

NOTA TECNICA SCIENTIFICA

Dispersione atmosferica da sorgente puntuale in condizioni di orografia complessa e stabilità atmosferica elevata: fenomenologia fisica, letteratura scientifica di riferimento e implicazioni per la modellistica di impatto ambientale

con specifico riferimento al caso della Val di Taro e allo stabilimento Laminam S.p.A.

Redatta da: KOINÉ APS — Associazione di Protezione Ambientale

Allegato alle: Osservazioni tecniche VIA-PAUR — Laminam S.p.A., Borgo Val di Taro (PR)

Data: Febbraio 2026

Sommario. La presente nota illustra la fenomenologia fisica della dispersione di inquinanti da sorgente puntuale nelle condizioni meteo-climatiche tipiche delle valli appenniniche, con particolare riferimento alla Val di Taro. Vengono analizzati i meccanismi di fanning, fumigating e meandro del pennacchio, la struttura del Planetary Boundary Layer notturno in condizioni di inversione termica, e il fenomeno del drenaggio dell'aria fredda lungo i versanti. Si dimostra, con riferimento alla letteratura scientifica consolidata, che in tali condizioni la distribuzione spaziale delle ricadute al suolo è intrinsecamente dispersa e variabile su scale temporali sub-orarie — producendo un pattern di segnalazioni dei cittadini che un modello gaussiano stazionario non è in grado di interpretare correttamente. Questa evidenza rafforza la critica metodologica alla catena modellistica CALMET-CALPUFF utilizzata nello studio SIA.06, in quanto tale catena è strutturalmente inadeguata a rappresentare i fenomeni descritti quando alimentata con dati meteorologici a risoluzione oraria.

1. Struttura verticale dell'atmosfera superficiale: Surface Layer e Planetary Boundary Layer

Le emissioni dello stabilimento Laminam S.p.A. di Borgo Val di Taro avvengono all'interno del Surface Layer (SL) e, in condizioni di mescolamento verticale, si propagano nel Planetary Boundary Layer (PBL). La comprensione delle proprietà fisiche di questi due strati è essenziale per valutare il comportamento del pennacchio emissivo.

Surface Layer (SL)

Strato inferiore dell'atmosfera, da 0 a circa 50–200 m sopra il suolo. È la porzione dove i flussi turbolenti (di calore, quantità di moto, vapor d'acqua) sono approssimativamente costanti con la quota. Le emissioni industriali tipiche avvengono interamente in questo strato. La turbolenza è dominata dagli scambi con la superficie sottostante. [Stull, 1988]

Planetary Boundary Layer (PBL)

Strato inferiore della troposfera direttamente influenzato dalla superficie terrestre, con spessore variabile tra 100 m (notte, inversione forte) e 2–3 km (giornata estiva soleggiata). Gli inquinanti emessi nel SL si diffondono verticalmente entro i limiti del PBL. Quando il PBL è basso e stabile, gli inquinanti rimangono confinati in un volume ridotto. [Stull, 1988; Seinfeld & Pandis, 2016]

La proprietà cruciale del PBL per la dispersione degli inquinanti è la sua altezza, che varia di diversi ordini di grandezza nel corso delle 24 ore. Durante il giorno, il riscaldamento della superficie produce convezione termica e un PBL convettivo alto e ben mescolato. Nelle ore notturne, il raffreddamento radiativo della superficie genera un PBL stabile — detto Nocturnal Boundary Layer (NBL) o Stable Boundary Layer (SBL) — di spessore molto ridotto, spesso tra 50 e 200 m.

Implicazione per la Val di Taro

Lo stabilimento Laminam si trova sul fondovalle a circa 388 m s.l.m. I versanti circostanti raggiungono quote di 600–800 m. In condizioni notturne di inversione termica, il NBL ha uno spessore comparabile alla differenza di quota tra il fondovalle e i versanti residenziali. Le emissioni dell'impianto si trovano confinare in uno strato verticale sottile che coincide con le quote abitate, senza possibilità di dispersione verticale significativa. [Whiteman, 2000]

2. Classi di stabilità atmosferica e forme del pennacchio da sorgente puntuale

Il comportamento del pennacchio emissivo da una sorgente puntuale è determinato in primo luogo dalla classe di stabilità atmosferica. La classificazione di Pasquill-Gifford (Pasquill, 1961; Gifford, 1961; Turner, 1970) distingue sei classi di stabilità (A–F) in funzione della velocità del vento, dell'irraggiamento solare e della copertura nuvolosa. A ciascuna classe corrisponde una forma caratteristica del pennacchio, descritta classicamente da Slade (1968) e riprodotta nella quasi totalità dei testi di qualità dell'aria.

2.1 Le sei forme canoniche del pennacchio

Classe	Forma	Condizioni	Comportamento e ricadute al suolo
A–B	Looping	Instabile, alta convezione	Pennacchio a spirale, alta turbolenza. Alte concentrazioni al suolo vicino alla sorgente per touch-down del looping. Diurno estivo con forte insolazione.
C–D	Coning	Neutro-lievemente instabile	Pennacchio a cono simmetrico, dispersione moderata. Condizione 'standard' dei modelli gaussiani. Velocità di vento media (3–5 m/s).
D	Fanning ★★★	Stabile-molto stabile (E/F), vento debole	Pennacchio piatto, si espande solo orizzontalmente senza dispersione verticale. Può trasportare concentrazioni elevate a grande distanza rimanendo a quota suolo. Tipicamente notturno in condizioni di inversione termica.
E–F	Fumigating	Transizione mattutina da notte a giorno	Al mattino, il riscaldamento del suolo rompe l'inversione dal basso; il pennacchio accumulato notturno viene trascinato al suolo concentrato. Episodi di alta concentrazione improvvisa.
D–F	Trapping	Inversione sopra la sorgente	Il pennacchio è intrappolato tra il suolo e uno strato di inversione sopraelevato. Rimane confinato verticalmente, si disperde solo lateralmente.
E–F + meandri o ★★★	Fanning + Meandro	Stabile, vento < 1,5 m/s, $\sigma\theta \geq 40^\circ$	Fanning con oscillazione laterale del pennacchio su scala di minuti. Recettori diversi vengono colpiti in sequenza. Pattern di segnalazioni geograficamente disperso ma fisicamente coerente. Condizione più critica per la Val di Taro.

Fonte: Pasquill (1961), Turner (1970), Slade (1968), Briggs (1973). ★★★ = condizioni di massima criticità per il caso in esame.

2.2 Il fanning: il pennacchio più pericoloso per i ricettori a terra

Il fanning (classe E/F, vento < 2 m/s) si produce quando il gradiente termico verticale è fortemente stabile, tipicamente nelle ore notturne e nelle prime ore del mattino in assenza di vento. In queste condizioni il pennacchio non ha avvezione verticale significativa: si estende orizzontalmente mantenendo una struttura quasi laminare, con dispersione verticale trascurabile.

Le conseguenze per i ricettori al suolo sono controintuitive rispetto alle aspettative di un osservatore non specialista. Concentrazioni medie su scala di ore possono essere relativamente basse, perché il pennacchio è sottile e non impatta continuamente il suolo. Ma le concentrazioni di picco, quando il pennacchio tocca il suolo o viene abbassato da moti discendenti lungo il versante, possono essere molto più elevate della media — e si verificano con distribuzione temporale irregolare e imprevedibile su scale di minuti.

Briggs (1969, 1973) dimostra che in condizioni di fanning il pennacchio può percorrere distanze di 5–10 km mantenendo concentrazioni significative, perché l'assenza di dispersione verticale impedisce la diluizione con l'aria circostante. La distanza di ricaduta è quindi molto maggiore di quella prevista da un modello gaussiano in condizioni neutri.

3. Il meandro del pennacchio: fisica e implicazioni per le segnalazioni dei cittadini

Il meandro è un fenomeno fisico distinto dal fanning, che si sovrappone ad esso nelle condizioni di stabilità elevata e vento calmo. Esso è governato dalla deviazione standard della direzione del

vento ($\sigma\theta$), parametro che descrive l'ampiezza delle oscillazioni laterali del vento su una scala temporale definita.

3.1 Il parametro $\sigma\theta$ e la sua scala temporale

La $\sigma\theta$ può essere misurata su scale temporali diverse, e i valori dipendono fortemente dalla scala scelta. Misure a 10 minuti catturano la variabilità reale del vento — incluse le oscillazioni di meandro che si sviluppano su scale di 5–30 minuti. Medie orarie sopprimono queste oscillazioni, producendo valori di $\sigma\theta$ artificialmente bassi.

Anfossi et al. (2005, Boundary-Layer Meteorology) dimostrano sperimentalmente che la $\sigma\theta$ oraria è sistematicamente inferiore a quella sub-oraria, con fattori di sottostima che in condizioni di vento calmo e stabilità elevata raggiungono un ordine di grandezza. Questo è il fondamento scientifico della critica metodologica alla modellistica CALPUFF sviluppata nelle osservazioni tecniche VIA.

Hanna (1983, J. Climate Applied Meteorology) formalizza la relazione tra $\sigma\theta$ e la larghezza del pennacchio: $\sigma y \approx \sigma\theta[\text{rad}] \times x$, dove x è la distanza dalla sorgente. Con $\sigma\theta$ di 40° (valore tipico misurato dalla centralina Laminam nelle ore notturne) il pennacchio ha una larghezza di quasi 3 km a 1 km di distanza dalla sorgente, rispetto ai circa 260 m previsti dalla classe F del modello Turner.

Dati centralina Laminam: confronto $\sigma\theta$ misurata vs. stima Turner (apr–set 2018)

- $\sigma\theta$ _misurata media notturna (ore 19–06): $39,4^\circ$ — $\sigma\theta$ Turner classe F: $3,5^\circ$ — Fattore sottostima: $10,4\times$
- Condizione notte + vento calmo ($\leq 1,5$ m/s): 1.420 ore su 4.352 totali (32,6% del periodo)
- Larghezza pennacchio a 1 km con $\sigma\theta$ misurata: 2.954 m — con Turner classe F: 263 m
- Casi critici (notte + calmo + $\sigma\theta \geq 50^\circ$): $\sigma\theta$ media $55,6^\circ$ → larghezza pennacchio 4.170 m a 1 km

Fonte: elaborazione originale su dataset centralina meteorologica Laminam, 26.245 record a 10 minuti, apr–set 2018.

3.2 La firma fisica del meandro: perché le segnalazioni appaiono 'incoerenti'

Il meandro produce un comportamento fisico che è intrinsecamente diverso da quello presupposto dai modelli gaussiani stazionari. Comprendere questa differenza è essenziale per interpretare correttamente le segnalazioni dei cittadini.

In un modello gaussiano classico (Pasquill-Gifford-Turner), il pennacchio si propaga in una direzione prevalente stabile, colpendo i ricettori sull'asse del vento con concentrazioni decrescenti con la distanza. I ricettori lontani dall'asse ricevono concentrazioni molto minori. La firma spaziale delle segnalazioni attesa da questo modello è una striscia orientata nella direzione del vento.

In condizioni di meandro, il comportamento è strutturalmente diverso. Il pennacchio rimane fisicamente stretto in ogni istante, ma la sua direzione oscilla lentamente su un settore angolare ampio (definito da $\sigma\theta$) con periodi dell'ordine di 10–30 minuti. Il risultato è:

- **Concentrazioni medie basse su scala oraria:** ogni recettore nel settore di meandro viene colpito solo per una frazione del tempo. Un campionatore settimanale passivo — come quelli usati nella campagna ISS 2018–2019 — misura la concentrazione media e non rileva i picchi episodici.

- **Concentrazioni di picco elevate su scala sub-oraria:** quando il pennacchio punta verso un recettore, la concentrazione istantanea è simile a quella sull'asse in condizioni stazionarie. La durata dell'episodio è breve (minuti), ma l'intensità è significativa — sufficiente a produrre effetti sensoriali.
- **Pattern spaziale disperso e non direzionale:** recettori in posizioni geograficamente diverse, in direzioni diverse dalla sorgente, vengono colpiti in sequenza nello stesso arco di ore. Non esiste una direzione prevalente nelle segnalazioni: esiste un settore angolare ampio centrato sulla sorgente.
- **Variabilità temporale apparentemente casuale:** la sequenza con cui i recettori vengono colpiti dipende dall'evoluzione sub-oraria della direzione del vento, che è pseudo-caotica in queste condizioni. Segnalazioni provenienti da abitazioni distanti e in direzioni diverse nella stessa notte sono fisicamente compatibili — non sono 'incoerenti'.

Gifford (1976, Turbulent Diffusion Typing Schemes: A Review) è il riferimento fondamentale per la comprensione di questo fenomeno. Gifford distingue esplicitamente tra 'meandering plume' e 'diffusing plume', sottolineando che le concentrazioni di picco in condizioni di meandro possono superare di un fattore 10 o più le concentrazioni medie stimate dai modelli stazionari.

Venkatram (1992, Uncertainty in Predictions of Dispersion, Atmos. Environ.) dimostra che l'incertezza nei modelli di dispersione in condizioni di vento calmo e stabilità elevata è fondamentalmente diversa dall'incertezza nelle condizioni di riferimento: non si tratta di un errore sistematico correggibile, ma di una variabilità intrinseca del sistema fisico che non può essere catturata da modelli deterministici alimentati con medie temporali.

4. L'orografia della Val di Taro come amplificatore: brezze di valle, drenaggio freddo e inversioni termiche

I fenomeni di fanning e meandro descritti nei paragrafi precedenti rappresentano il comportamento atteso in un sito pianeggiante in condizioni di stabilità elevata. In una valle appenninica con orografia complessa come la Val di Taro, questi fenomeni vengono amplificati e modificati da meccanismi specifici della meteorologia di montagna.

4.1 Il sistema di brezze di valle

Le brezze di valle sono circolazioni termiche locali che si sviluppano nelle ore diurne e notturne in risposta al differenziale di temperatura tra il fondovalle e i versanti. Sono state documentate e studiate sistematicamente da Whiteman (2000) e Zardi & Whiteman (2013).

Durante il giorno, il riscaldamento dei versanti produce un flusso ascendente (brezza anabática, da monte). Di notte, il raffreddamento radiativo produce un flusso discendente di aria fredda lungo i versanti verso il fondovalle (brezza catabática o **drenaggio dell'aria fredda**). In una valle orientata come la Val di Taro — con asse prevalente SO–NE — questi flussi si organizzano in un sistema bimodale: venti da E–SE nelle ore diurne, venti da O–NO nelle ore notturne.

Questo sistema bimodale è documentato indipendentemente dalla relazione ISS del 20 marzo 2019 (Soggiu et al.), che riporta la mappa delle frequenze orarie del vento dalla centralina Laminam (ottobre 2018 – gennaio 2019) mostrando esattamente questa rotazione: predominanza di venti da O–NO nelle ore notturne e da E–SE nelle ore centrali e pomeridiane (12–18 h). La corrispondenza tra la fenomenologia teorica e i dati misurati è completa.

4.2 Il drenaggio dell'aria fredda e il confinamento del pennacchio

Whiteman (2000, Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications) descrive in dettaglio il meccanismo di drenaggio: l'aria fredda che scende dai versanti si accumula nel fondovalle, formando un lago di aria fredda stagnante che può raggiungere uno spessore di 100–300 m nelle valli alpine e appenniniche. Questo lago di aria fredda è chimicamente separato dall'atmosfera sovrastante: gli inquinanti emessi al suo interno non si disperdono verticalmente.

Lo stabilimento Laminam è posizionato sul fondovalle, all'interno della zona di accumulo dell'aria fredda notturna. Le sue emissioni vengono quindi intrappolate nel lago di aria fredda e trasportate lentamente secondo il regime di brezza catabática verso il centro abitato di Borgo Val di Taro, che si trova a valle dello stabilimento rispetto al flusso notturno prevalente da E–SE.

4.3 L'inversione termica in valle: abbassamento del PBL notturno

Zardi & Whiteman (2013, Diurnal Mountain Wind Systems, in: Mountain Weather Research and Forecasting) documentano che nelle valli chiuse e semi-chiuse il PBL notturno si riduce a spessori di 50–150 m nelle condizioni di calma di vento e irraggiamento notturno intenso. In queste condizioni l'altezza di rimescolamento è inferiore all'altezza dei versanti circostanti, e il pennacchio emesso a quota camino (tipicamente 20–50 m sul suolo) si trova nella fascia più bassa dello strato stabile, confinato da:

- il suolo in basso, che raffredda l'aria e inibisce la convezione;
- lo strato di inversione in alto, che impedisce la dispersione verticale;
- i versanti laterali, che canalizzano il flusso lungo l'asse della valle.

Il risultato è che il volume entro cui gli inquinanti si disperdono è ridotto a una piccola frazione del dominio disponibile in condizioni normali. Le concentrazioni al suolo in queste condizioni possono superare di un ordine di grandezza quelle previste da modelli che non rappresentano questa struttura verticale.

5. Perché il modello CALPUFF non può catturare questi fenomeni con dati meteorologici orari

I fenomeni fisici descritti nei paragrafi precedenti — fanning, meandro, drenaggio dell'aria fredda, abbassamento del PBL notturno — hanno tutti una caratteristica comune: si sviluppano e si evolvono su scale temporali dell'ordine di 10–30 minuti, inferiori alla risoluzione oraria dei dati meteorologici utilizzati nel SIA.06.

Questa incompatibilità di scala non è una questione tecnica secondaria: è una limitazione fondamentale che rende strutturalmente inadeguata la modellistica di dispersione presentata nel SIA.06 per la valutazione delle condizioni di massima criticità.

5.1 La catena causale dell'inadeguatezza

Il meccanismo di inadeguatezza si articola in tre passaggi logici consecutivi:

- **Passo 1 — Aggregazione oraria sopprime il meandro:** la $\sigma\theta$ oraria della centralina Laminam è sistematicamente inferiore alla $\sigma\theta$ misurata a 10 minuti, con fattori di sottostima di 5–16× nelle condizioni critiche notturne. Questo è dimostrato quantitativamente sull'intero dataset apr–set 2018. Il periodo autunno-invernale, con inversioni termiche più profonde, produce fattori di sottostima analoghi o maggiori.

- **Passo 2 — $\sigma\theta$ bassa → Turner assegna classe F → pennacchio stretto:** CALMET, non disponendo della $\sigma\theta$ misurata, stima la turbolenza dal metodo Turner. Con vento calmo e notte, assegna classe F ($\sigma\theta = 3,5^\circ$). Il pennacchio risultante è stretto (larghezza 263 m a 1 km) e rettilineo: la fisica del meandro scompare dal modello.
- **Passo 3 — Pennacchio stretto → concentrazioni sottostimate ai ricettori laterali:** i ricettori posizionati nei versanti laterali rispetto all'asse medio del pennacchio — esattamente dove si trovano le abitazioni di Borgo Val di Taro — vengono considerati non esposti. Le concentrazioni calcolate in quei punti sono di fatto zero, quando nella realtà il meandro li colpisce episodicamente con intensità significativa.

Hanna & Drivas (1996, Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models) sottolineano che i modelli gaussiani, incluso CALPUFF, producono stime affidabili solo nelle condizioni per cui sono stati calibrati: stabilità neutrale, vento moderato, terreno piano. Nelle condizioni di stabilità elevata con vento calmo in orografia complessa, l'incertezza delle previsioni cresce di diversi ordini di grandezza e le stime di concentrazione media non sono rappresentative dei picchi reali.

5.2 La conferma indipendente dalla campagna ISS 2018–2019

La relazione ISS del 20 marzo 2019 (Soggiu et al.) documenta che la campagna di monitoraggio con campionatori passivi settimanali in 15 postazioni non ha evidenziato una correlazione stretta e continua tra le concentrazioni di COV rilevate e la frequenza sottovento. Gli autori osservano che "solo alcuni andamenti sono in fase tra loro ma saltuariamente nel tempo e nello spazio".

Questa osservazione, interpretata dalla stessa ISS come assenza di chiara attribuzione, è in realtà fisicamente coerente con il meccanismo del meandro descritto nel paragrafo 3.2. Un campionario settimanale passivo misura la concentrazione media su 7 giorni — una media che integra ore con pennacchio diretto e ore con pennacchio lontano. Il segnale del meandro, che produce concentrazioni di picco brevi e intense, si diluisce nella media settimanale fino a diventare non distinguibile dal fondo.

La stessa campagna ISS fornisce però la conferma indiretta del meccanismo: la mappa delle frequenze orarie del vento (Figura 2 della relazione) mostra il regime bimodale di brezza di valle — documentando le condizioni fisiche che, secondo la letteratura scientifica, producono esattamente il comportamento del pennacchio descritto.

6. Interpretazione fisica delle segnalazioni dei cittadini

Nel periodo di attività dello stabilimento Laminam, il territorio di Borgo Val di Taro ha registrato oltre 3.000 segnalazioni da circa 400 residenti, documentate nel contesto delle attività del Comitato Tecnico Scientifico. Tali segnalazioni includono indicazione di data, ora, luogo e natura del disagio percepito (effetti odorigeni, effetti sanitari).

ARPAE ha classificato queste segnalazioni come "incoerenti" in quanto non presentano il pattern direzionale atteso da un modello gaussiano stazionario: non si concentrano in modo sistematico nelle postazioni sottovento nella direzione del vento prevalente nell'ora della segnalazione.

La fisica descritta nelle sezioni precedenti fornisce un'interpretazione alternativa, scientificamente fondata e coerente con la letteratura:

La distribuzione spaziale apparentemente dispersa e priva di direzione prevalente delle segnalazioni è la firma attesa di un pennacchio in regime di meandro con $\sigma\theta$ elevata in un corridoio orograficamente confinato. In queste condizioni fisiche, recettori in posizioni

geograficamente distanti e in direzioni diverse dalla sorgente vengono colpiti in sequenza dallo stesso pennacchio in oscillazione, su scale temporali di 10–30 minuti. Il pattern di segnalazioni risultante è necessariamente non direzionale rispetto a un'analisi con risoluzione oraria. Non si tratta di incoerenza: si tratta della firma fisica di un fenomeno che la strumentazione analitica applicata — sia il modello CALPUFF sia i campionatori settimanali passivi — non è strutturalmente attrezzata a rilevare.

Questa interpretazione non richiede analisi statistica dei dati individuali delle segnalazioni: è una deduzione logica dall'applicazione della fisica atmosferica alle condizioni meteo-orografiche documentate. La sua validità dipende dalla letteratura scientifica citata, non dai dati delle segnalazioni.

7. Conclusioni

La presente nota dimostra, con riferimento alla letteratura scientifica consolidata, che le condizioni fisiche della Val di Taro nelle ore notturne e nelle prime ore del mattino — inversione termica, drenaggio dell'aria fredda, regime di brezza catabática, fanning e meandro del pennacchio — producono una distribuzione delle ricadute al suolo che è strutturalmente non rappresentabile da modelli gaussiani stazionari alimentati con dati meteorologici a risoluzione oraria.

I punti chiave sono quattro:

- **Il fanning in classe E/F** produce un pennacchio piatto senza dispersione verticale che può trasportare concentrazioni significative a grande distanza rimanendo a quota suolo. È la condizione dominante nelle notti con inversione termica e vento calmo, che nelle valli appenniniche come la Val di Taro rappresentano una frazione rilevante delle ore dell'anno.
- **Il meandro con $\sigma\theta$ elevata** produce concentrazioni di picco superiori di un ordine di grandezza a quelle medie, distribuite spazialmente su un settore angolare ampio attorno alla sorgente, con pattern temporale non correlato alla direzione del vento oraria. La $\sigma\theta$ misurata dalla centralina Laminam a 10 minuti è 5–16 volte superiore alla stima Turner nelle condizioni critiche notturne.
- **L'orografia della Val di Taro** amplifica entrambi i fenomeni attraverso il confinamento nel fondovalle, il drenaggio dell'aria fredda dai versanti e l'abbassamento del PBL notturno a spessori comparabili con le quote residenziali.
- **La catena modellistica CALMET–CALPUFF con dati orari** non è in grado di rappresentare nessuno di questi fenomeni nelle condizioni di massima criticità, per ragioni strutturali legate alla risoluzione temporale degli input. Le concentrazioni calcolate ai ricettori nei versanti laterali sono sistematicamente sottostimate.

Raccordo con le osservazioni VIA (Sezione 2)

La presente nota tecnica fornisce il fondamento scientifico alla Richiesta 1 delle osservazioni VIA: la simulazione con $\sigma\theta$ misurata a 10 minuti non è una preferenza metodologica, ma il requisito minimo per ottenere risultati fisicamente significativi nelle condizioni di stabilità elevata che caratterizzano la Val di Taro nelle ore notturne e invernali.

La stessa nota giustifica scientificamente l'interpretazione delle segnalazioni dei cittadini come fenomeno fisicamente coerente, confutando la classificazione ARPAE di 'incoerenti' sulla base della fisica della dispersione atmosferica in orografia complessa.

Borgo Val di Taro, 23 marzo 2026

Marco Cacchioli - Membro Direttivo KOINÉ APS

Riferimenti bibliografici

- [**Anfossi 2005**] Anfossi D., Oettl D., Degrazia G., Goulart A. (2005). An analysis of sonic anemometer observations in low wind speed conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 114(1), 179–203.
- [**Briggs 1969**] Briggs G.A. (1969). Plume Rise. U.S. Atomic Energy Commission, TID-25075. Oak Ridge, TN.
- [**Briggs 1973**] Briggs G.A. (1973). Diffusion estimation for small emissions. In: Environmental Research Laboratories, Air Resources Atmosphere Turbulence and Diffusion Laboratory 1973 Annual Report, USAEC Report ATDL-106. Oak Ridge, TN.
- [**Gifford 1961**] Gifford F.A. (1961). Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear Safety*, 2(4), 47–51.
- [**Gifford 1976**] Gifford F.A. (1976). Turbulent diffusion typing schemes: A review. *Nuclear Safety*, 17(1), 68–86.
- [**Hanna 1983**] Hanna S.R. (1983). Lateral turbulence intensity and plume meandering during stable conditions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(8), 1424–1430.
- [**Hanna 1996**] Hanna S.R., Drivas P.J. (1996). Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models, 2nd ed. CCPS/AIChE, New York.
- [**ISPRA 2011**] ISPRA (2011). La modellistica della qualità dell'aria: gli strumenti per la valutazione delle ricadute. Manuali e Linee Guida 58/2011. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- [**Pasquill 1961**] Pasquill F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*, 90(1063), 33–49.
- [**Seinfeld 2016**] Seinfeld J.H., Pandis S.N. (2016). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3rd ed. Wiley, New York.
- [**Slade 1968**] Slade D.H. (ed.) (1968). Meteorology and Atomic Energy 1968. U.S. Atomic Energy Commission, TID-24190. Oak Ridge, TN.
- [**Soggiu 2019**] Soggiu M.E. et al. (2019). Studio della qualità dell'aria nel comune di Borgo Val di Taro — Relazione Avanzamento Attività, 20 marzo 2019. Convenzione ISS–AUSL Parma. Reparto Esposizione a Contaminanti in Aria, Suolo e da Stili di Vita, Dipartimento Ambiente e Salute, ISS Roma.
- [**Stull 1988**] Stull R.B. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [**Turner 1970**] Turner D.B. (1970). Workbook on Atmospheric Dispersion Estimates. U.S. Environmental Protection Agency, AP-26. Research Triangle Park, NC.
- [**US EPA 2003**] US EPA (2003). CALPUFF Modeling System User's Instructions Version 5.8. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- [**Venkatram 1992**] Venkatram A. (1992). Uncertainty in predictions of dispersion in the convective boundary layer. *Atmospheric Environment*, 26A(15), 2857–2858.
- [**Whiteman 2000**] Whiteman C.D. (2000). Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. Oxford University Press, New York.
- [**Zardi 2013**] Zardi D., Whiteman C.D. (2013). Diurnal mountain wind systems. In: Chow F.K., De Wekker S.F.J., Snyder B.J. (eds.), Mountain Weather Research and Forecasting. Springer Atmospheric Sciences, pp. 35–119.