

Collana Tecnico-Scientifica
diretta da Giorgio Galli

Quaderno n. 18

FRANCESCO ASDRUBALI, CINZIA BURATTI, GIORGIO BALDINELLI

LA MAPPATURA ACUSTICA DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI FOLIGNO

Ottobre 2001

CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici

INDICE

Autori	pag. 4
Riassunto	pag. 5
Abstract	pag. 6
1. Introduzione	pag. 7
1.1 Criteri e finalità della mappatura acustica.....	pag. 7
2. Misure di rumore	pag. 11
2.1 Riferimenti normativi.....	pag. 11
2.2 Caratteristiche della strumentazione	pag. 12
2.3 Criteri di scelta dei punti di misura	pag. 13
2.3.1 <i>La zona urbana</i>	pag. 14
2.3.2 <i>la zona periferica</i>	pag. 15
2.4 Risultati e rappresentazione grafica	pag. 15
2.5 Analisi critica e interpretazione delle misure fonometriche	pag. 15
2.6 Analisi degli altri dati.....	pag. 19
2.7 Identificazione e classificazione delle sorgenti di rumore ..	pag. 19

3. Stima dei livelli di rumore.....	pag. 24
3.1 Modalità di effettuazione delle stime.....	pag. 25
3.2 I modelli previsionali	pag. 27
3.2.1 <i>Modello previsionale CNR</i>	pag. 28
3.2.2 <i>Modello previsionale CETUR</i>	pag. 33
3.2.3 <i>Modello previsionale basato sul calcolo del SEL</i>	pag. 36
3.2.4 <i>Modello previsionale OMTIC</i>	pag. 41
3.2.5 <i>Modello previsionale CLASSICO – CIRIAF</i>	pag. 42
3.2.6 <i>Modello previsionale per le ferrovie</i>	pag. 46
4. Procedure di mappatura.....	pag. 49
4.1 Elaborazione mappatura extraurbana.....	pag. 49
4.2 Elaborazione mappatura urbana.....	pag. 51
5. Conclusioni	pag. 54
6. Bibliografia.....	pag. 55

Autori

Francesco Asdrubali

Nato a Perugia nel 1967, laureato in Ingegneria Civile nel 1990, è ricercatore confermato di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Ingegneria di Perugia e docente di Energetica dall'a.a. 1999/2000. Membro del Consiglio Scientifico del CIRIAF, è autore di circa 40 pubblicazioni nei settori della climatizzazione, dell'energetica, dell'acustica, dell'illuminotecnica e delle proprietà termofisiche dei fluidi.

Cinzia Buratti

Nata a Marsciano (Perugia) nel 1966, si è laureata in Ingegneria Civile per la Difesa del Suolo e la Pianificazione Territoriale nel 1990. Ricercatrice di Fisica Tecnica Ambientale dal 1997 e docente di Tecnica del Controllo Ambientale dall'a.a. 1998/99. E' autrice di circa 35 pubblicazioni nel campo delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica, del benessere termoigrometrico, della conservazione di beni di interesse storico-artistico, dell'energetica.

Giorgio Baldinelli

Nato a Perugia nel 1971, si è laureato in Ingegneria Meccanica nel 1996 ed è titolare di un assegno di ricerca presso l'Università degli Studi di Perugia dal 1999. E' autore di 3 pubblicazioni nel campo della termofisica e dell'acustica.

Riassunto

Partendo dal caso della mappatura del territorio del Comune di Foligno, il lavoro esamina le finalità, i contenuti, le fasi e le metodologie delle procedure di mappatura acustica di un territorio, nell'ambito di un Piano Comunale di Risanamento Acustico. Sono innanzitutto illustrate le modalità di analisi ed interpretazione delle misure di rumore, quindi sono presentati i diversi criteri e modelli previsionali per le zone urbane ed extraurbane, ed infine sono descritte le procedure di elaborazione della mappatura.

Il lavoro è completato da alcuni esempi grafici estratti dal Piano di risanamento acustico del Comune di Foligno.

Abstract

The paper presents the aims, methods, contents and phases of a town noise mapping, starting from the case of the town of Foligno, Italy. First of all the analysis and interpretation of noise measurements is presented, then the main predictive models are illustrated, finally the noise mapping criteria are discussed.

The paper is enriched by a certain number of figures, taken from Foligno noise mapping.

1. Introduzione

Al fine di ottemperare agli obblighi introdotti dalla Normativa vigente in materia di inquinamento acustico (L.Q. 447/95 e successivi decreti), il Comune di Foligno, Area Gestione del territorio, Servizio Difesa del Suolo e dell'Ambiente ha avviato, fin dal 1997, la elaborazione del Piano di Risanamento Acustico del territorio comunale.

Il Piano, redatto dal CIRIAF – Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici, è articolato in cinque fasi principali:

- Progetto esecutivo delle attività;
- Misure di rumore;
- Zonizzazione acustica;
- Mappatura acustica;
- Piano di bonifica.

Nel presente lavoro sono descritte le procedure ed i risultati della fase relativa alla mappatura acustica.

1.1 Criteri e finalità della mappatura acustica

La finalità principale di un Piano di Risanamento Acustico è quella di tutelare le zone acusticamente non inquinate e di risanare quelle in cui si riscontrano condizioni di rumorosità non conformi alle disposizioni di legge.

A tal fine, è fondamentale una approfondita conoscenza dello stato di inquinamento acustico del territorio in esame.

Lo strumento più efficace allo scopo è senza dubbio la mappatura acustica, ossia la rappresentazione cartografica del territorio suddiviso per aree omogenee, ad ognuna delle quali è associato un livello di rumorosità.

Nota il livello di rumore nei punti di misura è possibile, mediante l'impiego di opportuni modelli di calcolo, stimare il rumore in tutti i punti del territorio. Tale operazione comporta l'individuazione e la classificazione di tutte le sorgenti di rumore presenti nel territorio; si effettua pertanto un censimento delle sorgenti di rumore.

Le aree nelle quali non sono rispettati i limiti di legge possono essere individuate operando un confronto fra le mappe di rumore e la zonizzazione acustica del territorio.

Nella fase di bonifica acustica, infine, il censimento delle sorgenti di rumore consente l'individuazione delle specifiche cause di inquinamento, dei soggetti responsabili e dei possibili interventi di risanamento.

Nell'ambito del Piano di Risanamento Acustico, la fase di mappatura segue la fase delle misure di rumore. Si deve prevedere una serie di attività che consenta, a partire dai dati della campagna di misure, la classificazione delle sorgenti e la realizzazione delle mappe di rumore.

Il lavoro di mappatura può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

- 1) Interpretazione delle misure fonometriche;
- 2) Interpretazione degli altri dati rilevati;
- 3) Identificazione delle sorgenti;

- 4) Classificazione delle sorgenti;
- 5) Identificazione dei punti di previsione;
- 6) Analisi topografica del territorio;
- 7) Previsione del rumore;
- 8) Interpolazione dei dati previsionali;
- 9) Realizzazione delle mappe di rumore.

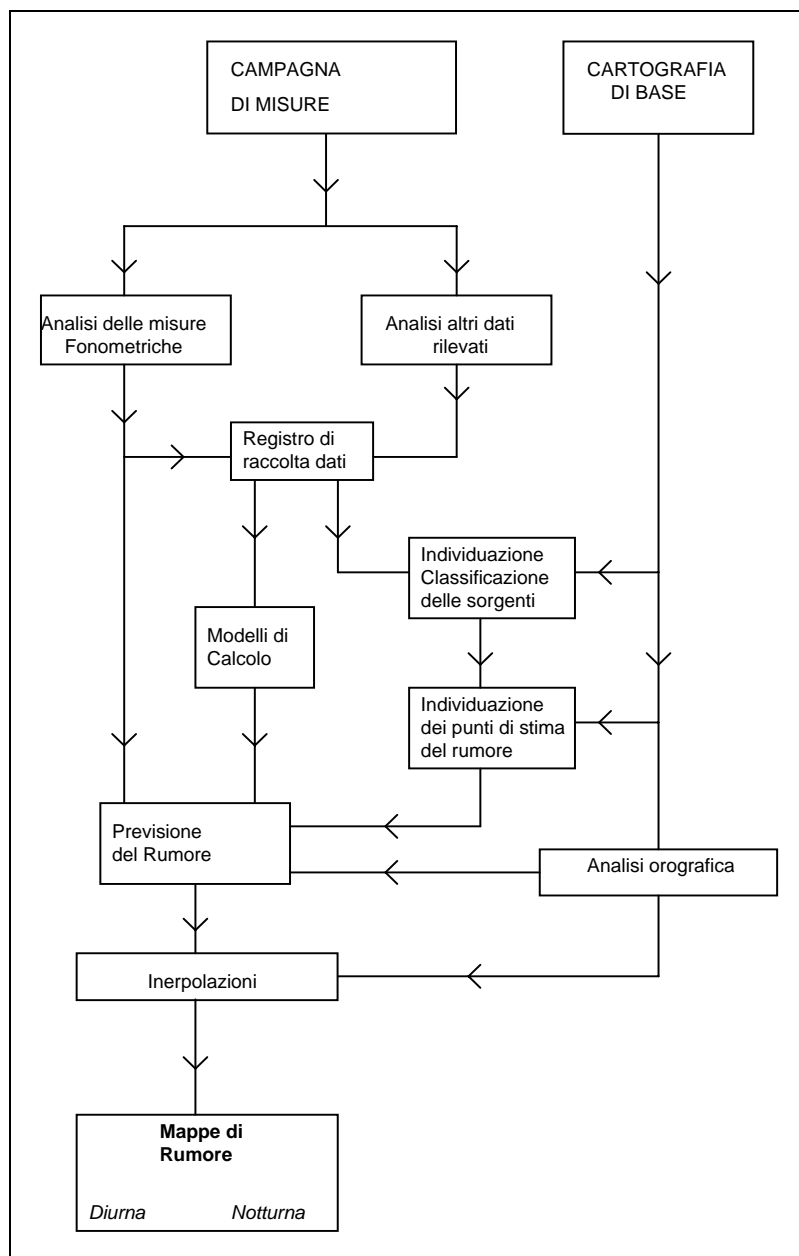


Fig. 1: *diagramma delle attività nella fase di mappatura acustica del territorio.*

2. Misure di rumore

2.1 Riferimenti normativi

La base normativa in materia di inquinamento acustico è senz'altro rappresentata dalla Legge Quadro N. 447/95. La Legge, dopo aver fissato le finalità e definito alcuni concetti fondamentali quali l'inquinamento acustico, le sorgenti di rumore ed i valori limite di emissione, stabilisce le competenze dello Stato, delle Regioni, delle Province e dei Comuni in materia di inquinamento acustico. Vengono inoltre fornite indicazioni per la predisposizione di piani di risanamento acustico e per le valutazioni di impatto acustico e si fissano infine le sanzioni amministrative per il superamento dei limiti di emissione e si indicano gli organismi preposti ai controlli.

Mentre venivano avviate le attività relative al piano di risanamento acustico del Comune di Foligno, entrava in vigore il Decreto del Ministero dell'Ambiente del 16 marzo 1998 relativo alle tecniche di misurazione dell'inquinamento acustico.

La valutazione del livello equivalente di rumore in corrispondenza di infrastrutture viarie era prevista eseguendo 2 misure in tempi diversi nello stesso punto: la prima effettuata durante un qualsiasi periodo di tempo appartenente alle ore piene; con tempo di misura di almeno 30 minuti; la seconda effettuata durante un qualsiasi periodo di tempo appartenente alle ore vuote; con tempo di misura di almeno 30 minuti. L'esecuzione di tali

operazioni era da ripetere sia per il tempo di riferimento diurno che per quello notturno.

Il D.M del 16 marzo 1998 prevede tuttavia un tempo di campionamento per la misura del rumore stradale non inferiore ad una settimana.

Visto lo stato di avanzamento delle attività, per non gravare eccessivamente sull'Amministrazione Comunale in termini di tempi e costi delle misure, si è optato per una sola parziale modifica delle modalità di misura.

Su 12 punti dell'area urbana si è proceduto alla misura nell'arco dell'intera giornata invece che in due periodi campione di mezz'ora ciascuno, come è stato fatto per i punti rimanenti. Si è così proposto un compromesso tra le nuove esigenze del D.M. e ciò che era già stato definito.

Negli anni 1999 e 2000, il CIRIAF ha eseguito 90 punti di misura previsti dal progetto iniziale; di cui 60 punti di misura urbani (di cui 12 misure giornaliere e 48 misure suddivise in due periodi campione di mezz'ora ciascuno sia per il tempo di riferimento diurno che notturno), e 30 periferici.

2.2 Caratteristiche della strumentazione

Le misure di livello equivalente sono state effettuate direttamente con un fonometro Bruel & Kjaer, modello 2260 Investigator BZ7206 che è conforme alla classe 1 delle norme EN 60651 e EN 60804.

E' stato inoltre utilizzato un microfono Bruel & Kjaer 4189, nel rispetto delle norme EN 61094-1, EN 61094-2, EN 61094-3, EN 61094-4. Per la taratura del fonometro si è utilizzato un calibratore Bruel & Kjaer 4231, conforme alle norme CEI 29-4 (IEC 942).

L'Unità Operativa è stata dotata di strumentazione ausiliaria per i rilievi planimetrici e fotografici ed in particolare:

- bussola;
- doppiodecametro (fettuccia);
- macchina fotografica munita di flash e grandangolo;
- torcia elettrica;

E' stata allestita inoltre una centralina microclimatica TECORA HSA DGT per la rilevazione dei dati climatici.

La centralina consente la misura e la registrazione delle seguenti grandezze:

- temperatura dell'aria;
- umidità relativa;
- velocità del vento.

Il funzionamento della centralina ha abbracciato tutto il periodo dell'esecuzione delle misure.

2.3 Criteri di scelta dei punti di misura

L'individuazione dei punti di misura nel territorio comunale di Foligno è stata effettuata impiegando due criteri diversi; a tale scopo il territorio

comunale è stato suddiviso in due parti: la zona urbana e la zona periferica o extraurbana.

Nella zona urbana si sono identificati i punti di misura mediante un'indagine dettagliata del territorio e prescindendo dalla localizzazione di sorgenti o di particolari ricevitori; in tale zona risulta difficile identificare sorgenti fisse e le sorgenti specifiche; il livello di rumore è determinato, per una certa percentuale, dal campo acustico riverberato vista la notevole densità di superfici riflettenti.

Nella zona periferica la scelta dei punti di misura è avvenuta in base ad un criterio sorgenti-orientato e ricevitore-orientato. Sono state identificate le sorgenti mobili ed i principali ricevitori soggetti al rumore.

Nei seguenti paragrafi si specificano i criteri adottati per le due zone citate.

2.3.1 La zona urbana

La zona urbana è stata suddivisa mediante una griglia a maglie quadrate di lato pari a 250 m. I punti di intersezione delle linee della griglia costituiscono lo schema di base per l'individuazione dei punti di misura. Quando i punti di misura coincidevano con il tetto di un edificio, con qualsiasi altro luogo inaccessibile, o comunque ricadevano in un'area scarsamente significativa, questi sono stati spostati sulla sede stradale più vicina.

2.3.2 La zona periferica

Nella zona periferica i punti di misura sono stati individuati lungo le vie di comunicazione, in prossimità di particolari ricettori e nelle principali aree industriali. Alcuni punti sono stati infine inseriti in zone scarsamente abitate, al fine di valutare il rumore di fondo presente nell'area.

2.4 Risultati e rappresentazione grafica

I risultati delle misure sono stati riportati nelle apposite Schede di Rilevamento Acustico (una per ogni punto di misura); i dati delle schede costituiscono le informazioni necessarie per la realizzazione delle mappe di rumore e per la predisposizione di piani di bonifica.

A titolo di esempio, in fig. 2 sono riportati (secondo la rappresentazione suggerita dalla norma UNI 9884) i dati fonometrici misurati (L_{eq} , L_1 , L_{10} , L_{90}) per i periodi di riferimento diurno pieno, diurno vuoto, notturno pieno e notturno vuoto. Dalla figura è deducibile l'esatta ubicazione di ogni punto di misura oltre alla durata temporale del campionamento (misure di 24 h o misure suddivise in due periodi campione di mezz'ora ciascuno).

2.5 Analisi critica e interpretazione delle misure fonometriche

Le schede di rilevamento sono compilate dalle unità operative durante l'esecuzione della campagna di misure; i risultati dei rilievi fonometrici possono essere affetti da errori interpretativi e di trascrizione.



Fig. 2: rappresentazione dei risultati delle misure di rumore.

Si è provveduto pertanto ad una fase di analisi dei rilievi, volta a verificare la loro effettiva rappresentatività.

I dati sottoposti ad analisi sono stati:

1) Le misure fonometriche.

Lo scopo di tale analisi è stato quello di verificare che il livello equivalente di rumore misurato in un dato punto di rilievo fosse rappresentativo della rumorosità media nel punto stesso.

A tale proposito, per ogni punto di misura, sono stati analizzati gli andamenti temporali in ogni fascia oraria dei livelli di rumore evidenziando, in accordo con i commenti e le segnalazioni riportate nella scheda di rilevamento, l'eventuale presenza di eventi acustici di carattere straordinario; in tal caso la misura è stata rielaborata, scorporando dall'andamento globale il rumore disturbante e ricalcolandone il livello equivalente.

2) I contributi delle sorgenti.

Al fine di caratterizzare le specifiche sorgenti di rumore, molti punti di misura sono stati individuati in base a criteri sorgente-orientato o ricevitore-orientato.

In molti casi, tuttavia, è particolarmente difficile associare ad una specifica misura fonometrica una particolare sorgente di rumore; accade infatti che il livello di rumore in un punto può essere frutto del contributo significativo di più sorgenti.

Inoltre, nei punti individuati in base ad una griglia regolare, si perde completamente la relazione fra sorgente specifica di rumore e punto di misura.

In base ai commenti degli operatori, agli andamenti temporali delle misure ed alle fotografie allegate nelle schede di rilievo, sono state quindi evidenziate le principali sorgenti di rumore che contribuiscono al livello equivalente in un dato punto.

Nel caso delle sorgenti mobili (strade), tale operazione è stata effettua-

ta congiuntamente all'analisi dei livelli percentili; infatti supponendo che il livello L_{90} costituisce il rumore di fondo, il confronto fra tale valore ed il livello equivalente fornisce informazioni sul contributo della particolare sorgente presso la quale è sito il punto di misura.

Nel caso delle sorgenti fisse, invece, tale contributo è stato valutato confrontando il livello di rumore ambientale con il livello di rumore residuo.

3) Composizione del livello di rumore

Per la valutazione del livello equivalente di rumore nel tempo di riferimento diurno e nel tempo di riferimento notturno, sono stati composti i singoli livelli relativi alle fasce orarie in cui risultano suddivisi i tempi di riferimento (ore piene, ore vuote) in base alla relazione:

$$Leq(A) = 10 \log_{10} \frac{T_p 10^{0.1L_p} + T_v 10^{0.1L_v}}{T_p + T_v}$$

dove:

T_p = tempo di misura durante le ore piene;

T_v = tempo di misura durante le ore vuote;

L_p = livello equivalente ponderato A misurato durante le ore piene;

L_v = livello equivalente ponderato A misurato durante le ore vuote;

Tale operazione è stata effettuata con i valori dei livelli ottenuti a seguito dell'analisi delle misure fonometriche di cui al punto 1.

2.6 *Analisi degli altri dati*

Le schede di rilevamento dati contengono, in aggiunta alle misure fonometriche, altri dati relativi alla tipologia della sorgente, al sito di misura ed ad eventuali segnalazioni dell'unità operativa effettuate a seguito del sopralluogo o a seguito delle interviste.

E' risultato necessario, mediante l'analisi delle fotografie e le segnalazioni dell'unità operativa, verificare l'eventuale presenza di ostacoli o particolarità orografiche fra il punto di misura e la sorgente mobile; tale eventualità costituisce un dato di "input" per i modelli di previsione acustica.

Inoltre, nel caso di sorgenti mobili, si è dovuta verificare la tipologia della strada, confrontando i dati riportati nelle schede con i dati cartografici.

2.7 *Identificazione e classificazione delle sorgenti di rumore*

Dall'analisi ed interpretazione dei risultati delle misure fonometriche e degli altri dati presenti nelle schede di rilevamento è stato possibile procedere all'identificazione e successiva classificazione delle sorgenti di rumore.

Le principali sorgenti di rumore riscontrate sono le infrastrutture di trasporto stradale e ferroviario.

Una stessa strada può essere costituita da tratti con caratteristiche differenti rendendo così necessaria la sua diversificazione in differenti sorgenti

ti mobili. Prendendo in considerazione questa possibilità, la caratterizzazione acustica delle vie di comunicazione stradali presenti è avvenuta individuando tratti aventi caratteristiche omogenee relative al traffico veicolare, alla pendenza, alla situazione morfologica (presenza di edifici ai lati, tipo di asfalto, larghezza della strada ecc.) e geometrica (tratto rettilineo o in curva) della sede viaria.

Le strade sono state classificate in tre diverse categorie utilizzando la stessa simbologia adottata nei modelli di calcolo descritti nel capitolo , secondo il seguente schema:

- Strade di tipo A, ossia Autostrade e Superstrade;
- Strade di tipo SS, ossia strade a scorrimento veloce;
- Strade di tipo SU, ossia strade urbane.

Ogni tratto di strada individuato è stato identificato con una sigla composta da:

- un campo letterale, dove introdurre una delle tre categorie sopra descritte;
- un campo numerico, costituito dal numero progressivo assegnato al tipo di strada A, SS o SU.

Il risultato finale di questo procedimento è rappresentato dalla Tabella 1 nella quale sono elencate tutte le sorgenti mobili individuate nel territorio extraurbano con il relativo codice di riconoscimento, il livello di rumore L_{eq} calcolato, il livello di potenza ad essa associato, valutati nei periodi di riferimento diurno e notturno.

Tab. 1: caratterizzazione delle sorgenti di rumore in ambito extraurbano.

Codice strada	Livello equivalente pressione diurno db(A)	Livello equivalente pressione diurno db(A)	Livello potenza diurno db(A)	Livello potenza notturno db(A)	numero punto di misura
SS-1a	73.5	69.4	86.94	82.84	92
SS – 1b	70.35	68.88	84.14	82.67	96
SS – 3	67.88	61.8	83.66	77.58	100
SS - 4	65.55	53.48	80.08	68.01	102
SS – 6	54.4	44.6	69.56	59.76	103
SS - 7	58.7	44.6	73.69	59.59	98
SS – 8	60.6	54.0	75.59	68.99	93
SS – 9	72.79	69.09	87.12	83.42	81
SS – 10	69.75	62.2	84.56	77.01	87
SS – 11	66.59	59.95	81.4	74.76	78
SS – 12	61.14	53.74	75.17	67.77	76
SS – 13	49.44	39.0	62.21	51.77	77
SS – 14	63.32	58.71	76.76	72.15	82
SS - 15	62.46	54.43	76.48	68.45	79
SS – 16	72.36	67.72	87.99	83.35	90
SS – 17	70.6	65.7	85.2	80.3	91
SS – 18	67.7	64.3	82.8	79.5	95
SS – 19	62.5	56.0	76.83	70.33	86
SS – 20	72.75	67.41	89.88	84.55	83
SS - 21	68.2	61.52	83.19	76.51	9
SS – 22	61.26	57.82	86.25	82.88	2
SS – 23	71.2	65.64	85.82	80.26	3
SS - 24	66.5	54.2	77.51	65.21	89

Le sorgenti mobili principali così individuate, sono state caratterizzate da una misura fonometrica, prevista nella fase di progetto, volta a produrre tutte le informazioni necessarie alla successiva applicazione dei modelli previsionali.

I dati reperiti per ogni sorgente sono:

- **CODICE STRADA:** è stato indicato il tipo di strada attraverso i codici già descritti A/SS/SU;
- **SEZIONE STRADA:** è stata indicata la tipologia della sezione stradale con i codici U/A/L in base rispettivamente alla presenza di edifici lungo entrambi i lati, all'assenza di edifici o alla presenza lungo un solo lato;
- **ALTEZZA EDIFICI:** espressa in metri;
- **LARGHEZZA STRADA:** è stata misurata in metri;
- **TIPO DI PAVIMENTAZIONE:** il manto stradale è stato classificato come liscio, ruvido, in conglomerato cementizio e lastricato scabro; a questa classificazione sono stati assegnati i codici AL (asfalto liscio)/AR(asfalto ruvido)/CEM (nel caso di conglomerato cementizio e lastricato scabro);
- **FLUSSO VEICOLARE:** il traffico dei mezzi è stato valutato nel tratto di strada interessato in veicoli/ora in funzione della tipologia veicolare e ne è stato indicato sia il valore nel tempo di riferimento diurno che notturno:

- **VELOCITA DEL TRAFFICO:** le condizioni del traffico sono state indicate attraverso i codici S (traffico scorrevole) / I (presenza di incroci) / R (traffico rallentato);
- **LIVELLO DI POTENZA:** ad ogni sorgente è stato assegnato un livello di potenza calcolato sulla base dei rilievi fonometrici secondo le modalità previste dal modello stradale classico CIRIAF.

-

Le ferrovie sono state caratterizzate mediante:

- **LIVELLO DI POTENZA:** calcolato secondo le modalità esposte per le sorgenti stradali;
- **NUMERO DI TRENI:** si è considerato il numero di treni nell'ora di massimo traffico ferroviario;
- **VELOCITA' DEL TRENO:** valutata in km/h.

-

Tutti i dati descritti sono stati inseriti sul supporto informatico previsto per la valutazione del rumore nei punti di stima e illustrato nel paragrafo 3.

3 Stima dei livelli di rumore

I risultati della campagna di misura, la loro elaborazione ed interpretazione hanno consentito, congiuntamente a considerazioni di tipo topografico ed orografico, di valutare il livello di rumorosità in tutti i punti del territorio; tale operazione ha permesso di ricavare curve isolivello e conseguentemente le mappe di rumore.

La previsione del rumore può talvolta essere effettuata mediante una semplice interpolazione dei dati di misura; tuttavia la fedeltà delle interpolazioni dipende dalla densità e dalla distribuzione dei punti di misura.

La suddivisione del territorio in esame in due zone, per ognuna delle quali è stato adottato un differente criterio per la scelta dei punti di misura, ha determinato anche una distribuzione degli stessi non omogenea.

Nelle aree del territorio nelle quali la densità dei punti di misura non era sufficientemente elevata, si è reso necessario individuare ulteriori punti detti "punti di stima" o "punti di previsione". Il livello in tali punti è stato stimato grazie ad appositi modelli di calcolo.

I punti di stima sono stati successivamente utilizzati come base di partenza per l'effettuazione delle interpolazioni; in tal modo si è incrementata la densità dei punti in cui è noto il livello di rumore e si è garantita maggiore fedeltà alle interpolazioni.

I criteri di individuazione dei punti di stima dipendono dalla densità e dalla distribuzione dei punti di misura.

Nella zona urbana non sono state effettuate stime. La forte influenza del

campo acustico riverberato e la conseguente impossibilità di associare agli eventuali punti di stima il contributo dato dalle sorgenti presenti ha infatti reso impossibile l'applicazione dei modelli di calcolo previsti.

In fase di progetto comunque, era stato previsto un infittimento dei punti di misura in questa zona per ovviare alla situazione presente.

Nella zona extraurbana è stato possibile individuare molti punti di stima in cui effettuare la valutazione del rumore.

A tal fine si è considerata una griglia di stima regolare a maglie quadrate di lato pari a 500 metri; in questo modo sono stati individuati punti (i nodi della maglia) ove è stato possibile valutare il livello di rumore tramite l'utilizzo dei modelli di calcolo trattati nel capitolo ed implementati su un foglio elettronico.

Durante tale fase si è reputato opportuno infittire notevolmente i punti di stima in prossimità di incroci stradali e ferroviari al fine di poter determinare con maggiore accuratezza l'andamento delle curve isolivello

3.1 Modalità di effettuazione delle stime

La previsione del rumore in un punto di stima è stata effettuata scegliendo, fra tutte le sorgenti presenti nel territorio, quelle che contribuiscono al livello di rumore nel punto.

A tale proposito si elencano i requisiti che le sorgenti devono possedere per essere associate ad un dato punto di stima:

- a) il livello di rumore prodotto dalla singola sorgente nel punto deve essere superiore a quello di fondo nel tempo di riferimento notturno e nel tempo di riferimento diurno (la valutazione del rumore di fondo di una certa area è stata effettuata operando una media tra gli L90 relativi ai punti di misura presenti all'interno della zona stessa, nel tempo di riferimento diurno e notturno);
- b) le sorgenti di rumore che sono separate dal punto di stima da ostacoli naturali (montagne, dossi, valli, ecc...) vengono considerate ininfluenti. Tale eventualità è stata verificata mediante l'analisi delle curve altimetriche riportate nella cartografia o mediante le segnalazioni delle unità operative riportate nelle schede di rilevamento.

Dopo aver associato ad ogni punto di misura le sorgenti che contribuiscono al livello di rumore, si è passati alla determinazione di tutti i dati necessari per l'applicazione dei modelli di calcolo.

La scelta di tali modelli risulta fortemente vincolata dalla tipologia del territorio in esame e dalla scala alla quale si intende operare: questi due fattori infatti determinano la scelta di alcune assunzioni e semplificazioni alle quali la mappatura acustica finale risulta inevitabilmente legata.

3.2 I modelli previsionali

I modelli previsionali disponibili per la stima del rumore possono essere suddivisi principalmente in due categorie:

- *modelli di pianificazione*: utilizzati per mappature del territorio in grande scala (1:10000);
- *modelli di dettaglio*: utilizzati per mappature in scala ridotta (almeno 1:2000).

La differenza sostanziale tra le due categorie risiede nella diversa quantità di dati di input, sia topografici che relativi alla conformazione dell'ambiente di propagazione, necessarie per la loro applicazione.

Nel caso della mappatura acustica del Comune di Foligno, sfruttando l'esperienza acquisita nei Piani di Risanamento Acustico dei Comuni di Perugia e Terni si è deciso di utilizzare i modelli di pianificazione in quanto idonei a garantire il grado di precisione richiesto dal progetto in esame.

I modelli di pianificazione esistenti per la caratterizzazione del rumore prodotto da traffico stradale possono essere raggruppati in due categorie: *modelli estensivi* e *modelli predittivi*.

I modelli estensivi sfruttano i risultati delle misure fonometriche eseguite in prossimità della sorgente le quali permettono di attribuire alla sorgente stessa un livello di potenza caratteristico dal quale è possibile stimare il livello di pressione in punti situati a qualsiasi distanza. L'attendibilità di

tali modelli è ovviamente vincolata alla precisione con cui vengono effettuati i rilievi fonometrici caratterizzanti la sorgente.

I modelli predittivi invece, consentono la valutazione del livello del rumore utilizzando esclusivamente i dati riguardanti il flusso veicolare e le caratteristiche urbanistiche del sito. Questi modelli presentano una maggiore velocità e semplicità di valutazione rispetto a quelli estensivi ma non fanno riferimento a rilievi fonometrici effettuati sulla sorgente. La deduzione dei parametri atti a caratterizzare la potenza della sorgente avviene per via sperimentale e può variare in funzione delle caratteristiche stradali e della varietà di veicoli del paese in cui vengono effettuate le sperimentazioni.

Al fine di ottenere una stima del livello di rumore nei punti aggiuntivi il più possibile accurata, sono stati utilizzati entrambi i tipi di modelli: 4 modelli predittivi (CNR, CETUR, SEL, OMTC) ed uno estensivo (classico – CIRIAF).

I loro algoritmi di funzionamento sono brevemente esposti nei paragrafi successivi.

3.2.1 Modello previsionale CNR

Il contributo di una strada di carattere urbano (presenza di edifici attorno alla sede stradale e presenza non trascurabile del capo riverberato) al livello sonoro equivalente ponderato A in un determinato punto può essere determinato mediante un algoritmo avente la seguente struttura:

$$L_{eq} = L_{rif} + \Delta_{bar} + \Delta_{div} + \Delta_{traf} \quad (3.1)$$

dove:

L_{eq} = livello sonoro equivalente, espresso in dB(A);

L_{rif} = livello sonoro di riferimento, espresso in dB(A);

Δ_{bar} = attenuazione dovuta alla interposizione di un ostacolo tra la sorgente e il ricevente, espressa in dB(A);

Δ_{div} = attenuazione dovuta a divergenza, ovvero alla distanza dalla sorgente, espressa in dB(A);

Δ_{traf} = termine correttivo in particolari condizioni di traffico, espresso in dB(A).

Il livello sonoro di riferimento L_{rif} rappresenta il livello sonoro in corrispondenza della sede viaria, mentre Δ_{bar} e Δ_{div} rappresentano i termini correttivi che tengono conto rispettivamente della distanza dalla strada del punto stima e di diverse condizioni di traffico.

Il calcolo del livello sonoro di riferimento viene effettuato distinguendo le tipologie di strada in:

- strade ad "U", ossia costeggiate da edifici da entrambi i lati e tali che il rapporto tra l'altezza degli edifici e la larghezza della strada sia maggiore o uguale a 0,2;
- strade ad "L", ossia costeggiate da edifici da un solo lato e tali che il rapporto tra l'altezza degli edifici e la larghezza della strada sia minore o uguale a 0,2;
- strade aperte, ossia libere su entrambi i lati.

Nel seguito, per semplicità di trattazione, la strada ad "L" e la strada "Aperta" verranno accomunate in un unico caso di riferimento, evidenziando le eventuali differenze.

Il valore di L_{rif} si suppone costante all'interno della carreggiata sia nel caso di strade costeggiate da edifici che nel caso di strade ad "L" o "Aper-te". Il livello sonoro in mezzera coincide pertanto con il livello sonoro in corrispondenza della facciata di edifici eventualmente presenti, che costeggiano la strada o ai lati esterni della strada. Il livello sonoro di riferimento viene valutato in entrambi i metodi con la relazione seguente:

$$L_{rif} = A + 10 \times \log(Q_{VL} + E Q_{PL}) + \Delta_R + \Delta_V + \Delta_S + \Delta_P + \Delta_G \quad (3.2)$$

dove:

A = costante espressa in dB(A);

Q_{VL} = flusso di veicoli leggeri (peso minore di 3,5 t), espresso in veicoli/h;

Q_{PL} = flusso di veicoli pesanti (peso maggiore di 3,5 t), espresso in veicoli/h;

E = coefficiente adimensionale di omogeneizzazione tra veicoli leggeri e pesanti;

Δ_R = coefficiente correttivo per tener conto della riflessione del suono sulle facciate degli edifici eventualmente presenti ai lati della strada, espresso in dB(A);

Δ_V = coefficiente correttivo di velocità, espresso in dB(A),

Δ_S = coefficiente correttivo di pavimentazione, espresso in dB(A);

Δ_P = coefficiente correttivo di pendenza dell'asse stradale, espresso in dB(A);

Δ_g = coefficiente correttivo per simulare le emissioni sonore di sorgenti lineari di lunghezza finita, espressa in dB(A).

I valori numerici assegnabili ai parametri sopra elencati sono riportati nella Tabella 3, per le due situazioni tipiche di strada ad "U" e strada ad "L" o "aperta".

L'interposizione di un ostacolo tra la sorgente ed il ricevente determina un abbattimento del livello sonoro percepito Δ_{bar} .

In ambiente urbano, gli ostacoli sono principalmente costituiti dagli edifici.

Il livello sonoro di riferimento, pertanto, costante all'interno della sede viaria, subisce un abbattimento oltrepassando il fronte dei fabbricati eventualmente presenti a lato della strada stessa. L'entità di tale riduzione risulta di difficile quantificazione, se non si ricorre a studi e valutazioni di dettaglio a microscala, che prescindono dagli scopi del modello di simulazione in esame. A livello indicativo, si può considerare che l'effetto barriera prodotto da una fila di edifici valga:

$$\Delta_{bar} = 5 \text{ [dBA]} \quad (3.3)$$

Il livello sonoro percepito dall'osservatore, a parità di tutte le altre condizioni, è funzione della distanza tra questo e la sorgente di emissione. Aumentando tale distanza si ha un'attenuazione del livello sonoro percepito.

La correlazione tra distanza e livello sonoro è di tipo logaritmico:

$$\Delta_{div} = 10\log(d/d_0) \quad [\text{dBA}]$$

dove:

d_0 = distanza di riferimento, espressa in m ed assunta pari a 25 metri;

d = distanza dell'osservatore dall'asse della sede stradale, espressa in m.

Benché questo termine di attenuazione costituisca un'approssimazione di massima della riduzione del livello sonoro di riferimento, le espressioni adottate dal modello risultano senz'altro adeguate alla finalità dell'applicazione, ovvero nella definizione di opportuni interventi di bonifica acustica.

Viene inoltre introdotto un coefficiente Δ_{traf} per tenere conto delle condizioni di moto dei veicoli in area urbana.

Il modello CNR assume:

$\Delta_{traf} = 0 \text{ dB(A)}$ per condizioni di traffico scorrevoli;

$\Delta_{traf} = +1 \text{ dB(A)}$ in prossimità di incroci;

$\Delta_{traf} = -1,5 \text{ dB(A)}$ per condizioni di traffico congestionato (velocità del flusso veicolare minore di 30 Km/h).

3.2.2 *Modello previsionale CETUR*

La validità del presente modello, analogo quello appena descritto è stata verificata per strade di carattere extraurbano.

Il livello sonoro di riferimento è ancora calcolato mediante la relazione:

$$L_{eq} = L_{rif} + \Delta_{bar} + \Delta_{div} + \Delta_{traf} \quad (3.4)$$

dove i singoli termini hanno il significato specificato in precedenza.

La relazione che esprime L_{rif} è:

$$L_{rif} = A + 10 \times \log(Q_{VL} + ExQ_{PL}) + \Delta_r + \Delta_v + \Delta_s + \Delta_p + \Delta_g \quad (3.5)$$

I valori da attribuire ai singoli termini della relazione sono indicati nelle tabelle 2, 2A, 2B, 2C, 2D, ove sono riportati anche i corrispondenti valori attribuiti con il modello CNR.

$$\Delta_{div} = -12 \log(d) \quad [\text{dBA}] \quad (3.6)$$

$$\Delta_{traf} = 0 \quad [\text{dBA}] \quad (3.7)$$

Tab. 2: termini per il calcolo del livello di riferimento

	2° MODELLO		1° MODELLO	
	Strada ad "U"	Strada aperta o ad "L"	Strada ad "U"	Strada aperta o ad "L"
A [dB(A)]	+55	+20	+35,1	+35,1
E	(1)	tabella 32A	8	8
Δ_R [dB(A)]	$-10 \times \log(L)$	0	+4	(2)
Δ_V [dB(A)]	(3)	$20 \times \log(V)$	tabella 3.2B	tabella 3.2B
Δ_S [dB(A)]	0	0	tabella 3.2C	tabella 3.2C
Δ_P [dB(A)]	(4)	(4)	tabella 3.2D	tabella 3.2D
Δ_g [dB(A)]	$10 \times \log(9/180)$	$10 \times \log(9/180)$	$10 \times \log(9/180)$	$10 \times \log(9/180)$

Note:

(1) Tabella 2, valori corrispondenti a Strada di Quartiere e Strada Locale.

(2) Lato edificio: $\Delta_R = 2,5$;

Lato aperto: $\Delta_R = 1,5$;

(3) Per velocità ≤ 60 km/h $\Delta_V = 0$

Per velocità > 60 km/h $\Delta_V = (V-60)/10$

(4) $\Delta_S = 0$, in quanto ricade già nella stima del parametro E.

dove:

L = Larghezza della sede stradale [m];

V = Velocità del flusso veicolare [km/h];

g = Angolo di visuale sotto il quale l'osservatore vede la sorgente sonora lineare

Tab. 2. A: *coefficiente dimensionale di omogeneizzazione tra veicoli leggeri e veicoli pesanti*

PENDENZA	$\leq 2\%$	3%	4%	5%	$\geq 6\%$
Superstrada /Autostrada E₁	E = 4	5	5	6	6
Strada a scorrimento veloce E₂	7	9	10	11	12
Strada urbana E₃	10	13	16	18	20

Tab 2. B: *coefficiente correttivo di velocità*

VELOCITA' DEL FLUSSO VEICOLARE [km/h]	ΔV [dB(A)]
30 - 50	0
60	+1,0
70	+2,0
80	+3,0
100	+4,0

Tab. 2. C: *coefficiente correttivo di pendenza*

PENDENZA [%]	Δ_p [dB(A)]
≤ 5	0
6	+0,6
7	+1,2
8	+1,8
9	+2,4
10	+3,0
Ad ogni % in più	+0,6

Tab. 2. D: *coefficiente correttivo di pavimentazione*

PAVIMENTAZIONE	Δ_s [dB(A)]
Asfalto liscio	-0,5
Asfalto ruvido	0
Conglomerato cementizio	+1,5
Pavimentazione in blocchi	+4,0

3.2.3 Modello previsionale basato sul calcolo del SEL

Si riporta di seguito il modello basato sul calcolo del SEL (Single Event Level) medio rilevato per ciascuna categoria di veicoli. Il SEL è definito come il valor medio del livello sonoro ponderato A, mantenuto costante per un tempo pari ad un secondo, al quale è associata una energia sonora totale pari a quella dell'evento sonoro reale.

Attraverso tale modello il valore del livello equivalente continuo ponderato A è calcolato, in base alla composizione del traffico, a partire dal

valore del SEL medio per ogni tipologia di veicolo.

Gli errori introdotti possono essere elevati quando il flusso veicolare è molto modesto o irregolare: in particolare è stato evidenziato che in presenza di traffico scarso, orientativamente inferiore ai 50 veicoli/ora, il valore calcolato del $Leq(A)$ risulta poco attendibile.

In tale circostanza è necessario aggiungere a tale valore un livello convenzionale di rumore $Leq(A),res$ (livello equivalente di rumore con traffico molto scarso o inesistente attribuibile al traffico veicolare che è presente nelle strade più vicine al sito di misura).

$Leq(A)$ risulta pertanto:

$$Leq(A) = 10 \log(10^{0,1Leq(A),res} + 10^{0,1Leq(A),sel}) \quad (3.8)$$

Se non è dato conoscere $Leq(A),res$ si possono assumere i seguenti valori:
ore diurne (6 - 22)

$Leq(A),res = 35$ dBA per le zone residenziali e protette;

$Leq(A),res = 40$ dBA per le zone miste con attività commerciali ed artigianali poco rumorose;

$Leq(A),res = 45$ dBA per le zone ad intensa attività umana, in quelle in prossimità di strade di grande traffico, nelle zone prevalentemente industriali e in quelle industriali.

Durante la notte (22 - 6) i valori suddetti devono intendersi ridotti di 10dBA.

Il secondo termine della (3.8) $Leq(A),sel$ è calcolabile secondo la:

$$\text{Leq}(A), \text{SEL} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^S n_i 10^{0,1 \text{SEL}_i} \right) \quad (3.9)$$

e quindi per $T = 3600$ s:

$$\text{Leq}(A), \text{SEL} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^S n_i 10^{0,1 \text{SEL}_i} \right) - 35,6 \quad (3.10)$$

Nella (3.10) n_i rappresenta il numero dei veicoli della i -esima categoria che passano davanti al punto di osservazione durante l'intervallo di misura T ed è rapportato agli specifici valori di SELM (SEL medio) propri delle categorie di veicoli suddette.

Per tener conto in qualche modo degli effetti di riflessione delle strutture verticali, SEL_m assume valori diversi per strade chiuse, con $L/H' \leq 2,0$ ($L =$ larghezza della strada ed $H' =$ altezza dell'edificio più basso), e per strade aperte o prive di edifici limitanti con $L/H' > 2$.

Per l'esplicitazione della (3.10) è necessario valutare il numero di autoveicoli/h (n_1), quello dei veicoli industriali leggeri (n_2) e pesanti (n_3) dei motocicli (n_4) e dei ciclomotori (n_5), in relazione alla specifica tipologia stradale del sito di misura.

Utilizzando i valori di SEL riportati nella tab. 3, la (3.10) si esplicita nelle due seguenti espressioni per il calcolo del livello equivalente continuo di rumore orario:

$$\text{Leq}(A), h, \text{SEL} = 10 \log (n_1 10^{7,65} + n_2 10^{8,00} + n_3 10^{8,60} + n_4 10^{8,45} + n_5 10^{7,85}) - 35,6 \quad (3.11)$$

Tab. 3: SEL medio per diverse tipologie di veicoli in relazione alla tipologia stradale

Tipo di strada	Autoveicoli	Veicoli industriali leggeri	Veicoli industriali pesanti	motocicli	ciclomotori
strade chiuse	76,5	80,0	86,0	84,5	78,5
strade aperte	76,0	79,5	84,5	82	77,5

per strade chiuse con $0,5 < L/H' \leq 2$:

$$Leq(A), h, SEL = 10 \log(n_1 10^{7,60} + n_2 10^{7,95} + n_3 10^{8,45} + n_4 10^{8,20} + n_5 10^{7,75}) - 35,6 \quad (3.12)$$

per strade aperte con $L/H' > 2$.

Effettuando gli sviluppi matematici della (3.11) e della (3.12) si ottiene per strade chiuse:

$$Leq(A), h, SEL = 10 \log(n_1 4,467 + n_2 10 + n_3 39,811 + n_4 28,184 + n_5 7,079) + 34,3 \quad (3.13)$$

per strade aperte:

$$Leq(A), h, SEL = 10 \log(n_1 3,981 + n_2 8,913 + n_3 28,184 + n_4 15,849 + n_5 5,623) + 34,4 \quad (3.14)$$

I metodi di predeterminazione, basati sulla valutazione dei contributi energetici per singolo evento, offrono, tra l'altro, il vantaggio di poter valutare le variazioni di rumorosità che si determinano modificando la percentuale delle componenti veicolari nell'insieme dei flussi di traffico (ad esempio soppressione o riduzione del transito di autoveicoli industriali pesanti) o intervenendo direttamente sulle sorgenti (ad esempio, riduzione dei livelli massimi di rumorosità ai fini della omologazione dei veicoli).

La (3.8) può, successivamente, essere affinata utilizzando tutta una serie di fattori di correzione (ΔL) che vengono di seguito riportati:

ΔLZ = fattore di correzione per le caratteristiche geometriche del sito di misura: deve essere valutato paria +1 dBA qualora si utilizzino i valori di SEL per le strade chiuse, nel caso che il rapporto L/H' sia inferiore a 0,5; sempre utilizzando i suddetti valori di SEL sarà uguale a -0,5 dBA per strade con edifici da un solo lato;

ΔLV = fattore di correzione per la velocità media dei veicoli; deve essere preso in considerazione per le strade di grande comunicazione o per autostrade, assumendo valori di +2 dBA per ogni incremento di 15 km/h della velocità media dei veicoli in transito nella fascia di velocità compresa tra 60 e 120 km/h;

ΔL_p = fattore di correzione per la pendenza della strada: è di 0 dBA per pendenze fino al 4%, mentre per le pendenze superiori aumenta di 0,6 dBA per ogni incremento unitario della pendenza della strada stessa;

ΔL_r = fattore di correzione per le caratteristiche del manto stradale: pari a -3 dBA per asfalti fonoassorbenti, a 0 dBA per asfalto liscio, a + 2 dBA per cemento e a + 4,5 dBA per manto lastricato scabro o pavè;

ΔL_d = parametro di correzione per la distanza: poiché il livello sonoro continuo (ponderato A) L_{Aeq} diminuisce di 3 dBA a ogni raddoppio della distanza, si può porre:

$$\Delta L_d = -10 \log\left(\frac{r}{r_{rif}}\right) - L_{es} \quad (3.15)$$

dove:

r e r_{rif} sono assunti perpendicolarmente al treno dei veicoli.

Il valore assunto da L_{es} è nullo quando $r < 300m$ mentre per valori superiori:

$$L_{es} = 0,005 \cdot D \quad (3.16)$$

L'espressione per il calcolo dell' L_{Aeq} basato su misure di SEL, può essere, pertanto, così completata:

$$Leq(A) = 10 \log(10^{0,1Leq(A),res} + 10^{0,1Leq(A),SEL}) + \Delta L_z + \Delta L_v + \Delta L_p + \Delta L_r + \Delta L_d \quad (3.17)$$

3.2.4 Modello previsionale OMTTC

Questo modello è stato implementato dall'Ontario Ministry of Transportation and Communication e si basa sul seguente algoritmo di calcolo:

$$L_{Aeq} = 49.5 + 10.21 \log(Q_l + 6Q_p) - 13.9 \log d + 0.2IV \quad (3.18)$$

dove

d = distanza del punto di stima dal bordo della strada in metri;

Q_l = flusso orario di veicoli leggeri;

Q_p = flusso orario di veicoli pesanti (assunti pari a sei veicoli leggeri);

V = velocità media di deflusso in Km/h.

3.2.5 Modello previsionale CLASSICO - CIRIAF

Il modello estensivo considerato è stato sperimentato con successo presso il CIRIAF ed è basato sulle seguenti ipotesi:

- flusso veicolare omogeneo;
- direzione di massima propagazione del rumore relativa al piano bisettore del diedro costituito dal piano stradale e dal piano normale a quest'ultimo passante per la mezzeria;
- sorgente concentrata lungo la linea di mezzeria;
- si ignora il carattere intermittente del traffico;
- le caratteristiche del singolo veicolo non intervengono in modo diretto nel modello.

In base alle suddette ipotesi, l'intensità acustica angolare può essere espressa dalla seguente legge (convalidata da dati sperimentali):

$$I(\alpha) = I_n \cdot \cos^3 \alpha \quad (3.19)$$

con I_n = intensità angolare, valutata per la direzione relativa alla bisettrice.

Essendo:

$$\frac{dW}{d\omega} = I(\alpha) \quad (3.20)$$

con: W = potenza della sorgente;

risulta:

$$W = \int_{\Omega} I(\alpha) \cdot d\omega = \int_{\Omega} I_n \cdot \cos^3 \alpha \cdot d\omega = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_n \cdot \cos^3 \alpha \cdot 2\pi \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\pi}{2} I_n \quad (3.21)$$

dove:

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \text{ con } dA = 2\pi r \cdot r \cdot d\alpha = 2\pi r^2 \sin\alpha \cdot d\alpha \quad (3.22)$$

essendo inoltre $d\omega = 2\pi \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha$ si ottiene:

$$I(\alpha) = \frac{2 \cdot W}{\pi} \cos^3 \alpha \quad (3.23)$$

quindi:

$$J(\alpha) = I(\alpha) \cdot \frac{d\omega}{dA} = I(\alpha) \cdot \frac{1}{r^2} = \frac{2 \cdot W}{\pi \cdot r^2} \cos^3 \alpha \quad (3.24)$$

Si definiscono pertanto:

$$Q(\alpha) = \frac{J(\alpha)}{J_{\text{omnid.}}} = \frac{I(\alpha)}{r^2} \cdot \frac{4\pi r^2}{W} = 8 \cdot \cos^3 \alpha \quad (3.25)$$

$$ID(\alpha) = 10 \log Q(\alpha) = 9 + 30 \log(\cos \alpha) \quad (3.26)$$

dove:

$Q(\alpha)$ = fattore di direttività;

$J_{\text{omnid.}}$ = intensità di potenza di una sorgente omnidirezionale valutata alla stessa distanza di $J(\alpha)$;

$ID(\alpha)$ = indice di direttività.

Si introducono inoltre le grandezze:

W' = potenza della sorgente per unità di lunghezza [Watt/m];

dJ = intensità di potenza per unità di lunghezza.

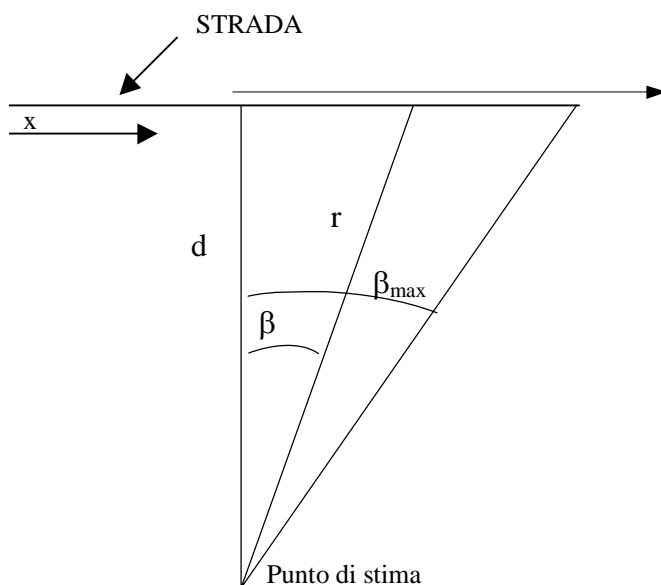


Fig. 3: schema di riferimento per l'elaborazione del modello delle strade.

Con riferimento alla Fig. 3 risulta:

$$dJ(\alpha) = \frac{W' \cdot dx}{4\pi \cdot r^2} \cdot Q(\alpha) \quad (3.27)$$

$$J(\alpha) = 2 \cdot \int_0^{\beta_{max}} \frac{W'}{4\pi \cdot r^2} \cdot Q(\alpha) \cdot r \cdot d\beta = \frac{W' \cdot Q(\alpha)}{4\pi \cdot d} \cdot \sin(\beta_{max}) \quad (3.28)$$

In base alla definizione di potenza e pressione acustica si ottiene:

$$L_p = L_W - 8 - 10 \log r + ID(\alpha) \quad (3.29)$$

$$ID(\alpha) = 10 \log(Q(\alpha)) + 10 \log(\sin\beta) \quad (3.30)$$

ovvero:

$$L_p = L_w - 8 - 10 \log r + B(\beta) + ID'(\alpha) \quad (3.31)$$

in cui:

$$ID'(\alpha) = 9 + 30 \log(\cos \alpha) \quad (3.32)$$

$$B(\beta) = 10 \log(\sin \beta) \quad (3.33)$$

$$J_0 = P_0^2 / \rho_0 c_0 \quad (3.34)$$

P_0 = pressione acustica di riferimento = $20 \cdot 10^{-6}$ Pa;

$\rho_0 c_0$ = resistenza acustica caratteristica dell'aria;

L = livello di pressione acustica misurato;

L_w = livello di potenza della sorgente.

Avendo stabilito per ipotesi che la direzione preferenziale di propagazione del rumore è quella lungo il piano bisettore del diedro costituito dal piano stradale ed il piano ad esso normale passante per la mezzzeria, si effettua la sostituzione:

$$\alpha = (45^\circ + \gamma) \quad (3.35)$$

da cui:

$$L_p = L_w - 8 - 10 \log r + B(\beta) + ID'(\gamma) \quad (3.36)$$

$$ID'(\alpha) = 9 + 30 \log(\cos(45^\circ + \gamma)) \quad (3.37)$$

$$B(\beta) = 10 \log(\sin \beta) \quad (3.38)$$

Le relazioni (3.36), (3.37) e (3.38) sono usate dal modello CIRIAF per la stima del livello di rumore prodotto dalla strada. Esse sono state anche utilizzate per la stima del livello di potenza delle varie sorgenti mobili.

3.2.6 *Modello previsionale per le ferrovie*

Il modello ricorrere a una formula semplice che prende in considerazione la distanza del punto di stima D , la lunghezza totale del treno in metri " L_t ", la velocità del convoglio in km/h " V " e il numero di treni " n " che transitano davanti al punto disturbato nell'ora di maggior traffico.

Sulla base dei predetti elementi di calcolo, $Leq(A)$ può essere determinato secondo la:

$$Leq(A) = 15 - 3 \log D + 10 \log(L_t V^2) + 10 \log n \quad (3.40)$$

Per l'applicazione dei modelli di calcolo si è utilizzato il supporto informatico già predisposto e collaudato presso il Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria nell'ambito dei piani di risanamento acustico dei Comuni di Perugia e di Terni. Tale supporto è stato modificato con l'aggiunta di altri modelli previsionali del rumore da traffico stradale e adattato al territorio in esame. Oltre ad inserire i parametri caratterizzanti le sorgenti associate al punto di stima in esame, per la stima del livello di rumore, nel foglio di calcolo Excel sono stati introdotti anche i seguenti dati:

- **POSIZIONE DEL PUNTO DI MISURA:** rappresenta l'ubicazione del punto di misura, questi può risultare posizionato sul lato aperto della strada oppure sul lato chiuso dagli edifici; tale distinzione è individuata con i due codici LA (per il lato aperto) / LE (per il lato

con edifici). Per la scelta del parametro è stata usata la cartografia di base;

- **EDIFICI INTERPOSTI:** serve per indicare la presenza di edifici tra la sorgente ed il punto di stima; il parametro è individuato attraverso i codici SI/NO;
- **DISTANZA DEL PUNTO DA STIMARE:** sulla cartografia è stata determinata la distanza minima sorgente – punto di stima (espressa in metri).

Una volta introdotti tutti i dati, nel foglio di interfaccia è possibile leggere i risultati riguardanti i contributi delle singole sorgenti (nella sezione denominata con lo stesso nome), i risultati finali (anch'essi in una sezione denominata con lo stesso nome) ed il valore di stima definitivo assegnato al punto (nella sezione denominata "conclusioni").

I livelli sonori sono calcolati per il periodo di riferimento diurno e notturno. Per le strade sono riportati i valori ottenuti utilizzando i cinque diversi modelli CETUR, CNR, CLASSICO - CIRIAF, SEL, OMTC.

Sul foglio di lavoro è possibile immettere i dati relativi ad un massimo di 5 sorgenti: tre tratti stradali, una sorgente fissa ed una linea ferroviaria. Il numero previsto risulta adeguato in quanto le sorgenti realmente influenti in un determinato punto sono sempre riconducibili ad un numero assai ridotto.

Il valore finale rappresentativo del livello di rumore presente nel punto di

stima è ottenuto per il caso stradale operando una media pesata tra i cinque modelli disponibili. Ai quattro modelli di tipo predittivo CETUR, CNR, SEL, OMTC è stato assegnato un coefficiente di pesatura pari ad 1 mentre per il modello estensivo CLASSICO-CIRIAF, è stato adottato un coefficiente di pesatura pari a 2. Ciò è dovuto al fatto che mentre i modelli predittivi si basano sui rilievi di traffico effettuati, il modello estensivo si basa invece sul livello di potenza ottenuto dalla misura fonometrica effettivamente eseguita sul posto.

L'errore commesso è stato valutato calcolando la massima differenza fra i valori forniti dai modelli ed il valore ottenuto con la media pesata. E' molto importante evidenziare come talvolta sia risultato necessario escludere uno o più modelli utilizzati in quanto conducevano ad una sovrastima dell'effettivo rumore presente. In condizioni di propagazione in campo aperto si è inoltre tenuto particolarmente conto in fase di mappatura del valore di rumore stimato dal modello CIRIAF.

Al fine di verificare l'attendibilità dei valori ottenuti, si è proceduto al calcolo del livello di rumore in alcuni dei punti dove sono stati effettivamente realizzati i rilievi fonometrici; l'accordo riscontrato tra i valori rilevati durante le misure e quelli determinati tramite i modelli di calcolo ha confermato la validità di tutte le considerazioni fatte. Di seguito è riportato un esempio di foglio di calcolo.

4. Procedure di mappatura

4.1 Elaborazione mappatura extraurbana

La previsione del rumore nei punti di stima ha esteso notevolmente la conoscenza puntuale del rumore nel territorio: al limitato numero di punti di misura è stato aggiunto un numero notevolmente più elevato di punti di stima, i quali sono stati scelti in modo da coprire uniformemente l'intero territorio comunale.

I livelli di rumore misurati e stimati sono stati utilizzati per ottenere mediante interpolazione logaritmica le curve isolivello; si è passati perciò da una conoscenza puntuale del livello di rumore ad una conoscenza continua dello stesso. Dall'analisi delle curve isolivello sono state identificate le aree del territorio per le quali il livello di rumorosità è compreso all'interno degli intervalli riportati in tabella.

La rappresentazione delle aree omogenee segue le indicazioni della norma UNI 9884 (come riportato in tabella) con alcune piccole differenze che a nostro giudizio consentono una migliore leggibilità dell'elaborato grafico; si è preferito infatti utilizzare, per tutti gli intervalli di rumore, un tratteggio solido pur continuando a seguire la colorazione suggerita dalla norma (tabelle 4 e 5).

La cartografia finale è stata realizzata utilizzando il programma grafico Autocad 14, grazie al quale è stato possibile realizzare una mappatura acustica digitalizzata. Le mappe di rumore sono rappresentative del livello

equivalente ponderato A e relative sia al tempo di riferimento diurno sia a quello notturno. A titolo di esempio in figg. 4 e 5 sono riportate le mappe del rumore diurne e notturne dell'area di Scanzano.



Fig. 4: *esempio di mappatura acustica diurna del territorio extraurbano.*



Fig. 5: *esempio di mappatura acustica notturna del territorio extraurbano*

4.2 Elaborazione mappatura urbana

In ambito urbano si è preferita, in attesa di ulteriori indicazioni utili da parte dei tecnici dell'amministrazione comunale, una rappresentazione rigorosa dei dati fonometrici a disposizione. E' stato già evidenziato come la forte influenza del campo acustico riverberato e la conseguente impossibilità di associare agli eventuali punti di stima il contributo dato dalle sorgenti presenti ha infatti reso impossibile l'applicazione dei modelli di calcolo previsti.

A ciò deve aggiungersi la necessità di attribuire a tratti di strada privi di misura un livello equivalente uguale a quello riscontrato in tratti aventi le stesse caratteristiche.

Tale operazione comporta la necessità di raccogliere ulteriori indicazioni ed elementi utili in collaborazione con l'amministrazione comunale al fine di evitare stime non attendibili del livello di rumore ed errori grossolani proprio in ambito urbano.

In questa fase si è dunque ipotizzata per le strade una zona di influenza di larghezza pari a 60 metri (30 m da ogni lato della linea di mezzzeria della sezione stradale), cui è stato associato il livello di pressione sonora della strada; anche in ambito urbano è stata utilizzata la stessa rappresentazione grafica del territorio extraurbano.

La cartografia finale prodotta della zona urbana è costituita da elaborati in scala 1:10000 (tempo di riferimento diurno e notturno) e da mappe digitalizzate (figg. 6 e 7).



Fig. 6: *esempio di mappatura acustica diurna del territorio urbano*



Fig. 7: *esempio di mappatura acustica notturna del territorio urbano*

Tab. 4: rappresentazione delle mappe di rumore (UNI 9884)

Livello di rumore (dBA)	Colore area	Tratteggio area
inferiore 35	verde chiaro	piccoli punti, bassa densità
da 35 a 40	verde	punti medi, media densità
da 40 a 45	verde scuro	punti grossi alta densità
da 45 a 50	giallo	linee verticali, bassa densità
da 50 a 55	ocra	linee verticali, media densità
da 55 a 60	arancione	linee verticali, alta densità
da 60 a 65	vermiglio	tratteggio a croce, bassa densità
da 65 a 70	carminio	tratteggio a croce, media densità
da 70 a 75	rosso violetto	tratteggio a croce, alta densità
da 75 a 80	blu	larghe strisce verticali
superiore a 80	blu scuro	completamente grigio

Tab. 5: rappresentazione delle mappe di rumore modificata (UNI 9884)

Livello di rumore (dBA)	Colore area	Tratteggio area
inferiore 35	verde chiaro	solido
da 35 a 40	verde	solido
da 40 a 45	verde scuro	solido
da 45 a 50	giallo	solido
da 50 a 55	ocra	solido
da 55 a 60	arancione	solido
da 60 a 65	vermiglio	solido
da 65 a 70	carminio	solido
da 70 a 75	rosso violetto	solido
da 75 a 80	blu	solido
superiore a 80	blu scuro	solido

4. Conclusioni

La mappatura acustica del territorio del Comune di Foligno, elaborata secondo i criteri esposti nella presente relazione a partire da un numero molto elevato di rilevazioni fonometriche dirette, rappresenta un passo fondamentale nella direzione di una maggiore tutela del territorio stesso dall'inquinamento acustico. Essa costituisce infatti una "fotografia" attendibile dello stato di effettivo inquinamento acustico del territorio, evidenziando le zone maggiormente rumorose e al tempo stesso quelle caratterizzate da una situazione di quiete.

Il confronto dei livelli di rumore indicati dalla mappatura con i limiti massimi di rumore previsti dalla zonizzazione acustica consentirà di evidenziare le aree in cui detti limiti sono superati e di stabilire le priorità di bonifica, su cui si dovranno concentrare gli sforzi dell'Amministrazione comunale e di tutti gli altri Soggetti preposti nei prossimi anni. Detto confronto sarà oggetto della successiva ed ultima fase del Piano di Risanamento Acustico del Comune di Foligno (Piano di Bonifica).

6. Bibliografia

NORMATIVA

1. D.P.C.M. 1/03/91, “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell’ambiente esterno”, G.U. n.57 del 8/03/91
2. Deliberazione della Giunta Regionale 13/10/93, n.7804 “Approvazione atto di indirizzo e coordinamento concernente la disciplina del rumore prodotto da attività temporanee”, Bollettino Ufficiale della Regione Lazio, n.11 Parte prima del 20/04/95
3. Deliberazione della Giunta Regionale 31/01/95, n.151 “Approvazione atto di indirizzo e coordinamento relativo alla redazione dei Piani di Risanamento Acustico Comunali”, Bollettino Ufficiale della Regione Lazio, n.18 Parte prima del 30/06/95
4. Legge n. 447 del 26 ottobre “Legge quadro sull’inquinamento acustico”, Supplemento ordinario alla G.U. n.254 del 30/10/95
5. Ministero dell’Ambiente – S.I.A.R. (Servizio Inquinamento Atmosferico Acustico e Industrie a rischio): “Linee Guida – Zonizzazione del territorio comunale – Piani di Risanamento”, Dicembre 1993
6. D.P.C.M. del 14/11/97 “Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore”, G.U. n. 280 del 1/12/1997
7. D.M.A. del 16/03/98 “Tecniche di rilevamento e misura del rumore”, G.U. n.76 del 01/04/98
8. UNI 9884 “Acustica. Caratterizzazione acustica del territorio mediante la descrizione del rumore ambientale” 1991

ACUSTICA AMBIENTALE

1. L. Rocco, “Fondamenti di Acustica Ambientale”, ALINEA editrice, Firenze 1989
2. Sharland, “L’attenuazione del rumore”, Ed. WOODS Italiana 1988
3. G. Moncada, Lo Giudice, S. Santoboni, “Acustica”, Ed. MASSON 1995
4. Bruel & Kjaer, “Noise Control”, 1986
5. Harris C., “Handbook of noise control”, Mc Graw Hill, New York, 1979
6. A. Alziati, “Acustica Ambientale e insonorizzazioni”, ed. ETAS libri, 1984
7. A. Cocchi, “Inquinamento da rumore”, ed. Maggioli, 1989
8. M. Cosa, “L’inquinamento da rumore”, ed. NIS, 1992

MISURE DI RUMORE

1. D.P.C.M. 1/03/91, “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell’ambiente esterno”, G.U. n. 57 del 8/03/91
2. UNI 9884 “Acustica. Caratterizzazione acustica del territorio mediante la descrizione del rumore ambientale”, 1991
3. F. Cotana, C. Buratti, F. Rossi, “Misure di rumore e mappatura acustica del territorio”, in ATTI del 24° Congresso Nazionale A.I.A., Trento 1996
4. ANPA – “Documento di riferimento per la definizione di linee guida

per la redazione dei piani comunali di disinquinamento acustico”, ottobre 1996

5. ANPA - “ Linee guida per l’elaborazione di piani comunali di risanamento acustico”, febbraio 1998
6. D. Bretoni, A. Franchini, M. Manconi, “ Il rumore e l’organizzazione del territorio”, Ed. Pitagora, Bologna 1988
7. M. Urbani, “ La valutazione dell’impatto acustico”, in Atti della Giornata di Studio del 20 Maggio 1997, Perugia
8. P. Cataletti, A. Pieroni, R. Sisto, M. Nesti, “ I rapporti di valutazione del rumore: un bilancio indicativo dei primi cinque anni di applicazione e proposta normativa”, in Atti del 25° Congresso Nazionale AIA, Vol II, 1997

MAPPATURA ACUSTICA

1. D.P.C.M. 1/03/91, “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell’ambiente esterno”, G.U. n. 57 del 8/03/91
2. UNI 9884 “ Acustica. Caratterizzazione del territorio mediante la descrizione del rumore ambientale”, 1991
3. F. Cotana, C. Buratti, F. Rossi, “Misure di rumore e mappatura acustica del territorio”, in ATTI del 24° Congresso Nazionale A.I.A., Trento 1996
4. ANPA – “Documento di riferimento per la definizione di linee guida per la redazione dei piani comunali di disinquinamento acustico”, ottobre 1996

5. ANPA - “ Linee guida per l’elaborazione di piani comunali di risanamento acustico”, febbraio 1998
6. F. Cotana, “Un criterio per la valutazione dell’inquinamento acustico dovuto al traffico stradale”, in Rivista Italiana di Acustica, vol. XV, 1991
7. Delany M.E., “Traffic noise prediction for use in environmental planning” in Models and Systems in Architecture and building, 1975
8. A. Farina, “Modelli matematici per la previsione della diffusione del suono” in Atti Seminario, Lucca 1984
9. Favre B. M. , “Road Traffic Noise: characteristics and computation methods”, U.K. 1984
10. R. Varini, “Modellistica per la valutazione dell’emissione sonora di insediamenti civili ed industriali come strumento per la pianificazione territoriale”, Atti Convegno Internazionale, Modena 1998
11. Legge Regionale sull’inquinamento acustico, “Difesa dall’inquinamento acustico”, Bozza del 01/02/01, Regione Umbria
12. M. De luca, ” Manuale di pianificazione dei trasporti ”- CNR – Progetto Finalizzato Trasporti 2, Collana Trasporti, Ed. Franco Angeli, 2000.