

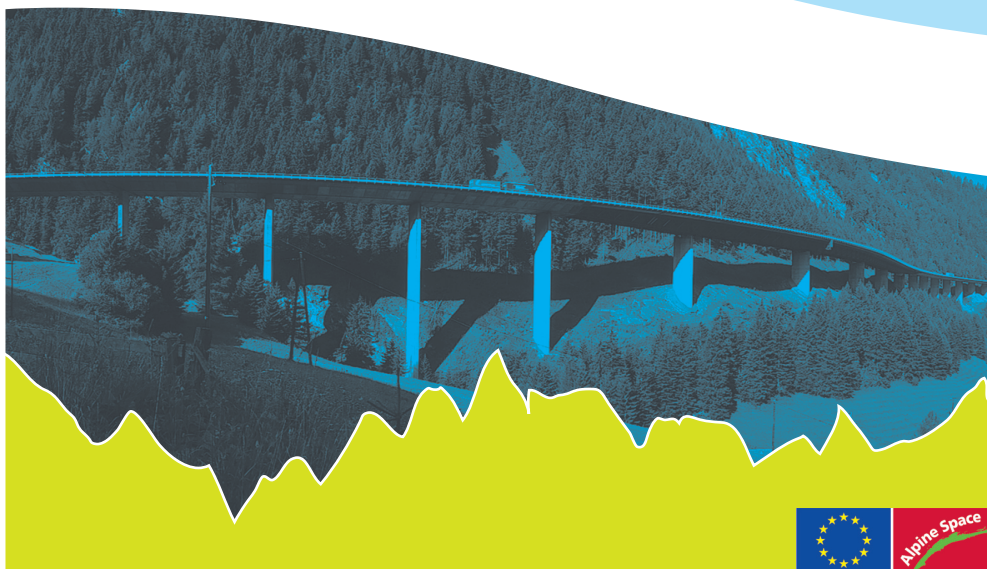


ALPNAP

Vivere vicino a una grande via di transito nelle Alpi  
inquinamento atmosferico, rumore e salute

**ALPNAP**

Team del progetto



Interreg III B

## **ALPNAP Gruppo di Coordinamento del Progetto**

D. Heimann, M. Clemente, X. Olny, J. Defrance, P. Suppan, S. Trini Castelli, P. Lercher, U. Uhrner, D. Zardi, P. Seibert, F. Obleitner

## **Comitato Editoriale**

D. Heimann, M. de Franceschi, S. Emeis, P. Lercher, P. Seibert

La riproduzione parziale o completa del contenuto è autorizzata soltanto con la seguente citazione della fonte:

Heimann D., de Franceschi M., Emeis S., Lercher P., Seibert P. (Eds.), 2007: *Vivere vicino a una grande via di transito nelle Alpi – inquinamento atmosferico, rumore e salute*. ALPNAP brochure. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italia, 20 pp.

Traduzione dall'inglese: M. de Franceschi con il contributo di G. Antonacci, I. Todeschini, D. Anfossi, M. Clemente ed E. Elampe.

La foto di copertina è pubblicata con il permesso di ASFINAG.

Design della copertina: Grafikbüro L, [design@grafikbuero-L.at](mailto:design@grafikbuero-L.at)

Stampato in Italia da Grafiche Futura s.r.l.

Università degli Studi di Trento  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Trento, dicembre 2007

# Prefazione

La presente pubblicazione è stata realizzata dal consorzio del progetto ALPNAP, un gruppo di 11 partners provenienti da Austria, Francia, Germania e Italia. Il progetto triennale (2005-2007) è stato co-finanziato dal Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale (FESR) nell'ambito del programma Interreg IIIB Spazio Alpino. Gli obiettivi di ALPNAP erano quelli di raccogliere e descrivere i metodi scientifici e più aggiornati per l'osservazione e la previsione dell'inquinamento atmosferico e acustico lungo i corridoi di transito Alpino e valutarne gli effetti sulla salute e sulla qualità della vita. Tali metodi possono essere utilizzati per stimare le conseguenze indotte da nuove infrastrutture di trasporto (stradale e ferroviario) che si trovino già nella fase di pianificazione o per progettare adeguate misure, sia amministrative che tecniche, per il contenimento dell'inquinamento atmosferico e acustico. I risultati del progetto sono pubblicati in un "Rapporto Finale" (Comprehensive Report) ad uso degli esperti di ambiente e di trasporti nelle pubbliche amministrazioni.

La pubblicazione è diretta agli abitanti delle Alpi che sono interessati ai disturbi ambientali. Nel testo si descrivono i processi di emissione dell'inquinamento atmosferico e del rumore, nonché i fattori di trasporto degli inquinanti e di propagazione del rumore in funzione delle condizioni meteorologiche. In particolare si mostrano le peculiarità dell'ambiente Alpino e le differenze con le aree di pianura, sintetizzando infine le possibilità offerte dai moderni strumenti, sviluppati presso le università e i centri di ricerca, per prevedere le concentrazioni di inquinanti o i livelli di rumore e il loro impatto con futuri scenari di traffico.



## Le Alpi: uno spazio vitale, una risorsa ricreativa, un'area di transito

Le Alpi costituiscono una delle più importanti riserve naturali in Europa e, nel contempo, sono uno spazio vitale per 13 milioni di persone che costituiscono circa il 2% della popolazione Europea. Con una presenza di 68 abitanti per km<sup>2</sup> la densità di popolazione è paragonabile alla media europea. L'arco Alpino costituisce una barriera topografica lunga 950 km e larga 250 km che separa alcuni tra i maggiori centri economici e abitativi in Europa (Italia – Francia, Italia – Germania, Slovenia – Repubblica Ceca). Le montagne costituiscono inoltre una barriera tra le aree residenziali intra-Alpine. A ciò si aggiunge il fatto che le bellezze naturali e le strutture sportive e ricreative attraggono un grande numero di turisti.

Il traffico locale, il traffico che si origina o che termina all'interno delle aree turistiche Alpine e il traffico di transito attraverso le Alpi contribuiscono tutti a creare un enorme flusso di veicoli. Il libero scambio di merci all'interno dell'Unione Europea ha incrementato e continua ad incrementare la richiesta di trasporto di beni attraverso le Alpi. Ciò causa una crescita del traffico commerciale lungo i corridoi di transito Alpino: tra il 1980 e il 2005 il volume totale di transito è più che raddoppiato e attualmente ha raggiunto i 193 milioni di tonnellate.

L'aumento dei volumi di transito evidenzia come l'inquinamento e il rumore siano un problema crescente nelle Alpi e come siano necessarie soluzioni in tempi brevi. Rispetto alle aree di pianura, il carico ambientale nelle aree montane è molto più marcato.



**Fig.1** Una bella vallata è attraversata dal corridoio autostradale del Brennero/Brenner. Il viadotto si estende sopra parte dell'abitato di Steinach/Tirol.



**Fig. 2** Un lungo treno merci si inerpica lungo il tracciato verso il confine Italo-Austriaco trasportando containers e rimorchi, simboleggiando così il moderno trasporto intermodale.

Gli ecosistemi delle aree montane nelle Alpi sono molto sensibili, in particolare nelle regioni a quote maggiori dove sono sottoposti anche a stress climatici. Le foreste Alpine hanno un'importante funzione protettiva nei confronti di valanghe e frane. Per questi ed altri analoghi motivi, in queste zone le conseguenze negative dell'inquinamento sono maggiori rispetto ad aree non montane. Sia l'inquinamento che il rumore contrastano inoltre con le aspettative dei turisti e mettono a repentaglio lo sviluppo delle aree ricreative.

La maggior parte dei centri abitati nelle Alpi si concentrano lungo le valli, specialmente in quelle con le maggiori linee autostradali e ferroviarie. Questo implica che un numero consistente di abitanti vive in prossimità dei corridoi di transito Alpino ed è conseguentemente esposto agli effetti ambientali sfavorevoli provocati dal traffico di transito con conseguenze negative sulla salute e sulla qualità della vita in generale.

### ***Le politiche di trasporto sostenibile necessitano del supporto scientifico***

All'aumentare dei volumi di trasporto ci si attende un aggravarsi dei conflitti tra interessi economici ed ecologici. Fino a quando non si prenderanno misure mirate, i limiti di legge per la qualità dell'aria e il rumore verranno superati sempre più frequentemente e nuove infrastrutture potranno causare nuovi disturbi in aree incontaminate.

Il supporto di esperti in inquinamento atmosferico, rumore ed effetti sulla salute e l'applicazione di strumenti scientifici sono indispensabili per fornire una solida base per decisioni politiche ed amministrative indirizzate ad ottenere un bilancio sostenibile di mobilità, economia, conservazione della natura, protezione ambientale, salute pubblica e qualità della vita.

Nuove infrastrutture modificheranno le emissioni e quindi l'impatto ambientale. Conseguenze significative sono attese dai nuovi tunnel ferroviari in costruzione o in progetto. Lo stesso dicasi per le misure amministrative (ad es. il blocco del transito notturno) e per gli incentivi verso il cambiamento di modalità ("modal shift") o la co-modalità ("co-modality") nei trasporti merci. Un aumento dei pedaggi e l'introduzione di un sistema di scambio di permessi di transito a livello Alpino sono altri strumenti che sono attualmente in discussione. Tali misure possono in parte migliorare la situazione, ma anche produrre effetti contraddittori come ad esempio introdurre nuove sorgenti di rumore cercando di ridurre l'inquinamento atmosferico.

### ***Passi verso un dialogo tra ricercatori e amministratori***

Nel passato è mancata una cooperazione sistematica tra esperti a livello Alpino e il dialogo tra ricercatori e amministrazioni non è stato particolarmente intenso. Il progetto ALPNAP ("Monitoring and Minimisation of Traffic-Induced Noise and Air Pollution Along Major Alpine Transport Routes") per mezzo dei suoi partner provenienti da università e centri di ricerca è stato predisposto per superare queste mancanze.

Gli obiettivi di ALPNAP erano quindi descrivere i processi tipici dell'ambiente Alpino che determinano la qualità dell'aria e il rumore all'interno delle valli, e raccogliere strumenti scientifici innovativi e metodi di valutazione che consentano di misurare, stimare e prevedere l'inquinamento atmosferico, il rumore e il loro impatto sulla salute. Tali strumenti e metodi sono stati applicati ad aree appositamente selezionate e in condizioni tali da dimostrare le loro potenzialità e chiarire la complessità dei processi coinvolti. Infine sono state elaborate delle raccomandazioni per le autorità e i consulenti tecnici sulle modalità ottimali di definizione degli impatti delle misure amministrative, degli incentivi e delle nuove infrastrutture, considerando in modo appropriato la complessità dei processi naturali nella regione Alpina.

Il valore aggiunto di ALPNAP è stato incrementato dalla cooperazione coordinata con il progetto MONITRAF ("Monitoring of Road-Traffic Related Effects and Common Measures"), co-

stituito da una rete di amministrazioni regionali ambientali e di traffico nelle Alpi. Gli obiettivi di MONITRAF riguardavano lo sviluppo di misure finalizzate alla riduzione degli effetti negativi del traffico stradale migliorando nel contempo la qualità della vita nella regione Alpina.

## Emissioni di inquinanti e rumore

Il termine *emissione* si riferisce al rilascio in atmosfera di inquinanti, aeriformi o sotto forma di particolato, o di rumore da parte di sorgenti diverse. La maggior parte degli inquinanti è emessa da processi di combustione come il riscaldamento domestico, la produzione industriale, di dimensione variabile dalla piccola impresa alla grande centrale elettrica, e il funzionamento di tutti i tipi di trasporto motorizzato con l'esclusione delle linee ferroviarie elettrificate. Il particolato ultrafine è rilasciato anche da processi di abrasione e di attrito, ad esempio durante le frenate, o è sollevato dalla superficie stradale grazie ai flussi d'aria indotti dai veicoli in transito. Il rumore è emesso dai motori e dagli scarichi (rumore di propulsione dei veicoli motorizzati, delle motrici ferroviarie alimentate a gasolio e degli aerei), dall'interazione tra ruote / gomme e le superfici delle rotaie / strade (rumore di rotolamento) o dal flusso d'aria intorno a mezzi di trasporto molto veloci (rumore aerodinamico di treni ad alta velocità e aerei). Il rumore può anche essere emesso da processi industriali, costruzioni, agricoltura ed anche da diverse attività antropiche come tagliare l'erba; anche eventi sportivi e musicali generano rumore. Rumore è emesso inoltre da alcuni animali domestici, di allevamento e selvatici.

Il traffico stradale causa l'emissione di inquinanti e di rumore. Nelle aree montane, in cui la guida in salita gioca un ruolo importante, l'emissione è determinata da fattori addizionali rispetto alle zone pianeggianti. Guidare con motore a pieno regime causa emissioni sostanzialmente maggiori rispetto a quanto accade sulle strade pianeggianti: l'emissione di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) lungo un tratto stradale con il 5% di pendenza è il doppio rispetto ad una strada pianeggiante.



**Fig. 3** Una lunga carovana di mezzi pesanti attraversa il "Ponte Europa" in Austria in un pomeriggio di autunno. Il viadotto è parte del corridoio di transito che collega la Germania meridionale con l'Italia settentrionale.

L'emissione di rumore da parte dei mezzi pesanti è incrementata non solo nei tratti in salita ma anche in quelli in discesa per l'azione dei sistemi di freno motore. Il rumore di rotolamento (causato dall'effetto del rotolamento del pneumatico sull'asfalto) dipende dalla superficie stradale: strade scabre o bagnate dalla pioggia sono più rumorose mentre strade più lisce o coperte di neve sono più silenziose. Il rumore di rotolamento dei treni dipende in larga parte dallo stato delle superfici delle ruote e delle rotaie: vecchi vagoni merci con freni a ganasce sulle ruote ne irruvidiscono la superficie ed emettono più rumore.



**Fig. 4** Tre motrici elettriche, due traenti e una spingente, sono necessarie per movimentare i vagoni di questo treno merci sulla ripida salita verso il passo del Brennero/Brennerpass in prossimità dell'abitato di St. Jodok/Tirol.

Viadotti (Fig. 3) e tunnel sono tipici delle strade montane. Questi hanno un effetto netto positivo sulle emissioni poiché riducono la distanza tra due destinazioni e contribuiscono ad evitare tratti ripidi. Le emissioni rilasciate da ponti sopraelevati hanno la possibilità di essere maggiormente diluite prima di giungere alle aree abitate rispetto alle emissioni emesse in strade limitrofe ai centri abitati. Dall'altro lato bisogna però considerare che gli scarichi rilasciati in un tunnel devono uscire attraverso gli ingressi e/o attraverso speciali condotti di aerazione. In ogni caso le emissioni di inquinanti di un tunnel entrano in atmosfera in singoli punti ad alta concentrazione.

Le linee ferroviarie delle Alpi sono quasi totalmente elettrificate, cosicché l'emissione di inquinanti lungo i tracciati non ha rilevanza. I treni restano tuttavia una fonte di rumore che in aree montane può essere amplificato (Fig. 4).

In area Alpina anche la distribuzione spaziale delle fonti di emissione è influenzata dalla topografia. Le maggiori vie autostradali e ferroviarie si snodano lungo le valli in cui si trovano anche i maggiori insediamenti. Ne consegue che la distanza tra la sorgente di inquinamento e di rumore e le aree abitate è molto minore nelle Alpi che nelle zone pianeggianti.

## **Meteorologia Alpina**

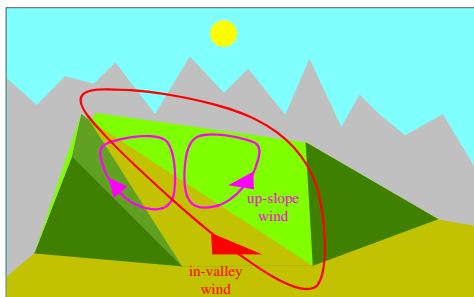
Montagne come le Alpi rappresentano un'autentica specificità della superficie terrestre. Esse infatti si estendono all'interno dell'atmosfera e costituiscono così una barriera che esercita attrito sulle circolazioni che sono causate dai sistemi di alta e bassa pressione. Tali correnti sono costrette a sollevarsi o ad aggirare le montagne quando le incontrano. Nelle valli l'aria è frequentemente incanalata e i venti seguono l'asse della valle. L'attrito con la superficie causa il rimescolamento delle masse d'aria e quindi uno scambio tra l'aria vicina al suolo e quella a quote maggiori. Il trasporto orizzontale operato dal vento medio e il rimescolamento turbolento sono un importante meccanismo di origine meteorologica per rimuovere gli inquinanti dalla loro regione di origine e per ridurne la concentrazione.

A seguito di specifiche condizioni si sviluppano venti di caduta sul lato sottovento rispetto alle creste montane. Questi venti sono conosciuti come “foehn” e possono essere estremamente turbolenti e caratterizzati da raffiche. In condizioni di vento debole, come nel caso di aree ad alta pressione, uno scambio orizzontale di masse d’aria ad opera del vento medio così come un mescolamento turbolento indotto dalla rugosità superficiale non sono possibili. Nelle giornate serene la radiazione solare riscalda il suolo che a sua volta riscalda l’aria sovrastante. Quest’ultima tende a risalire sotto forma di “bolle” (le cosiddette termiche) e causa dei moti di compensazione discendenti. Anche questo meccanismo induce un rimescolamento ed uno scambio verticale di masse d’aria e degli inquinanti in esse contenuti.



**Fig. 5** Le Alpi causano specifici fenomeni meteorologici come le “onde orografiche” che sono visibili grazie alle caratteristiche nubi *altocumulus lenticularis*.

Un ulteriore effetto della presenza delle montagne è quello causato dall’inclinazione dei pendii e dalla presenza delle creste montane sui bilanci radiativi e sul trasferimento di calore tra atmosfera e terreno. In condizioni di cielo sereno e deboli flussi a grande scala ciò causa un riscaldamento/raffreddamento differente tra gli strati d’aria prossimi ai pendii e l’aria che si trova alla stessa quota in corrispondenza del centro valle. Tale riscaldamento/raffreddamento differenziale è all’origine dei venti forzati termicamente che cambiano la propria direzione due volte al giorno. L’aria che si raffredda in corrispondenza dei pendii è più densa (e quindi più pesante) di quella che si trova al centro della valle, mentre il contrario accade per l’aria riscaldata in prossimità dei pendii che è meno densa (più leggera) di quella in centro valle. Tali differenze di densità fanno sì che l’aria più densa discenda lungo il pendio mentre quella più leggera lo risalga. Questo effetto non si realizza solamente nelle aree riscaldate/raffreddate sui lati delle valli, ma anche – a scala maggiore – tra le zone montane e quelle pianeggianti adiacenti.



**Fig. 6a** Nel primo pomeriggio di giornate serene si sviluppano venti che risalgono i pendii (magenta) e circolazioni che penetrano nelle valli (rosso).

**Fig. 6b** Nelle ore notturne con cielo sereno venti discendenti i pendii (blu chiaro) si affiancano a correnti che escono dalla valle (blu scuro).

Nelle Alpi i venti forzati termicamente (Fig. 6) sono quindi costituiti da due sistemi di circolazione spesso sovrapposti tra di loro, ovvero le correnti di pendio e i venti monti-pianura: (1) le

circolazioni di pendio mostrano venti ascendenti durante il giorno e discendenti durante la notte; (2) la circolazione monti-pianura è ritardata di alcune ore cosicché il vento che entra nella valle si instaura nella tarda mattinata e persiste fino a tarda sera, mentre il vento che esce dalla valle inizia nella tarda serata e continua sino alle prime ore del mattino.

Se venti deboli si combinano con poca o nulla radiazione solare, il ricambio d'aria è limitato o quasi soppresso. Questo è il caso di aree ad alta pressione nelle ore notturne o di aree in cui il cielo è coperto. In particolare, all'interno di bacini l'aria in prossimità del suolo è confinata dalle catene montuose circostanti e ristagna limitandone così un ricambio orizzontale. La situazione può essere aggravata nel periodo invernale quando l'aria che ristagna nei bacini ma anche sui fondovalle si raffredda mentre la subsidenza degli strati superiori ne causa un riscaldamento. Ciò porta alla formazione di uno strato di inversione in cui la temperatura dell'aria aumenta con la quota. Se l'aria è sufficientemente umida si formano nebbie o nubi persistenti del tipo "bassostrati" (Fig. 7) che inibiscono l'apporto energetico dei raggi solari. Queste inversioni agiscono sostanzialmente come un "coperchio" al di sopra degli strati di atmosfera prossimi al suolo, sopprimendo gli scambi verticali d'aria: gli inquinanti non possono essere trasportati lontano dalle sorgenti e le concentrazioni tendono ad aumentare.

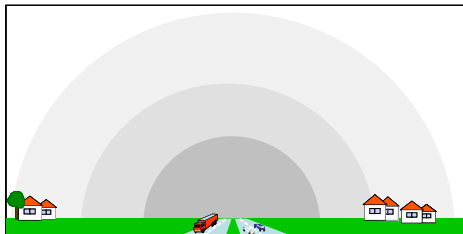


**Fig. 7** Bassostrati o nebbie si sono sviluppate nella valle indicando la presenza di un'inversione di temperatura. Al di sopra della nube stratiforme sono visibili sottili strati di foschia.

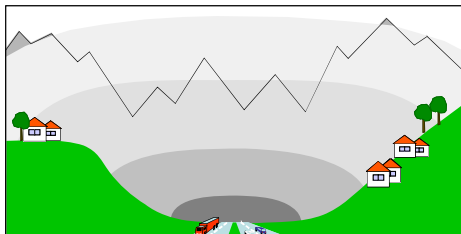
Incanalamento, foehn, ristagno, frequenti inversioni e circolazioni diurne forzate termicamente determinano in larga parte il clima locale delle aree all'interno o in prossimità delle zone montane. Queste caratteristiche sono realmente delle specificità dell'ambiente montano e non sono riscontrabili in zone di pianura.

## **Il trasporto degli inquinanti nell'ambiente Alpino**

La misura più importante dell'inquinamento atmosferico è data dalla concentrazione di inquinanti pericolosi. Questi possono essere gas come il biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ), il monossido di carbonio (CO), il monossido di azoto (NO), il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), l'ozono ( $\text{O}_3$ ), ecc. o particelle sospese (polvere, metalli pesanti come il piombo (Pb) o materiale abrasivo da freni, attriti e gomme). Gli aerosol e le particelle ultra-fini sono classificate secondo il loro massimo diametro espresso in micrometri ( $\mu\text{m}$ ); ad es. PM10 indica particelle più piccole di 10  $\mu\text{m}$ . La concentrazione esprime la massa di inquinante in un dato volume di aria ed è quindi misurata in milligrammi o microgrammi per metro cubo ( $\text{mg}/\text{m}^3$  o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Fig. 8a** L'inquinante emesso in aree di pianura può disperdersi in tutto il semispazio che sovrasta la superficie del terreno. Le tonalità di grigio del disegno indicano qui le aumentate concentrazioni medie sempre per una distribuzione uniforme di direzioni del vento.



**Fig. 8b** In una valle il volume d'aria è ridotto per la presenza dei pendii. Le tonalità di grigio del disegno indicano qui le aumentate concentrazioni medie sempre per una distribuzione uniforme di direzioni del vento

La concentrazione locale di una certa specie di inquinante atmosferico dipende dal rapporto tra l'emissione di tale specie, ovvero quanta massa di inquinante è rilasciata in un volume d'aria, e la trasmissione netta, ovvero quanta massa di inquinante è trasportata da o verso l'area ad opera del vento medio (la cosiddetta avvezione) e dei moti turbolenti (la diffusione turbolenta). Il processo di diffusione porta ad una continua diluizione e decrescita delle concentrazioni poiché un dato ammontare di inquinanti contamina un volume d'aria sempre crescente. Se emissione e trasmissione sono in bilancio, la concentrazione locale è costante. Per un dato valore di emissione, il livello di concentrazione di equilibrio è basso se la velocità del vento è moderata o intensa e/o lo scambio turbolento è efficiente (periodo estivo, giornate serene, venti intensi, foehn). Il livello di concentrazione di equilibrio è invece particolarmente alto per venti deboli e scarso mescolamento turbolento (periodo invernale, inversioni, notti serene).

Nelle aree montane delle Alpi si osservano degli effetti aggiuntivi. Poiché il volume d'aria è ridotto dalla presenza delle montagne, la stessa massa di inquinante è distribuita in un volume d'aria minore rispetto al terreno pianeggiante (Fig. 8). Da ciò ne consegue che a parità di emissione la concentrazione nelle aree montane è maggiore rispetto a quelle pianeggianti.



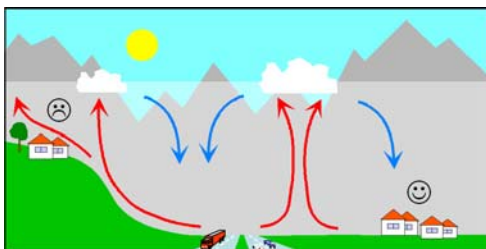
**Fig. 9** Aria fredda si è accumulata sul fondovalle innevato. Le inversioni termiche associate intrappolano gli inquinanti che sono identificabili dal loro colore bruno. L'aria è troppo secca per permettere la formazione di nebbia durante il giorno.



**Fig. 10** Sottili strati di aria inquinata sono visibili in prossimità del fondovalle mentre tipiche nubi "altocumuliformi" indicano la presenza di un intenso flusso a grande scala che incrocia le Alpi in quota.

L'esistenza di inversioni termiche (quando la temperatura aumenta con la quota, anziché diminuire) associata a venti deboli è critica e può indurre alti valori di concentrazione (Fig. 9 e 10). Nelle Alpi queste situazioni sono particolarmente frequenti in bacini e valli a sezione e sviluppo ridotti. In entrambi i casi il flusso orizzontale è fortemente contrastato dalle montagne circostanti cosicché i venti medi sono deboli e gli inquinanti non possono essere trasportati lontano, mentre l'inversione termica impedisce il mescolamento turbolento verticale. Poiché tali situazioni possono persistere per più giorni, gli inquinanti possono accumularsi in prossimità del suolo facendo aumentare di conseguenza i livelli di concentrazione.

Anche le circolazioni forzate termicamente hanno una specifica influenza sull'inquinamento in aree montane. I venti che risalgono i pendii (Fig. 11a) trasportano gli inquinanti dal fondovalle (dove si trovano la maggior parte delle emissioni) lungo il pendio e da qui al centro della valle. Termiche addizionali che si originano dallo strato d'aria in prossimità del pendio a causa di irregolarità del terreno (rocce, limitare di foreste) portano infine ad un'atmosfera ben miscelata all'interno della valle. Come conseguenza, la concentrazione media nella valle è bassa. Gli insediamenti sul fondovalle generalmente beneficiano di questo effetto, mentre le aree abitate lungo i pendii o su altopiani risentono dell'aria inquinata che viene trasportata dal fondovalle.



**Fig. 11a** Venti di pendio (rossi a sinistra) e termiche (rosse a destra) portano durante il giorno a sviluppare uno spesso strato rimescolato. Questo riduce le concentrazioni sul fondovalle ma trasporta gli inquinanti lungo i pendii. Correnti di compensazione sono indicate in blu.



**Fig. 11b** Durante la notte le emissioni sono confinate dalle inversioni sul fondovalle. Siti prossimi alle pendici dei pendii beneficiano dei venti di pendio (blu). Gli altopiani spesso sono al di sopra degli strati di inversione e restano nello strato residuo del giorno precedente.

Nel caso di correnti discendenti notturne (Fig. 11b), flussi di aria fresca scorrono lungo i pendii e se non incontrano ostacoli possono continuare il loro moto sul fondovalle. Naturalmente tale flusso di aria può andare a sostituire localmente l'aria inquinata, motivo per cui è utile tenere tali percorsi liberi da ostacoli, come ad es. gli edifici. Comunque la maggior parte delle aree site in ampie valli Alpine non beneficia dei flussi di aria fresca che scorrono lungo i pendii. A causa del ridotto mescolamento verticale durante la notte e il ridotto spessore dello strato rimescolato, le concentrazioni sul fondovalle sono elevate. Zone abitate a quote più elevate beneficiano di questi processi poiché le emissioni non sono trasportate dal fondovalle; nonostante questo la qualità dell'aria anche in queste aree può diminuire a causa degli inquinanti sollevati a quote maggiori nel corso dei giorni precedenti.

Un accumulo di inquinanti può verificarsi se le condizioni meteorologiche con venti forzati termicamente persistono per più giorni. Nella circolazione lungo l'asse della valle e in direzione trasversale gli inquinanti sono trasportati avanti e indietro mentre ulteriori emissioni inquinano l'aria nell'atmosfera della valle. Un ricambio d'aria a larga scala non è possibile e lo spessore dello strato miscelato è spesso limitato da un'inversione in quota. Come conseguenza la concentrazione aumenta di giorno in giorno mentre può variare tra il giorno e la notte.

## Propagazione del rumore nelle Alpi

Il rumore, una volta generato presso una sorgente, si propaga nell'aria sotto forma di invisibili onde sonore. L'intensità è data fisicamente dall'ampiezza delle oscillazioni di pressione associate alle onde sonore in movimento e può essere misurata mediante microfoni. L'ampiezza del suono è espressa in termini di *livelli sonori*, una scala logaritmica in *decibel* (dB). Poiché il rumore è generalmente costituito da un ampio spettro di frequenze mentre l'orecchio umano ha una percezione diversa dell'intensità sonora al variare della frequenza, negli strumenti di misura si sono introdotti opportuni filtri che operano una media pesata delle frequenze; il più diffuso è la "curva di ponderazione A", il cui corrispondente valore misurato è il "livello sonoro ponderato A", e si esprime in dB(A).

In pratica vengono definiti livelli di rumore a breve e lungo termine. Per singoli eventi (come ad es. il passaggio di un treno) è interessante il massimo dei livelli A. Per la valutazione più generale del rumore da traffico sono utilizzati livelli sonori a lungo termine (medie annuali). La Direttiva Europea sul rumore ambientale prescrive l'utilizzo del livello giorno-sera-notte (*day-evening-night* o "den"). Questo è mediato su intervalli giornalieri tipici (giorno, sera e notte) in cui ai contributi della sera e della notte vengono assegnati dei pesi maggiori rispetto al giorno per tenere conto della sensibilità umana.

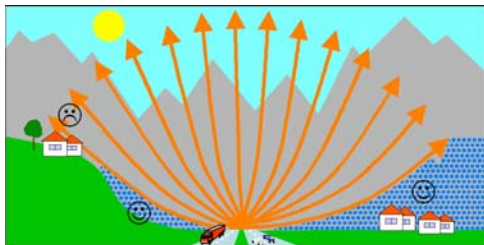
Nel caso di propagazione libera, i livelli sonori decrescono in funzione della distanza. Una stima di massima ci dice che il livello sonoro del rumore emesso da una sorgente puntuale (ad esempio una singola auto) diminuisce di 6 dB(A) al raddoppiare della distanza. Per una sorgente lineare (ad es. un'autostrada con traffico intenso e continuo) il livello sonoro decresce solamente di 3 dB(A) al raddoppiarsi della distanza. Bisogna però tenere conto di diversi fattori addizionali nel determinare i livelli sonori in ambiente.

Durante la propagazione, una parte dell'energia sonora è assorbita dall'aria. Ciò riguarda principalmente le alte frequenze, motivo per cui i toni bassi dei concerti all'aperto possono essere uditi a grande distanza mentre i toni alti sono fortemente attenuati. Il grado di attenuazione dipende dalla temperatura dell'aria e dalla sua umidità.

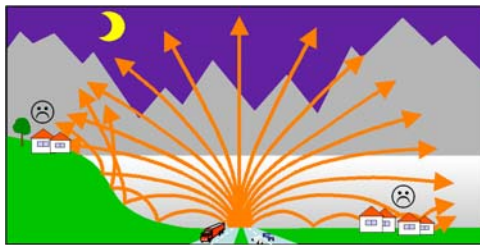
Il suono che si propaga da una sorgente vicino al suolo (ad es. una strada) verso un ricevitore posto anch'esso vicino al suolo (ad es. una persona) è attenuato anche per l'interazione delle onde sonore con il suolo stesso. Questo smorzamento dipende dalle proprietà acustiche del suolo: è massimo in un terreno acusticamente "soffice" (neve fresca, erba) e sostanzialmente inesistente in suoli acusticamente "rigidi" (cemento, superfici liquide).

Il maggior influsso meteorologico sulla propagazione del suono è causato dalla rifrazione delle onde sonore. È il motivo per cui una sorgente di rumore distante (ad es. un'autostrada o una linea ferroviaria) a volte è percepita molto intensamente, mentre altre volte è praticamente non udibile.

La rifrazione si verifica in presenza di differenze di temperatura sulla verticale o di vento. Si ha una rifrazione verso l'alto (Fig. 12a) solitamente durante il giorno quando l'aria in prossimità del suolo viene riscaldata. Ciò comporta una deflessione verso l'alto del suono, emesso orizzontalmente. Ne consegue che l'ampiezza sonora vicino al suolo decresce rapidamente all'aumentare della distanza dalla sorgente, molto più marcatamente rispetto ad un'atmosfera priva di stratificazione termica.



**Fig. 12a** Direzione di dispersione dei raggi sonori durante il giorno quando la temperatura dell'aria decresce con la quota e il suono è rifratto verso l'alto. Nelle aree punteggiate in blu ("zone "acusticamente in ombra") del fondovalle il rumore è marcatamente ridotto poiché i raggi sonori rifratti verso l'alto non le possono raggiungere.



**Fig. 12b** Direzione di dispersione dei raggi sonori durante la notte quando la temperatura dell'aria aumenta con la quota in uno strato d'inversione (in grigio) e il suono è rifratto verso il basso. Non compaiono zone acusticamente in ombra e il suono è riflesso al suolo.

Per questi motivi l'udibilità di autostrade o ferrovie è limitata a qualche centinaio di metri. Al contrario la rifrazione verso il basso (Fig. 12b) si ha solitamente durante la notte quando si forma un'inversione. I raggi sonori emessi orizzontalmente sono ora deflessi verso il suolo dove sono riflessi e nuovamente deflessi verso il suolo, ecc., cosicché il suono è intrappolato in uno strato in prossimità del suolo. In queste condizioni il rumore è udibile a lunghe distanze. La rifrazione delle onde sonore si verifica anche ad opera del vento: verso l'alto con conseguente udibilità limitata nel caso in cui il suono si propaghi controvento; verso il basso con conseguente udibilità a grandi distanze quando il suono si propaga a favore di vento. Generalmente la rifrazione indotta dalla stratificazione termica si sovrappone a quella dovuta al vento. Entrambi gli effetti si possono amplificare vicendevolmente (ad es. propagazione del suono a favore di vento con inversione termica) o annullarsi.

Nelle aree montane vanno considerate alcune peculiarità. Se il suono si propaga da sorgenti ubicate nel fondovalle verso abitazioni poste su un pendio o un altopiano, le onde sonore si propagano trasversalmente attraverso l'atmosfera e non lungo il terreno. Per questo motivo il suono non viene attenuato dall'effetto del terreno, il che può portare a livelli sonori relativamente alti in aree a quota elevata e persino sulle sommità delle montagne, dove il rumore del traffico è ben udibile anche se la distanza reale è di diversi chilometri. In alcuni casi le pareti delle valli ben rappresentano un anfiteatro naturale (Fig. 13) e gli abitanti che vivono in queste situazioni possono "gioire" di tale situazione sentendo il rumore di sorgenti lontane sul fondovalle.



**Fig. 13** La testa artificiale dotata di microfoni registra l'effetto anfiteatro da una "loggia d'onore" sul lato orientale della Wipptal con il viadotto dell'autostrada verso il Brennero/Brenner sullo sfondo (in prossimità di Steinach/Austria).

## Influsso dell'inquinamento e del rumore sulla salute nelle Alpi

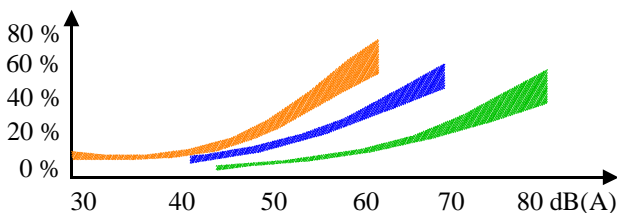
L'inquinamento e il rumore sono fattori ambientali negativi. Entrambi i disturbi non soltanto debilitano la salute umana, ma anche peggiorano la qualità della vita. Quest'ultima è legata sia a misure oggettive di inquinamento e di rumore che ad altri fattori come aspettative positive associate ad un certo ambiente, ad esempio un'area residenziale di pregio o un contesto naturale di rilievo.

L'aria inquinata è una causa diretta o un'aggravante di malattie come l'asma, la bronchite, l'enfisema, patologie polmonari e cardiache e allergie respiratorie. Anche la percezione dell'inquinamento atmosferico può indirettamente indurre effetti negativi sulla salute. Si stima infatti che circa il 90% degli effetti avversi sulla salute osservati sia causato da vie biofisiche dirette (ad es. attraverso la respirazione), mentre circa il 10% è attribuito ad una catena indiretta. Per il rumore le cose sono molto diverse: esso può causare direttamente patologie cardiovascolari, ma queste costituiscono solamente il 25% circa degli effetti sulla salute correlati al rumore. Il restante 75% si assume sia causato indirettamente e da luogo principalmente a disturbi del sonno, fastidio e stress che a loro volta aumentano la suscettibilità verso altre patologie.

La complessità delle relazioni che legano inquinamento e rumore da un lato e il loro impatto sulla salute e il benessere dall'altro, richiedono scale semplici che aggregino i diversi influssi e possano servire come criterio per decisioni politiche o tecniche; queste scale sono chiamate *indicatori* o *indici*. Gli *indici di inquinamento atmosferico (API)* combinano alcune classi di concentrazione dei diversi inquinanti in accordo con la loro gravità, mentre possono essere assegnati pesi diversi alle diverse specie chimiche a seconda dei loro specifici effetti. Lo stesso è possibile per gli *indici di inquinamento acustico (NPI)* in cui vengono pesate diverse sorgenti (ad es. strade e ferrovie). Non è facile trovare indici di rumore universali, poiché alcuni effetti sono meglio correlati con livelli di rumore sul lungo periodo, mentre altri effetti dipendono maggiormente dai livelli massimi o dal numero di superamenti di appropriate soglie di rumore e tutto ciò è comunque ancora oggetto di ricerca. È anche possibile combinare indici di inquinamento e di rumore in un unico *indice di esposizione (EI)* che descrive l'effetto derivante dalla sovrapposizione degli effetti dell'inquinamento e del rumore.

Inoltre è conveniente definire degli *indici di salute* in cui gli indicatori ambientali sono incrociati con i fattori di rischio. Questi ultimi sono dati da parametri demografici che dipendono dal numero di persone, dalla distribuzione per genere ed età, ecc. La funzione

esposizione-risposta è un indice che esprime l'impatto sulla salute (risposta) come prodotto dell'esposizione o della dose di inquinamento e/o rumore ricevuta e del rischio relativo (Fig. 14). Quest'ultimo dipende da una dettagliata analisi territoriale della zona di impatto. Le dosi calcolate sono integrate sulla durata dell'esposizione che copre la durata media della vita e il tempo speso nell'area d'interesse. Con le funzioni esposizione-risposta è possibile valutare il numero di ricoveri ospedalieri aggiuntivi che ci si può attendere per effetto di un incremento di inquinamento. Anche gli "anni di vita persi" (*Years Of Life*



**Fig. 14** Esempio di una funzione esposizione-risposta che mostra la porzione di popolazione "molto infastidita" in funzione dei livelli sonori di lungo termine per il rumore di una strada principale (in rosso), un'autostrada (in blu) e una ferrovia (in verde).

*Lost – YOLL*) sono un parametro comune di una funzione esposizione-risposta e descrivono la riduzione dell'attesa di vita rispetto ad un incremento nei livelli di inquinamento.

Con il termine *monetizzazione* viene indicato un altro metodo di quantificazione degli impatti. Esso esprime le conseguenze del peggioramento delle condizioni di salute in termini di valori economici. Questo è il prerequisito per calcolare i "costi esterni" dell'inquinamento o del rumore, ovvero i costi che derivano da attività umane che non sono direttamente coperti secondo il "principio dell'esecutore", ma che sono ripartiti sulla comunità e spesso pagati dalle generazioni successive.

## **Valutazioni per la mitigazione e la pianificazione**

Da diversi decenni la ricerca internazionale si è indirizzata verso lo sviluppo di migliori strumenti per la misura dell'inquinamento atmosferico e del rumore, procedure modellistiche e tecniche numeriche per prevedere i livelli di concentrazione e sonori e metodi per determinare l'impatto ambientale sulla salute e il benessere. Negli ultimi anni questa ricerca ha fatto sostanziali progressi: nuove tecnologie sensoristiche e la rapida crescita delle performance dei computer hanno permesso nuove possibilità nelle metodologie di osservazione e previsione. In particolare oggi è possibile descrivere i complessi moti atmosferici in area montana con maggiore accuratezza. Questo a sua volta è un prerequisito per una previsione affidabile delle concentrazioni di inquinanti e dei livelli sonori poiché entrambe sono fortemente determinate dalle condizioni atmosferiche, sia per il trasporto dei traccianti, sia per la propagazione del suono. Queste previsioni richiedono inoltre informazioni precise sulla distribuzione spazio-temporale delle emissioni, cioè il rilascio di composti chimici dannosi e la generazione di rumore in funzione dei flussi di traffico (numero di veicoli all'ora), della composizione del parco veicoli (ad es. auto e mezzi pesanti) e delle condizioni delle strade e delle ferrovie. Infine si sono realizzati diversi studi completi sugli effetti dell'inquinamento atmosferico e del rumore sulla salute umana e sul grado di disturbo.

## **Metodi di monitoraggio e osservazione**

La misura delle problematiche ambientali viene realizzata in due modi:

1. Il monitoraggio continuo mira ad una sorveglianza dello stato dell'ambiente in postazioni fisse. Da queste misure è possibile ricavare statistiche quali valori medi giornalieri o annuali, valori estremi o il numero di superamenti dei limiti di legge.
2. Le osservazioni temporanee sono realizzate per indagini specifiche nel corso di campagne pianificate o come risposta a precise richieste. Spesso si estendono solamente ad alcuni giorni o settimane. È possibile utilizzare piattaforme di misura mobili (auto, furgoni o anche velivoli) per coprire non solamente alcuni punti ma per ottenere informazioni su di un'area o un volume maggiori. Con le misure temporanee è possibile osservare la situazione con maggiore dettaglio, ad es. con l'osservazione contemporanea di un gran numero di specie chimiche differenti mediante una fitta rete di strumenti, o campionare in simultanea parametri meteorologici, di inquinamento e di rumore.

Il flusso di traffico e la tipologia dei veicoli in transito sono monitorati di routine in diverse sezioni delle autostrade Alpine e di altre maggiori vie di comunicazione. Il conteggio dei flussi di traffico non è utilizzato primariamente per questioni ambientali ma per un controllo generale del traffico. Oltre alle postazioni fisse, il traffico è rilevato sporadicamente lungo diverse strade nel corso di programmi specifici, a volte in concomitanza con questionari relativi ai tragitti compiuti.

## Misure meteorologiche

I parametri meteorologici di base (pressione atmosferica, temperatura e umidità, velocità e direzione del vento) sono solitamente misurati presso stazioni automatiche o manuali con cadenza oraria. La distanza media tra le singole stazioni è di circa 50 km che è di fatto troppo elevata per poter tenere in conto la complessità dei fenomeni meteorologici che si realizzano nell'area Alpina. La maggior parte delle stazioni meteorologiche è situata sui fondovalle, ad es. presso gli aeroporti. Solamente un numero limitato di esse è posizionato sulla sommità dei monti. I profili verticali di temperatura, umidità e pressione atmosferica sono misurati solitamente per mezzo di radiosonde: attualmente soltanto una decina di stazioni di radiosondaggio sono presenti intorno alle Alpi, mentre una soltanto è sita nelle Alpi (Innsbruck/Austria). Presso queste stazioni i sondaggi sono effettuati normalmente soltanto una o due volte al giorno.

Poiché vi è una generale carenza di informazioni meteorologiche esaustive che possano dare conto della complessità tridimensionale dei sistemi di circolazione nelle Alpi, di volta in volta si rende necessario realizzare dei periodi di osservazione intensivi con campagne di monitorag-



(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 15** (a) Stazione meteorologica automatica con palo da 2 m per la misura di temperatura (al centro), vento (a destra) e radiazione (sinistra); (b) Stazione meteorologica automatica con palo da 10 m; (c) Pallone frenato con sonda meteorologica poco prima dell'ascesa; (d) Sodar Doppler.

gio coordinate. In tali attività sperimentali è possibile utilizzare strumentazione molto sofisticata. Si può distinguere tra due tipologie base di strumenti:

1. misure “in-situ”
2. misure di “remote-sensing” o “in remoto”.

I sistemi in-situ misurano lo stato dell’atmosfera nel punto in cui si trova il sensore. Sono normalmente utilizzati per misurare parametri meteorologici in prossimità del suolo (Fig. 15a) e possono essere montati su un palo per misurare profili verticali (Fig. 15b). Solitamente i pali installati temporaneamente non superano la decina di metri di quota, motivo per cui per ottenere dati da quote superiori è possibile installare i sensori su di un pallone frenato che può essere sollevato ed abbassato di qualche centinaio di metri (Fig. 15c). Misure in-situ possono essere effettuate anche mediante velivoli appositamente equipaggiati che costituiscono un metodo flessibile anche se molto costoso di ottenere informazioni in tre dimensioni. Un metodo meno costoso per misurare profili “verticali” sfrutta sensori installati su automezzi che si muovono lungo strade che costeggiano i fianchi delle valli per ottenere dati a diverse quote rispetto al fondovalle.

Strumenti di remote-sensing sono installati al suolo ma sono in grado di misurare profili verticali utilizzando tecniche Radar, Lidar o Sodar (Fig. 15d), ovvero onde elettromagnetiche, ottiche (laser) o acustiche per ricevere informazioni continue sulla colonna d’aria che sovrasta il sensore.

### **Misure di inquinamento atmosferico**

Il monitoraggio sul lungo periodo dell’inquinamento atmosferico è attualmente uno standard nei paesi Europei. Osservazioni continue sono condotte in aree urbane e rurali in prossimità di autostrade o in aree critiche a causa di emissioni industriali. Le stazioni misurano principalmente quei composti chimici che sono regolamentati dalla normativa vigente per i quali sono definiti dei valori limite (medie di lungo o breve periodo) e/o il numero di superamenti del limite in uno specifico intervallo di tempo. Sono solitamente monitorati, anche se non da tutte le stazioni, i seguenti composti : monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), composti organici volatili (VOC) e particolato con diametro  $\leq 10 \mu\text{m}$  (PM10).

In aggiunta alla rete di monitoraggio permanente, vengono effettuati monitoraggi temporanei sia di routine (ovvero misure consecutive in aree selezionate) sia in occasioni particolari (ad es. nel corso di episodi di forte inquinamento o nell’ambito di progetti di ricerca).

Come nel caso delle misure meteorologiche, anche qui si possono utilizzare strumenti “in-situ” e di “remote sensing”. Sistemi di misura in-situ sono commercialmente disponibili per una svariata serie di composti chimici e possono essere installati in containers, mezzi mobili (Fig. 16) o velivoli. Sistemi di remote-sensing vengono utilizzati per determinare la concentrazione degli inquinanti ad una certa distanza.



**Fig. 16** Il mezzo mobile di misura della qualità dell’aria dell’Agenzia per la Protezione dell’Ambiente della Provincia Autonoma di Bolzano – Autonome Provinz Bozen.

## Misure di rumore

Misure di lungo termine di rumore come spesso richieste dalla legge in prossimità degli aeroporti non sono comunemente adottate lungo le vie di transito. Per questo motivo le misure di rumore sono realizzate nel corso di specifiche campagne di monitoraggio che possono andare dal singolo campionamento alle osservazioni continue per una settimana o più.

Gli strumenti standard misurano i livelli di pressione sonora pesati secondo la curva A e li possono archiviare ad intervalli di 1 secondo. Strumenti più avanzati presentano analizzatori integrati che forniscono la distribuzione spettrale del rumore, ovvero il contributo delle principali bande di ottava o 1/3 di ottava all'interno delle frequenze udibili (20 Hz – 16 kHz). I misuratori di livelli di rumore utilizzano microfoni molto sensibili che sono normalmente protetti dal vento e, seguendo gli standard, posizionati ad un'altezza di 1.5 m o 4 m dal suolo.

Per le misure binaurali (stereo) si utilizzano microfoni installati nella posizione delle orecchie su teste artificiali (Fig. 17), il che consente anche di determinare la direzione di provenienza del rumore. Questo tipo di misure è utilizzato principalmente in studi di impatto del rumore poiché è possibile misurare il rumore così come è percepito dall'udito umano.



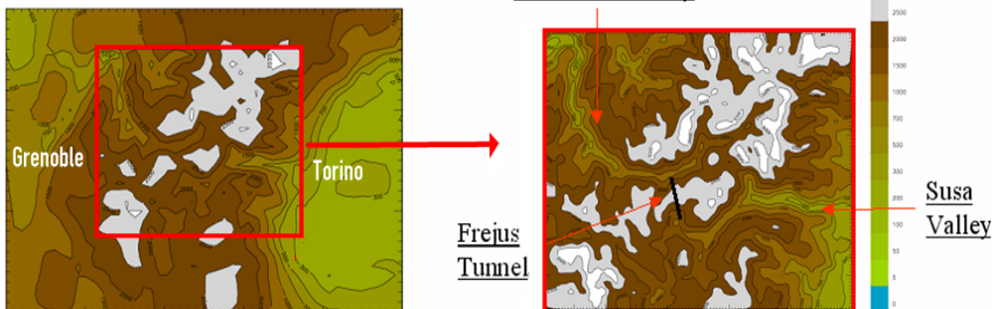
**Fig. 17** Un microfono binaurale (a sinistra) e monoaurale (a destra) "ascoltano" il rumore da traffico in un'area ricreativa della Val Maurienne in Francia. Entrambe i sensori sono protetti dal vento.

## Simulazioni e previsioni

L'impatto sull'inquinamento e sul rumore di infrastrutture progettate (ad es. nuove autostrade o linee ferroviarie), di misure amministrative (ad es. limiti di velocità, divieto di transito notturno per i mezzi pesanti), dello spostamento modale (da strada a rotaia) o di futuri scenari di traffico (ad es. per l'apertura di nuovi tunnel ferroviari, crescita economica o cambiamenti nel turismo), così come le loro conseguenze, non possono essere determinati sulla base di monitoraggi o osservazioni. È necessario applicare strumenti di simulazione e procedure di previsione.

Fondamentalmente, i principali processi atmosferici che governano lo sviluppo di venti forzati dall'orografia e dalla stratificazione termica, il trasporto, la dispersione, la reazione chimica e la deposizione di inquinanti atmosferici, così come la propagazione, l'assorbimento, la riflessione, la rifrazione e la diffrazione delle onde sonore, sono largamente conosciuti e possono essere descritti da formule matematiche, fisiche e chimiche. La soluzione di tali equazioni fornisce principalmente l'evoluzione temporale e/o la distribuzione spaziale delle concentrazioni di inquinanti e dei livelli di rumore in determinate condizioni al contorno. Modelli di emissione vengono utilizzati in via preliminare per convertire i dati di traffico in emissioni. Successivamente la valutazione dell'impatto si basa su relazioni esposizione-effetto che descrivono gli effetti sulla salute in conseguenza dell'inquinamento o del rumore.

### Maurienne Valley



**Fig. 18** Effetto della risoluzione spaziale: il grafico mostra l'elevazione del terreno delle Alpi occidentali con una risoluzione spaziale di 4 km (a sinistra). Nel sottodominio evidenziato (riquadro rosso) la risoluzione spaziale è portata ad 1 km (a destra) rendendo visibili molti più dettagli dell'orografia.

In tal modo è possibile simulare per mezzo di “modelli” o “sistemi modellistici” i processi antropici o naturali responsabili delle problematiche legate al traffico. Bisogna però tenere sempre in conto che i “modelli” sono una semplificazione della realtà: mentre i processi naturali dipendono dall'interazione di miriadi di singole molecole, anche i computer più potenti non sono in grado di calcolare tutte queste interazioni. È oltremodo necessario aggregare e approssimare i processi fisici per questioni computazionali, ma ciò può essere all'origine di inaccuratezze: la maggior parte dei modelli è caratterizzato da una certa “risoluzione” spaziale, ovvero una lunghezza scala che determina l'estensione delle più piccole peculiarità orografiche e dei processi che possono essere rappresentati nella simulazione (Fig. 18).

Nel corso degli ultimi decenni sono stati sviluppati presso le università e i centri di ricerca potenti modelli fisico-matematici che sono stati validati (ovvero verificati nella loro correttezza) tramite confronto dei loro risultati sia con dati misurati routinariamente che nel corso di apposite campagne di validazione. Quando un modello mostra la propria capacità nel riprodurre con sufficiente accuratezza un caso reale ben documentato, allora può essere utilizzato come strumento previsionale per la simulazione di scenari futuri con sufficiente affidabilità.

Poiché soluzioni molto accurate richiedono uno sforzo computazionale molto elevato, sono stati derivati anche modelli semplificati per applicazioni di routine. Tali modelli sono spesso richiamati dalle regolamentazioni nazionali o internazionali e sono utilizzati dagli amministratori o dagli studi tecnici nelle procedure di approvazione durante la fase di pianificazione di nuove infrastrutture, per valutare se gli interventi violeranno i limiti di inquinamento o rumore imposti dalla legge. Lo svantaggio di tali modelli risiede nel fatto che sono stati sviluppati principalmente per terreni pianeggianti e quindi trascurano la complessità associata all'orografia Alpina, ed in particolare le relazioni esistenti tra topografia e meteorologia. Come conseguenza di un errato utilizzo dei modelli si possono avere stime poco affidabili.

Modelli avanzati sono oggi pronti per l'uso ma non possono sostituire immediatamente i modelli standard indicati dalle regolamentazioni. Ciononostante possono essere utilizzati come strumenti supplementari per

- investigare situazioni complesse in cui i metodi standard possono fallire,
- definire le condizioni peggiori, ovvero quelle situazioni in cui ci si attende un elevato inquinamento che richiede contromisure adeguate,

- l'ottimizzazione di misure di abbattimento in situazioni geografiche specifiche,
- la valutazione di scenari di traffico futuri.

In pratica l'utilizzo di modelli spesso risente dei seguenti problemi:

- dati dettagliati di input spesso non sono disponibili con una sufficiente qualità, perché non vengono raccolti in certe aree o perché non sono resi disponibili dai proprietari,
- motivi economici richiedono un compromesso tra impegno computazionale e accuratezza.

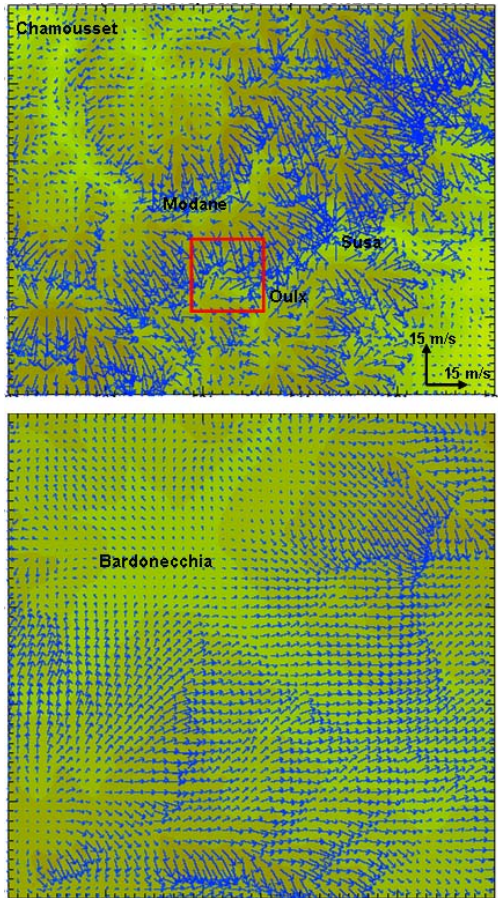
Tuttavia l'applicazione di modelli avanzati fornisce spesso risultati migliori rispetto a quelli ottenibili tramite l'adozione di metodi ingegneristici o semplici stime.

### **Modelli di emissione**

I modelli di emissione sono utilizzati per calcolare le emissioni (ovvero la massa di inquinanti rilasciata nell'intervallo di tempo o i livelli di potenza sonora) lungo una strada o una linea ferroviaria partendo dai dati di traffico (numero di veicoli/treni per intervallo di tempo, composizione dei veicoli/tipi di treno, distribuzione delle velocità, pendenze, condizioni del manto stradale o della sede ferroviaria). I dati di traffico possono essere osservati, stimati o previsti. La qualità dei dati di emissione dipende ovviamente dalla qualità dei dati di traffico. Il traffico e le altre fonti di emissioni, come ad es. il riscaldamento domestico e le industrie, sono catalogati dalle Agenzie per l'Ambiente nei cosiddetti "inventari delle emissioni".

### **Modelli meteorologici**

I modelli meteorologici sono utilizzati per calcolare la distribuzione spaziale di tutti i parametri che controllano sia il trasporto e la dispersione degli inquinanti che la propagazione delle onde sonore in tre dimensioni. I campi dettagliati dei parametri meteorologici in aree montane sono determinati simulando tutti i processi che sono influenzati dai fattori topografici (elevazione del terreno, uso del suolo, proprietà aerodinamiche e termodinamiche del suolo), dai fattori astronomici (ora dell'alba e del tramonto, inclinazione solare), e da fattori meteorologici a larga scala (ad es. correnti in quota). In particolare i modelli devono essere in grado di riprodurre i sistemi di circolazione indotti dalle montagne (correnti di pendio, circolazioni monte-pianura, incanalamento, foehn) e la forma-

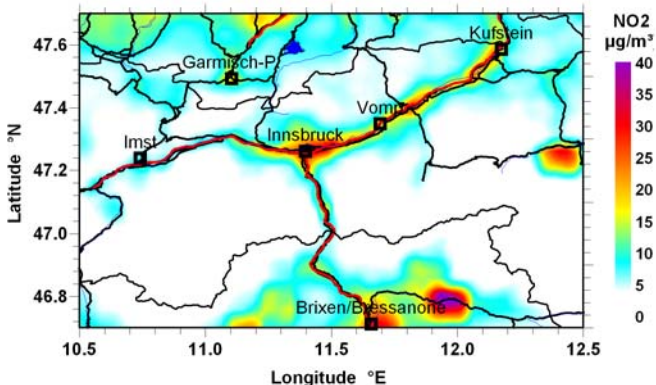


**Fig. 19** Esempio di simulazioni meteorologiche "in-nestate" del campo di vento con 1 km di risoluzione (in alto) e in un sottodomino (riquadro rosso) con 100 m di risoluzione (in basso).

zione di inversioni. I modelli meteorologici tipicamente utilizzati nelle Alpi hanno una risoluzione orizzontale compresa tra qualche centinaio di metri e una decina di chilometri. I modelli con una risoluzione meno raffinata non possono simulare le circolazioni nelle valli più strette, ma possono coprire un'ampia porzione delle Alpi. Tecniche di "annidamento" (inserimento di modelli con risoluzione via via maggiore) permettono di coprire un'area ampia con un focus più dettagliato su di una certa porzione (Fig. 19).

### Modelli di inquinamento

I modelli di inquinamento atmosferico calcolano il trasporto, la dispersione, la deposizione e le trasformazioni chimiche degli inquinanti per una data emissione e un dato campo meteorologico. Le informazioni sulle emissioni e la meteorologia sono spesso ricavate dai risultati dei relativi modelli descritti in precedenza, cui si aggiungono i dati topografici. I modelli di inquinamento forniscono la distribuzione spaziale delle concentrazioni in aria e/o la massa di inquinanti che si depositano sulla superficie o sulla vegetazione (deposizione secca e umida, sedimentazione). Per quanto riguarda la risoluzione spaziale dei modelli di inquinamento si applicano le stesse considerazioni fatte con riferimento ai modelli meteorologici (Fig. 20).

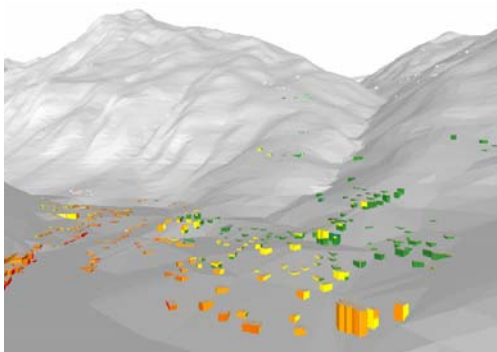


**Fig 20** Esempio di simulazione della concentrazione media annuale di  $\text{NO}_2$  in una vasta area delle Alpi orientali.

Per quanto riguarda la risoluzione spaziale dei modelli di inquinamento si applicano le stesse considerazioni fatte con riferimento ai modelli meteorologici (Fig. 20).

### Modelli di rumore

A seconda della complessità, i modelli di rumore simulano parzialmente o completamente gli effetti di propagazione del suono tra la sorgente e il ricettore (ad es. in aree abitate) per specifici livelli di emissione e condizioni meteorologiche. Come nel caso dei modelli di inquinamento, i dati d'ingresso possono essere ottenuti dai modelli di emissione o meteorologici. In aggiunta è necessario descrivere accuratamente la topografia dell'area (morfologia e caratteristiche del terreno, edifici). I modelli di rumore forniscono i livelli di rumore in posizioni di ricezione selezionate o su di un'area estesa (mappe di rumore, Fig. 21).

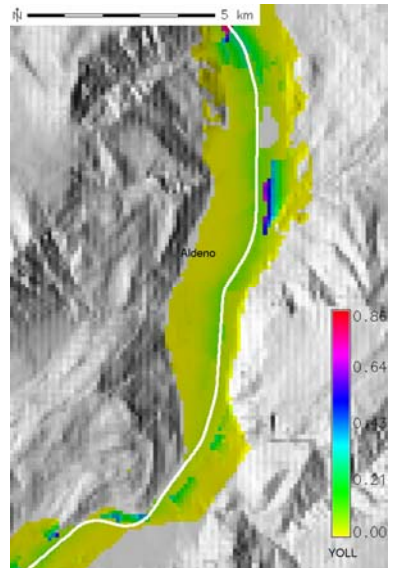


**Fig. 21** Esempio di mappe di rumore. I colori rappresentano i livelli di rumore simulati sulle facciate degli edifici della Val Maurienne in Francia. Tonalità dal verde al rosso indicano livelli crescenti.

## **Modelli di impatto**

I modelli di impatto considerano dati di inquinamento e/o rumore che sono stati misurati o simulati e calcolano l'impatto sulla salute umana, il livello di disturbo, il potenziale incremento dei ricoveri ospedalieri, il decremento delle aspettative di vita o i costi esterni indotti dalla problematica ambientale. I modelli di impatto sono basati su funzioni esposizione-risposta e richiedono in particolare informazioni demografiche (densità di popolazione, distribuzione di età, tempi di permanenza indoor e outdoor, ecc.).

Con l'aiuto di Sistemi Informativi Territoriali (SIT o Geographical Information Systems – GIS) è possibile combinare mappe di densità di popolazione e parametri di impatto sulla salute in una rappresentazione cartografica (Fig. 22).



**Fig 22** “Anni di vita persi – Years of life lost” (crescenti dal giallo al rosso) per effetto dell’inquinamento atmosferico in una sezione della valle dell’Adige/Etschtal.

## **Photo credits:**

J. Defrance (17), M. de Franceschi (16), Alexander Gohm (7, 10, 15b), D. Heimann (1, 2, 3, 4, 5, 19), P. Lercher (13), K. Schäfer (15d, 21), J. Vergeiner (9, 15a,c)

## ALPNAP Partecipanti

- (1) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, Germania (Partner Capofila).  
<http://www.dlr.de/pa>
- (2) Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (ARPA del Piemonte), corso Unione Sovietica, 216, 10134 Torino, Italia.  
<http://www.arpa.piemonte.it/>
- (3) Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon (CETE de Lyon), 46, rue Saint-Théobald BP 128, 38081 L'Isle d'Abeau Cedex, Francia.  
<http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr>
- (4) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Département Acoustique et Eclairage, 24, rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères, Francia.  
<http://www.cstb.fr>
- (5) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen, Germania.  
<http://www.fzk.de>
- (6) Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima – CNR (ISAC-CNR), corso, Fiume 4, 10133 Torino, Italia.  
<http://www.isac.cnr.it>
- (7) Medizinische Universität Innsbruck (MUI), Department für Hygiene, Mikrobiologie und Sozialmedizin - Sektion für Sozialmedizin, Sonnenburgstr. 16, 6020 Innsbruck, Austria.  
<http://www.i-med.ac.at/sozialmedizin>
- (8) Technische Universität Graz (TU Graz), Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 21a, 8010 Graz, Austria.  
<http://fvkma.tu-graz.ac.at>
- (9) Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Gruppo di Fisica dell' Atmosfera, Via Mesiano 77, 38100 Trento, Italia.  
<http://apg.ing.unitn.it>
- (10) Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Meteorologie, Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien, Austria.  
<http://www.wau.boku.ac.at/met.html>
- (11) Universität Innsbruck, Institut für Meteorologie und Geophysik, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Austria.  
<http://www2.uibk.ac.at/meteo>



This project has received European Regional Development Funding through the INTERREG IIB Community Initiative



Interreg III B

