel 148 a.C. dal console romano Postumio Albino per scopi militari. Il tracciato originale congiungeva i porti di Aquileia e di Genova.

La Postumia Romana nel corso del tempo ha subito più volte interventi di ammodernamento e sistemazione in virtù dell'importanza che l'arteria ricopre per il territorio provinciale. Il traffico giornaliero medio si attesta intorno ai 13300 veicoli con una percentuale dei mezzi pesanti che varia dal 20% al 30%.

Il tratto di strada in esame, rispetto all'intero tracciato che si sviluppa a raso, presenta una sede stradale che si trova al di sotto della quota del piano di campagna. Il tronco stradale realizzato in trincea è stato costruito per deviare il traffico pesante al di fuori del centro abitato di Postioma e allo stesso tempo ridurre il livello di pressione sonora emesso al passaggio di veicoli attraverso la schermatura acustica delle scarpate inerbite.



Figura 18 Sezione in trincea S.P. 102

Questa particolare conformazione richiama lo schema tipico di barriera naturale in rilevato con copertura vegetale. L'effetto schermante dei rilevati in terra a lato strada, nella sezione in trincea, è dato dalle scarpate inerbite laterali. Così facendo si ottiene una completa mimetizzazione dell'infrastruttura da un punto di vista dell'impatto visivo. La comunità residente nei pressi dell'infrastruttura beneficerà di una libera visuale del territorio circostante.

Secondo i criteri di classificazione della sede viaria definiti dal D.M. 05.11.2001 la S.P. 102 è una strada extraurbana secondaria di tipo C1. È costituita da un'unica carreggiata con una corsia per senso di marcia di larghezza 3.75m e banchina laterale con larghezza di 1.50m per lato.

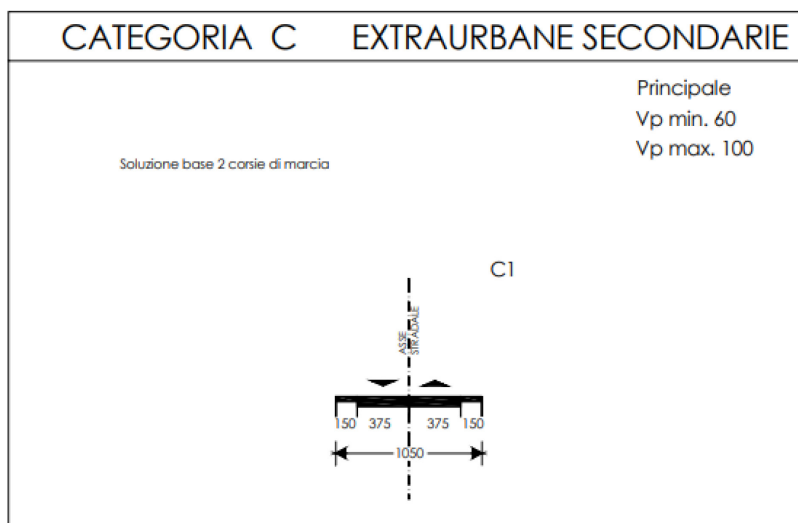


Figura 19 Schema geometrico strada tipo C (DM 05/11/2001)

La sede stradale presenta la classica forma a schiena d'asino per permettere un agevole deflusso delle acque meteoriche verso i canali di raccolta a forma trapezoidale realizzati a lato delle banchine.

Il tratto in trincea inizia al chilometro 13,8 e si sviluppa, con una larghezza di occupazione della sezione stradale di 50 m, per una lunghezza di 2 Km con quota dell'asse stradale di 6 m al di sotto del piano di campagna. Con una pendenza del 45%, le scarpate della sezione in trincea rappresentano il 54% della larghezza complessiva della sede stradale.

Attraverso una simulazione virtuale si vuole confrontare il beneficio, in termini di riduzione della pressione acustica, ottenibile dall'applicazione di una barriera acustica artificiale rispetto alla tecnica di mitigazione di tipo naturale utilizzata nel tratto di strada in trincea. I software di simulazione sono degli strumenti molto potenti in grado di prevedere e quantificare, attraverso un modello della realtà, gli effetti derivanti dall'applicazione di una serie di eventi. Questi strumenti forniscono un valido supporto al processo decisionale in fase progettuale ma non possono sostituire a tutti gli effetti la capacità umana di lettura e contestualizzazione del fenomeno analizzato. Per poter eseguire delle analisi comparative di soluzioni alternative tramite il modello sviluppato è necessario verificare l'attendibilità del modello stesso attraverso il confronto dei dati ottenuti con quelli misurati sul campo.

Si è proceduto alla rilevazione fonometrica del livello di pressione sonora del tratto di strada in esame.

4.2 RILEVAZIONI FONOMETRICHE

4.2.1 INDAGINI PRELIMINARI

Con riferimento alle linee guida per la verifica dell'efficacia delle mitigazioni previste nei pareri di compatibilità ambientale delle infrastrutture stradali redatte dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) si è proceduto alla misurazione del livello di pressione sonora nel tratto di strada in esame.

Per poter procedere all'attività di misura sul campo è stato necessario eseguire un'indagine conoscitiva del contesto ambientale con riferimento alle tipologie di sorgenti acustiche e ricettori presenti nell'area di studio. In figura 20 è riportata l'immagine satellitare dell'area oggetto di studio ed in particolare sono ben visibili i nuclei abitativi prossimi alla via Postumia evidenziati in rosso.



Figura 20 Immagine satellitare area di studio

Da un primo sopralluogo non sono state riscontrate sorgenti di tipo concorsuale. Il contesto nel quale è inserita l'opera è di tipo misto rurale e urbano con presenza di isolati edifici residenziali vicini all'infrastruttura stradale. Le strade prossime alla via Postumia, fungendo da collegamento al centro urbano per gli isolati agglomerati abitativi presenti, non costituiscono una sorgente sonora concorrente ai fini del calcolo del livello di pressione sonora considerata la quasi assenza di traffico.

Il piano di classificazione acustica di Paese, comune nel quale si sviluppa il tratto di strada di interesse, individua attraverso le linee continue di colore verde le fasce di pertinenza dell'infrastruttura. Si riporta di seguito un estratto di mappa con una tabella riassuntiva dei valori limite per ciascuna classe territoriale.

CL.	DEFINIZIONE	TEMPI DI RIFERIMENTO EMISSIONE		TEMPI DI RIFERIMENTO IMMISSIONE		TEMPI DI RIFERIMENTO QUALITA'		RETINO	COLORE
		06:00-22:00	22:00-06:00	06:00-22:00	22:00-06:00	06:00-22:00	22:00-06:00		
I	Aree particolarmente protette	45 dB(A)	35 dB(A)	50 dB(A)	40 dB(A)	47 dB(A)	37 dB(A)		verde
II	Aree ad uso prevalentemente residenziale	50 dB(A)	40 dB(A)	55 dB(A)	45 dB(A)	52 dB(A)	42 dB(A)		giallo
III	Aree di tipo misto	55 dB(A)	45 dB(A)	60 dB(A)	50 dB(A)	57 dB(A)	47 dB(A)		arancione
IV	Aree di intensa attività umana	60 dB(A)	50 dB(A)	65 dB(A)	55 dB(A)	62 dB(A)	52 dB(A)		rosso
V	Aree prevalentemente industriali	65 dB(A)	55 dB(A)	70 dB(A)	60 dB(A)	67 dB(A)	57 dB(A)		viola
VI	Aree esclusivamente industriali	65 dB(A)	65 dB(A)	70 dB(A)	70 dB(A)	70 dB(A)	70 dB(A)		blu

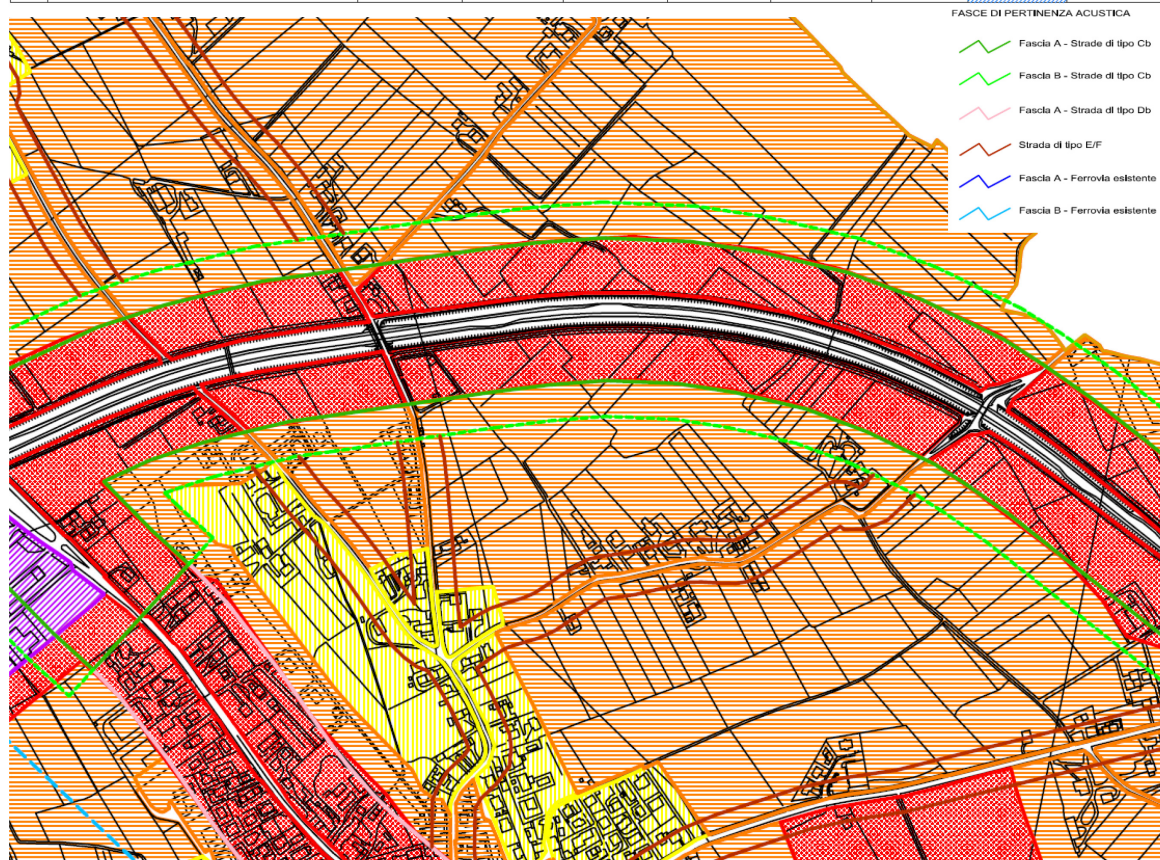


Figura 21. Estratto mappa di classificazione acustica del comune di Paese

I valori limite previsti dal d.P.R. 142/2004 per la fascia di pertinenza tipo A, con ampiezza 100 m, di un'infrastruttura viaria esistente di tipo C sono di 70 dB(A) nel periodo diurno (06:00-22:00) e di 60 dB(A) nel periodo notturno (22:00-06:00) e per la fascia tipo B, con ampiezza di 50 m, sono di 65 dB(A) nel periodo diurno e 55 dB(A) nel periodo notturno.

Non sono da applicare, ai sopracitati valori limite, ulteriori restrizioni dovuti alla presenza di ricettori sensibili come scuole, ospedali o case di riposo in quanto sono presenti solo edifici ad uso abitativo.

4.2.2 METODOLOGIA DI MISURA

Ai fini dell'analisi comparativa che si vuole svolgere risulta sufficiente eseguire delle misurazioni di breve periodo. Data l'impossibilità di accesso alle strutture più esposte alla sorgente si è prevista la rilevazione del livello di pressione sonora su due differenti postazioni di misura a campo libero.

In particolare, le misure spot (breve durata) sono state eseguite in condizioni standard di traffico evitando i periodi della giornata e della settimana di picco e/o di flusso ridotto.

Durante la fase di rilevazione sono state valutate anche le condizioni della pavimentazione stradale che è risultata essere in un buono stato di conservazione. Non è stata riscontrata la presenza di fessure, buche e altri difetti che potrebbero alterare le caratteristiche di emissione acustica.

Particolare attenzione è stata rivolta alla raccolta delle informazioni relative alle condizioni meteo che influenzano in maniera diretta la propagazione del suono nell'ambiente esterno. Le misure acustiche devono essere effettuate in assenza di precipitazioni atmosferiche, con velocità del vento inferiore ai 5m/s. Nel rispetto delle sopracitate condizioni risulta necessario misurare la temperatura, l'umidità ambientale, la velocità e direzione del vento. Per poter verificare l'effetto di mitigazione acustica e il rispetto dei valori limite è necessario rilevare, oltre ai livelli di rumore, i flussi veicolari, opportunamente suddivisi per categorie, e le relative velocità.

Il posizionamento della strumentazione di misura deve essere effettuato rispettando le condizioni previste dal D.M 16/03/1998 e dal D.P.R. 142/2004. Per le misure in esterno, in aree non edificate, il microfono deve essere posizionato ad un'altezza minima di 1,5 m dal suolo nella direzione di massima esposizione.

Nel caso in cui non fosse possibile realizzare misurazioni in continuo nei ricettori esposti è possibile ricavare i livelli di esposizione diurni e notturni attraverso delle misurazioni spot che verranno poi riferite ai relativi periodi.

Attraverso il rispetto delle condizioni prescritte nella seguente tabella è possibile individuare gli intervalli orari e i giorni nei quali eseguire una misura di breve durata del

livello equivalente, per intervalli di tempo maggiori o uguali all'ora, dal quale stimare il livello equivalente diurno e notturno.

<i>Tipologia di strada</i>	<i>Giorni di misura</i>	<i>Orario di misura</i>	<i>Correzione per L_{Aeq} notturno</i>
Urbana o locale a traffico medio-basso con forti differenze giorno-notte (tipicamente strade E o F).	da Lun a Giov.	dalle 9:00 alle 19:00	7 dB(A)
	Ven.	dalle 9:00 alle 18:00	
Di attraversamento o extraurbane con traffico medio-alto anche di notte (tipicamente strade C o D).	da Lun. a Ven.	dalle 10:00 alle 19:00	6 dB(A)
Extraurbane principali ad intenso traffico sia di giorno che di notte (tipicamente strade A o B).	Lun, Mar, Gio, Ven	dalle 10:00 alle 17:00	5 dB(A)
	Mer	dalle 11:00 alle 15:00 dalle 16:00 alle 17:00	

Tabella 7. fasce temporali per lo svolgimento dei rilevamenti acustici in relazione alla tipologia di strada

Il metodo sopracitato, sulla base delle analisi statistiche eseguite su campioni di misura nel lungo termine per varie infrastrutture stradali, è in grado di garantire, con una probabilità del 90%, una stima del livello equivalente diurno e notturno reale con un errore di ± 2 dB(A).

4.2.3 FONOMETRO

Il fonometro è uno strumento di misurazione del livello di pressione acustica. Il principio di funzionamento consiste nel convertire un'onda di pressione in un segnale elettrico. La norma IEC 61672 definisce le caratteristiche minime che deve avere un fonometro. Viene riportata di seguito una tabella che schematizza in 4 classi i fonometri in funzione della loro precisione.

Tipo	Categoria in base a IEC 60651 e 60804	Precisione
0	Di riferimento, da laboratorio	± 0.4 dB
1	Di precisione, da laboratorio	± 0.7 dB
2	Per misure sul campo	± 1.0 dB
3	Per misure di controllo	± 1.5 dB

Tabella 8 Classificazione fonometri

Per l'analisi fonometrica è stato utilizzato il microfono Røde VideoMic Go di classe 3 accoppiato ad un dispositivo di memorizzazione dei dati. Di seguito si riporta la scheda tecnica del prodotto.

VideoMic GO

Lightweight On-Camera Microphone

AUSTRALIA
107 Carnarvon st, Silverwater NSW 2128 Australia
Ph: +61 2 9648 5855 Fx: +61 2 9648 2455

USA
PO Box 91028, Long Beach CA 90809-1028
Ph: +1 562 364 7400 Fax: +1 888 412 4664

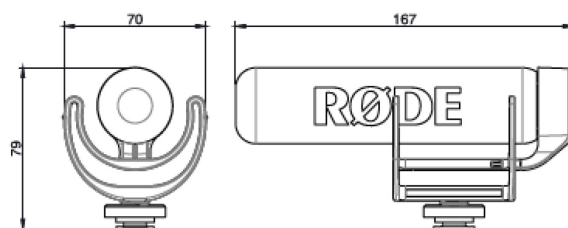


Specifications

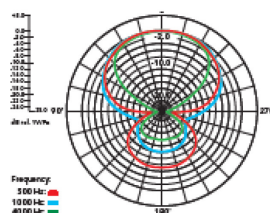
Acoustic Principle	Line Gradient
Directional Pattern	Super-Cardioid
Frequency Range	100Hz ~ 16,000Hz
Sensitivity	-35dB re 1V/Pa (17.8V @ 94dB SPL) ±1.5dB @ 1kHz
Equivalent Noise	34dBA SPL (A - weighted per IEC651)
Signal/Noise	60dB SPL (A - weighted per IEC651)
Dynamic Range	96dB (per IEC651)
Dimensions	167mm L x 79mm H x 70mm D
Maximum SPL	120dB (@ 1kHz, 1% THD into 1kΩ load)
Weight	73gm
Power Req.	Plug-in power required (330uA @ 2.5V)
Output Connection	3.5mm TRS mini-jack (dual mono)

Features

- High quality directional microphone
- No battery required (powered by camera plug-in power - min 2.5V)
- Integrated Rycote® Lyre® shock mounting
- Only 73gm (2.5oz)
- Rugged reinforced ABS construction
- Windshield included
- 3.5mm mini-jack output (20cm cable included, extendable to 35cm)
- Integrated cold-shoe mount with 3/8" thread
- Designed and manufactured in Australia
- Two year warranty



Polar pattern



Frequency response

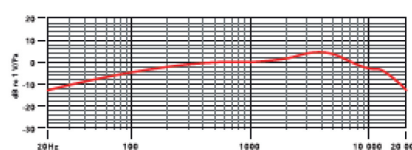


Figura 22 Scheda tecnica fonometro Rode VideoMic Go

Ai fini della comparazione acustica in esame non risulta necessaria l'adozione di un fonometro di classe 1, come definito dalla normativa italiana per la redazione di perizie acustiche. Il seguente studio, avendo come obiettivo quello di valutare gli effetti dati dall'inserimento di due differenti barriere acustiche in un determinato contesto territoriale, non richiede una particolare precisione nella stima del livello di pressione sonora.

Come dispositivo di archiviazione dei dati rilevati è stata utilizzata l'applicazione OPEN NOISE installata in un dispositivo Android. Quest'applicazione, sviluppata da Arpa Piemonte in collaborazione con L'istituto Superiore Mario Boella, rappresenta un'alternativa attendibile e a basso costo per l'esecuzione di misure di rumore rispetto ai classici fonometri professionali.

Grazie a questo strumento è possibile misurare il livello equivalente di pressione sonora con ponderazione di tipo A, il livello minimo e massimo e un'analisi in terzi di ottava delle frequenze. L'interfaccia risulta essere intuitiva e di facile comprensione.

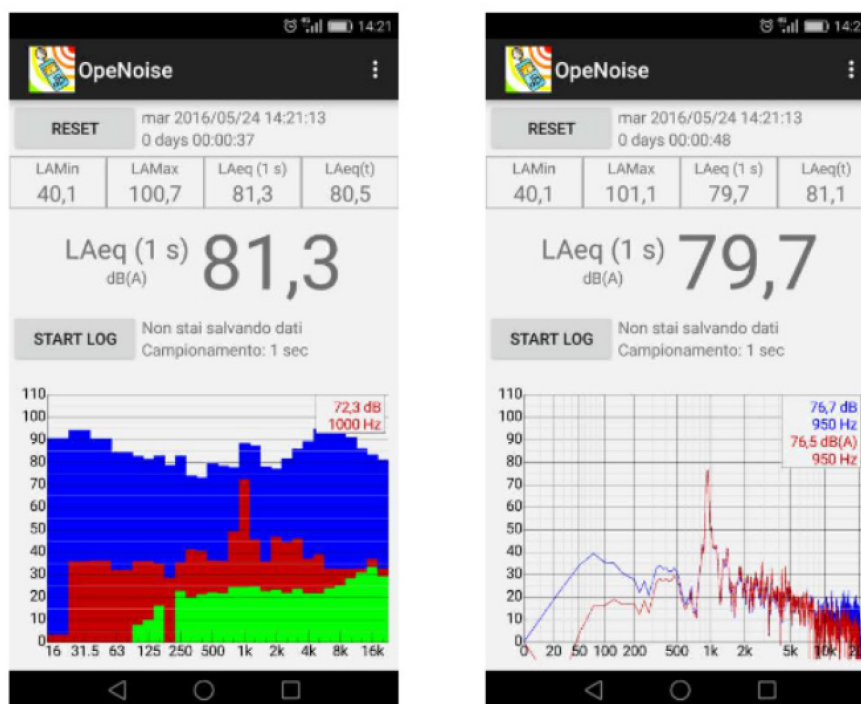


Figura 23 Interfaccia utente applicazione OpeNoise

Nelle impostazioni è possibile inserire un guadagno che ha lo scopo di eseguire una calibrazione del microfono attraverso una sorgente della quale si conoscono le caratteristiche acustiche.

4.2.4 RECETTORI RILEVATI

Per la validazione del modello di simulazione acustica sono state effettuate due postazioni di misura in campo aperto della durata di 1h e 30min, data l'impossibilità di poter eseguire direttamente dei rilievi sulle facciate degli edifici maggiormente esposti.

Di seguito vengono riportare le informazioni relative alle postazioni di misura.

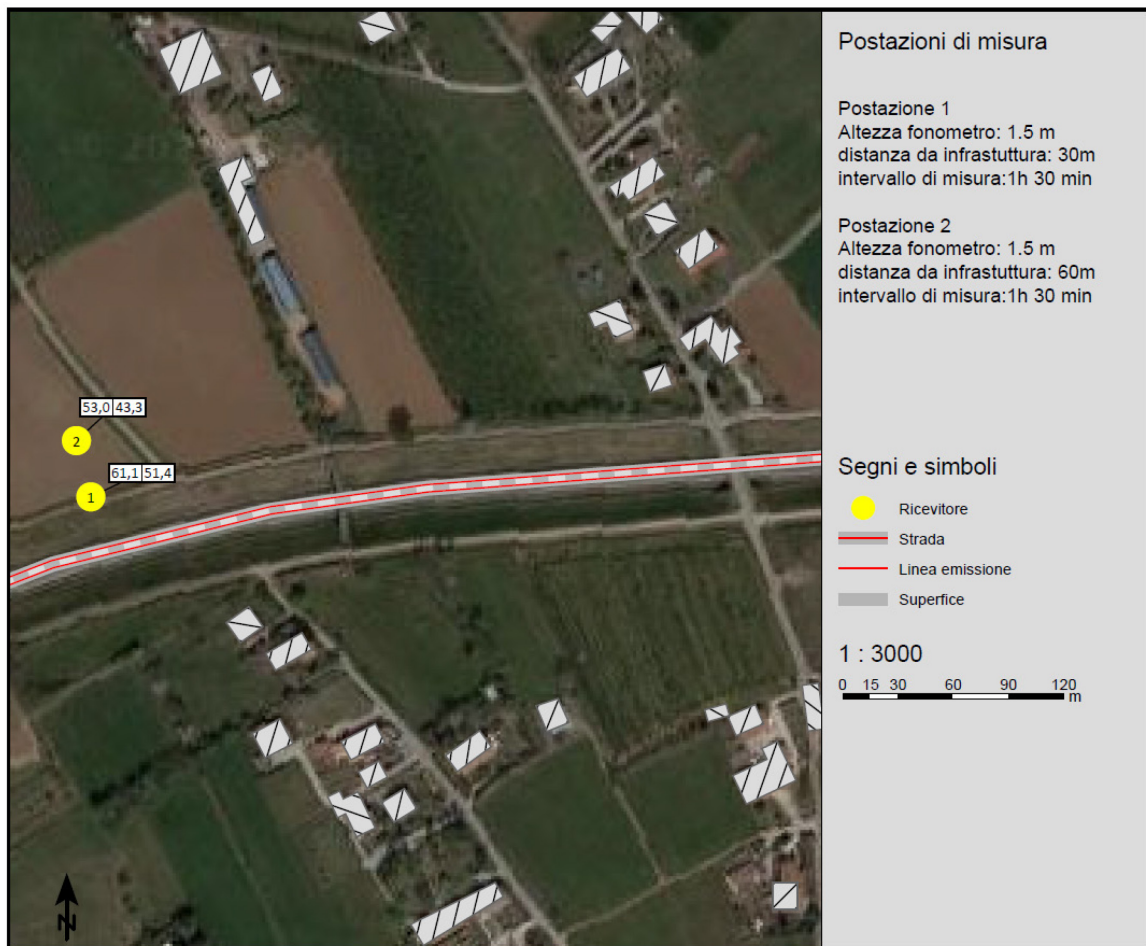


Figura 24 Inquadramento planimetrico postazioni di misura

POSTAZIONE	UBICAZIONE	CONTESTO	TIPO MISURA	INTERVALLI DI MISURA	
	1	Via Castagnera, Postioma di Paese	Area priva di ostacoli	Misura spot	Data 07/12/2021 Dalle 11:50 alle 13:20
	2	Via Castagnera, Postioma di Paese	Area priva di ostacoli	Misura spot	Data 07/12/2021 Dalle 11:50 alle 13:20

Tabella 9 Dati postazioni di rilevamento

Le misurazioni, effettuate martedì 7 dicembre 2021, sono state effettuate in contemporanea in modo tale da ottenere dei livelli equivalenti direttamente confrontabili in quanto calcolati sulla base delle stesse condizioni ambientali e di traffico. Così facendo non è stato necessario standardizzare i valori rilevati in funzione dei flussi di traffico.

Le rilevazioni acustiche si sono svolte con una temperatura ambientale di 10°C, umidità dell'aria del 70% e in assenza di vento.

Duranti le fasi di rilievo si sono effettuate le misurazioni per la caratterizzazione del traffico stradale. In riferimento al modello di simulazione della sorgente sonora stradale utilizzato dal software Soundplan (strumento di simulazione) si sono adottate le seguenti due categorie di classificazione del traffico stradale:

- veicoli leggeri: componente del traffico stradale caratterizzata prevalentemente da autovetture e veicoli commerciali leggeri;

- veicoli pesanti: componente del traffico stradale caratterizzata da veicoli commerciali di media e grossa taglia (massa superiore alle 3,5 tonnellate) con coefficiente di omogenizzazione pari a 2.

Oltre ai conteggi veicolari si è proceduto al rilevamento della velocità media di percorrenza del tratto in esame. Facendo riferimento ad un tratto stradale di lunghezza nota si sono cronometrati i relativi tempi di percorrenza dei veicoli. La velocità media di percorrenza è stata ricavata come rapporto tra la lunghezza del tratto considerato e il tempo impiegato dai veicoli per percorrerlo.

Si riporta una tabella riassuntiva dei dati rilevati.

DIREZIONE	N° VEICOLI	TIPOLOGIA	VELOCITÀ MEDIA (KM/H)
Est	277	Veicoli leggeri	86
	111	Veicoli pesanti	69
Ovest	334	Veicoli leggeri	91
	80	Veicoli pesanti	73

Tabella 10 Dati flussi veicolari rilevati

I dati relativi ai livelli di pressione sonora rilevati vengono riportati sottoforma di rappresentazione grafica per una migliore comprensione del fenomeno osservato.

Nell'allegato 1 e 2 vengono riportati in forma tabellare degli estratti delle misurazioni effettuate.

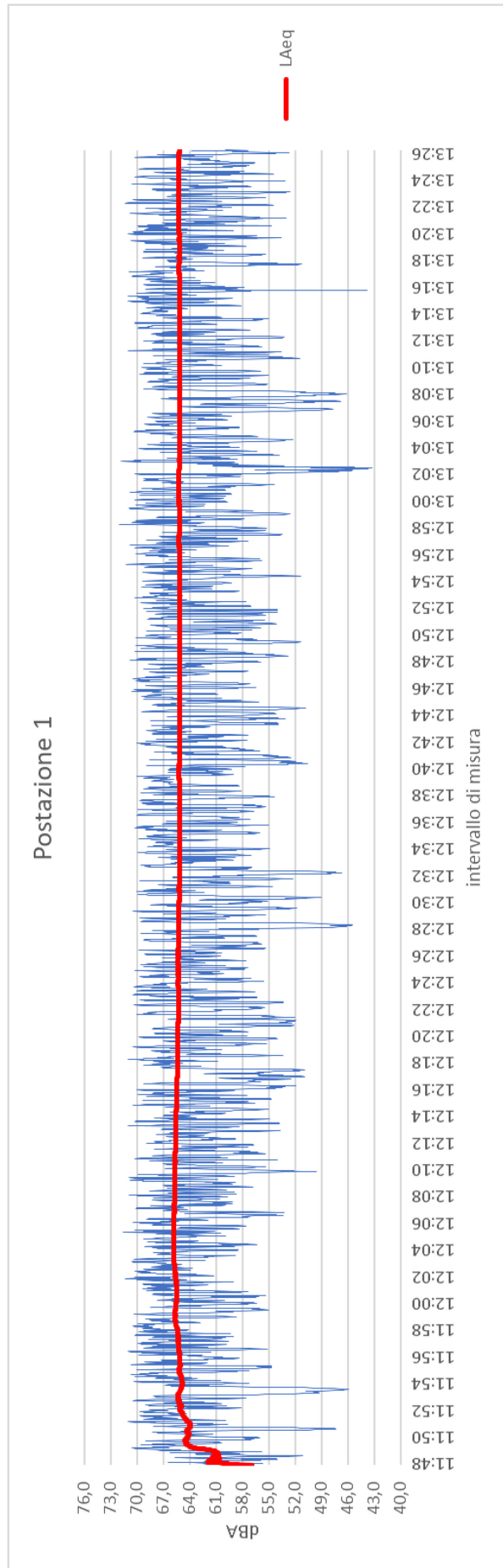


Grafico 1 Livello equivalente rilevato nella postazione 1

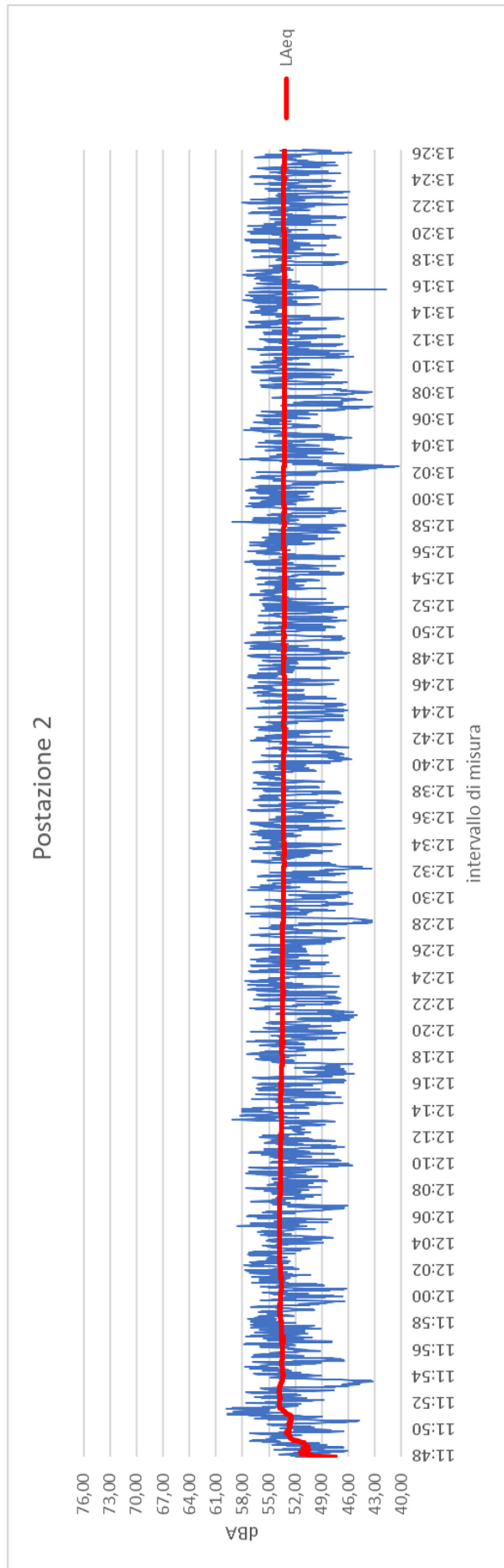


Grafico 2 Livello equivalente rilevato nella postazione 2

POSTAZIONE	L _{AEQ(TL)} RILEVATA [DBA]	
	DIURNO	NOTTURNO
1	65,2	58,2*
2	53,3	46,3*

Tabella 11 Livelli equivalenti rilevati nella postazione 1 e 2

I valori segnati con l'asterisco nella tabella 11 sono stati calcolati attraverso la procedura presentata nel paragrafo relativo alle metodologie di misura.

Dalla lettura dei grafici sopra riportati si può osservare un'andamento quasi simultaneo degli eventi acustici nelle due stazioni di misura. Nella prima postazione si osserva che le oscillazioni del valore della pressione sonora rilevata sono maggiori rispetto a quelle della seconda postazione. Questo fenomeno è dovuto all'attenuazione acustica e alla dispersione dell'energia trasportata dall'onda che si propaga nell'aria.

4.3 ANALISI COMPARATIVA

4.3.1 STRUMENTO DI SIMULAZIONE ACUSTICA - SOUNDPLAN

I modelli di simulazione sono degli strumenti in grado di supportare il processo decisionale attraverso la previsione degli effetti prodotti dalle scelte intraprese. L'utilizzo di modelli matematici permette di risolvere problematiche di natura complessa difficilmente risolvibili attraverso un'approccio teorico. I dati ottenuti dalle simulazioni, se mal interpretati e contestualizzati, possono essere fuorvianti e portare ad una errata comprensione degli effetti prodotti. La simulazione virtuale pertanto non può sostituire l'approccio teorico alla risoluzione di un problema in quanto è necessaria una conoscenza approfondita dei fenomeni che stanno alla base degli eventi. Per la simulazione virtuale è stato utilizzato il software SoundPlan essential che permette di calcolare gli effetti della propagazione del rumore acustico generato dai sistemi di trasporto in aree di limitata estensione.

La rappresentazione dei dati di output avviene attraverso l'utilizzo di tavole grafiche e rappresentazioni tabellari di facile comprensione. La simulazione si basa sulla valutazione della propagazione delle onde acustiche all'interno del modello digitale. L'ambiente reale viene ricreato all'interno del programma attraverso un modello matematico del contesto analizzato che il software, sulla base dei valori forniti in input per la caratterizzazione della sorgente acustica, utilizza per calcolare i livelli di pressione sonora in ogni punto del modello.

4.3.2 MODELLO DIGITALE DELL'AREA STUDIO

In prima fase è stato realizzato il modello digitale del terreno (DGM) dell'area di studio. Il software permette di importare all'interno dell'area di lavoro un'immagine satellitare georeferenziata dalla quale ricava, attraverso i punti quotati, il DGM. Successivamente si è proceduto alla realizzazione del contesto urbano con particolare riferimento alle infrastrutture stradali, agli edifici abitativi e qualsiasi altro tipo di oggetto, che all'interno dell'area di studio, può influenzare la propagazione delle onde sonore emesse dalla sorgente acustica in esame.

Per la comparazione degli effetti di mitigazione acustica del tratto di strada provinciale S.P. 102 con sezione in trincea rispetto ad un ipotetico tratto stradale con barriere acustiche artificiali e sezione a raso è stato necessario redigere i seguenti modelli digitali:

1. modello digitale di via Postumia con sezione in trincea;

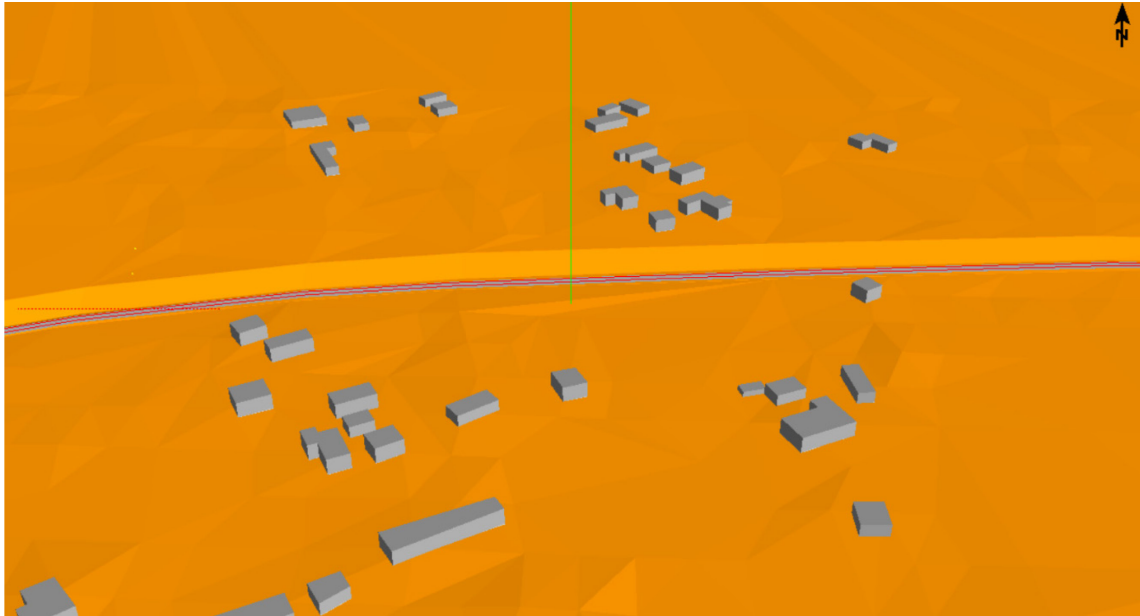


Figura 25 Vista prospettica del modello digitale della soluzione 1

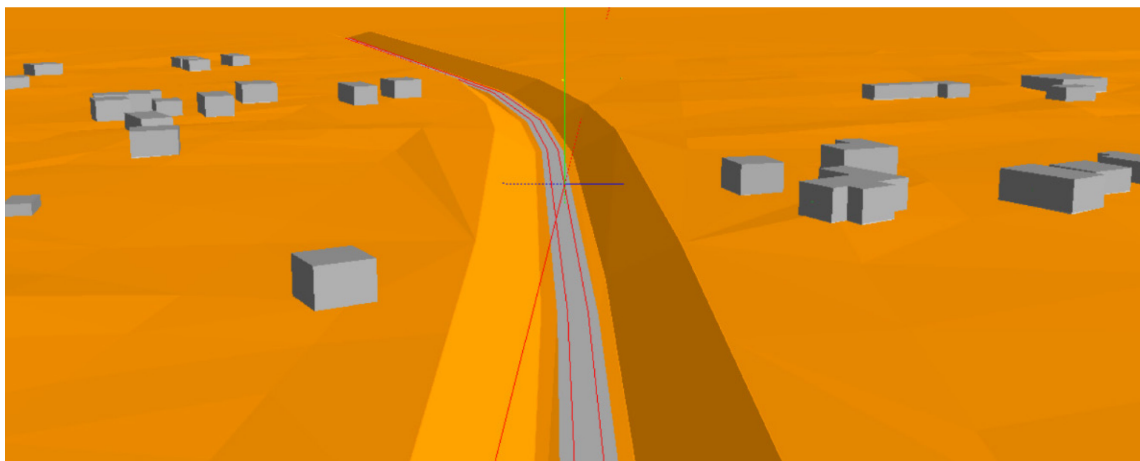


Figura 26 Vista sulla sezione in trincea del modello digitale della soluzione 1

2. Modello digitale di via Postumia con ipotetica soluzione a raso e barriere acustiche artificiali. Si prevede l'adozione di barriere acustiche artificiali con pannelli in lamiera metallica di alluminio data l'elevata capacità fonoassorbente del materiale di cui sono composte. L'installazione delle barriere acustiche è prevista per entrambi i sensi di marcia. In particolare per la corsia in direzione est la barriera antirumore inizia al chilometro 15,2, e con uno sviluppo longitudinale di 500 m, termina al chilometro 14,7 con un'altezza costante di 3 m e distanza di un metro dal bordo stradale. Per la corsia in direzione ovest è stata prevista l'installazione di una barriera acustica artificiale che inizia al chilometro 14,65 e si sviluppa per una lunghezza di 230m con un'altezza costante di 3 metri e una distanza dal bordo stradale di un metro.

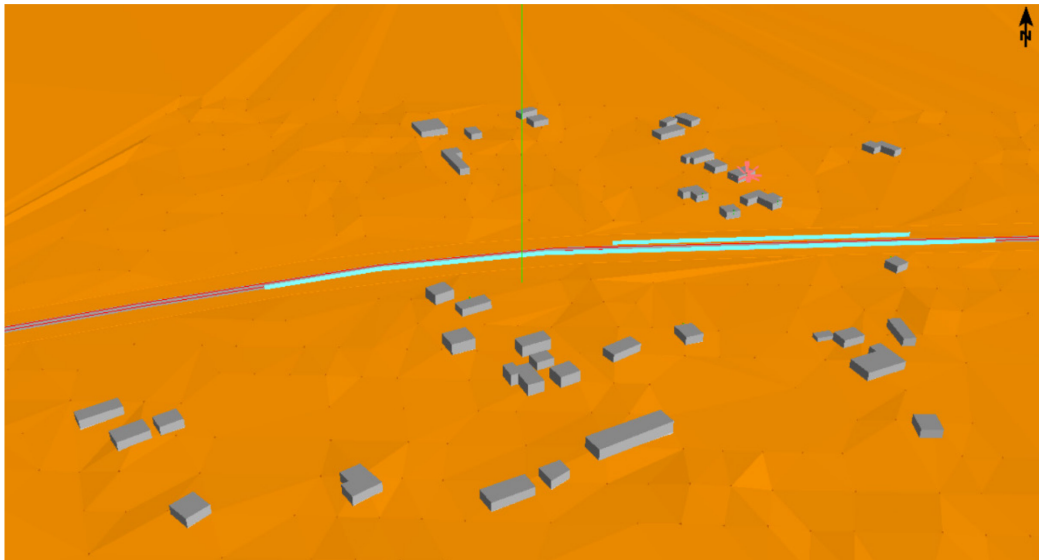


Figura 27 Vista prospettiva del modello digitale della soluzione 2

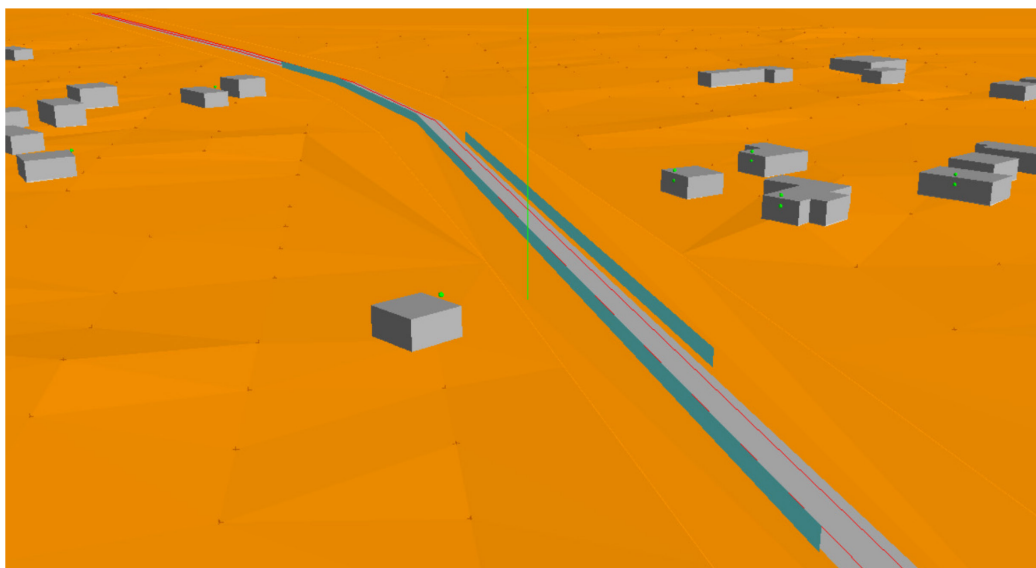


Figura 28 Vista prospettiva sulle barriere acustiche della soluzione 2

4.3.3 MODELLO SORGENTE ACUSTICA

Per la caratterizzazione della sorgente di rumore da traffico stradale il software SoundPlan si basa sul modello RLS-90 sviluppato dal ministero per i trasporti Tedesco.

In funzione dei dati relativi al traffico e della morfologia dell'area di studio il modello RLS-90 consente il calcolo del livello equivalente (L_{Aeq}). Il metodo, tenendo conto delle riflessioni su ostacoli e delle schermature di terrapieni e barriere acustiche artificiali, permette il calcolo del livello equivalente, diurno e notturno, in funzione di un livello di emissione di riferimento così determinato:

$$L_{A,eq} = L_{m,E} + \Delta_s + \Delta_{BM} + \Delta_B$$

Con:

- Δ_s attenuazione dovuta alla distanza e all'assorbimento di energia acustica da parte dell'aria:

$$\Delta_s = 11,2 - 20 * \log(d) - \frac{d}{200}$$

- Δ_{BM} attenuazione dovuta all'effetto suolo e alle condizioni meteorologiche:

-

$$\Delta_{BM} = \frac{h_{media}}{d} * \left(34 + \frac{600}{d} \right)$$

- h_{media} altezza media edifici esposti;
- Δ_B attenuazione data dalla morfologia del terreno;

dove:

$$L_{m,E} = L_m + \Delta_V + \Delta_{Str0} + \Delta_{Stg} + \Delta_E$$

dove:

$$L_m = 37.3 + 10 * \log[M * (1 + 0.082 * p)]$$

con:

- M portata media oraria complessiva (veic/h);
- P percentuale dei veicoli pesanti (massa superiore alle 3,5 ton);
- Δ_V fattore correttivo funzione della velocità:

$$\Delta_V = L_{VL} - 37.3 + 10 * \log \left\{ \frac{100 + (10^{0.1 * D} - 1) * p}{100 + 8.23 * p} \right\}$$

$$L_{VP} = 27.7 + 10 * \log[1 + (0.02 * V_{VP})^3]$$

$$L_{VL} = 23.1 + 12.5 * \log(V_{VL})$$

$$D = L_{VL} - L_{VP}$$

- V_{VL} velocità dei veicoli leggeri (min 30 Km/h, max 130Km/h);
- V_{VP} velocità dei veicoli pesanti (min 30 Km/h, max 90Km/h);
- Δ_{Str0} fattore correttivo per il tipo di pavimentazione stradale (da 0 a 6 dB(A));
- Δ_{Stg} fattore correttivo per la pendenza della strada (se la pendenza è inferiore al 5% vale 0);
- Δ_E fattore correttivo per fenomeni di assorbimento e riflessione degli edifici.

Si riportano di seguito i dati di input per la caratterizzazione acustica della sorgente stradale:

- Flusso veicolare pari a 993 veic/h per il periodo diurno e 82 veic/h per il periodo notturno;
- Percentuale veicoli pesanti pari al 20%;
- velocità veicoli pesanti di 71 Km/h;
- velocità veicoli leggeri di 89 Km/h;
- asfalto liscio come tipologia di pavimentazione.

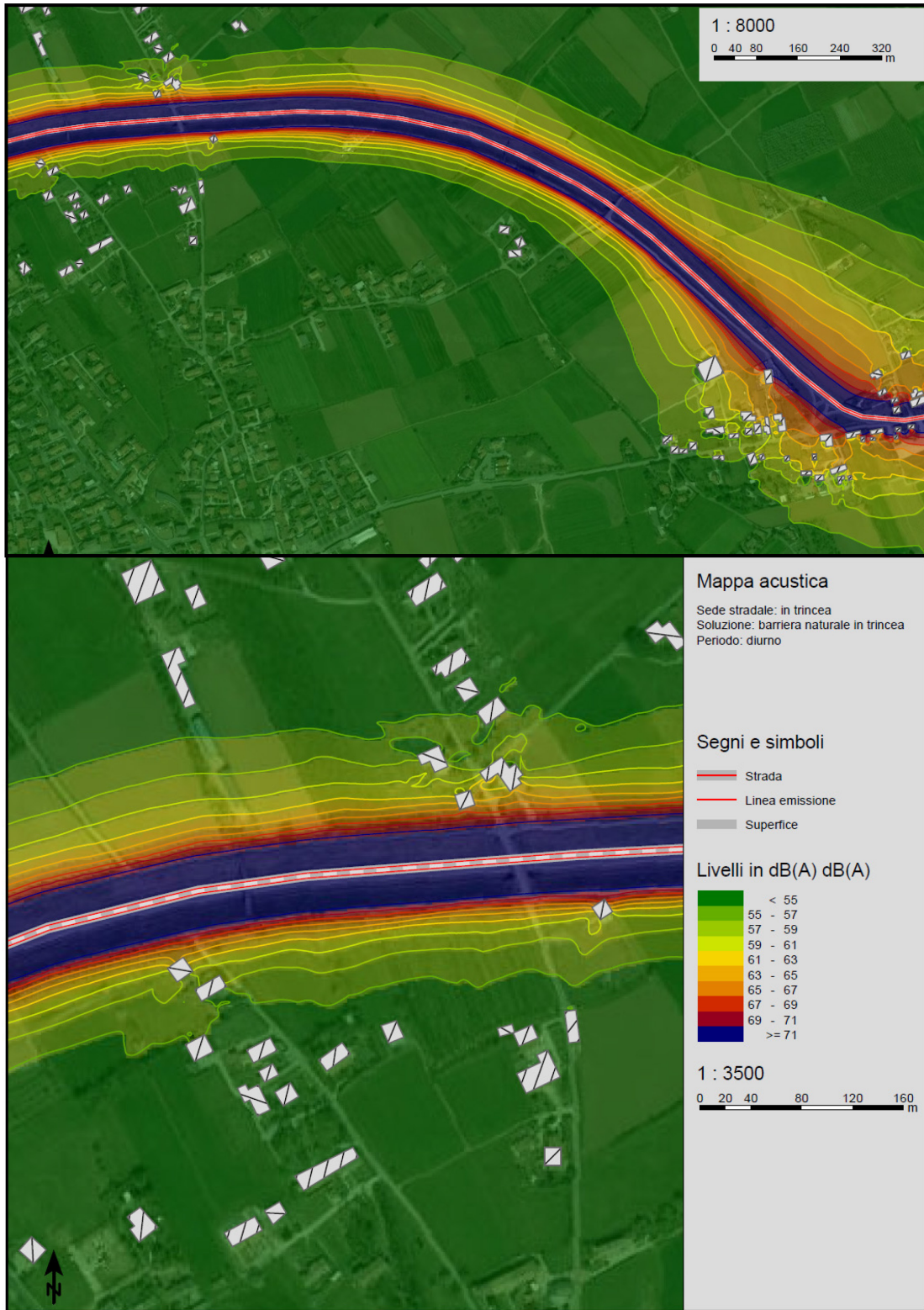
4.3.4 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla simulazione acustica delle due tecniche di mitigazione dell'impatto acustico da traffico stradale.

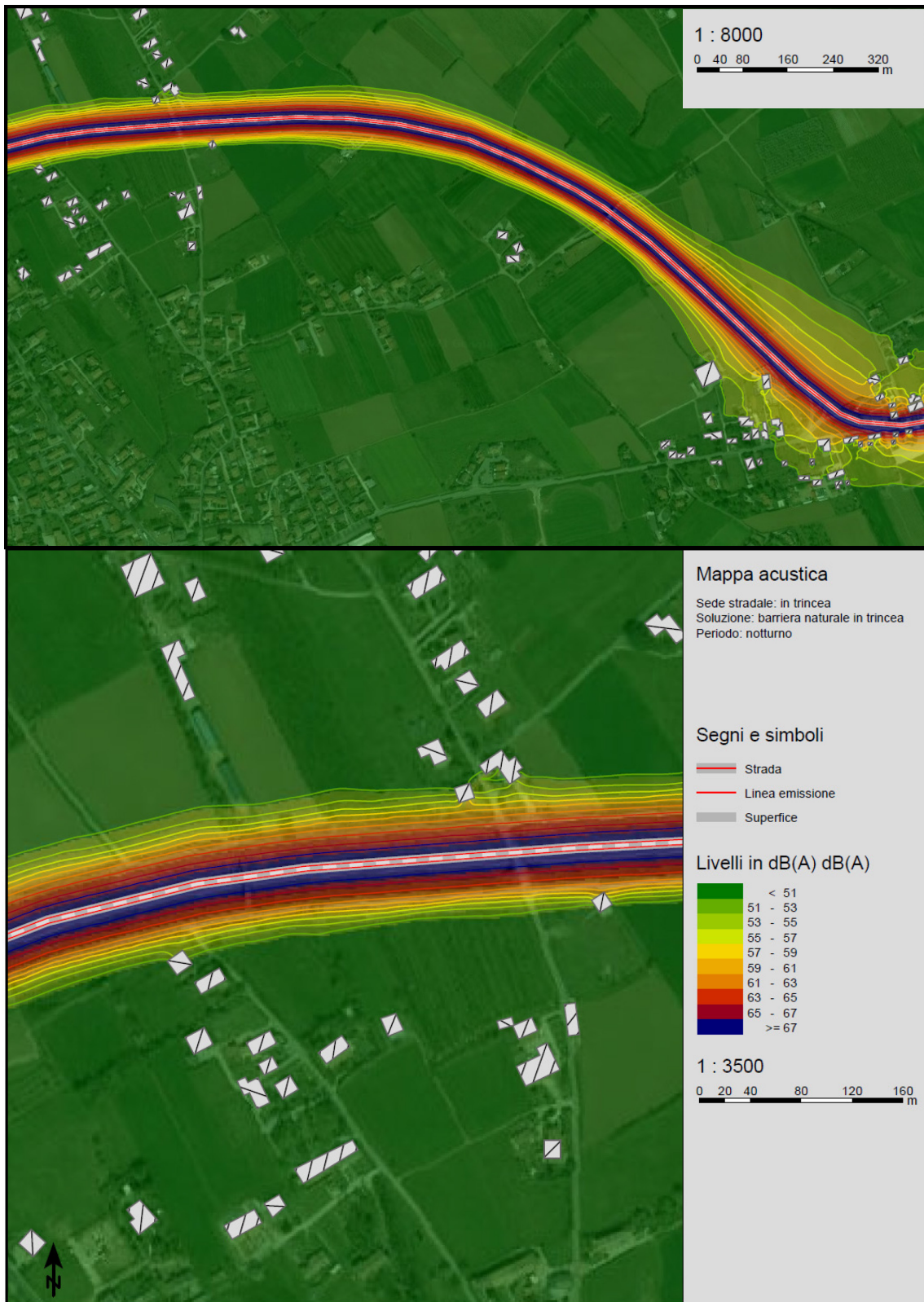
In termini di riduzione del livello di pressione sonora relativi alla soluzione con sede stradale in trincea di via Postumia (soluzione 1) e alla soluzione ipotetica di strada a raso con barriere acustiche (soluzione 2), i risultati vengono di seguito riportati sotto forma di mappe acustiche distinte per periodo diurno e notturno.

Si riportano anche, in forma tabellare, i valori di pressione acustica in prossimità delle facciate degli edifici maggiormente esposti al rumore.

Per evidenziare l'effetto di mitigazione acustica delle due soluzioni analizzate, si riporta la mappa acustica dei livelli di esposizione al rumore da traffico stradale nel caso in cui non siano presenti le soluzioni sopra citate (soluzione 3). Si può osservare che in assenza di barriere acustiche i valori limite del livello di pressione sonora prescritti dalla normativa vengono sforati.



Mappa 1 Rappresentazione L_{Aeq} soluzione 1 periodo diurno



Mappa 2 Rappresentazione L_{Aeq} soluzione 1 periodo notturno

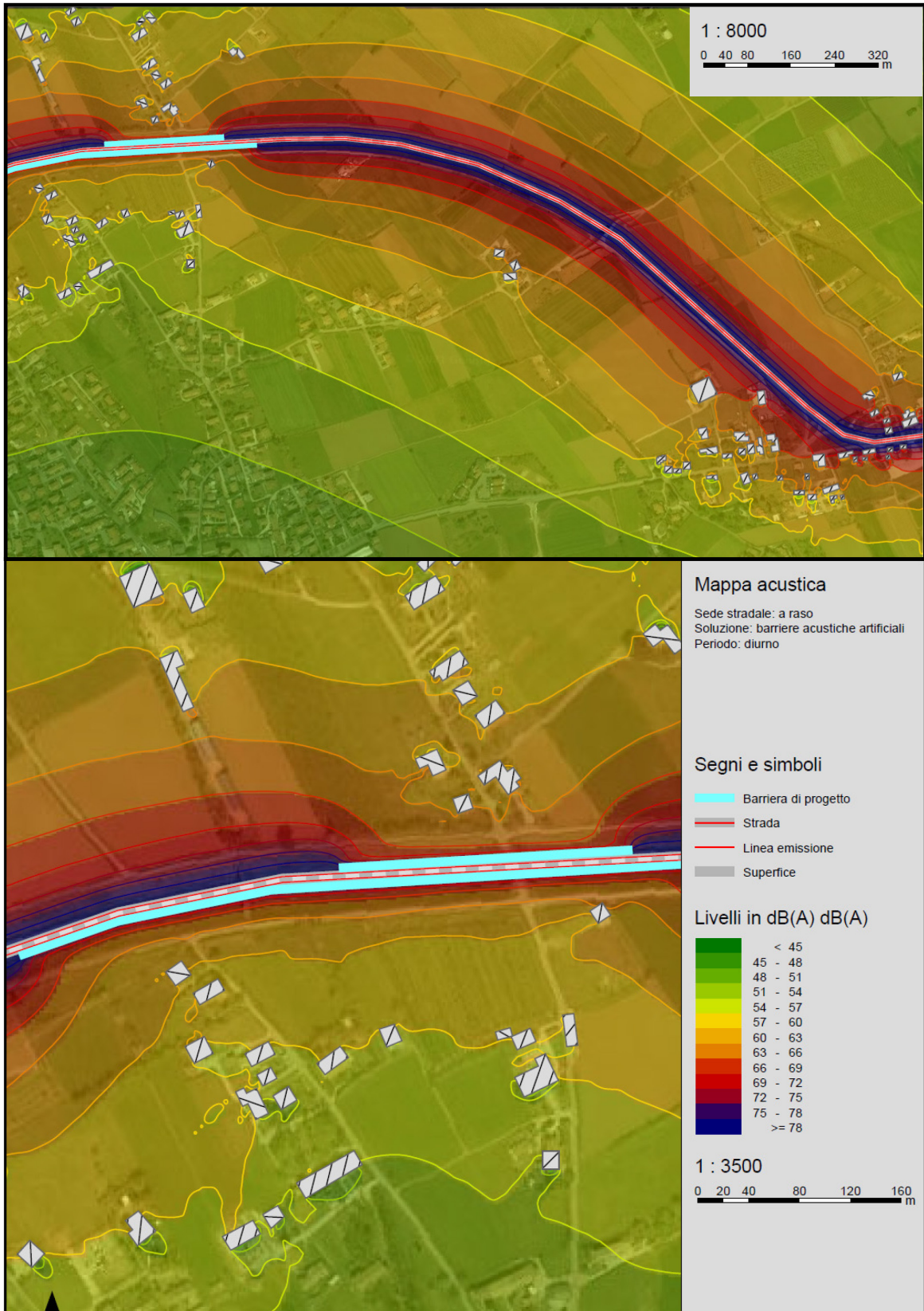


Mappa 3 Valori di L_{Aeq} dei ricettori della soluzione 1

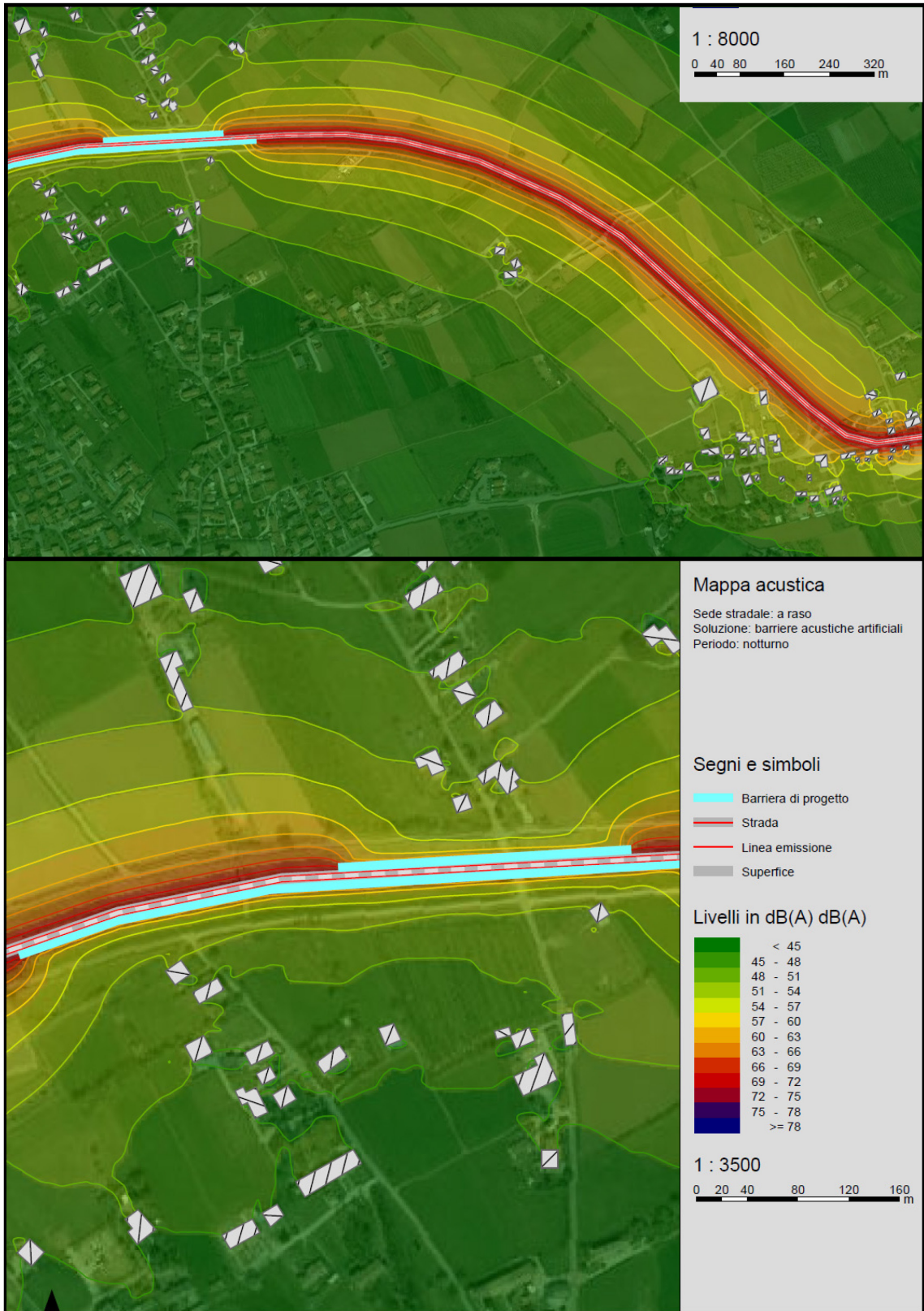
Lista ricevitori

N°	Nome ricevitore	Lato edificio	Piano	Limite		Livello		Conflitto	
				Giorno dB(A)	Notte dB(A)	Giorno dB(A)	Notte dB(A)	Giorno dB	Notte dB
1	1	-	GF	70	60	66,5	56,9	-	-
2	2	-	GF	70	60	55,1	47,8	-	-
3	3	Nord ovest	GF	70	60	63,0	53,3	-	-
			1.FI	70	60	66,3	56,6	-	-
4	4	Nord ovest	GF	70	60	57,5	47,8	-	-
			1.FI	70	60	59,2	49,6	-	-
5	5	Nord	GF	70	60	54,5	44,8	-	-
			1.FI	70	60	55,4	45,7	-	-
6	6	Nord ovest	GF	70	60	65,5	54,8	-	-
			1.FI	70	60	68,5	58,8	-	-
7	7	Sud	GF	70	60	66,1	56,4	-	-
			1.FI	70	60	68,2	58,5	-	-
8	8	Sud Est	GF	70	60	62,8	53,1	-	-
			1.FI	70	60	65,8	56,1	-	-
9	9	Sud Est	GF	70	60	58,9	49,2	-	-
			1.FI	70	60	60,9	51,3	-	-
10	10	Sud Est	GF	70	60	55,6	45,9	-	-
			1.FI	70	60	56,8	47,1	-	-

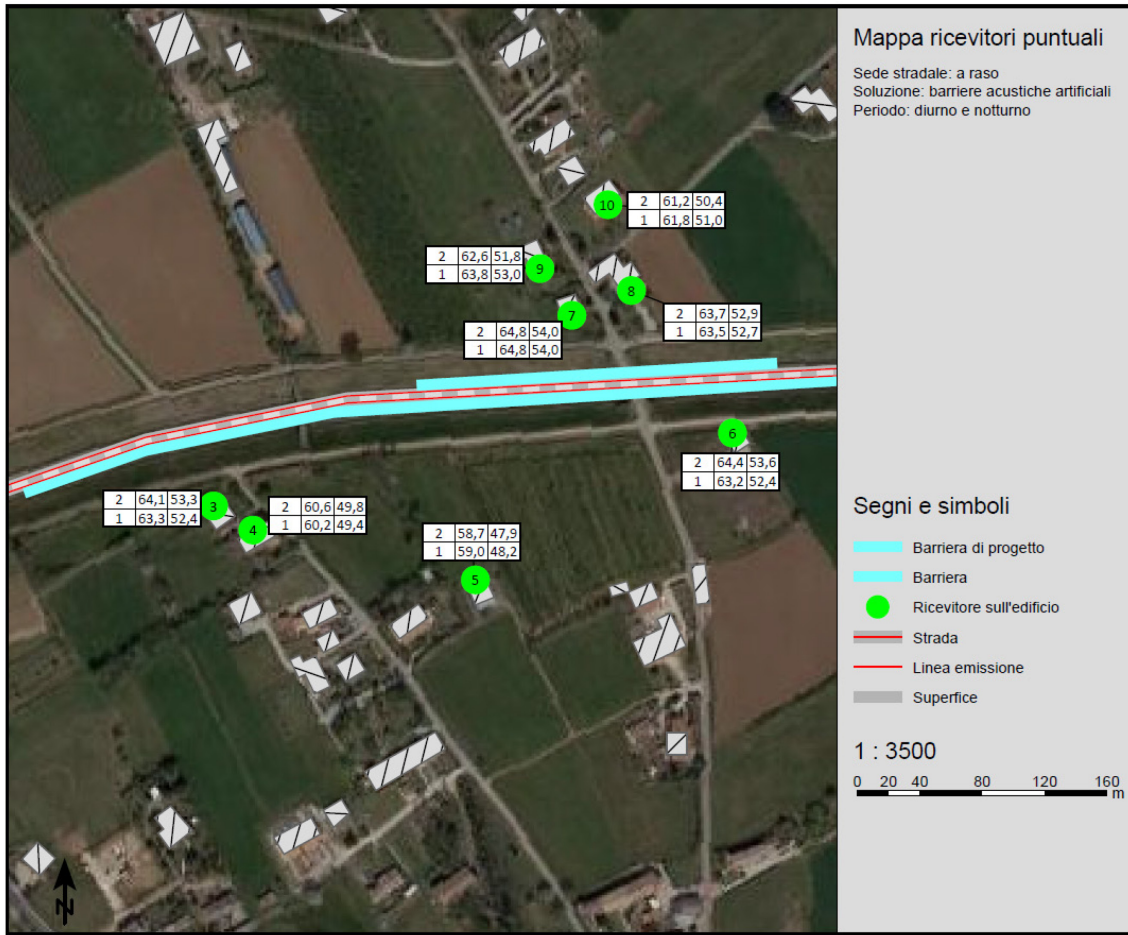
Tabella 12 Valori di L_{Aeq} dei ricettori della soluzione 1



Mappa 4 Rappresentazione L_{Aeq} soluzione 2 periodo diurno



Mappa 5 Rappresentazione L_{Aeq} soluzione 2 periodo notturno

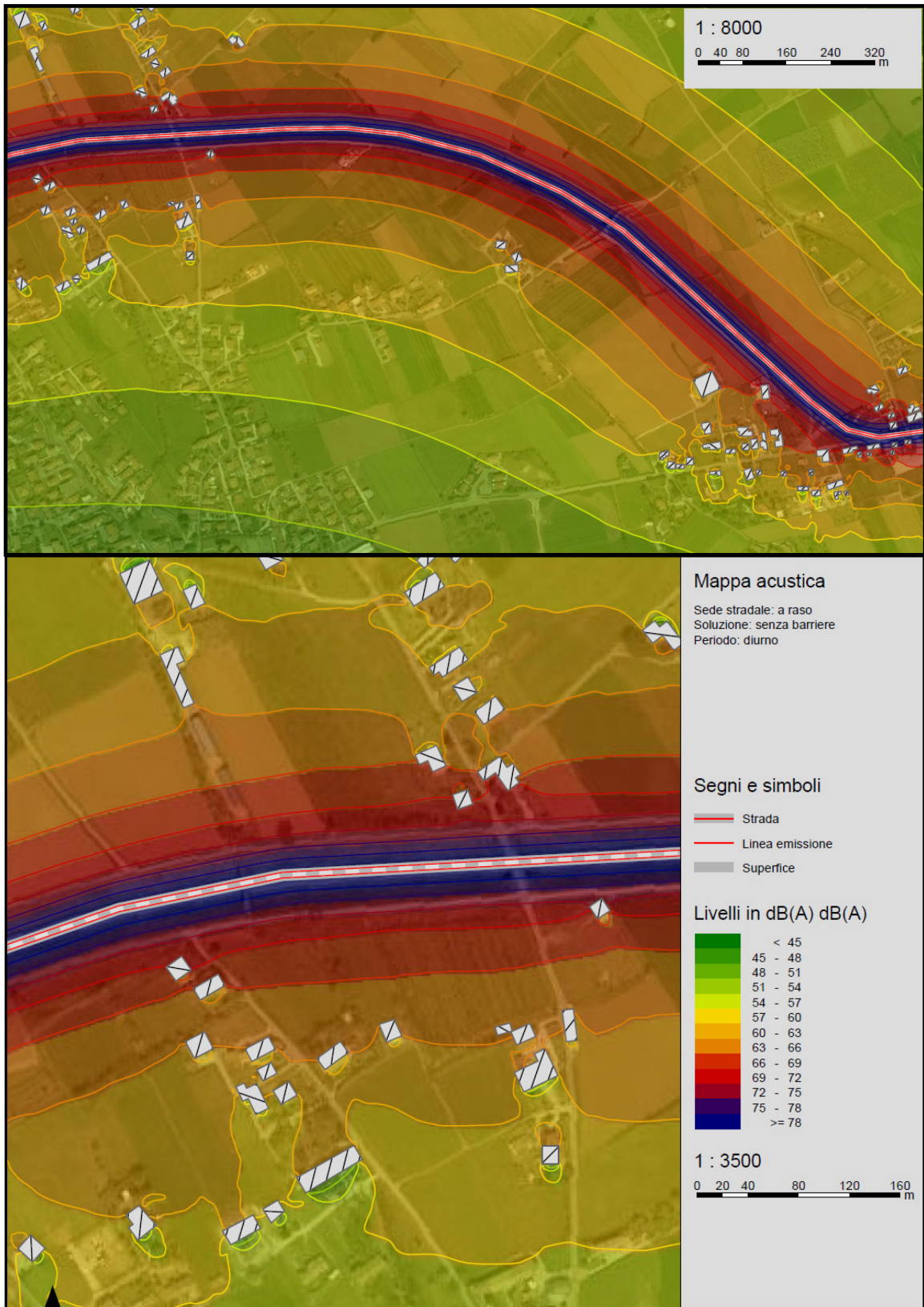


Mapa 6 Valori di L_{Aeq} dei ricettori della soluzione 2

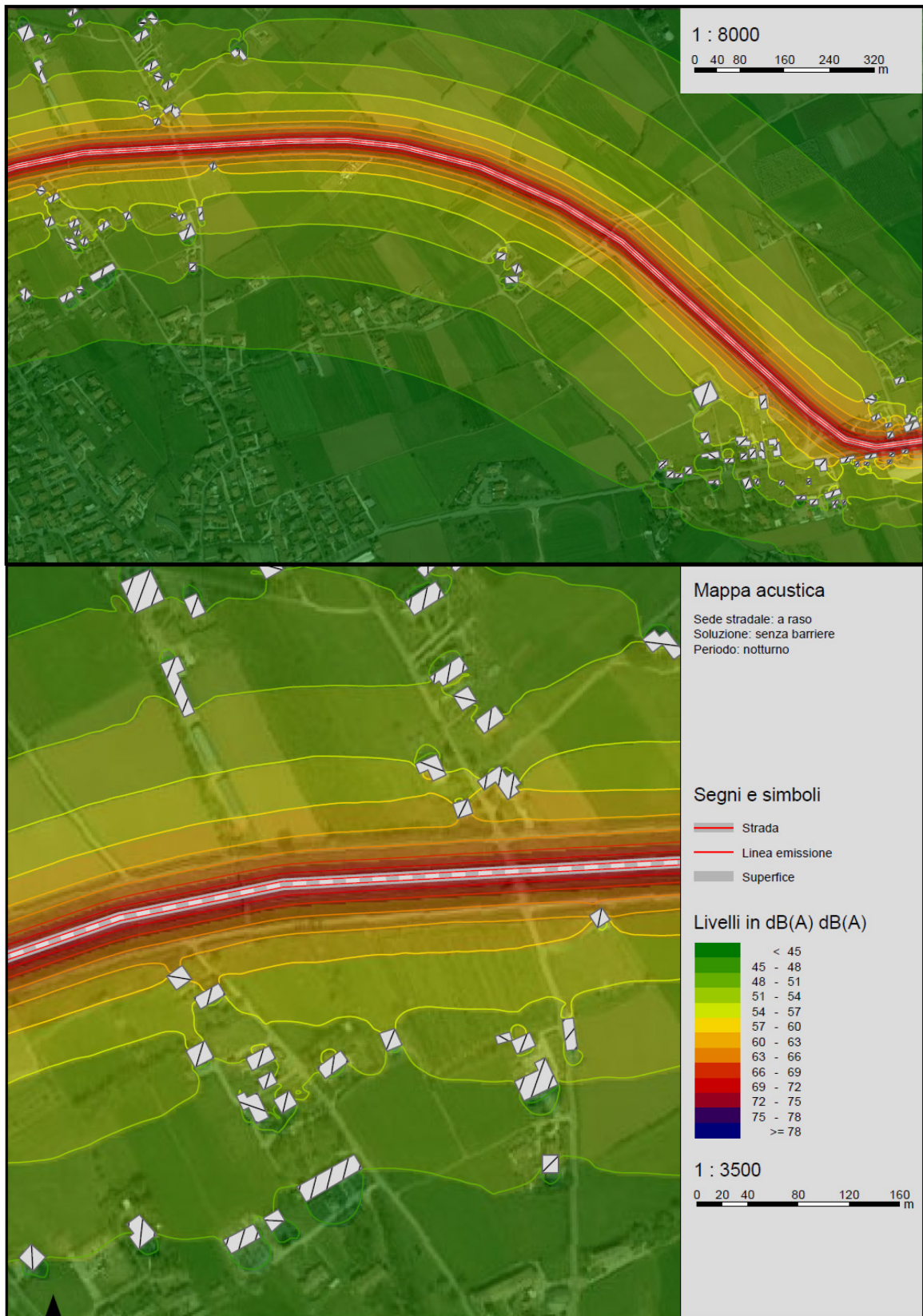
Lista ricevitori

N°	Nome ricevitore	Lato edificio	Piano	Limite		Livello senza NP		Livello con NP		Differenza		Conflitto	
				Giorno	Notte	Giorno	Notte	Giorno	Notte	Giorno	Notte	Giorno	Notte
				dB(A)		dB(A)		dB(A)		dB		dB	
3	3	N-O	GF	70	60	72,2	61,4	63,3	52,4	-8,9	-9,0	-	-
			1.FI	70	60	73,1	62,3	64,1	53,3	-9,0	-9,0	-	-
4	4	N-O	GF	70	60	68,9	58,1	60,2	49,4	-8,7	-8,7	-	-
			1.FI	70	60	67,9	57,1	60,6	49,8	-7,3	-7,3	-	-
5	5	N	GF	70	60	66,8	56,0	59,0	48,2	-7,8	-7,8	-	-
			1.FI	70	60	65,3	54,5	58,7	47,9	-6,6	-6,6	-	-
6	6	N-O	GF	70	60	74,3	63,5	63,2	52,4	-11,1	-11,1	-	-
			1.FI	70	60	73,5	62,6	64,4	53,6	-9,1	-9,0	-	-
7	7	S	GF	70	60	72,8	62,0	64,8	54,0	-8,0	-8,0	-	-
			1.FI	70	60	71,7	60,9	64,8	54,0	-6,9	-6,9	-	-
8	8	S-E	GF	70	60	70,8	60,0	63,5	52,7	-7,3	-7,3	-	-
			1.FI	70	60	70,0	59,2	63,7	52,9	-6,3	-6,3	-	-
9	9	S-E	GF	70	60	68,9	58,1	63,8	53,0	-5,1	-5,1	-	-
			1.FI	70	60	67,9	57,0	62,6	51,8	-5,3	-5,2	-	-
10	10	S-E	GF	70	60	65,1	54,3	61,8	51,0	-3,3	-3,3	-	-
			1.FI	70	60	64,4	53,6	61,2	50,4	-3,2	-3,2	-	-

Tabella 13 Valori di L_{Aeq} dei ricevitori della soluzione 2



Mappa 7 Rappresentazione L_{Aeq} soluzione 3 periodo diurno



Mappa 8 Rappresentazione L_{Aeq} soluzione 3 periodo notturno



Mappa 9 Valori di L_{Aeq} dei ricettori della soluzione 3

Lista ricevitori

N°	Nome ricevitore	Lato edificio	Piano	Limite		Livello senza NP		Livello con NP		Differenza		Conflitto	
				Giorno	Notte	Giorno	Notte	Giorno	Notte	Giorno	Notte	Giorno	Notte
				dB(A)		dB(A)		dB(A)		dB		dB	
3	3	N-O	GF	70	60	72,2	61,4	63,3	52,4	-8,9	-9,0	-	-
			1.FI	70	60	73,1	62,3	64,1	53,3	-9,0	-9,0	-	-
4	4	N-O	GF	70	60	68,9	58,1	60,2	49,4	-8,7	-8,7	-	-
			1.FI	70	60	67,9	57,1	60,8	49,8	-7,3	-7,3	-	-
5	5	N	GF	70	60	66,8	56,0	59,0	48,2	-7,8	-7,8	-	-
			1.FI	70	60	65,3	54,5	58,7	47,9	-6,6	-6,6	-	-
6	6	N-O	GF	70	60	74,3	63,5	63,2	52,4	-11,1	-11,1	-	-
			1.FI	70	60	73,5	62,6	64,4	53,6	-9,1	-9,0	-	-
7	7	S	GF	70	60	72,8	62,0	64,8	54,0	-8,0	-8,0	-	-
			1.FI	70	60	71,7	60,9	64,8	54,0	-8,9	-8,9	-	-
8	8	S-E	GF	70	60	70,8	60,0	63,5	52,7	-7,3	-7,3	-	-
			1.FI	70	60	70,0	59,2	63,7	52,9	-6,3	-6,3	-	-
9	9	S-E	GF	70	60	68,9	58,1	63,8	53,0	-5,1	-5,1	-	-
			1.FI	70	60	67,9	57,0	62,6	51,8	-5,3	-5,2	-	-
10	10	S-E	GF	70	60	65,1	54,3	61,8	51,0	-3,3	-3,3	-	-
			1.FI	70	60	64,4	53,6	61,2	50,4	-3,2	-3,2	-	-

Tabella 14 Valori di L_{Aeq} dei ricevitori della soluzione 3

Dal confronto dei livelli di pressione sonora dei ricevitori 1 e 2 simulati (per la soluzione 1) con quelli rilevati sul campo (rappresentati con cerchio giallo nella mappa dei ricevitori per la soluzione 1) si possono considerare sufficientemente attendibili i dati di output del modello di simulazione.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva di confronto dei dati simulati con quelli rilevati.

POSTAZIONE	$L_{AEQ(TL)}$ RILEVATA [DBA]		$L_{AEQ(TL)}$ STIMATA [DBA]		DIFFERENZA [DBA]	
	DIURNO	NOTTURNO	GIORNO	NOTTE	GIORNO	NOTTE
1	65,2	58,2	66,5	56,9	-1,3	1,3
2	53,3	46,3	55,1	47,8	-1,8	-1,5

Tabella 15 Valori di L_{Aeq} rilevati e stimati

Si osserva che la differenza, in termini di livello equivalente, risulta essere confrontabile con l'errore dovuto alla sensibilità dello strumento di misura pari a $\pm 2\text{dB(A)}$.

Dall'analisi delle mappe acustiche si evince che entrambe le soluzioni 1 e 2 sono in grado di mitigare il rumore acustico in modo tale da ridurre il livello equivalente di pressione acustica al di sotto dei limiti di legge a cui sono esposti i ricettori prossimi all'infrastruttura. La riduzione del livello acustico per entrambe le soluzioni risulta essere pari a 10dB. Da un punto di vista dell'efficacia di schermatura le soluzioni (1 e 2) analizzate risultano essere equiparabili. Si osserva però, attraverso l'analisi dei valori di pressione acustica a cui sono soggetti i ricevitori più esposti, una differente mitigazione dell'impatto acustico in funzione della posizione del ricettore rispetto alla barriera. Nella soluzione 1 l'effetto di riduzione del livello equivalente risulta essere proporzionale alla distanza dall'opera di schermatura. In pratica maggiore è la distanza del ricettore dalla barriera maggiore sarà la riduzione del livello di pressione sonora e viceversa. Nella soluzione 2 invece si ottiene un effetto contrario. Infatti, si può osservare che i ricevitori posti nelle vicinanze dell'opera di mitigazione hanno un livello di pressione acustica inferiore rispetto ai ricevitori più lontani. Questo effetto è dato dal fenomeno di diffrazione acustica generato dal bordo superiore della barriera. A causa di questo fenomeno le opere di mitigazione acustica di tipo artificiale, se mal progettate, possono causare un incremento puntuale dell'inquinamento acustico. L'utilizzo delle barriere acustiche di tipo naturale e artificiale è strettamente legato al contesto territoriale nel quale vengono inserite.

L'adozione di una sezione stradale in trincea è dipendente dalla disponibilità di un'area sufficientemente ampia da poterla ospitare. Nel caso di interventi di mitigazione dell'inquinamento acustico stradale su infrastrutture esistenti la realizzazione di un rilevato in terra risulta essere poco frequentemente utilizzata per mancanza di spazi. Molto spesso la presenza di edifici molto vicini all'infrastruttura stradale predilige una soluzione compatta e con elevata capacità di riduzione del livello equivalente nell'area retrostante la barriera. Le opere di riduzione del rumore di tipo artificiale garantiscono una soluzione "tampone" in aree di limitata estensione fortemente inquinate.

Un approccio di tipo preventivo per la mitigazione dell'inquinamento acustico da traffico stradale attraverso l'utilizzo di barriere acustiche naturali garantisce una maggiore efficienza in termini di benefici economici e sociali ottenibili. La realizzazione di rilevati in terra o di sezioni in trincea risulta essere economicamente sostenibile se effettuata in fase di costruzione dell'infrastruttura stessa. Il materiale rimosso per la realizzazione della pavimentazione stradale venendo riutilizzato in loco per la formazione del rilevato in terra risulta essere poco costoso. Da non sottovalutare sono i benefici in termini di inserimento dell'opera all'interno del contesto territoriale. L'impatto visivo di una strada in trincea può essere considerato trascurabile nei confronti di una barriera artificiale. Una soluzione che presenta un maggior equilibrio in termini di impatto acustico e consumo di suolo può essere data da una strada in trincea con rilevati in terre armate. Questa soluzione permette di ridurre l'area di occupazione dell'infrastruttura con le annesse opere di mitigazione acustica in terra. La riduzione della differenza di quota tra l'asse stradale e il piano campagna in combinazione con la realizzazione di rilevati in terra armata permette la diminuzione dello spazio di ingombro dell'infrastruttura grazie alla possibilità di aumentare la pendenza delle scarpate senza compromettere la stabilità del rilevato.

CONCLUSIONI

L'inquinamento acustico da traffico stradale rappresenta una problematica di ampia diffusione nelle città urbanizzate. Nasce quindi la necessità di ridurre il livello di pressione sonora al quale quotidianamente siamo esposti. Le soluzioni più frequentemente utilizzate per mitigare l'impatto acustico vengono suddivise a seconda della tipologia costruttiva e dei materiali utilizzati.

La prima categoria è costituita da quell'insieme di soluzioni che, sfruttando il potere fonoisolante e assorbente dei pannelli di materiale composito, riduce il livello di pressione sonora attraverso l'azione combinata dell'effetto di riflessione e assorbimento delle onde acustiche.

La seconda categoria invece sfrutta le proprietà di schermatura e assorbimento delle onde acustiche del terreno con copertura vegetale.

L'obiettivo del seguente studio consiste nel valutare, in termini di efficacia di riduzione del rumore, gli effetti ottenuti dall'utilizzo di una tecnica di mitigazione naturale rispetto alle più utilizzate tecniche artificiali. Come caso studio è stato analizzato il tratto di strada provinciale S.P. 102 (via Postumia) con sezione in trincea (soluzione 1) situato nel territorio comunale di Paese. La tecnica di mitigazione acustica di tipo naturale adottata nell'area di studio viene confrontata con un'ipotetica soluzione che prevede l'adozione di una sede stradale a raso con l'installazione di barriere acustiche artificiali (soluzione 2).

L'analisi comparativa delle due soluzioni viene effettuata tramite l'utilizzo del software di simulazione acustica SoundPlan. Questo strumento, sfruttando un modello digitale dell'area di studio, è in grado di stimare la riduzione dei livelli di pressione sonora dati dall'installazione delle barriere acustiche. La rappresentazione dei dati ottenuti dalla simulazione virtuale avviene attraverso delle mappe di rumore. Questa tipologia di presentazione dei dati permette una più semplice lettura del fenomeno osservato. Per verificare l'attendibilità del modello matematico si sono effettuate delle rilevazioni sul campo all'interno dell'area di studio della strada S.P. 102 attraverso l'utilizzo di un microfono ed un dispositivo di memorizzazione dei dati. Dal confronto dei livelli equivalenti ricavati dalle postazioni di misura in via Castagnera e quelli simulati si può considerare sufficientemente attendibile il modello matematico sviluppato.

Le mappe di rumore ricavate dimostrano che le due tecniche di mitigazione sono equiparabili in termini del valore di riduzione del livello di pressione sonora che risulta pari a circa 10dB.

Da un'attenta analisi dei livelli equivalenti dei ricevitori posizionati nelle facciate degli edifici risulta che la riduzione del rumore è direttamente proporzionale alla distanza dalla sorgente per la soluzione 1 mentre è inversamente proporzionale per la soluzione 2. Nel secondo caso l'effetto è attribuibile al fenomeno di diffrazione generato dalla barriera. Le tecniche di mitigazione di tipo naturale risultano essere più apprezzate dalla comunità in quanto comportano un impatto visivo del tutto trascurabile, a parità di efficacia, rispetto ad una barriera artificiale. Per mancanza di spazi sufficientemente ampi, non è sempre possibile utilizzare questa tecnica soprattutto nel caso di interventi di mitigazione su infrastrutture esistenti.

ALLEGATI

1. ESTRATTO DATI RILEVATI SULLA POSTAZIONE 1

Date	Time	LAeq	BANDE DI FREQUENZA															
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000	12500	16000	20000		
2021-12-07	11:48:40	56,9	24,6	20,7	33,1	39	38,4	43,1	48,4	44,6	49,8	30,6	28,8	28,6	29,7	32,7		
2021-12-07	11:48:41	61,3	24,7	17,3	38,3	42,4	39,3	44,9	48,3	45,7	54,7	46,8	46,7	51,1	53,4	55,9		
2021-12-07	11:48:42	56,8	24,3	17,6	30,2	33,8	35,9	39,9	44,5	45,4	49,6	39,5	40,6	39,4	42,5	45,2		
2021-12-07	11:48:43	56,7	19,1	3,2	30,2	29	34,5	40,1	47,5	45,1	48,1	36,2	36	36,2	41,1	47		
2021-12-07	11:48:44	62,1	24,5	15,9	35,2	36,6	39,7	46,5	56,4	49	50,1	39,9	42,5	40,8	40,5	46,8		
2021-12-07	11:48:45	62,5	23,6	14,8	32,9	33,9	38,9	46,3	53,7	48,9	52,4	38,9	35,5	40,9	41,7	44,7		
2021-12-07	11:48:46	55,7	19,6	9,5	26	30,2	38,5	39,1	50	37,8	46,4	32,4	30,8	34,8	37,6	40,5		
2021-12-07	11:48:47	60,3	24	15,9	32	33	43,4	45	55,6	43,3	43,1	34,4	33,2	36,7	38,8	41,8		
2021-12-07	11:48:48	61,4	24,6	22,3	39,5	45,6	42,2	47,1	54,9	45,5	44,9	39,6	36,6	40,4	44,1	47,8		
2021-12-07	11:48:49	62,1	24,7	19,3	38,1	43,4	40,4	43,5	55,5	45,4	43,4	31	26,9	27,2	28,8	31,9		
2021-12-07	11:48:50	63,7	24,5	16,5	36,6	37,6	37,3	45,9	56,2	47,3	52,2	36,5	33,9	31,6	32,3	34,4		
2021-12-07	11:48:51	66,5	24,4	11,2	33	36,9	39,8	51,6	58,1	50,3	57,6	41,8	39,9	36,8	38,7	41,1		
2021-12-07	11:48:52	64,3	24,6	25,9	38,2	46,5	47	50,1	54,5	49,1	54,8	35,2	30,9	30	30,8	33,5		
2021-12-07	11:48:53	62	24,9	26,9	41,7	51,4	45,9	50,5	54,9	46,3	48,7	31,7	28,4	27,6	29	32,4		
2021-12-07	11:48:54	61,1	24,9	24	41,4	51,2	53,2	51,1	54,2	45,3	42,6	30,6	26,6	27,1	28,6	32		
2021-12-07	11:48:55	61,3	24,6	12	33	39,2	48,3	51,6	51,4	47,1	50,1	33	28,8	28,1	29,4	32,6		
2021-12-07	11:48:56	60,2	24,5	14,9	34,7	38,5	41,4	50,7	51,5	46,4	51,4	38,8	36,4	35,3	39	42		
2021-12-07	11:48:57	62,3	24,5	16,8	37,1	41	40	49	51	45,3	55,9	40,9	38,1	37,7	41,1	44		
2021-12-07	11:48:58	62	24,3	14	31,8	32,8	35,6	45,8	50,9	44,4	56,8	37,2	38,2	33	34,3	38,5		
2021-12-07	11:48:59	58,8	24,5	13,2	32,9	33,4	34,4	42,7	49,5	42,4	51,7	33,7	28,5	27,9	29,1	32,7		
2021-12-07	11:49:00	56,5	24,6	17,8	33,4	40,2	33,1	41,8	49,2	38,3	48,6	31,3	26,7	27,2	28,7	32		
2021-12-07	11:49:01	55,9	24,5	20,9	34,8	36,4	34,7	42,9	47,3	38,8	48,3	31,6	27,8	28,3	29,2	32,3		
2021-12-07	11:49:02	56,1	24,5	19,6	30,1	32,8	33,3	42,7	47	40,3	49,1	31,9	28,1	28,3	29,3	32,6		
2021-12-07	11:49:03	56,3	24,4	8,3	29	31,6	31,4	40,4	47,9	42	48,9	32	28,2	28,1	29,2	33		
2021-12-07	11:49:04	58,1	24,3	5,4	30,7	30,1	31,5	39,8	46,6	43	52,5	33,8	30,8	31,2	30,9	34,3		
2021-12-07	11:49:05	55	24,4	10	30,1	30,4	31,8	40	45,8	39,9	47,4	32,1	27,4	28	28,9	32,4		
2021-12-07	11:49:06	54	24,4	5	32	30,4	32,8	41,6	45,9	39	44	31,5	27,2	28,2	29,1	32,9		
2021-12-07	11:49:07	54,1	24,4	10,7	31,1	30,2	32,9	39,9	45,7	41	42,8	30,4	26,2	27,5	28,7	32,2		
2021-12-07	11:49:08	58,1	24,5	11	32,3	30,6	35,6	41,3	46,9	44,6	47,6	31,3	26,8	27,2	28,9	32,2		
2021-12-07	11:49:09	61,2	24,5	12,5	32,5	32,7	35,3	45,7	51,8	47	41,3	30,9	26,4	27,1	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:10	63,1	24,5	12,9	33,4	34,2	40,6	50,4	56,2	49,4	42,5	30,6	26,5	27	28,7	32,1		
2021-12-07	11:49:11	65,4	24,5	20	35,2	39,8	44,7	53,3	57,9	51	44,2	30,5	26,2	27	28,5	32,3		
2021-12-07	11:49:12	65,7	24,6	15,5	35,2	40,2	47,5	52,7	58,5	51,4	46,1	30,5	26,5	27,1	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:13	64,6	24,5	19,1	36,2	41,9	48,1	51,1	58	49,9	44,5	30,4	26,4	27	28,6	31,9		
2021-12-07	11:49:14	63,7	24,6	18,6	36,8	38,7	47,3	50,4	57,2	49,3	42,8	30,9	26,4	26,9	28,5	32,3		
2021-12-07	11:49:15	59,9	24,5	17,7	37,2	35,4	46,1	47,6	54,4	45,6	40,7	30,5	26,2	27,2	28,7	32,2		
2021-12-07	11:49:16	58,5	24,5	15,1	35	36	45,6	49,7	51,3	46,1	38,6	30,4	26,2	27,4	28,4	32		
2021-12-07	11:49:17	55,8	24,5	20,4	36,2	37,5	38	47,8	48,2	44,5	37,2	30,6	26,6	26,9	28,4	32		
2021-12-07	11:49:18	53,6	24,5	6,9	36,2	32,9	37	45,7	45,7	40,3	34,6	30,4	26,3	27,1	28,4	32,2		
2021-12-07	11:49:19	52,7	24,5	10,8	37,2	32,4	33,4	43,1	45,6	38	35	30,3	26,1	27	28,5	32,3		
2021-12-07	11:49:20	51,1	24,4	6,6	36,9	34,6	34,1	41,2	44	36,9	34,9	30,7	26,1	27	28,3	32,1		
2021-12-07	11:49:21	51,6	24,4	8	34,9	36,2	33,9	39,6	45,6	37	34	30,8	26,1	27	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:22	52,3	24,6	15,8	37,8	39,8	37,8	42,2	45,8	35,9	33,6	30,7	26,2	27	28,7	32,1		
2021-12-07	11:49:23	54,1	24,5	14	32,2	33,6	35,1	42,6	48	37,2	36,5	30,7	26,4	27,1	28,6	32,2		
2021-12-07	11:49:24	57,3	24,5	11,3	32,6	32,4	36,1	45,5	51,3	40,8	35,4	30,7	26	27,1	28,4	32,2		
2021-12-07	11:49:25	58,5	24,5	14	33,9	33	39,2	49,7	51,7	43,9	37	30,8	26,3	27,1	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:26	60,5	24,5	14,8	34,4	35,5	44,7	48,7	54,1	46,9	38,1	30	26,3	27,1	28,7	32,1		
2021-12-07	11:49:27	60,8	24,5	11,6	34,3	37	48,5	47,6	55,5	42,1	40,3	30,9	26,3	27,1	28,5	32,2		
2021-12-07	11:49:28	63,2	24,5	13,4	34,3	36,9	45,2	47	57	46,2	39,6	31	26,5	27	28,8	32,2		
2021-12-07	11:49:29	63,4	24,5	14,9	36,3	39,7	40,1	48,9	55,8	46,7	38,1	30,5	26,3	27,2	28,4	32,2		
2021-12-07	11:49:30	61,8	24,5	12,4	32,8	38	36,6	47,6	57	43,8	36,6	30,7	26,4	27,1	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:31	61	24,4	11,4	29,8	34,9	32,9	45,6	56,5	43,5	36,7	31,5	26,4	27	28,6	32,3		
2021-12-07	11:49:32	58,2	24,5	16	33,2	36,4	37,2	42,8	50,9	44,5	38,4	30,5	26,6	27,1	28,6	32,2		
2021-12-07	11:49:33	61,2	24,5	18,1	35	37,8	36,8	47,2	55	45,1	38,6	31	26,6	27	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:34	65,6	24,6	19,7	35,8	37,2	41,3	52,5	59,9	50,2	41,8	31,3	27,4	27,1	28,6	32,3		
2021-12-07	11:49:35	66,2	24,5	22,1	35,9	41,7	46,7	53,2	59,2	51,2	45	31,2	27,4	27,2	28,6	32,1		
2021-12-07	11:49:36	63,8	24,5	25,7	40,3	40	50,9	51,8	58,6	47,6	45,1	31,7	28,8	28,2	28,4	32,4		

[...]

2. ESTRATTO DATI RILEVATI SULLA POSTAZIONE 2

Date	Time	LAeq	BANDE DI FREQUENZA													
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000	12500	16000	20000
2021-12-07	11:50:03	69,9	59,8	56,3	62,1	56,5	48,6	46,4	45,8	49,2	55	67,2	62,5	57,4	50	43
2021-12-07	11:50:04	56,1	54,4	56,9	64,3	56,6	46,6	43,6	43,4	40,5	39,3	50,3	44,7	38	34,8	30
2021-12-07	11:50:05	71	62,7	66,5	69,6	62,4	64,2	60,6	55,2	56,8	60,4	59,3	52,3	59,8	61	54,7
2021-12-07	11:50:06	53,5	54,7	54,3	61,2	52,1	48,4	41,8	44,5	42,9	31,3	37,6	34,3	31	29	25,6
2021-12-07	11:50:07	54,8	53,6	54,6	60,5	55,8	47,5	41,7	45,5	45,9	33,2	36,2	32,6	30,6	28,7	25,3
2021-12-07	11:50:08	54,3	54	49,8	59,5	58,2	48,6	40,9	45,8	43,2	30,9	37,7	34,4	30,6	28,7	25,4
2021-12-07	11:50:09	54,1	53,7	50,5	61,7	54	47,5	42,6	43,3	43,5	33,5	39,6	35,5	31,5	29	25,5
2021-12-07	11:50:10	53,9	54,6	56,5	65,2	56,9	48,6	42	43	42,9	31,9	35,3	32,3	30,4	28,7	25,1
2021-12-07	11:50:11	53,9	54,1	48,5	64,3	54,1	46,2	39,3	44,3	44,5	32,6	35,6	32,4	30,3	28,5	25,2
2021-12-07	11:50:12	54,5	55,4	56,3	61,9	54	46,9	40,1	45,1	44,5	34,6	43	39,6	34,5	31,1	27,4
2021-12-07	11:50:13	53,6	53	54,5	63,5	55,7	47,2	39,3	41,8	40,5	35	45,4	43,1	35,5	31,8	27,1
2021-12-07	11:50:14	53	52,9	55,2	60	55,7	45,5	40,9	41,3	39,3	34	44,4	39,3	36,9	31,8	27,2
2021-12-07	11:50:15	53,1	52,9	51,9	63,4	55	43,5	40	42,6	41,8	36,1	42,7	39	35,3	31,5	26,8
2021-12-07	11:50:16	54,7	55,9	52,4	58,5	53,6	43,4	39,2	43,5	44,6	37,5	43,3	39,9	38,4	33,7	27,4
2021-12-07	11:50:17	53,9	54,7	51,2	61,4	52,6	43,1	39,1	43,2	43	35,3	41,8	38,1	36,3	30,6	26,4
2021-12-07	11:50:18	51,4	54,3	53,9	59,2	53	43,7	38,5	42,3	40,4	31,4	36,5	33,3	33,9	30,3	26,2
2021-12-07	11:50:19	53,8	51,7	53,4	58,1	54,1	46,9	41,7	42,9	40	34,1	44	40,6	40,7	34,8	29,4
2021-12-07	11:50:20	53,7	54,9	56,7	58,2	54,3	45,9	42,3	44,8	40,5	33,1	35,9	32,9	31,5	29	25,4
2021-12-07	11:50:21	53,4	55	51,6	58	51	46,7	43,2	43,5	40,4	32	33,3	29,9	30,2	28,5	25,2
2021-12-07	11:50:22	54	54,6	54,3	57,1	55,4	44	45	41,8	39,4	30,6	33	30,3	30,2	28,6	25,3
2021-12-07	11:50:23	55,9	56	55,3	58,7	54,9	45,5	47,3	43,9	38,1	30,2	33	30	30	28,4	25,3
2021-12-07	11:50:24	57,1	56,1	49,9	56,3	53,3	48,1	49,9	43,6	37,4	29,9	32,8	30	30	28,4	25,2
2021-12-07	11:50:25	57,2	56,2	53,7	55	53,6	48,9	49,7	44,5	37,7	29,9	32,7	30	30	28,6	25,3
2021-12-07	11:50:26	56,2	56,3	53,7	66,1	57,8	52,3	46,3	44,6	38,4	30	32,8	29,9	30,4	28,6	25,3
2021-12-07	11:50:27	54,8	57,7	61,6	59,5	57,9	50,4	45,4	43,6	39,1	30,1	32,8	30,1	30,1	28,6	25,2
2021-12-07	11:50:28	52,9	53,1	57	58,2	55,1	49,3	44,6	40,6	37,1	28,9	32,3	29,8	30,2	28,7	25,3
2021-12-07	11:50:29	53,8	54,3	57	59,4	55,8	50,4	46	41	36,2	28,9	32,2	30,1	30,2	28,6	25,1
2021-12-07	11:50:30	49,6	54,8	48	57,8	54,5	42	40,3	39,3	33,7	28,7	32,5	30,5	30,4	28,7	25,1
2021-12-07	11:50:31	50,9	51,9	52,5	61	62,4	45,5	37,3	37,6	33,4	28,7	32,8	30,3	30,3	28,6	25
2021-12-07	11:50:32	48,1	51,5	52,9	54,9	54,8	40,3	35,4	36,8	33	30	34,8	31,5	32,3	28,8	25
2021-12-07	11:50:33	46,5	48,6	48,2	56,9	51,7	38,9	34,4	34,5	33,8	28,3	32,3	30,2	30,2	28,4	25,2
2021-12-07	11:50:34	46,5	49,9	54,3	56,6	54	39,7	33,6	35,2	31,3	28,5	32,6	29,9	30	28,6	25,1
2021-12-07	11:50:35	47,4	55,3	51,9	56,7	53,1	37,1	32	34	39,2	29,2	33,3	30,7	30,2	28,5	25,1
2021-12-07	11:50:36	46,9	54,3	51,6	56,8	48,4	37,3	32,6	34,6	31,4	29,9	36,1	32,5	31,5	29	25,1
2021-12-07	11:50:37	48,2	56,1	50,4	57,8	48,4	39,2	32,7	35,2	36,4	31,7	38,9	34,4	33,3	29,6	25,7
2021-12-07	11:50:38	52,2	56	53,2	56,8	49,3	38,7	36,4	36,8	35,9	42	46	39,4	38,7	31,5	27,2
2021-12-07	11:50:39	49,5	54,2	52,1	58,6	50,6	37,9	35,6	37,1	36,3	31,3	40,8	39,1	37,4	30,2	26,5
2021-12-07	11:50:40	48,7	57,7	53,1	57,2	49,3	38,3	35	37,4	33,7	33	38,8	34,8	33,9	29,2	25,2
2021-12-07	11:50:41	48	55,3	52,8	58,5	49,9	40	36,7	37,3	32,9	30,2	34,7	31,3	31	28,6	25,1
2021-12-07	11:50:42	49,6	52,3	57,1	56,2	51,3	39,8	39	37,8	33,2	30,5	37,5	32,8	32,5	29,2	25,4
2021-12-07	11:50:43	51	53,7	55,8	58,7	52,8	43,8	45,1	39,7	34,2	30,6	36,5	32,9	32,7	29,2	25,7
2021-12-07	11:50:44	52	55,6	55,7	55,5	53,4	43	45,6	40,5	36,5	32,4	37,5	32,9	32,1	28,7	25,1
2021-12-07	11:50:45	50,6	52,8	58,4	60,5	53,2	43,9	42,3	39,2	34,2	30,1	35,1	32	31,6	28,7	25
2021-12-07	11:50:46	52,4	53,6	61,6	57,3	53,4	46,3	44,6	39,8	35,2	31,1	35,9	40,6	36,4	29	25,2
2021-12-07	11:50:47	53,6	58,6	58,8	57,6	56	46,2	43,3	40,6	35,5	30,5	34,6	31	30,4	28,6	24,8
2021-12-07	11:50:48	53,7	57,9	59,3	57,2	54,8	47,8	45,4	42,1	37	31,4	37,4	34,1	33,6	29,9	25,6
2021-12-07	11:50:49	52,8	57,7	54,4	57,5	55	48,5	42,3	42,5	38,3	30,8	37,2	31,4	31,3	28,8	25,1
2021-12-07	11:50:50	51,2	55,4	53,5	56,4	52,4	46	40,1	40,8	37,5	30,4	33,9	30,6	30,3	28,5	25
2021-12-07	11:50:51	50,5	54,1	54,2	58,8	54,2	46	40,5	40,7	37,1	29,7	33,3	30,2	30,5	28,4	25,2
2021-12-07	11:50:52	50	54	50,2	56	52,2	41,6	37,1	39,6	38,9	29,5	32,8	30,1	30,4	28,4	25
2021-12-07	11:50:53	51,2	56	55,4	57,2	51,7	41,5	34,1	41,8	41	30,4	35,7	31,3	30,7	28,6	25,1
2021-12-07	11:50:54	51,7	53,1	52,3	57,1	50,6	39,9	34,3	43,1	41,8	29,6	32,8	30,3	30,2	28,6	25
2021-12-07	11:50:55	50,3	51,7	52,5	57,3	51,6	38,6	32,9	41	39,3	29,7	32,8	30,2	30	28,6	25,1
2021-12-07	11:50:56	51	50	51,1	58	51,5	38,6	33,1	41,8	40,1	28,6	32,9	30,2	30,1	28,5	25,2
2021-12-07	11:50:57	50,4	50,9	51,7	58	53,2	40,4	35,1	41,7	39,7	29,2	33,3	30,4	30,3	28,5	24,9
2021-12-07	11:50:58	51,1	52,1	53,7	58,9	51,7	41,7	38,1	42,1	40,3	29,7	33,1	30,3	30,2	28,4	25,1
2021-12-07	11:50:59	52,9	51,2	51,8	60,1	53,9	43,5	40,1	43,5	43	30,5	33,3	30,2	30,5	28,6	25

[...]

BIBLIOGRAFIA

De Cesaris, A. L., Beria d'Argentina, M., *Le nuove norme sull'inquinamento acustico : Legge-quadro 26 ottobre 1995, n. 447 : aspetti normativi e tecnici*, Milano, Pirola, 1996.

European Environment Agency, *Environmental noise in Europe – 2020*, “EEA Report”, 2019, n. 22.

Farina, A., Fausti, P., *Fonometria*, Ferrara, Dispensa corso per tecnici in acustica, Unife, 2018.

Felli, M., *La tutela del territorio dall'inquinamento acustico*, Vol. 2, Roma, Armando Editore, 2000.

Lo Bosco, D., Leonardi, G., Scopelliti, F., *Metodologie per lo studio dell'inquinamento acustico da traffico veicolare*, Quaderno di dipartimento – Università do Reggio Calabria, 2006.

Masera, S., Fogola, J., Malnati, G., Lotito, A., Gallo, E., *Realizzazione di un sistema di monitoraggio del rumore a basso cost attraverso la nuova app Android “OpeNoise”*. “Rivista italiana di acustica”, 2016, n. 1-2, pp. 48-58.

Pascali, M., *Acustica ambiente esterno*, Palermo, Grafill, 2012.

Ricciardi, P., *Elementi di Acustica ed Illuminotecnica*, Milano, McGraw-Hill, 2009.

Romani, P., Ventura, F., *La rumorosità ambientale : il ruolo delle barriere acustiche*, Bologna, Pitagora Editrice, 1992

Spagnolo, R., *Manuale di Acustica Applicata*, Milano, Cittàstudi, 2005.

SITOGRAFIA

<https://it.rode.com/> [ultima consultazione 09/11/2021]

<http://www.arpa.piemonte.it/> [ultima consultazione 22/10/2021]

<https://www.gazzettaufficiale.it/> [ultima consultazione 04/02/2022]