

**RICERCHE
E FORMAZIONE**

Episodi acuti di inquinamento atmosferico invernale a Firenze

**Analisi dei dati e
metodi di previsione**

7



**Agenzia Regionale
per la Protezione Ambientale della Toscana**

Ricerche e formazione

7

Antongiulio Barbaro

Marco Bazzani

Franco Giovannini

Paolo Nannini

EPISODI ACUTI DI INQUINAMENTO ATMOSFERICO INVERNALE A FIRENZE

Analisi dei dati e metodi di previsione

ARPAT

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana

Ricerche e formazione

7



Fisica Ambientale tel. 055/678309-678449-678297 - fax 055/678314

A.R.P.A.T. - Agenzia regionale per la Protezione ambientale della Toscana
DIPARTIMENTO PROVINCIALE DI FIRENZE
UNITA' OPERATIVA DI FISICA AMBIENTALE
Via di San Salvi, 12 - 50135 Firenze

Gli autori

Antongiulio Barbaro è dal 1991 presso l'U.O. Fisica Ambientale della USL 10/A-Servizio Multizonale di Prevenzione Ambientale, e dal 1995 presso la stessa U.O. dell'ARPAT-Dipartimento Provinciale di Firenze, dove si occupa dell'uso e messa a punto dei modelli matematici per la simulazione del trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera.

Franco Giovannini e **Paolo Nannini** sono consulenti dal 1992 del Comune di Firenze, dal 1993 della Provincia di Firenze, e dal 1996 dell'ARPAT, assegnati all'U.O. Fisica Ambientale per le problematiche inerenti la gestione della rete di monitoraggio

Marco Bazzani è dal 1995 consulente della Provincia di Firenze, e dal 1996 dell'ARPAT per le problematiche connesse con la rete di monitoraggio di Prato e per la messa a punto di strumenti software nel settore meteorologico.

La presente pubblicazione è frutto di un lavoro collettivo, particolarmente intenso nell'ultimo anno, che è stato coordinato da Franco Giovannini.

Coordinamento editoriale:

Pietro Bertoli, ARPAT, settore tecnico CEDIF
(Comunicazione, Educazione, Documentazione,
Informazione, Formazione)

Via Baracca, 9 - 50127 Firenze
Tel. 055-3206355/62/63/64
Fax 055-3206367
E mail: cedoc@fi.nettuno.it

Realizzazione editoriale:

Litografia I.P. - Firenze - Tel. 055/578661

Progetto grafico della copertina:

Gianni Sinni - CDC graphics

Il logo della Fisica ambientale è di Sauro Ciantini

Stampato su carta ecologica

INDICE

	Presentazione	9
1	Introduzione	13
1.1	La normativa	14
1.2	La rete di monitoraggio della qualità dell'aria a Firenze	17
1.3	Gli episodi acuti e le strategie di intervento e previsione	21
2	Inquinamento atmosferico invernale nelle aree urbane	27
2.1	Le sostanze, le sorgenti, la fenomenologia dell'inquinamento urbano	27
2.2	Lo strato limite atmosferico e le condizioni meteorologiche rilevanti agli effetti dell'inquinamento atmosferico urbano	36
3	Analisi	47
3.1	Analisi dei fenomeni	47
3.1.1	Analisi qualitativa e di screening delle variabili	48
	a) Episodi acuti d'inquinamento da NO ₂ e da CO	48
	b) Dipendenza dalle emissioni	50
	c) Dipendenza dai parametri meteorologici	54
	d) Dipendenza dell'NO ₂ dai precursori	67
	e) Osservazioni multivariate: box degli eventi critici	71
	f) Conclusioni	72
3.1.2	Variazione delle condizioni meteorologiche e del quadro emissivo	73
3.2	Analisi statistica preliminare	82
3.2.1	Distribuzioni statistiche e test	83
	a) Tipo di giorno	85
	b) Categorie sinottiche	88
	c) Test sui valori medi	90
3.2.2	Suddivisione in classi discrete e tabelle di contingenza	92
3.2.3	Analisi di correlazione	102
4	Modelli statistici per la previsione	111
4.1	Modelli CHAID	111
4.1.1	Cenni sulla tecnica di segmentazione CHAID	112
4.1.2	Applicazione della tecnica CHAID per la realizzazione di	

modelli di previsione degli episodi acuti d'inquinamento atmosferico	113
4.1.3 Modelli CHAID per la previsione degli episodi acuti d'inquinamento atmosferico: selezione dei modelli	115
4.1.4 Risultati ottenuti e valutazione dei modelli CHAID	136
4.1.5 Modelli CHAID operativi	152
4.2 Modelli K-nn	157
4.2.1 Il metodo K-nn (K-nearest neighbours)	158
4.2.2 Applicazione del metodo K-nn per la previsione degli episodi acuti d'inquinamento atmosferico: scelta dei modelli e della tecnica di previsione	159
4.2.3 Risultati ottenuti e valutazione dei modelli K-nn	165
4.2.4 Modelli K-nn operativi	184
4.3 Modelli a regressione	186
4.3.1 Modelli a regressione multilineare	186
4.3.2 Modelli a regressione logistica	199
4.4 Confronto dei risultati e conclusioni	207
5 L'attività operativa di previsione	211
5.1 Obiettivi della previsione	211
5.2 Risultati ottenuti dalla previsione e confronto fra le diverse procedure d'intervento adottate dal Comune di Firenze nel corso degli anni	214
5.3 Prospettive di sviluppo e miglioramento degli strumenti di previsione	224
Appendice 1 L'inquinamento atmosferico da NO ₂ a Prato	227
Appendice 2 Variabili ambientali e meteorologiche utilizzate e loro codifica in classi	237
Appendice 3 Categorie sinottiche	242
Appendice 4 Distribuzioni di frequenza di NO ₂ AB rispetto al tipo di giorno	249
Appendice 5 Matrice di correlazione lineare (1993-94, 1994-95, 1995-96)	252
Appendice 6 Persistenza fra i valori della velocità del vento nella mattina e nel periodo diurno	263

Ringraziamenti

Ci preme esprimere un ringraziamento anzitutto alla Provincia di Firenze, Settore Ambiente, che ha realizzato la rete di monitoraggio e che in questi anni ne ha finanziato la manutenzione e l'aggiornamento tecnologico, favorendo anche l'acquisizione degli strumenti idonei per studiare i dati rilevati, meglio comprendere le relazioni tra concentrazioni ed emissioni, mettere a punto le strategie di risanamento più idonee.

Un ringraziamento va anche a tutti i colleghi dell'ARPAT che hanno lavorato e lavorano quotidianamente alla gestione e manutenzione della rete e di tutti i sensori, ed in specie al Sig. Marco Degl'Innocenti, e a tutto lo staff che si occupa del Centro operativo di raccolta dei dati: un lavoro "silenzioso", ma prezioso grazie al quale la rete di Firenze presenta da sempre un'efficienza complessiva molto elevata. Una citazione particolare va al Dott. Daniele Grechi per gli utili chiarimenti e le discussioni tecniche avute in questi anni circa il funzionamento dei sistemi di monitoraggio e le caratteristiche degli inquinanti.

Un ringraziamento va al Dott. Piero Battini, responsabile dell'U.O. Fisica Ambientale, che da sempre promuove attività di approfondimento con forte valenza operativa e che anche in questa occasione non ci ha fatto mancare il proprio appoggio.

Inoltre ci fa piacere ricordare l'apprezzato apporto offerto dai tecnici del Servizio Agrometeorologico dell'ARSIA, dai colleghi del Servizio Meteorologico dell'ARPA Emilia-Romagna, dai tecnici del CINECA di Casalecchio di Reno, grazie ai quali da anni disponiamo di previsioni meteorologiche progressivamente più affidabili.

Infine un grazie di cuore alla Dott.ssa Francesca Calastrini per il concreto e puntuale aiuto nella revisione finale della presente pubblicazione.

Presentazione

Questo rapporto presenta la metodica di previsione elaborata ed adottata dal 1995 per l'area urbana di Firenze al fine di rispondere alle disposizioni legislative in materia di episodi acuti di inquinamento atmosferico (Decreto del Ministro per l'Ambiente 15 aprile 1994 e successive modificazioni).

Lo sviluppo e la messa a punto dei modelli e delle modalità operative qui illustrate hanno impegnato il personale dell'Unità Operativa di Fisica Ambientale e i consulenti ad essa affidati dall'Amministrazione Provinciale di Firenze, prima, e dall'ARPAT, successivamente, per diversi anni, in pratica fin dalla realizzazione della rete provinciale di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico (1993).

In questo senso la presente pubblicazione intende rappresentare la fase matura di una ricerca scientifica e operativa di notevole rilevanza, non solo rispetto all'impegno che ha costituito per chi vi ha lavorato, ma anche in relazione alle conseguenze gestionali e sociali dell'adozione su base previsionale dei provvedimenti di informazione alla cittadinanza e di limitazione delle emissioni nocive. Il valore del lavoro svolto può forse essere apprezzato se si considera che Firenze risulta l'unica realtà italiana nella quale le gestione degli episodi acuti è affrontata sfruttando le possibilità che le attuali tecniche previsionali mettono a disposizione.

Il lavoro prende le mosse dalle norme di legge in materia di inquinamento atmosferico e dalla realizzazione del relativo sistema di sorveglianza che, a partire dal 1991, hanno costituito per Firenze e per molte altre grandi città italiane uno stimolo rilevante per l'adozione di misure di risanamento via via più efficaci (capitolo 1).

L'attenzione si è incentrata sul biossido di azoto (NO_2), un inquinante secondario tipico dei grandi agglomerati urbani: a Firenze costituisce tuttora un problema per la qualità dell'ambiente e la salute dei cittadini. L' NO_2 presenta inoltre caratteristiche di diffusione sul territorio tali da farlo preferire ad altri quale indicatore complessivo della qualità dell'aria urbana nei mesi invernali, periodo considerato nella ricerca, durante il quale i giorni caratterizzati da condizioni meteorologiche particolarmente avverse sono relativamente frequenti (capitolo 2).

La metodica presentata si basa anzitutto sull'analisi statistica della serie storica dei dati di qualità dell'aria e meteorologici raccolti dalla rete di mo-

nitoraggio dal 1993 al 1996. Per ognuno dei giorni analizzati (454) sono stati individuati numerosi parametri che consentono di descrivere con sufficiente dettaglio le condizioni ambientali che hanno caratterizzato ciascuno di essi. Il confronto tra i dati di qualità dell'aria e quelli meteorologici ha permesso di circoscrivere le situazioni che possono determinare gli episodi acuti, come definiti dalla legge (capitolo 3).

Sulla base dell'analisi condotta, sono stati elaborati una serie di modelli di tipo statistico grazie ai quali è possibile formulare, in termini probabilistici o quantitativi, la previsione sull'andamento delle concentrazioni degli inquinanti nelle 12 ore successive a quella stabilita dalla legge affinché le Autorità locali adottino i provvedimenti preventivi. I modelli si basano su quattro tecniche distinte, due delle quali (CHAID e K-nn) applicate per la prima volta a questo tipo di problematica. I modelli ottenuti sono stati calibrati utilizzando i dati rilevati negli inverni 1993-94 e 1994-95, mentre l'analisi delle loro prestazioni è stata effettuata sui dati dell'inverno 1995-96. Il confronto finale tra i modelli ottenuti con ciascuna tecnica ha consentito di individuare quelli più idonei ad affrontare il problema proposto (capitolo 4).

Utilizzando le informazioni derivanti dall'analisi preliminare dei dati, i modelli statistici individuati, e le previsioni meteorologiche prodotte da diversi Enti (in particolare dall'ARSIA-Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel settore Agricolo-forestale; e dal Servizio Meteorologico dell'Emilia-Romagna, che tramite il CINECA diffonde le previsioni quantitative del modello meteorologico LAMBO), è stata messa a punto la procedura previsionale operativa a Firenze dall'autunno 1995. La sua adozione ha modificato in modo sostanziale la gestione degli episodi acuti da parte delle Autorità locali, in particolare del Comune di Firenze, attualmente fronteggiati con interventi di emergenza mirati, ma drastici, coincidenti con gli eventi negativi previsti (capitolo 5).

Il presente lavoro, che in forma sintetica è stato presentato alla Conferenza Internazionale AIR POLLUTION 96 (Toulouse, 28÷30 agosto 1996), ha l'obiettivo di concludere una fase di ricerca molto impegnativa, sistematizzando la massa di informazioni e gli strumenti messi a punto in questi anni, illustrando tecniche e procedure applicate al problema specifico della qualità dell'aria urbana.

L'approccio scelto è piuttosto tecnico, soprattutto nell'illustrazione dell'analisi dei dati e dei modelli statistici (capitoli 3 e 4). Tuttavia, senza la pretesa di esaurire l'argomento, il lettore viene introdotto anche agli elementi conoscitivi di base relativi alle norme di legge, alle sorgenti inquinanti, alle caratteristiche delle diverse sostanze monitorate, alle proprietà dispersive dell'atmosfera. Una trattazione completa, che potrebbe risultare utile ad altri "gestori" di reti di monitoraggio della qualità dell'aria.

Chiusa questa fase del lavoro, la più difficile se si considera che fino al 1993 i dati necessari erano scarsi o inesistenti, si possono ipotizzare ulteriori sviluppi, quali quelli indicati nel capitolo 5, nonché l'estensione delle tecniche messe a punto per l' NO_2 nel periodo invernale anche all'ozono (O_3) nel periodo estivo.

Molto dipenderà anche dagli obiettivi che l'ARPAT intenderà darsi, dalle effettive problematiche che emergeranno dal territorio, dalle disposizioni legislative che verranno adottate. A questo proposito vale la pena ricordare che in Toscana deve ancora essere completato il sistema di monitoraggio dell'ozono previsto dal Decreto del Ministro dell'Ambiente 16 maggio 1996, e che la Giunta Regionale sta predisponendo una normativa specifica sugli episodi di inquinamento acuto.

Anche grazie al lavoro fin qui svolto riteniamo che sarà possibile rispondere alle eventuali nuove esigenze.

Piero Battini

Responsabile Unità Operativa Fisica Ambientale
Dipartimento ARPAT di Firenze

1 Introduzione

Il presente lavoro ha l'obiettivo di illustrare in maniera analitica alcune tecniche di previsione "short-term" degli episodi acuti di inquinamento atmosferico, basate su metodi di tipo statistico.

Lo sviluppo di queste tecniche da parte dell'Unità Operativa di Fisica Ambientale dell'ARPAT di Firenze è stato reso necessario a partire dal 1992 con l'emanazione delle prime ordinanze del Ministro dell'Ambiente per la gestione degli episodi acuti di inquinamento atmosferico in area urbana, e con la contestuale e progressiva realizzazione della rete di monitoraggio nell'area fiorentina.

La normativa di settore, infatti, ha introdotto la necessità da parte delle Autorità locali di intervenire con provvedimenti di emergenza finalizzati alla riduzione delle emissioni in atmosfera a fronte del superamento di determinate soglie di concentrazione (attenzione/allarme) per alcuni inquinanti (NO_2 , CO , O_3 , SO_2 , PTS). L'applicazione di queste norme e l'esperienza accumulata in questi anni a Firenze, come nelle altre grandi città oggetto dei provvedimenti, ha dimostrato che l'efficacia di questo tipo di interventi dipende anche dalla loro tempestiva adozione rispetto al verificarsi dell'evento negativo. Ciò richiede l'utilizzo operativo e quotidiano di un "sistema di previsione" mirato al problema specifico.

D'altra parte con la realizzazione della prima rete di monitoraggio provvisoria nel 1992, e successivamente di quella attuale (primavera-autunno 1993), anche nell'area fiorentina si è potuto disporre di un complesso organico e accurato di dati di qualità dell'aria e meteorologici che ha consentito di accumulare il patrimonio di informazioni indispensabile per valutare il rispetto degli standard di legge e l'efficacia delle azioni di risanamento, ma anche per meglio comprendere le relazioni esistenti fra le condizioni meteo ed i valori di concentrazione degli inquinanti.

Durante il 1996 può dirsi conclusa una prima fase di messa a punto del

sistema di previsione per l'area fiorentina, che con questo lavoro viene documentato. Infatti durante questo anno si è potuto finalmente rendere operativa una procedura di previsione, di cui sono a questo punto note anche le prestazioni e i margini di errore, con la quale sono stati gestiti gli episodi di inquinamento acuto degli inverni 1995-96 e 1996-97. Si è perciò ritenuto opportuno presentare in modo organico il complesso di informazioni e di metodiche che compongono la procedura utilizzata, e che costituiscono ad oggi un patrimonio di esperienze originale e in larga parte unico nel suo genere.

1. 1 La normativa

Fin dal 1983 nel quadro legislativo italiano^{A,B,C,D} è stato introdotto il concetto di standard di qualità dell'aria per diverse sostanze aerodisperse. Le concentrazioni limite, valide su tutto il territorio nazionale, hanno l'obiettivo di contenere entro valori accettabili l'esposizione dei cittadini nei confronti degli agenti inquinanti e costituiscono la sommatoria dei contributi di tutte le sorgenti presenti in una determinata area.

Da un punto di vista operativo il superamento di questi standard imponeva alle Regioni la predisposizione, entro il 1993, di specifici piani di risanamento. Tuttavia solo la Regione Lombardia a partire dai primi anni '90 ha emanato un piano di risanamento stralcio^E, e quindi il miglioramento della qualità dell'aria è stato affidato più che a un'organica politica di pianificazione degli interventi a livello regionale al miglioramento di alcune tecnologie e di un'ampia gamma di combustibili (soprattutto a seguito dell'emanazione di numerose direttive europee)¹.

Probabilmente anche per questo motivo alla fine del 1992 il Ministro dell'Ambiente emanò una serie di ordinanze specifiche per le principali aree urbane italiane con le quali venivano imposte ai Comuni iniziative urgenti, soprattutto nel caso di avvenuto superamento di particolari soglie di legge per le concentrazioni dei più importanti inquinanti rilevati in area urbana^{F,G,H}. A questi provvedimenti temporanei ha fatto seguito il Decreto del Ministro dell'Ambiente 12/11/92^I, dichiarato illegittimo dalla Corte

1. I provvedimenti più noti sono quelli relativi al contenimento del tenore di piombo nelle benzine e del tenore di zolfo nei gasoli, nonché l'obbligo di omologazione degli autoveicoli equipaggiati con il sistema di abbattimento delle emissioni detto anche "marmitta catalitica".

Costituzionale nel marzo 1994^J, parzialmente sostituito dal Decreto del Ministro dell'Ambiente 15/4/94^K, modificato e integrato dal Decreto del Ministro dell'Ambiente 25/11/94^L e dal Decreto del Ministro dell'Ambiente 16/5/96^M.

Questo complesso di norme definisce gli episodi acuti in relazione agli inquinanti d'interesse e alle relative concentrazioni limite; stabilisce i tempi e le modalità di intervento rispetto all'evento negativo; regola i casi in cui è necessario intervenire con misure di informazione alla popolazione e di limitazione delle emissioni.

La struttura delle reti di monitoraggio in quanto a tipologia di stazioni, dotazione strumentale, caratteristiche tecniche del software e dell'hardware, livello di gestione dei sistemi è disciplinata dal Decreto del Ministro dell'Ambiente 20/5/91 "Criteri per la raccolta dei dati inerenti la qualità dell'aria"^N.

Già questo ultimo decreto imposta l'approccio di intervento nel caso si verifichino episodi acuti (articolo 9). Infatti non solo "la rete di rilevamento dovrà permettere la trasmissione in tempo reale dei dati relativi agli inquinanti sottoposti a procedura di allarme e dei parametri meteorologici al fine di accertare il superamento dei livelli di attenzione e di allarme", ma dovrà anche "essere dotata di un sistema di acquisizione e di elaborazione di dati relativi a specifici parametri chimico-fisici ... legati ai processi di evoluzione temporale dell'inquinamento al fine di individuare potenziali situazioni di emergenza prima che si raggiungano le soglie di attenzione".

Come si può notare quindi la normativa introduce fin dal 1991 la necessità di dotarsi di strumenti idonei per effettuare previsioni specifiche relative all'andamento temporale degli inquinanti proprio in occasione degli episodi acuti. Questa impostazione appare in parte trascurata sia nel D.M. 12/11/92 che nel vigente D.M. 15/4/94. Infatti pur ribadendo la necessità di "valutare la probabile evoluzione dell'inquinamento e stabilire i provvedimenti da adottare" (articolo 4, comma 1, dove a questo scopo viene suggerito di utilizzare i dati rilevati dalla rete di monitoraggio e le previsioni meteorologiche a scala nazionale e locale), il dispositivo del decreto in realtà individua una procedura tassativa di dichiarazione dello stato di attenzione/allarme, e della successiva adozione dei provvedimenti ritenuti necessari, esclusivamente basata sui valori di concentrazione degli inquinanti misurati nelle 24 ore precedenti al termine del ciclo di monito-

raggio (articolo 4). La conseguenza di un'applicazione letterale di questo dispositivo determina la sostanziale inefficacia dei provvedimenti, che di fatto hanno vigore da 36 a 48 ore dopo il manifestarsi dell'evento negativo (in relazione all'ora finale del periodo di monitoraggio individuata dall'Autorità competente, nonché all'inquinante che ha determinato l'attivazione dello stato di attenzione/allarme).

In realtà la lettura coordinata dei due decreti non esclude l'adozione di provvedimenti preventivi, ovvero assunti prima che l'evento negativo si manifesti e sulla base degli strumenti e dei dati previsionali disponibili, ma sembra imporre una valutazione specifica nei casi di manifesto superamento dei limiti di legge, seppur senza alcun automatismo per l'assunzione dei provvedimenti.

Il Decreto del Ministro dell'Ambiente 16/5/96, relativo ai soli episodi di inquinamento da ozono, adotta con maggior chiarezza un'impostazione di intervento preventivo. Infatti l'articolo 5, comma 2 stabilisce che "lo stato di attenzione o di allarme deve essere comunque dichiarato al raggiungimento dei livelli" di legge, ma che ciò è possibile anche "nel caso di raggiungimento di concentrazioni prossime ai livelli di attenzione o di allarme ... in base alla rappresentatività delle stazioni e alla situazione meteorologica". Il decreto nell'Allegato IV indica tra gli elementi conoscitivi da comunicare alle autorità e alla popolazione anche le previsioni circa la probabile evoluzione delle concentrazioni, e riassume gli elementi e i dati meteorologici utili per formulare questo tipo di previsione.

Anche se forse sarebbe necessario rivedere in parte il dispositivo individuato dal D.M. 15/4/94, appare sufficientemente chiara la necessità e la possibilità di intervenire nei confronti degli eventi più critici utilizzando sistemi previsionali. Su questa base il Comune di Firenze con successive Ordinanze del Sindaco (nn° 6679/94, 7644/95 e 53/97) ha progressivamente introdotto una procedura di intervento per gli episodi acuti che consente di assumere i provvedimenti necessari (secondo una graduazione proporzionata alla gravità dell'evento) utilizzando le previsioni diffuse dall'AR-PAT di Firenze sul trend degli inquinanti atmosferici nelle successive 24÷72 ore.

Tali previsioni sono formulate in termini di probabilità di raggiungimento dello stato di attenzione/allarme, come definiti dal D.M. 15/4/94. In Tabella 1.1.I sono riportati i limiti di attenzione e di allarme e le stazio-

ni di misura presso le quali è necessario si verifichi il superamento di detti limiti perché si determini lo stato di attenzione/allarme.

Tabella 1.1.I: livelli di attenzione e di allarme (D.M. 15/4/94 e D.M. 25/11/94).

inquinante	livello di attenzione/allarme	grandezza di riferimento	condizioni per la dichiarazione dello stato di attenzione/allarme
NO ₂	200/400 µg/m ³	media oraria	50% stazioni A e B
CO	15/30 mg/m ³	media oraria	50% stazioni A e C
SO ₂	125/250 µg/m ³	media giornaliera	50% stazioni A, B e C
PTS	150/300 µg/m ³	media giornaliera	50% stazioni A, B e C
O ₃	180/360 µg/m ³	media oraria	una stazione A o D

Le stazioni di monitoraggio sono classificate secondo le seguenti tipologie (D.M. 20/5/91, Allegato 1, punto 1.3):

- stazioni di riferimento, da localizzare in zone non direttamente interessate dalle sorgenti di emissione (parchi urbani o isole pedonali): classe A;
- stazioni da localizzare in zone ad elevata densità abitativa: classe B;
- stazioni da localizzare in zone ad elevata densità di traffico: classe C;
- stazioni da localizzare in periferia o in aree suburbane finalizzate alla misura degli inquinanti fotochimici: classe D.

1. 2 La rete di monitoraggio della qualità dell'aria a Firenze

L'attuale rete di monitoraggio degli inquinanti in atmosfera è stata realizzata nel 1993 dalla Provincia di Firenze nell'ambito di uno dei progetti DISIA finanziati dal Ministero dell'Ambiente. La gestione della rete è stata affidata, tramite una specifica convenzione, al Servizio Multizonale di Prevenzione Ambientale della USL 10/A di Firenze, e successivamente all'ARPAT (1° gennaio 1996)².

La rete attuale soddisfa pienamente i criteri di realizzazione individuati dal D.M. 20/5/91^N e dal Rapporto ISTISAN 89/10^O, e grazie alla continui-

2. All'ARPAT, istituita con la Legge Regionale n° 66/95, sono stati trasferiti il personale e le attrezzature dei SS.MM.PP.AA. delle UU.SS.LL. toscane.

tà del monitoraggio, della gestione tecnica nonché della centralizzazione di tutti i dati in un unico database, consente di ottenere una serie storica progressivamente sempre più ricca in base alla quale effettuare tutte le elaborazioni e i riscontri normativi necessari.

Le stazioni di misura degli inquinanti sono le seguenti³:

- Firenze, Giardino di Boboli: classe A;
- Firenze, Viale Ugo Bassi: classe B;
- Firenze, Via di Novoli: classe B;
- Firenze, Via di Scandicci: classe B;
- Firenze, Viale Antonio Gramsci: classe C;
- Firenze, Viale Fratelli Rosselli: classe C;
- Firenze, Via Ponte alle Mosse: classe C;
- Firenze, Settignano: classe D;
- Scandicci, Piazza Matteotti;
- Prato, Fontanelle;
- Prato, San Paolo;
- Prato, Ferrucci;
- Montelupo, Via Milani;
- Empoli, Via Ridolfi.

La gestione secondo le modalità di “rete di allarme” è attivata attualmente solo su Firenze, dove è funzionante il numero sufficiente di stazioni secondo i parametri richiesti dal D.M. 20/5/91.

Oltre a queste, esistono anche tre stazioni per il monitoraggio meteorologico:

- Firenze, Osservatorio Ximeniano: al centro dell'area urbana (piazza San Lorenzo), su un giardino pensile a 25 m di altezza rispetto al piano stradale;
- Sesto Fiorentino, Borgo Morello: a 325 m s.l.m., sulle pendici meridionali di Monte Morello, prospiciente la piana di Firenze-Prato-Pistoia;
- Empoli, località Riottoli: in aperta campagna, nella piana dell'Arno a ovest di Empoli.

Nella Tabella I è riassunta la dotazione strumentale delle stazioni di misura.

3. Dal 6 maggio 1997, a seguito dell'istituzione della Provincia di Prato, le 3 stazioni pratesi sono interamente gestite dal Dipartimento Provinciale ARPAT di Prato.

Tabella 1.2.I: riepilogo stazioni e strumenti della rete provinciale di Firenze.

stazione	strumenti presenti
FIRENZE BOBOLI	NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10, O ₃
FIRENZE NOVOLI	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO, O ₃
FIRENZE BASSI	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10
FIRENZE Via di SCANDICCI	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO
FIRENZE GRAMSCI	NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10
FIRENZE ROSSELLI	NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10, CH ₄ , NMHC
FIRENZE MOSSE	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10
FIRENZE SETTIGNANO	NO _x , NO, NO ₂ , O ₃
SCANDICCI MATTEOTTI	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10, O ₃
PRATO FONTANELLE	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10, O ₃
PRATO SAN PAOLO	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂
PRATO FERRUCCI	NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10, CH ₄ , NMHC
MONTELUPO MILANI	NO _x , NO, NO ₂ , PM10, O ₃
EMPOLI RIDOLFI	SO ₂ , NO _x , NO, NO ₂ , CO, PM10, CH ₄ , NMHC
FIRENZE XIMENIANO	VV, DV, T, RH, P, PG, RT, RN
SESTO FIORENTINO MORELLO	VV, DV, T, RH, P, PG, RT, RN
EMPOLI RIOTTOLI	VV, DV, T, RH, P, PG, RT, RN
sigle: CO ossido di carbonio, NO ossido di azoto, NO ₂ biossido di azoto, NO _x ossidi di azoto totali (NO _x ≈ NO + NO ₂), O ₃ ozono, SO ₂ biossido di zolfo, PM10 polveri con diametro aerodinamico <10 μm, CH ₄ metano, NMHC idrocarburi totali non metanici, VV velocità del vento, DV direzione del vento, T temperatura, RH umidità relativa, P pressione atmosferica, PG precipitazione, RT radiazione globale, RN radiazione netta.	

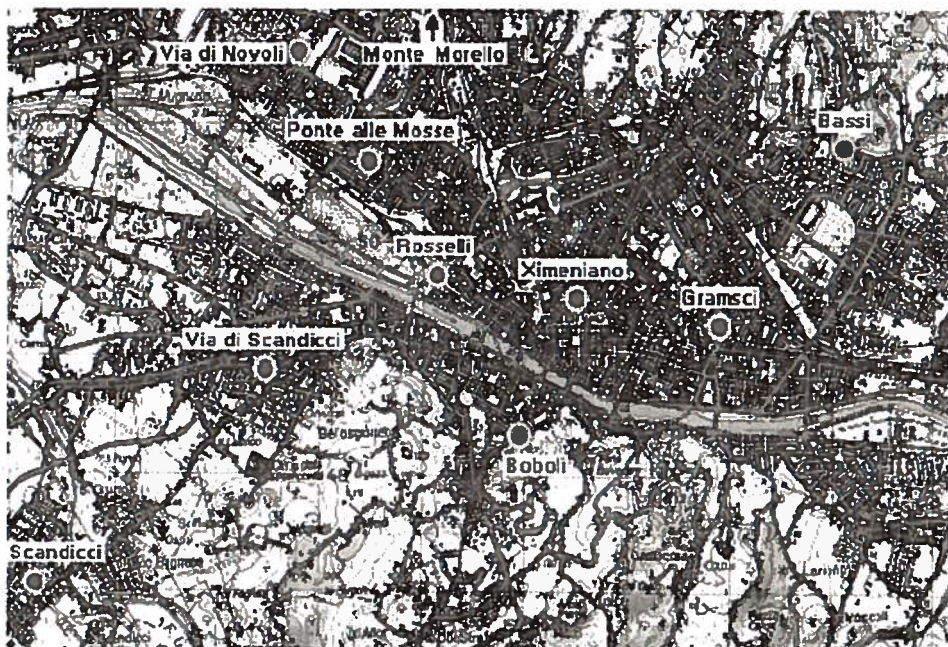


Figura 1.2.1: posizione delle stazioni di monitoraggio della rete della Provincia di Firenze (area urbana di Firenze).

Le stazioni di rilevamento sono dotate di un data-logger locale che interpella ciascuno strumento con alta frequenza (ogni $5 \div 15$ s), calcola i valori significativi su base oraria (tipicamente la media oraria dei valori elementari), gestisce le eventuali calibrazioni, accumula i dati storici sulla RAM, colloquia con il computer del Centro Operativo, al quale è collegato tramite una linea telefonica.

Il Centro Operativo, attualmente ospitato presso il Dipartimento Provinciale ARPAT, è dotato di un computer centrale dal quale è possibile effettuare tutte le operazioni di comunicazione con le stazioni (lettura dei dati, invio delle configurazioni, gestione degli allarmi e delle calibrazioni), e le elaborazioni sui dati storici immagazzinati nel database centrale.

Al Centro Operativo è inoltre collegato sempre tramite linea telefonica un computer satellite presso l'Unità Operativa di Fisica Ambientale del Dipartimento Provinciale ARPAT, dal quale è possibile consultare, estrarre ed elaborare i dati dell'archivio storico.

Presso l'Unità Operativa di Fisica Ambientale vengono in particolare

svolte tutte le attività connesse con la previsione sull'andamento delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici nelle successive 24 ÷ 72 ore.

1.3 Gli episodi acuti e le strategie di intervento e previsione

A Firenze la rete di monitoraggio ha evidenziato nel corso di questi anni superamenti degli standard di qualità dell'aria⁴ relativamente a NO₂, CO e O₃; gli stessi inquinanti hanno dato luogo più volte anche al raggiungimento dello stato di attenzione e a quello di allarme (NO₂ e O₃)^P. Come illustrato al paragrafo 1.1, il superamento degli standard conferma per l'area fiorentina la necessità di predisporre e attuare un concerto di misure strutturali volte al risanamento della qualità dell'aria. Gli inquinanti che superano gli standard suggeriscono interventi soprattutto nel settore delle emissioni da traffico veicolare, da riscaldamento degli edifici e dalle lavorazioni che coinvolgono emissioni di composti organici volatili.

Il ripetersi di numerosi episodi acuti (in inverno dovuti all'NO₂ ed al CO, e d'estate all'O₃) mette in evidenza non solo gli elevati tassi di emissione dovuti all'agglomerato urbano che ormai si estende senza soluzione di continuità da Prato a Pontassieve, ma anche le particolari caratteristiche morfologiche dell'area che possono determinare elevate concentrazioni di inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera. Ciò sostanzialmente è da attribuire al fatto che la piana di Firenze-Prato-Pistoia per la sua conformazione orografica di bacino chiuso e per il clima con caratteri di continentalità tende a favorire episodi di forte stabilità atmosferica, in particolare nel periodo invernale. Questo comporta anche la necessaria predisposizione di un "piano d'intervento operativo" con il quale fronteggiare questi episodi, con l'obiettivo di assumere provvedimenti idonei alla riduzione drastica ancorché temporanea delle emissioni inquinanti.

Nel caso della rete fiorentina di monitoraggio si nota anzitutto che gli stati di attenzione e di allarme per i tre inquinanti in questione sono determinati dal superamento dei rispettivi limiti di legge nelle seguenti stazioni:

- per il CO in almeno due delle quattro stazioni Boboli (A), Gramsci (C), Rosselli (C), Mosse (C);

4. Si tratta dei limiti di legge stabiliti dal D.P.C.M. 28/3/83 e dal D.P.R. n° 203/88: si veda per maggiori dettagli il paragrafo 2.1.

- per l' NO_2 in almeno due delle quattro stazioni Boboli (A), Bassi (B), Via di Scandicci (B), Novoli (B);
- per l' O_3 in almeno una delle due stazioni Boboli (A) o Settignano (D).

La scelta operata dal legislatore relativamente alla tipologia delle stazioni rilevanti per la dichiarazione degli stati di attenzione/allarme appare collegata con le diverse caratteristiche fenomenologiche che le concentrazioni dei tre inquinanti presentano. Il CO è il tipico inquinante emesso direttamente dal traffico veicolare che presenta variazioni molto rapide nel tempo e nello spazio: ciò suggerisce di scegliere le stazioni di misura più prossime alla sorgente emissiva al fine di rilevare le massime concentrazioni. L' NO_2 è invece un inquinante che si forma in atmosfera per reazioni fotochimiche che coinvolgono l'ossido di azoto (NO) e gli idrocarburi (HC); le sue concentrazioni presentano variazioni molto meno accentuate col risultato che si possono osservare valori elevati anche a distanza dalle sorgenti di NO e su di un'area molto vasta. Ciò può quindi suggerire l'opportunità di osservare preferibilmente questa specie chimica nelle stazioni all'interno dell'area urbana ma non direttamente a ridosso delle sorgenti, con l'obiettivo di monitorare l'esposizione della popolazione. Infine per quanto riguarda l'ozono si tratta anche in questo caso di un inquinante che si forma in atmosfera per reazioni fotochimiche, tuttavia la particolare dinamica che ne governa la formazione fa sì che si osservino concentrazioni più elevate non soltanto lontano dalle sorgenti di NO e HC, ma anche in luoghi dove le concentrazioni di NO e NO_2 risultano modeste. Ciò dà luogo a concentrazioni più elevate di O_3 fuori dai centri urbani, negli immediati sobborghi posti sottovento alla città: questo suggerisce di osservare le concentrazioni in stazioni appositamente collocate che la normativa classifica come stazioni di tipo D. Le caratteristiche di formazione e di emissione delle sostanze inquinanti fanno sì che gli episodi acuti provocati da O_3 si verifichino quasi esclusivamente nel periodo estivo, mentre quelli dovuti a CO ed NO_2 si verificano nel periodo invernale. Occorre comunque segnalare che livelli elevati di concentrazione di NO_2 si riscontrano sistematicamente anche in estate nelle stazioni di tipo C, contribuendo così al superamento degli standard di qualità dell'aria.

Nell'area fiorentina l'attenzione si è particolarmente incentrata sull' NO_2 . Infatti:

1. mentre il trend delle concentrazioni di NO_2 dal 1993 non accenna ancora ad una sostanziale riduzione, e gli episodi acuti che si verificano d'inverno continuano a presentarsi numerosi, le concentrazioni di CO e i relativi episodi acuti hanno subito una drastica riduzione;
2. nel caso di episodi acuti da NO_2 (come nel caso del CO) esiste una relazione lineare tra le emissioni e le concentrazioni misurate: ciò rende ragionevoli ed in teoria efficaci interventi di emergenza volti a ridurre rapidamente ed in misura consistente le emissioni. Queste considerazioni non sono invece estendibili al caso di episodi da O_3 a causa delle complesse reazioni fotochimiche che ne governano la formazione e che comportano una relazione non lineare tra emissioni dei precursori e concentrazioni di O_3 ^Q;
3. le concentrazioni di NO_2 , (diversamente da quelle di altre sostanze, segnatamente il CO) durante gli episodi acuti si presentano elevate su tutta l'area urbana. Tale inquinante quindi appare un indicatore significativo del tasso d'inquinamento medio presente nell'area e quindi dell'esposizione di tutta la popolazione.

Negli ultimi anni a Firenze il problema costituito dagli eventi acuti di O_3 si è rivelato assai grave ed ha richiesto l'impiego di strumenti di previsione^R che tuttavia richiedono una calibrazione specifica e distinta rispetto a quelli utilizzati per l' NO_2 oggetto del presente studio.

L'esperienza di questi anni ha mostrato che a Firenze spesso gli episodi acuti da NO_2 hanno durata molto limitata, costituiscono cioè eventi isolati per lo più di un giorno, all'interno del quale le concentrazioni raggiungono valori oltre le soglie di legge limitatamente ad alcune ore nella tarda mattinata e/o nel primo pomeriggio⁵. Più raramente si assiste ad episodi di durata maggiore, nei quali pur essendo sostanzialmente da escludere fenomeni di accumulo fra un giorno e l'altro, il superamento dei livelli di legge si ripete per più ore su più giorni. Sono esattamente questi i casi nei quali ha senso intervenire sulle emissioni nel tentativo di limitare l'esposizione e impedire il raggiungimento di valori pericolosi per la salute della popolazione. In genere la durata di questi episodi è di due-tre giorni, ma talvolta può protrarsi anche su periodi più lunghi⁶.

5. In particolare episodi di questo tipo sono peculiari del periodo primaverile o con caratteristiche meteorologiche primaverili.

6. L'episodio più prolungato è stato osservato dal 3 al 7 dicembre 1996.

Gli interventi di emergenza per gli eventi acuti d'inquinamento che richiedono la limitazione delle emissioni, possono incidere fortemente sulla vita sociale ed economica della città e necessitano di una struttura informativa capillare e rapida. Le Amministrazioni delle città difficilmente dispongono di strumenti adeguati per intervenire con i tempi richiesti; anche per questo motivo, nella maggioranza delle città italiane interessate dal fenomeno si è sempre preferito intervenire o quando i limiti di legge erano già stati superati e quindi di fatto quando l'emergenza era già cessata, oppure con provvedimenti stabili (targhe alterne, limitazioni alla circolazione in giorni prefissati) che evidentemente non coincidono che casualmente con le situazioni di emergenza.

Anche a Firenze nel corso degli anni sono state adottate politiche d'intervento di questo tipo, ma dal 1995 l'Amministrazione comunale ha invece scelto di adottare provvedimenti di emergenza soltanto ed in coincidenza con gli episodi acuti, dotandosi quindi anche di una serie di adeguati strumenti informativi (spesso sperimentali)⁷.

L'esperienza fiorentina, pressoché unica in Italia^{8,S,T,U}, costituisce negli errori, nei ripensamenti, nella sperimentazione e nei risultati ottenuti, un bagaglio di conoscenze e competenze che merita di essere diffuso. Questo studio di carattere eminentemente tecnico-scientifico ha lo scopo di mostrare come sia possibile mettere a punto una serie di strumenti adeguati alla previsione degli eventi acuti, il primo tassello essenziale per poter attuare una gestione tempestiva e preventiva degli episodi di inquinamento atmosferico invernale in ambiente urbano.

7. Oltre alle ovvie e consuete modalità di informazione tramite gli organi di stampa e radiotelevisivi, viene dato specifico avviso alla cittadinanza per mezzo di 10 pannelli a messaggio variabile posizionati sulle vie di accesso alla città; per mezzo del servizio televideo su un'emittente locale; sulle pagine della Rete civica metropolitana (raggiungibile anche all'indirizzo internet <http://www.comune.firenze.it>); con l'attivazione di uno specifico numero verde; con l'accensione cadenzata per 15 minuti dell'illuminazione pubblica nel periodo diurno; con l'accensione di tre fasci luminosi allo xenon dalle colline prospicienti la città nel periodo notturno.

8. Negli anni '80 a Milano e Torino sono state sperimentate ed attuate procedure e sistemi di previsione per l'inquinamento atmosferico da SO₂, fondate su modelli di tipo autoregressivo. Le previsioni venivano quindi diffuse attraverso i mezzi di comunicazione di massa allo scopo di informare la popolazione (si vedano i riferimenti bibliografici S e T; per una rassegna sul problema si veda anche il riferimento U).

Riferimenti bibliografici

- A Restani W. e Mari R., *Tutela dell'ambiente atmosferico*, Il Sole 24 Pirola, Milano, 1995, Capitolo 3.
- B Caponigro R., "Quadro di sviluppo della normativa nazionale e internazionale", in Gallo F. (coord.to scientifico), *Il controllo della qualità dell'aria: reti di monitoraggio, strumenti normativi e tecniche statistiche*, atti del Workshop, Roma 5 ottobre 1994, Annali di Statistica, ISTAT, 1995, 7, 49-58.
- C Desideri C. (a cura di), *L'inquinamento atmosferico e acustico nelle città: dall'emergenza all'intervento ordinario*, Quaderni per la ricerca-Serie Studi/31, Istituto di Studi sulle Regioni-CNR, Roma, 1993.
- D Desideri C. (a cura di), *Qualità dell'aria e automobili: problemi e politiche*, Istituto di Studi sulle Regioni-CNR/A. Giuffrè Editore, Milano, 13, 1996.
- E Delibera della Giunta Regionale 21/2/95, n° 5/64263, "Piano di risanamento dell'aria. Definizione del territorio oggetto del risanamento e primi provvedimenti in attuazione dell'art. 4 del D.P.R. n° 3/88 e dell'art. 3 del D.M. 20/5/91", 4° *Supplemento straordinario al Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia*, 20, 20/5/95.
- F Ordinanza del Ministro dell'Ambiente di concerto con il Ministro per le Aree Urbane 20/11/91, "Misure urgenti per il contenimento dell'inquinamento atmosferico e del rumore nel comune di Firenze", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 77, 28/11/91.
- G Ordinanza del Ministro dell'Ambiente di concerto con il Ministro per le Aree Urbane 28/12/91, "Disposizioni attuative, in tema di prevenzione dell'inquinamento atmosferico e acustico, delle ordinanze 20 novembre 1991 dei Ministri dell'Ambiente e per i Problemi delle Aree Urbane", *Gazzetta Ufficiale*, 1, 2/1/92.
- H Ordinanza del Ministro dell'Ambiente di concerto con il Ministro per le Aree Urbane 30/4/92, "Proroga del termine di scadenza delle ordinanze 20 novembre 1991 recanti misure urgenti per il contenimento dell'inquinamento atmosferico e acustico nei comuni di Bari, Bologna, Catania, Firenze, Genova, Milano, Napoli, Palermo, Roma, Torino e Venezia", *Gazzetta Ufficiale*, 100, 30/4/92.
- I Decreto del Ministro per l'Ambiente di concerto con i Ministri per le Aree Urbane, della Difesa, dei Lavori Pubblici, dei Trasporti, dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato, e della Sanità 12/11/92, "Criteri generali per la prevenzione dell'inquinamento atmosferico nelle grandi zone urbane e disposizioni per il miglioramento della qualità dell'aria", *Gazzetta Ufficiale*, 272, 18/11/92.
- J Sentenza della Corte Costituzionale n° 113 del 23-31 marzo 1994, *Prima serie speciale della Gazzetta Ufficiale*, 16, 13/4/94.
- K Decreto del Ministro per l'Ambiente di concerto con il Ministro della Sanità 15/4/94, "Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane, ai sensi degli articoli 3 e 4 del Decreto del Presidente della Repubblica 24 maggio 1988, n° 203, e dell'articolo 9 del Decreto ministeriale 20 maggio 1991", *Gazzetta Ufficiale*, 107, 10/5/94.
- L Decreto del Ministro per l'Ambiente di concerto con il Ministro della Sanità 25/11/94, "Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti di cui al Decreto ministeriale 15 aprile 1994", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 159, 13/12/94.
- M Decreto del Ministro per l'Ambiente di concerto con il Ministro della Sanità 16/5/96, "Attivazione di un sistema di sorveglianza di inquinamento da ozono", *Gazzetta Ufficiale*, 163, 13/7/96.
- N Decreto del Ministro per l'Ambiente di concerto con il Ministro della Sanità 20/5/91, "Criteri per la raccolta dei dati inerenti la qualità dell'aria", *Gazzetta Ufficiale*, 126, 31/5/91.

- O Gruppo di lavoro ISS "Reti di rilevamento per il controllo della qualità dell'aria", *Progettazione e gestione di una rete di rilevamento per il controllo della qualità dell'aria*, Rapporto ISTI-SAN 89/10, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 1989.
- P Grechi D. e Bruni M., "Area Urbana di Firenze: struttura della rete di monitoraggio e dati riassuntivi sugli inquinanti tradizionali", comunicazione al seminario organizzato dal Comune di Firenze *L'inquinamento atmosferico nell'area fiorentina: dati, effetti, provvedimenti per la città che vogliamo*, Firenze 12 marzo 1996.
- Q Horowitz J.L., *Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning*, MIT Press, Cambridge (USA), 1982, Capitolo 3.
- R Barbaro A., "Previsione inquinamento da ozono nell'area urbana di Firenze", *AER*, 1996, 8, 8-11.
- S Finzi G. e Tebaldi G., "Un sistema di previsione e allarme in tempo reale dell'inquinamento nella città di Milano", *Acqua & Aria*, 1981, 4, 433-436.
- T Bonello G., Collo A. e Finzi G., "Un sistema di previsione e allarme dell'inquinamento da anidride solforosa nella città di Torino", *Inquinamento*, 1986, 1/2.
- U Elsom D., *Smog Alert: managing urban air quality*, Earthscan Publications, London (UK), 1996, Capitolo 5.

2 Inquinamento atmosferico invernale nelle aree urbane

L'individuazione e la messa a punto di una procedura di previsione degli episodi acuti richiede l'applicazione di tecniche di analisi statistica dei dati rilevati, ma ha come requisito fondamentale la conoscenza delle sorgenti emissive nell'area in esame, del comportamento in atmosfera delle sostanze inquinanti e dei processi fisici che ne regolano la dispersione.

Nel seguito vengono perciò sinteticamente illustrate queste conoscenze di base, con particolare attenzione alle caratteristiche dell'area fiorentina.

2. 1 Le sostanze, le sorgenti, la fenomenologia dell'inquinamento urbano

Durante il periodo invernale, le principali fonti di inquinamento atmosferico nelle aree urbane sono gli impianti di riscaldamento degli edifici ed il traffico veicolare. Per alcune città assume rilevanza anche il contributo delle emissioni di origine industriale, in particolare dove siano presenti impianti di grosse dimensioni all'interno o nelle zone adiacenti all'area urbana. Nel caso di Firenze e di realtà consimili quest'ultima categoria di sorgenti può essere trascurata in prima istanza per quanto riguarda gli inquinanti oggetto del presente studio: infatti il tessuto produttivo dell'area fiorentina è caratterizzato da aziende di piccola e media dimensione estremamente diffuse sul territorio, mentre sono assenti o si sono progressivamente spostate lontano dal centro del capoluogo industrie di grandi dimensioni con lavorazioni pesanti (Pignone, Officine Galileo, FIAT).

Gli impianti di riscaldamento ed il traffico veicolare influiscono con diverse modalità sulle concentrazioni dei vari inquinanti presenti nell'aria, sia per la composizione chimica dei fumi emessi, sia per l'andamento nel tempo delle emissioni, sia per le quote di rilascio degli effluenti.

Le emissioni da traffico veicolare^{A,B,C,D,E} avvengono in pratica al livello del suolo e sono particolarmente intense nei periodi di maggior congestionamento, ovvero nei periodi 7:30÷9:00 e 17:30÷20:00, in coincidenza con i flussi pendolari in ingresso e uscita dalla città¹. I fumi emessi sono caratterizzati da una grande quantità di sostanze: ossidi di azoto ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$); biossido di zolfo (SO_2), dovuto alla presenza dello zolfo nel combustibile; ossido di carbonio (CO), particolato, benzene, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), ecc., derivanti dall'imperfetta combustione degli idrocarburi contenuti nella benzina e nel gasolio. Le emissioni di CO e di benzene sono più rilevanti nel caso di veicoli alimentati a benzina (anche se quelli dotati di catalizzatore presentano emissioni ridotte anche fino al 90% rispetto ai non catalizzati), mentre quelle di SO_2 sono più rilevanti nel caso di veicoli alimentati a gasolio (motori diesel).

Le emissioni dagli impianti di riscaldamento degli edifici^{F,G} avvengono a quote maggiori (oltre 10 m, a seconda dell'altezza del camino di convogliamento dei fumi), e si verificano in coincidenza con i periodi di accensione degli impianti, tipicamente nei periodi 6:00÷9:00 e 19:00÷22:00 (anche se la diffusione degli impianti singoli in luogo di quelli centralizzati ha contribuito a dilatare il periodo di accensione). La qualità delle emissioni varia a seconda del tipo di alimentazione: le sostanze emesse dagli impianti a gasolio sono analoghe a quelle emesse dai veicoli a trazione diesel, mentre dagli impianti a metano si hanno emissioni inquinanti costituite in assoluta prevalenza da ossidi di azoto.

L'atmosfera urbana è quindi inquinata da una miscela complessa, i cui singoli componenti presentano andamenti caratteristici delle concentrazioni in relazione alla distanza dalle sorgenti del punto di misura, al momento della giornata, alla reattività o meno della sostanza monitorata (ovvero alla capacità della stessa di partecipare a reazioni chimiche e/o fotochimiche che modificano la composizione della miscela). A ciò devono aggiungersi le condizioni meteorologiche, che influenzano in modo determinante le

1. Le emissioni veicolari sono sensibili ad un gran numero di variabili tra cui la temperatura del motore e quella dell'aria esterna, nonché le condizioni di guida ovvero la velocità di scorrimento del veicolo: è noto che in generale le emissioni di CO e idrocarburi sono maggiori a bassa velocità, mentre quelle di NO_x risultano maggiori a velocità più sostenuta (si vedano in particolare i riferimenti bibliografici B ed E).

concentrazioni misurate, provocando variazioni sui valori orari che possono essere comprese tra un fattore 10 e un fattore 100.

Per quanto riguarda l'area fiorentina il quadro emissivo sommariamente descritto si riflette nelle misure di concentrazione dei principali inquinanti aerodispersi. I risultati principali del monitoraggio condotto dal 1993, anno di realizzazione della rete provinciale^H, si possono così sintetizzare:

- biossido di zolfo (SO_2) - grazie alla larga metanizzazione degli impianti termici ed alla modesta presenza di quelli industriali le concentrazioni di questo inquinante rispettano da molti anni gli standard di qualità dell'aria^I. In particolare la mediana annuale assume valori intorno ai $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, essendo il valore limite pari a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$; da notare anche che il valore medio giornaliero più elevato è risultato $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (registrato nella stazione di Mosse il 7 e il 17 febbraio 1995) essendo la soglia di attenzione pari a $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- polveri (PM_{10}) - la rete di monitoraggio è in grado di rilevare la frazione respirabile delle polveri ovvero quella caratterizzata da un diametro aerodinamico inferiore a $10 \mu\text{m}$. Tale parametro è quello che ha maggiore rilevanza sanitaria in quanto questa porzione delle polveri è quella che può raggiungere le vie respiratorie più profonde. Solo recentemente la normativa italiana si è adeguata a tale impostazione introducendo per il PM_{10} un "obiettivo di qualità" di $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come media mobile annuale delle concentrazioni giornaliere^{2,J}. La normativa precedente, compresa quella relativa agli episodi d'inquinamento acuto, stabilisce limiti alle concentrazioni delle polveri genericamente intese (PTS) senza alcuna precisa indicazione relativa alla granulometria. Con queste precisazioni si deve notare che a Firenze le concentrazioni medie annuali del PM_{10} sono risultate comprese tra i 30 ed i $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a seconda della tipologia di stazione nella quale viene effettuata la misura, rispettando così l'attuale obiettivo di qualità;
- biossido di azoto (NO_2) - si tratta di un inquinante che deriva dall'ossidazione dell' NO (ossido di azoto) sostanza generata nel corso di tutte le combustioni a temperature relativamente alte. Per questo motivo l' NO_2 è presente nelle aree fortemente urbanizzate e caratterizzate da elevati flussi di traffico. A Firenze questo inquinante costituisce il principale problema dando luogo da un lato ai più numerosi episodi acuti d'inqui-

2. Questo valore ha validità fino al 31/12/98: dall'1/1/99 l'obiettivo è ridotto a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

namento invernale e dall'altro al superamento dello standard di qualità dell'aria^{3,K} in alcune delle stazioni (di tipo C) della rete di monitoraggio. In particolare il 98° percentile annuo delle concentrazioni orarie nelle stazioni di Mosse e di Rosselli è risultato rispettivamente pari a 215 e 236 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per l'anno 1994, e pari a 211 e 205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per l'anno 1995; nell'anno 1996 il superamento dello standard si è verificato soltanto nella stazione di Rosselli con 205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. I dati complessivi relativi a quest'ultimo anno (1996-97), tenuto conto degli aspetti meteorologici, sembrano indicare una tendenza verso una lieve diminuzione delle concentrazioni di NO_2 ;

- ossido di carbonio (CO) - si tratta di un inquinante emesso per oltre il 90% dal traffico veicolare ed in particolare dai veicoli con alimentazione a benzina. Le concentrazioni più elevate si osservano nelle zone a ridosso degli assi viari. Per quanto riguarda Firenze si sono osservati superamenti degli standard di qualità dell'aria^{4,I} e delle soglie di attenzione nelle stazioni di tipo C, anche se nel corso degli anni è emersa con chiarezza una tendenza alla diminuzione delle concentrazioni. Per esempio nella stazione Rosselli la frequenza di superamento della concentrazione limite sulle 8 ore si è più che dimezzata, passando dal 10.5% del 1993 al 3.9% del 1996;
- ozono (O_3) - si tratta di un inquinante che si forma in atmosfera a seguito di reazioni fotochimiche che coinvolgono quali inquinanti precursori gli ossidi di azoto e gli idrocarburi, questi ultimi emessi in misura preponderante dal traffico veicolare. La complessa dinamica che porta alla formazione di ozono richiede l'intervento di un forte irraggiamento solare ed è favorita da elevate temperature. Per questi motivi si tratta di un inquinante presente limitatamente al periodo estivo nei dintorni delle aree urbane con notevoli volumi di traffico. A Firenze dal 1993 al 1996 si sono osservati numerosi superamenti dello standard di qualità dell'aria^{5,I} in particolare nelle stazioni A e D.

3. Per l' NO_2 la normativa fissa in 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ il valore limite di concentrazione riferito al 98° percentile annuo delle concentrazioni medie orarie.

4. Per il CO esistono due diversi standard di qualità dell'aria: il primo riferito alla concentrazione media oraria è pari a 40 mg/m^3 , il secondo riferito alla concentrazione media su 8 ore è pari a 10 mg/m^3 .

5. La concentrazione limite di 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ non deve essere superata per più di un'ora nell'arco di un mese.

Il quadro sinteticamente esposto evidenzia quali sono le principali problematiche relative all'inquinamento atmosferico nell'area fiorentina, e spiega anche in larga misura le ragioni per cui le azioni di rimedio si sono per lo più indirizzate al contenimento delle emissioni da traffico e di quelle dovute al riscaldamento degli edifici. Anche l'attività preventiva e di controllo da parte degli enti preposti si è concentrata sugli inquinanti presenti in concentrazioni più elevate. In particolare, come già illustrato nel paragrafo 1.3, essendo gli episodi acuti invernali determinati dal CO e soprattutto dall' NO_2 , lo studio delle tecniche di previsione più efficaci è stato effettuato per quest'ultimo inquinante.

I valori di concentrazione degli inquinanti sono legati all'insieme combinato di numerosi fattori, quali la distanza del punto di misura dalle sorgenti, le variazioni temporali delle emissioni e delle condizioni meteorologiche che determinano la capacità dispersiva dell'atmosfera. In generale ciò produce un andamento tipico delle concentrazioni dei diversi inquinanti nel corso del giorno e nell'arco dell'anno^L.

Per quanto riguarda l'ossido di carbonio in Figura 2.1.1 e 2.1.2 vengono messi a confronto i giorni medi rilevati nelle stazioni di Bassi (tipo B) e Rosselli (tipo C), rispettivamente nel gennaio 1996 e nel marzo 1995.

Come si può notare l'andamento tipico presenta due picchi di concentrazione, uno mattutino tra le 8 e le 10, l'altro serale tra le 18 e le 20, sostanzialmente coincidenti con le punte massime del traffico veicolare (si veda anche la Figura 3.1.2). Questo andamento è evidente in entrambe le stazioni, anche se risulta ovviamente più accentuato presso la stazione Rosselli in quanto posizionata in mezzo a due corsie di scorrimento con elevati flussi di traffico. Si può notare tuttavia la netta riduzione nei valori assoluti delle concentrazioni rilevate nella stazione Bassi passando dal mese di gennaio a quello di marzo, comportamento comprensibile se si tiene conto della maggiore instabilità e turbolenza che mediamente caratterizza i mesi tardo-invernali e tardo-autunnali (marzo e novembre), rispetto a quelli più tipicamente invernali (dicembre, gennaio e febbraio). Questo andamento con "doppio picco" tipico degli inquinanti primari originati dal traffico veicolare (CO, NO e HC), viene enfatizzato dalle condizioni meteorologiche che tipicamente risultano più instabili nel periodo centrale della giornata favorendo così un decremento delle concentrazioni. D'altra parte i massimi di emissione si verificano durante periodi della giornata caratterizzati da maggiore stabilità ovvero poco dopo l'alba e poco dopo il tramonto.

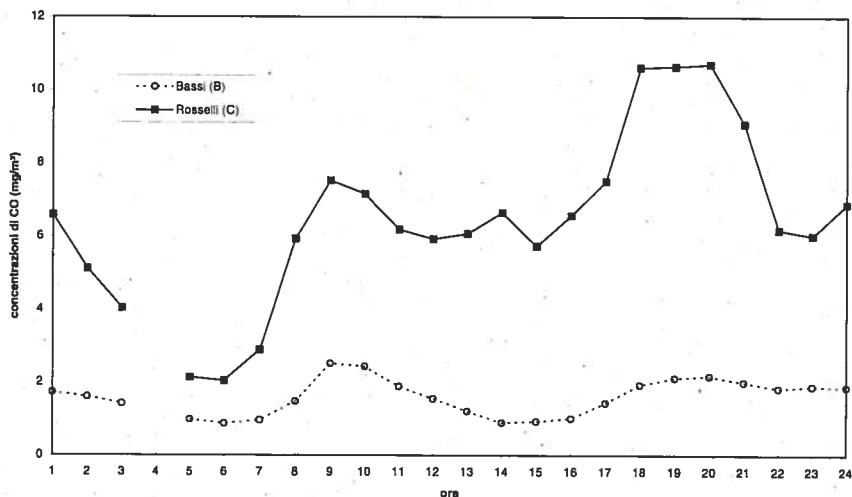


Figura 2.1.1: giorno medio delle concentrazioni di CO rilevate nelle stazioni di Bassi (B) e Rosselli (C) nel mese di gennaio 1996; il dato mancante alle ore 4 è dovuto alla quotidiana calibrazione automatica del sensore.

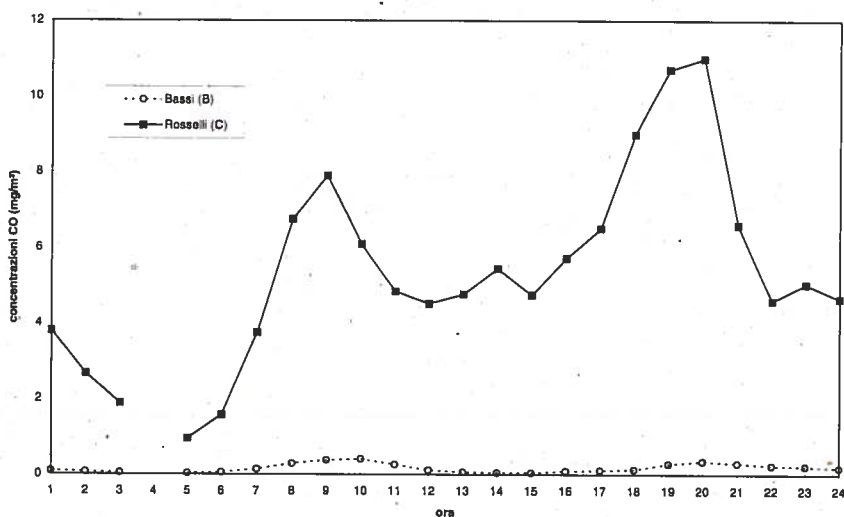


Figura 2.1.2: giorno medio delle concentrazioni di CO rilevate nelle stazioni di Bassi (B) e Rosselli (C) nel mese di marzo 1995; il dato mancante alle ore 4 è dovuto alla quotidiana calibrazione automatica del sensore

Per quanto riguarda il biossido di azoto in Figura 2.1.3 e 2.1.4 vengono messi a confronto i giorni medi rilevati nelle stesse stazioni, rispettivamente nel gennaio 1996 e nel marzo 1995.

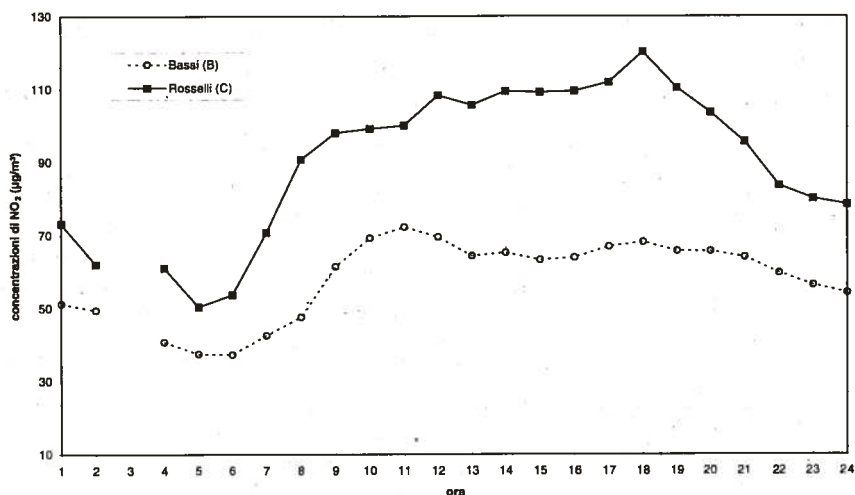


Figura 2.1.3: giorno medio delle concentrazioni di NO_2 rilevate nelle stazioni di Bassi (B) e Rosselli (C) nel mese di gennaio 1996; il dato mancante alle ore 3 è dovuto alla quotidiana calibrazione automatica del sensore.

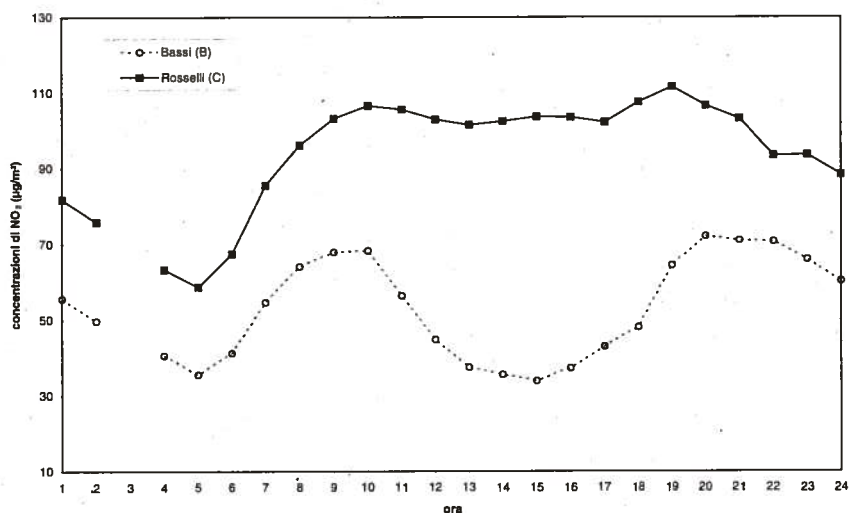


Figura 2.1.4: giorno medio delle concentrazioni di NO_2 rilevate nelle stazioni di Bassi (B) e Rosselli (C) nel mese di marzo 1995; il dato mancante alle ore 3 è dovuto alla quotidiana calibrazione automatica del sensore.

Come si può notare l'andamento orario di questo inquinante secondario differisce in maniera sostanziale da quello dell'ossido di carbonio e varia significativamente passando da gennaio a marzo. In pieno inverno vi è un

andamento che presenta generalmente un solo massimo per lo più collocato nella fascia pomeridiana; a marzo (come a novembre) invece anche l'andamento dell' NO_2 presenta in genere due massimi, uno mattutino ed uno serale, evidenti soprattutto nella stazione di tipo B. Ciò si può spiegare tenendo conto di quanto già illustrato per gli inquinanti primari, precursori dell' NO_2 , e delle variazioni stagionali dell'irraggiamento solare. Tale fattore da un lato è necessario per l'innescò delle reazioni fotochimiche che producono questo inquinante, dall'altro favorisce il riscaldamento della superficie terrestre e dei bassi strati dell'atmosfera con il conseguente sviluppo di moti convettivi e quindi di una maggiore turbolenza. Mentre a gennaio il periodo diurno risulta mediamente troppo breve perché questa turbolenza determini una dispersione efficace dell' NO_2 , a marzo tale effetto è ovviamente molto maggiore e dà luogo quindi al decremento delle concentrazioni nelle ore centrali della giornata evidenziato in Figura 2.1.4.

Da notare anche come i valori di concentrazione di NO_2 nelle due stazioni risultino dello stesso ordine di grandezza (il rapporto tra i corrispondenti dati medi orari delle due stazioni è compreso tra 1 e 3), mentre nel caso del CO le concentrazioni rilevate nella stazione di tipo C sono sempre nettamente superiori a quelle misurate nelle stazioni di tipo B con rapporti che tendono ad aumentare nel mese di marzo (variando tra 2 e 7 a gennaio, e tra 14 e 112 a marzo).

Le concentrazioni di NO_2 durante gli episodi di inquinamento acuto assumono un andamento particolare, in cui risulta enfatizzato l'unico massimo giornaliero. In Figura 2.1.5 viene mostrato a titolo di esempio il comportamento delle concentrazioni di NO_2 ed NO misurate nella stazione Bassi il 18 gennaio 1996, giorno nel quale si è verificato lo stato di attenzione ai sensi del D.M. 15/4/94 con superamenti della relativa soglia in tutte le stazioni dell'area urbana di Firenze⁶.

Nella Figura 2.1.5 si nota la tipica forma a "doppio picco" delle concentrazioni di NO; al primo di questi, relativo al massimo delle emissioni del mattino, segue quello di NO_2 con un ritardo (tipicamente tra due e cinque ore) legato al tempo necessario affinché abbia efficacia l'azione del-

6. Il 18 gennaio 1996 si è osservato il superamento della soglia di attenzione per l' NO_2 nella stazione di tipo A, nelle tre di tipo B e nelle tre di tipo C, mentre nella stazione suburbana di tipo D il valore massimo è risultato pari a $172 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La durata dell'episodio è stata limitata a due ore, tuttavia questo risulta significativo proprio per l'estensione spaziale del fenomeno.

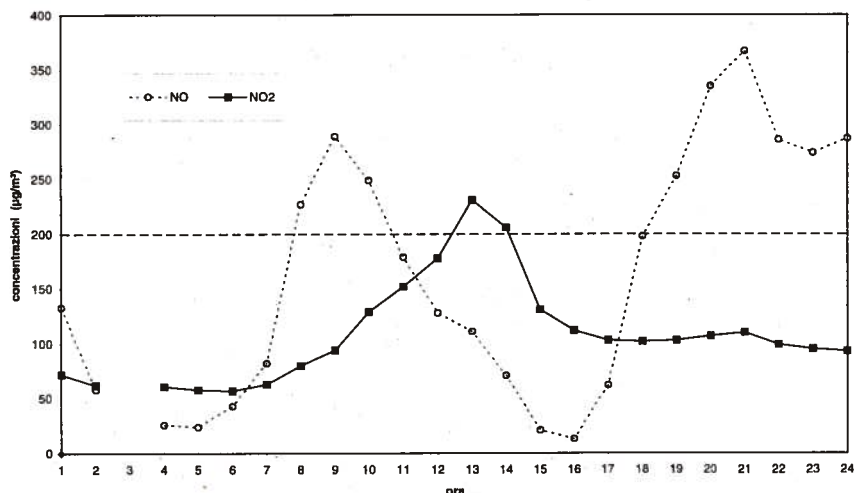


Figura 2.1.5: concentrazioni di NO₂ ed NO rilevate nella stazione di Bassi (B) il 18/1/96. Il dato mancante alle ore 3 è dovuto alla quotidiana calibrazione automatica del sensore; la linea orizzontale tratteggiata indica il livello di attenzione per l'NO₂.

l'irraggiamento solare. Al secondo massimo serale di NO non corrisponde evidentemente analogo picco di NO₂. Naturalmente l'entità della concentrazione massima di NO₂ ed il superamento o meno del livello di attenzione dipende dal protrarsi nel corso del periodo diurno di condizioni di accentuata stabilità dei bassi strati dell'atmosfera.

Il protrarsi di queste condizioni è possibile con maggiore facilità nei mesi tipicamente invernali, in quanto in questo periodo la durata dell'irraggiamento solare è ridotta e quindi risulta sfavorito l'innesco dei moti convettivi turbolenti. Gli episodi invernali possono avere in genere durata e persistenza di alcuni giorni mentre quelli che si verificano nei mesi di marzo e novembre sono in genere caratterizzati da superamenti episodici delle soglie di legge, e limitati a poche ore e poche stazioni. La probabilità di accadimento, la durata e l'estensione degli episodi di inquinamento acuto dipendono strettamente da questi fattori come verrà mostrato nei capitoli successivi.

2. 2 Lo strato limite atmosferico e le condizioni meteorologiche rilevanti agli effetti dell'inquinamento atmosferico urbano

La maggior parte dei fenomeni che interessano l'inquinamento atmosferico si verifica nella porzione inferiore dell'atmosfera chiamata "strato limite atmosferico" o PBL (planetary boundary layer), definito come la regione nella quale l'atmosfera è influenzata dagli effetti superficiali mediante gli scambi di energia meccanica, di calore e di umidità⁷. All'interno del PBL la dispersione degli inquinanti dipende fortemente dalle variazioni temporali delle caratteristiche atmosferiche ed in particolare dai fenomeni di turbolenza, assai ridotti negli strati superiori. Tra i principali fattori meteorologici che influenzano i fenomeni di inquinamento atmosferico all'interno del PBL vi sono^{M,N,O,P,Q,R}:

- la componente orizzontale del vento, che è generata dal gradiente di pressione e modificata dal contributo delle forze di attrito con la superficie nonché dagli effetti dei venti locali, quali le brezze di mare, le brezze di monte e di valle, la circolazione fra zone rurali e zona urbana;
- la stabilità atmosferica, ovvero lo stato turbolento dell'atmosfera;
- l'andamento della temperatura con la quota, ed in particolare l'eventuale presenza e l'intensità dell'inversione termica;
- i moti verticali dovuti ai sistemi di alta o bassa pressione e agli effetti dell'orografia.

Il complesso di questi fattori, mutuamente correlati, determina la capacità dispersiva del PBL ed è quindi a partire dalla loro analisi che è possibile acquisire gli elementi utili per comprendere e predire il comportamento degli inquinanti atmosferici. L'analisi di questi fenomeni è in genere condotta suddividendoli in tre categorie in base alla scala dei processi meteorologici:

1. macroscale: si tratta di fenomeni che si verificano su scale dell'ordine delle migliaia di chilometri, come le aree di alta e bassa pressione che sono localizzate sugli oceani ed i continenti. Questa scala è comunemente indicata con il termine "sinottico";
2. mesoscale: si riferisce ai fenomeni che si verificano su scale dell'ordine delle centinaia di chilometri, come le brezze di mare e il movimento giornaliero dei fronti perturbati;

7. L'altezza del PBL varia nel tempo e nello spazio, e può oscillare da alcune centinaia di metri fino a 1 o al massimo 2 km.

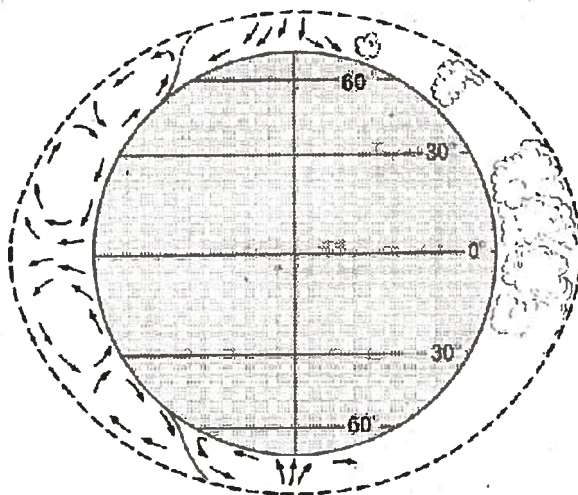


Figura 2.2.1: rappresentazione schematica della circolazione generale nell'atmosfera. Sono indicate le celle convettive che determinano la formazione delle aree di alta e bassa pressione e il relativo movimento delle masse d'aria (da: Pinna M., *L'atmosfera e il clima*, UTET, Torino, 1978).

3. microscala o scala locale: si tratta dei fenomeni che si verificano su scale dell'ordine del chilometro, come la perturbazioni al moto delle masse d'aria prodotte dalla presenza di un edificio.

Il bilancio tra l'energia incidente sulla terra e quella radiante emessa è complessivamente in equilibrio: tuttavia ciò non vale in ogni punto della superficie. La quantità di energia assorbita da un dato punto della superficie dipende dalle sue caratteristiche fisiche, dal grado di copertura nuvolosa e dalla sua latitudine. Questo produce una distribuzione disomogenea dell'energia assorbita che dà luogo a movimenti su larga scala delle masse d'aria. In particolare il principale fattore che regola la circolazione generale dell'atmosfera è la tendenza al trasporto di energia dai tropici verso le regioni polari, che si manifesta con un innalzamento dell'aria calda tropicale e relativa diminuzione della pressione al suolo, un abbassamento dell'aria fredda polare e relativo aumento della pressione al suolo, con i conseguenti flussi verso i poli e verso l'equatore che completano la circolazione (Figura 2.2.1).

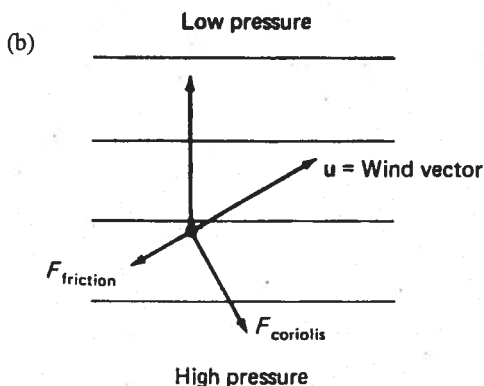
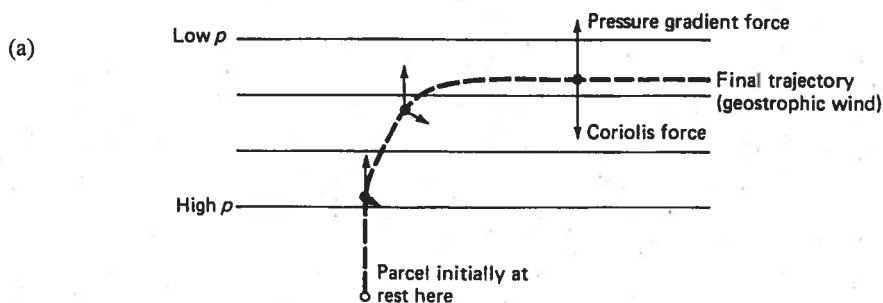


Figura 2.2.2: in (a) è illustrata la formazione del vento geostrofico come risultante dell'equilibrio tra la forza dovuta al gradiente di pressione e la forza di Coriolis; in (b) è illustrata la formazione del vento al suolo con l'ulteriore intervento delle forze di attrito (da: Seinfeld J.H., *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, New York, 1986).

Questo schema è complicato dal formarsi di più celle convettive di questo tipo e dalla rotazione della terra attorno al proprio asse a causa della quale sulle masse d'aria in movimento agisce la forza di Coriolis⁸. Vengono quindi a crearsi vaste zone a diversa pressione atmosferica (alte pressioni o zone anticicloniche e basse pressioni o cicloniche) nelle quali la circolazione delle masse d'aria prodotta dal gradiente di pressione e dalla forza di Coriolis (vento geostrofico) assume tipici andamenti rotatori⁹ (Figura 2.2.3). L'intensità del vento geostrofico è proporzionale al gradiente di pressione che l'origina (Figura 2.2.2). In presenza di forte gradiente il vento al suolo si orienta pressoché nella stessa direzione di quello geostrofico, in presenza invece di pressione livellata il vento al suolo è determi-

8. L'effetto della forza di Coriolis è tale che ad un osservatore sulla superficie terrestre nell'emisfero boreale una massa d'aria in movimento verso sud appare deviata verso ovest. Questo effetto è mitigato nei bassi strati dell'atmosfera dall'azione delle forze di attrito (Figura 2.2.2).

9. Nell'emisfero boreale il vento geostrofico (che si instaura quando si raggiunge l'equilibrio fra la forza dovuta al gradiente di pressione e quella di Coriolis) ruota in senso orario attorno ai centri di alta pressione ed in senso antiorario attorno a quelli ciclonici. In realtà, a causa dell'attrito, con l'avvicinarsi alla superficie terrestre si osserva una deviazione della direzione del vento verso l'esterno o l'interno rispettivamente nella zona anticiclonica o in quella ciclonica.

nato prevalentemente dai fattori di mesoscala che sono legati all'orografia ed ai fenomeni termici locali. Tra questi assumono particolare interesse le brezze di monte e di valle, cioè i movimenti alternati di aria dalla valle verso i rilievi di giorno e viceversa durante la notte, dovuti al riscaldamento delle pendici nelle ore diurne e al loro raffreddamento dopo il tramonto.

Anche la presenza di un'area urbana modifica il campo di pressione e quello termico e introduce una maggiore rugosità della superficie: ciò provoca cambiamenti sostanziali nel campo dei venti ed un aumento della turbolenza dei bassi strati^{10,S}.

All'interno del PBL il fenomeno della turbolenza è uno dei più rilevanti in relazione alla diffusione e dispersione delle sostanze inquinanti. La turbolenza è una caratteristica tipica dei fluidi costituita dai moti caotici e irregolari delle particelle del fluido. La turbolenza atmosferica può essere di natura meccanica, legata alla rugosità della superficie su cui scorre il fluido e alle fluttuazioni e variazioni di intensità e direzione del moto nel fluido stesso; oppure di natura termica, legata cioè ai moti indotti dal gradiente verticale della temperatura.

Tabella 2.2.I: categorie di stabilità secondo la parametrizzazione di Pasquill^{T,U}

radiazione (W/m ²) RT globale / RN netta		velocità orizzontale del vento, V (m/s)					
		V < 2	2 ≤ V < 3	3 ≤ V < 4	4 ≤ V < 5	5 ≤ V < 6	V ≥ 6
G I O R N O	RT ≥ 700	A	A	B	B	C	C
	540 ≤ RT < 700	A	B	B	B	C	C
	400 ≤ RT < 540	B	B	B	C	C	D
	270 ≤ RT < 400	B	B	C	C	C	D
	140 ≤ RT < 270	C	C	C	D	D	D
	RT < 140	D	D	D	D	D	D
N O T T E	RN ≥ -20	D	D	D	D	D	D
	-40 ≤ RN < -20	F	E	D	D	D	D
	RN < -40	F	F	E	E	D	D

10. Il principale effetto di un'area urbana è costituito dall'instaurarsi della cosiddetta "isola di calore", ovvero dall'innalzamento complessivo della temperatura rispetto alle zone rurali circostanti, provocato dalle diverse caratteristiche termiche dell'ambiente urbanizzato rispetto alla superficie rurale e dall'input energetico dovuto alle attività umane (trasporti, industrie, climatizzazione, ...): si veda anche il riferimento bibliografico S.

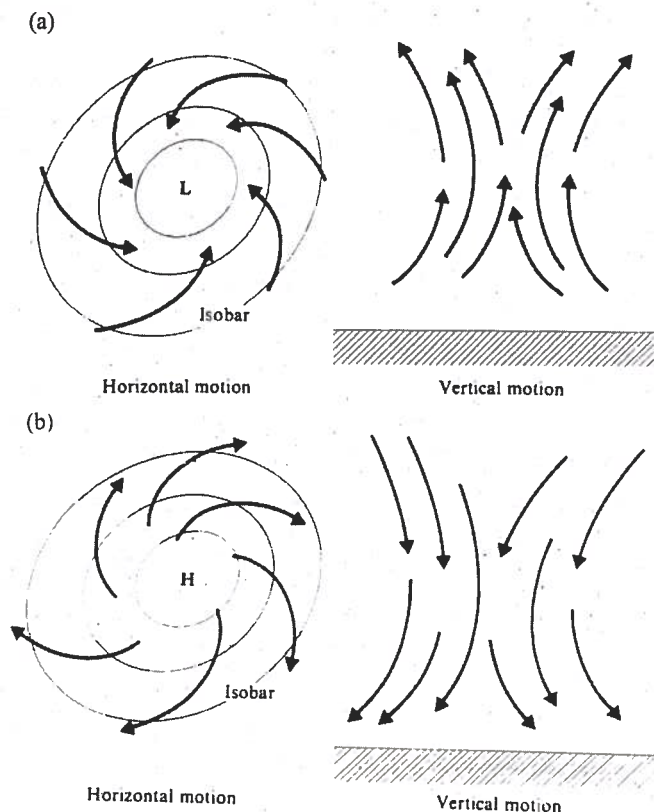


Figura 2.2.3: in (a) è illustrata la rotazione antioraria dei venti al suolo, che convergono verso il centro di un'area di bassa pressione, nonché il corrispondente moto verticale verso l'alto delle masse d'aria. In (b) è illustrata la rotazione oraria dei venti al suolo, che divergono dal centro di un'area di alta pressione, nonché il corrispondente moto verticale verso il suolo delle masse d'aria. Queste sono le configurazioni relative all'emisfero boreale (da: Williamson S.J., *Foundamentals of Air Pollution*, Addison-Wesley, Reading, 1973).

La presenza di elevata turbolenza indica l'esistenza di notevole rimescolamento degli strati atmosferici superficiali ed è quindi associata a condizioni di instabilità. Viceversa si parla di stabilità atmosferica quando i moti turbolenti sono ridotti. La stabilità atmosferica può essere caratterizzata in diversi modi che tendono a quantificare il fenomeno della turbolenza attraverso grandezze fisiche misurabili al suolo in modo da valutare i contributi di origine meccanica e termica¹¹. Quello tradizionalmente più utilizzato è lo schema proposto da Pasquill (Tabella 2.2.I) che individua sei categorie, dalla A (forte instabilità) alla F (stabilità), utilizzando la velocità della componente orizzontale del vento, la radiazione globale (nel periodo diurno) e la radiazione netta (nel periodo notturno).

11. Fra questi si ricordano lo schema proposto da Turner, il numero di Richardson e la lunghezza di Monin-Obukhov.

Uno dei parametri direttamente connessi con il fenomeno della turbolenza atmosferica è la cosiddetta "altezza di rimescolamento" con la quale si intende proprio delimitare lo strato al di sopra del suolo nel quale sono presenti i moti turbolenti che producono una continua mescolamento dell'aria e quindi delle sostanze inquinanti in esso presenti. Questo strato è delimitato da uno strato di inversione termica (vedi oltre) in cui i moti turbolenti verticali risultano assai ridotti.

L'andamento della temperatura con la quota è di grande rilevanza nei fenomeni di inquinamento atmosferico non solo perché influenza la turbolenza dei bassi strati dell'atmosfera, ma anche perché in particolari situazioni può determinare il ristagno delle sostanze nocive vicino al suolo che quindi possono raggiungere elevate concentrazioni. Normalmente la temperatura nel PBL diminuisce all'aumentare dell'altezza di $6.4\text{ }^{\circ}\text{C/km}$: in queste condizioni, o con gradiente ancora maggiore, si ha un buon rimescolamento in quanto i moti verticali non vengono ostacolati. Tuttavia si osservano situazioni nelle quali tale gradiente tende invece a diminuire e può risultare anche positivo: in quest'ultimo caso la temperatura aumenta con la quota fino ad una certa altezza, sotto la quale sono ostacolati i moti dal basso verso l'alto; oltre tale quota la temperatura riprende un andamento decrescente. Questo tipo di situazioni viene definito di "inversione termica" (Figura 2.2.4).

Il fenomeno dell'inversione termica in inverno può risultare accentuato (con differenze di temperatura fino a $4\div 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tra la collina e il fondo valle) e protrarsi anche nel periodo diurno: quando ciò si verifica le sostanze inquinanti emesse nei bassi strati rimangono "intrappolate" sotto la quota dell'inversione termica, dando luogo così a concentrazioni elevate.

Il profilo del gradiente di temperatura subisce nel corso del giorno e della notte una serie di variazioni legate ai vari fenomeni fisici che si manifestano. In Figura 2.2.5 (a) sono rappresentati i diversi tipici andamenti della temperatura con la quota al variare delle ore di un giorno invernale con cielo sereno, in ambiente rurale: durante la notte il rapido raffreddamento radiativo del suolo provoca l'instaurarsi di un'inversione termica (con base al suolo) che viene invece prima ridotta ed infine distrutta dal rapido riscaldamento della terra dopo l'alba; al tramonto il processo si ripete in seguito al nuovo raffreddamento del suolo.

In ambiente urbano (Figura 2.2.5 (b)) i profili di temperatura vengono modificati dalla presenza dell'isola di calore per la quale l'inversione tende

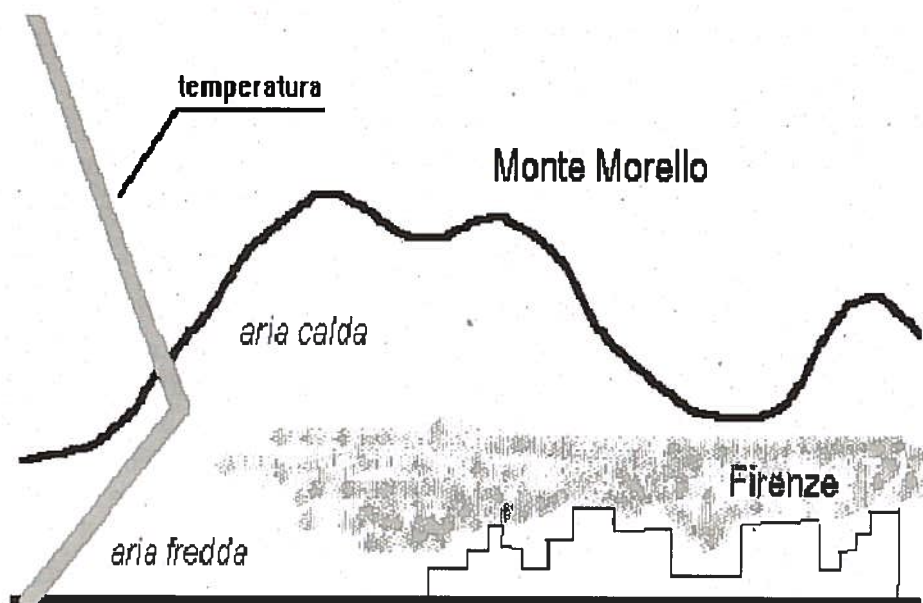
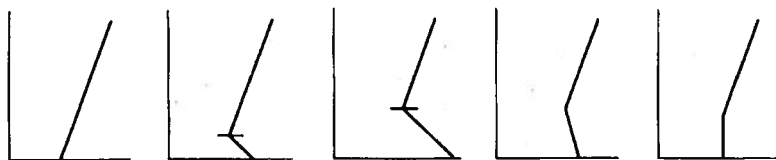


Figura 2.2.4: rappresentazione schematica del fenomeno di inversione termica ed il relativo intrappolamento degli inquinanti nei bassi strati; la linea spezzata a sinistra indica qualitativamente l'andamento della temperatura con la quota (temperatura crescente da sinistra verso destra).

ad iniziare ad una quota diversa dal suolo. L'andamento qui descritto si verifica molto frequentemente, soprattutto nelle giornate invernali caratterizzate dall'assenza di copertura nuvolosa, e viene definito "inversione di origine radiativa". Tuttavia si possono verificare anche situazioni di "inversione di origine avvevativa", in cui aria calda si sovrappone orizzontalmente a strati di aria più fredda. In genere sull'Italia quest'ultime situazioni avvengono a causa dell'estendersi sul Mediterraneo centro-meridionale di un'area di alta pressione che determina un afflusso di aria calda di origine africana: quando ciò si verifica nel periodo invernale il fenomeno di inversione può essere particolarmente intenso a causa della bassa temperatura della superficie terrestre e del ridotto periodo di irraggiamento solare (si veda l'Appendice 3 ed in particolare le configurazioni sinottiche indicate con AN e AW).

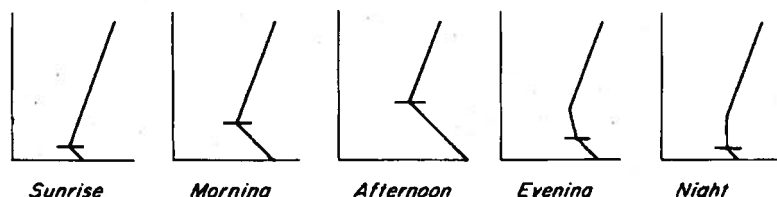
Il verificarsi del fenomeno di inversione termica può non essere sufficiente a provocare episodi critici. Il vento gioca un ruolo fondamentale, e naturalmente quando è debole ($V < 1$ m/s) può favorire aumenti delle concentrazioni. La temperatura è a sua volta importante, in quanto le emissio-

(a) Over open country



Height

(b) Over a large city



Sunrise

Morning

Afternoon

Evening

Night

Figura 2.2.5: rappresentazione schematica del tipico andamento verticale della temperatura nell'arco della giornata durante un episodio di inversione termica: (a) in aperta campagna, (b) in un'area urbana (da: Stern A.C., *Air pollution*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1976)

ni da traffico e dagli impianti di riscaldamento sono più elevate quando l'aria è più fredda¹². Quindi le condizioni meteo negative per la qualità dell'aria sono quelle caratterizzate dal fatto che contestualmente molte variabili meteorologiche assumono valori particolari.

In Figura 2.2.6 è rappresentata la situazione meteorologica sull'Europa il 18 gennaio 1996, quando una vasta area di alta pressione, estesa dalla Polonia al bacino del Mediterraneo, ha interessato la penisola italiana, portando cielo sereno, ma anche un repentino aumento delle concentrazioni dei diversi inquinanti a causa dell'instaurarsi di quelle particolari condizioni critiche sopra accennate.

Occorre infine ricordare che esistono due modalità grazie alle quali l'atmosfera è in grado di autodepurarsi ovvero di ridurre la presenza delle sostanze inquinanti al suo interno:

12. Molti impianti possiedono una regolazione automatica in relazione alla temperatura interna o esterna.

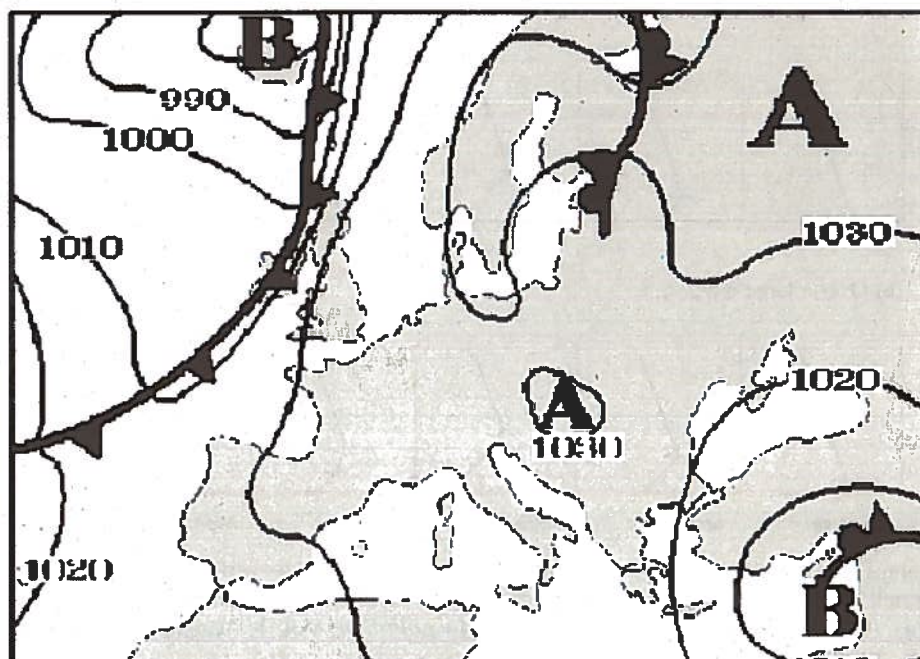


Figura 2.2.6: carta sinottica che mostra la situazione barica al suolo di giovedì 18 gennaio 1996 (elaborazione CSVDI-Arabba).

1. deposizione umida, ovvero l'assorbimento da parte delle piccole gocce di umidità in sospensione, a loro volta coinvolte dal fenomeno della precipitazione;
2. deposizione secca, ovvero la fissazione delle particelle inquinanti da parte del suolo, dell'acqua e della vegetazione sulla superficie terrestre (ad esempio per l'azione della forza di gravità).

Riferimenti bibliografici

- A Horowitz J.L., *Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning*, MIT Press, Cambridge (USA), 1982, Capitoli 2, 3, 5.
- B Eggleston H.S. et alii, *CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic*, Final Report-contract n° B43045(91)10PH, Environmental Consultancy, 1991, Volume 1: Methodology and Emission Factors.
- C Seinfeld J.H., *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, New York (USA), 1986, Capitolo 3.
- D C.E.T.U.R., *La pollution de l'air par la circulation automobile*, Dossier n° 29, Ministère de l'équipement du logement de l'aménagement du territoire et des transports, Bagneux (F), 1986, Capitolo 2.
- E Lies K.-H., *Unregulated motor vehicle exhaust gas components*, Volkswagen AG Research and Development, Wolfsburg (D), 1989.
- F Tamponi M. et alii, *Studio modellistico sull'inquinamento atmosferico da traffico e da riscaldamento nell'area metropolitana milanese*, Provincia di Milano-USSL 75 III, Milano, 1992.
- G Mazzali P., *L'inquinamento atmosferico: origine, prevenzione, controllo*, Pitagora Editrice, Bologna, 1989, Capitolo 1.
- H Barbaro A., Battini P., Bini G., Bruni M., Giovannini F. e Grechi D., "Il caso Firenze: rete di rilevamento e provvedimenti di limitazione del traffico", comunicazione al convegno organizzato dall'Unione Chimici Igienisti *Inquinamento urbano da traffico veicolare: cause, effetti, indagini e misure di contenimento*, Siracusa, 11 maggio 1997.
- I Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 28/3/83, "Limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinanti dell'aria nell'ambiente esterno", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 30, 28/5/83.
- J Decreto del Ministro per l'Ambiente di concerto con il Ministro della Sanità 25/11/94, "Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti di cui al Decreto ministeriale 15 aprile 1994", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 159, 13/12/94.
- K Decreto del Presidente della Repubblica 24/5/88, n° 203, "Attuazione delle Direttive CEE nn° 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi dell'articolo 15 della legge 16 aprile 1987, n° 183", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 53, 16/6/88.
- L Horowitz J.L., *Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning*, MIT Press, Cambridge (USA), 1982, Capitolo 3.
- M Seinfeld J.H., *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, New York (USA), 1986, Capitoli 11, 12, 16.
- N Stern A.C., *Air pollution*, Vol.1, Academic Press, New York (USA), 1976, Capitolo 8.
- O Santomauro L., *Dinamica dell'inquinamento atmosferico da impianti industriali*, Calderini, Bologna, 1975, Parte Prima.
- P Strahler A.N., *Physical Geography*, John Wiley & Sons, New York (USA), 1975, Parte II.
- Q Steward R.W., *The Atmospheric Boundary Layer*, World Meteorological Organization, Geneve (CH), 1979.
- R Zannetti P., *Air Pollution Modelling*, Van Nostrand Reinhold, New York (USA), 1990, Capitoli 3, 10.
- S Elsom D., *Smog alert: managing urban air quality*, Earthscan Publications, London (UK), 1996, 91-93.

- T Pasquill F. e Smith F.B., *Atmospheric Diffusion*, Ellis Horwood, Chichester (UK), 1983, Capitolo 6.
- U Gruppo di lavoro ISS “Reti di rilevamento per il controllo della qualità dell’aria”, *Modelli per la progettazione e valutazione di una rete di rilevamento per il controllo della qualità dell’aria*, Rapporto ISTISAN 90/32, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 1990, 58-63.

3 **Analisi**

Prima di impiegare strumenti avanzati utili per formulare una previsione sul trend degli inquinanti atmosferici, è necessario acquisire tutte le informazioni legate ai fenomeni oggetto dello studio per mezzo di un'analisi fenomenologica e statistica dei dati di qualità dell'aria rilevati, ed in particolare delle relazioni tra questi e quelli meteorologici. Alcune analisi condotte sui dati di Firenze sono state ripetute anche sui dati di Prato (Appendice 1).

3.1 Analisi dei fenomeni

Poiché lo scopo principale del presente studio è quello di analizzare le condizioni che possano determinare episodi acuti d'inquinamento, e quindi individuare metodi per la loro previsione, è in primo luogo necessario definire quantitativamente tali episodi e determinare degli indicatori che li individuino univocamente. Perciò vengono qui definiti gli episodi acuti di inquinamento atmosferico, facendo riferimento al D.M. 15/4/94, come quelle situazioni nelle quali si è determinato lo "stato di attenzione", o lo "stato di allarme". Di conseguenza, riferendosi all'attuale rete urbana di rilevamento della città di Firenze¹, risulta indicatore ottimale la grandezza NO₂AB definita come il secondo valore più elevato fra le quattro concentrazioni massime orarie giornaliere di NO₂ registrate nelle stazioni di tipo A (n° 1) e B (n° 3). Analogamente per l'inquinante CO è stato scelto il parametro COAC definito come il secondo valore più elevato fra i quattro valori della concentrazione massima oraria giornaliera rilevati nelle stazioni di tipo A (n° 1) e C (n° 3). Quando uno di questi parametri risulta superiore ai limiti di legge (200 o 400 µg/m³ per NO₂ e 15 o 30 mg/m³

1. Per la descrizione della rete di monitoraggio della Provincia di Firenze si veda il paragrafo 1.2.

per CO) viene raggiunto lo stato di attenzione o allarme.

Per quanto riguarda gli altri parametri ambientali e meteorologici, gli scopi e l'attività operativa dai quali discende questo studio hanno orientato prevalentemente verso tutte quelle grandezze che risultano disponibili o prevedibili al momento nel quale viene effettivamente eseguita la previsione (tipicamente tra le 9:30 e le 10:30 della mattina). Quindi in massima parte verranno qui esaminate le relazioni di tipo fenomenologico fra gli indicatori precedentemente definiti e i parametri rilevati dalla stessa rete di monitoraggio. Verranno però anche introdotti alcuni parametri non direttamente rilevabili ma prevedibili o ottenibili con informazioni esterne.

3.1.1 Analisi qualitativa e di screening delle variabili

Sono state considerate e confrontate con gli indicatori di interesse più di 40 variabili descrittive e riepilogative della situazione ambientale e meteorologica presente in ciascuno dei 454 giorni che costituiscono la popolazione degli eventi contenuta nella serie storica della rete di rilevamento di Firenze (periodo invernale, da novembre a marzo, degli anni 1993-94, 1994-95 e 1995-96). Nel seguito verranno discusse ed analizzate soltanto quelle che si sono rivelate direttamente o indirettamente interessanti per la comprensione dei fenomeni in studio. La complessità del problema, caratterizzato dalla presenza di un numero elevatissimo di fattori che influenzano i dati effettivamente rilevati dalle stazioni, rende necessaria un'analisi di tipo multivariato; ciononostante in fase preliminare anche la semplice osservazione delle singole variabili produce elementi ed informazioni di grande interesse.

Nel seguito vengono mostrate, attraverso strumenti grafici (scatterplot o grafici a dispersione) e tabelle, le più importanti relazioni fenomenologiche individuate fra i parametri "predittori" (per le cui definizioni si rimanda all'Appendice 2) e gli indicatori dei livelli d'inquinamento.

a) Episodi acuti d'inquinamento da NO₂ e da CO

Il presente studio ha sostanzialmente per oggetto l'inquinante secondario NO₂, che attualmente costituisce il problema principale di inquinamento atmosferico invernale nei grandi centri urbani e nelle aree metropo-

litane. Come già avvenuto alcuni anni fa per l'inquinante SO₂ in seguito alla metanizzazione degli impianti di riscaldamento, attualmente gli episodi acuti di inquinamento da CO mostrano un'evidente riduzione in frequenza e gravità in seguito all'introduzione di veicoli con emissioni più contenute^{2,A}.

Nelle seguenti Tabelle (3.1.I e 3.1.II) sono riportati e confrontati gli episodi acuti da NO₂ e CO verificatisi a Firenze nei tre periodi invernali considerati, mentre in Figura 3.1:1 è rappresentato l'intero campione dei dati rispetto ai valori dei due indicatori NO₂AB e COAC.

Si osserva in primo luogo la netta riduzione degli episodi relativi al CO nelle due stagioni più recenti rispetto al periodo 1993-94, mentre un analogo comportamento non è riscontrabile per l'NO₂, nonostante le variazioni del quadro emissivo abbiano senz'altro prodotto una diminuzione anche degli ossidi di azoto precursori dell'NO₂. Come sarà precisato in seguito (paragrafo 3.1.2), la diminuzione degli episodi acuti prodotti dal CO e soprattutto la stazionarietà di quelli legati all'NO₂ non appaiono imputabili alle particolari condizioni meteorologiche registrate nei tre diversi periodi invernali.

Tabella 3.1.I: riepilogo complessivo degli episodi acuti.

NO ₂ AB	COAC		totale
	COAC ≤ 15 mg/m ³	COAC > 15 mg/m ³	
NO ₂ AB ≤ 200 µg/m ³	416	13	429
NO ₂ AB > 200 µg/m ³	19	4	23
dati non disponibili	2	0	2
totale	437	17	454

Tabella 3.1.II: andamento nel tempo degli episodi acuti.

periodo invernale	NO ₂ AB > 200 µg/m ³	COAC > 15 mg/m ³
1993-94	6	12
1994-95	10	3
1995-96	7	2
totale	23	17

2. Dal gennaio 1993 (D.M. 28/12/91) gli autoveicoli di nuova immatricolazione devono essere dotati della cosiddetta "marmitta catalitica", dispositivo che riduce notevolmente le emissioni di CO e di NO_x.

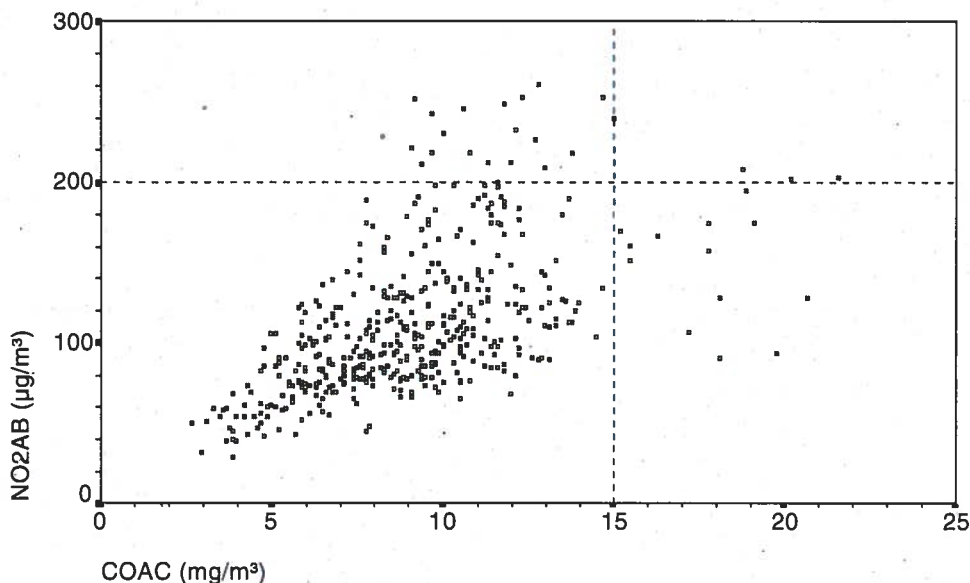


Figura 3.1.1: il grafico a dispersione mostra la relazione fra NO₂AB e COAC relativi allo stesso giorno (serie di dati 1993÷1996).

Si osserva inoltre come siano relativamente poco numerosi gli eventi di superamento contemporaneo dei limiti di legge dei due inquinanti (Figura 3.1.1). Ciò può essere parzialmente giustificato tenendo conto delle diversità di formazione ed emissione di CO ed NO₂ nonché della diversa influenza che le condizioni meteorologiche producono sulle loro concentrazioni^B.

b) Dipendenza dalle emissioni

Le emissioni da traffico veicolare costituiscono senz'altro il contributo principale all'inquinamento atmosferico nella città di Firenze e probabilmente di ogni area metropolitana non fortemente industrializzata.

È sufficientemente noto il comportamento pressoché ciclico e regolare del traffico veicolare urbano al variare dei giorni della settimana^{3,C}: a Firenze i giorni feriali mostrano in genere lievi differenze nei flussi di traffico complessivi e nel loro sviluppo orario giornaliero, anche se esiste una

3. I flussi di traffico veicolare presentano comportamenti giornalieri e settimanali ciclici pressoché costanti in ogni periodo dell'anno, escluso al più giorni molto particolari come le maggiori festività o il periodo di fine luglio e agosto, quando si registra una loro sostanziale riduzione (pari anche al 40÷50%).

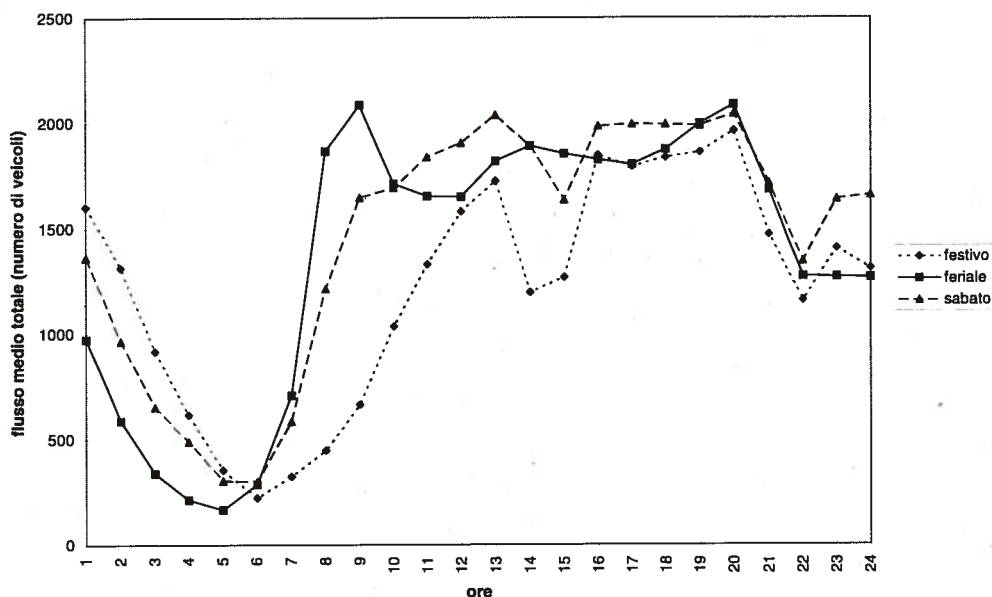


Figura 3.1.2: traffico veicolare, giorni medi per le classi festivi, feriali e prefestivi nel mese di Febbraio 1994 (valori rilevati nelle 22 stazioni contatraffico del Comune di Firenze).

tendenza ad un leggero incremento nei giorni di giovedì e di venerdì; nei giorni di sabato (ed in genere nei prefestivi) si ravvisa un certo decremento nei valori complessivi giornalieri che si evidenzia in modo più netto fra le ore 7 e le ore 10 della mattina, ed al quale fa riscontro invece un incremento nelle ore notturne. Nei giorni festivi il decremento complessivo è più netto ma comunque percentualmente limitato, mentre risulta sostanziale per quanto riguarda i valori orari della mattina. In Figura 3.1.2 a titolo di esempio sono mostrati i giorni medi delle tre classi (festivo, feriale e prefestivo) dei flussi medi registrati nel febbraio 1994 dalle 22 stazioni contatraffico del Comune di Firenze.

Il valore medio giornaliero della classe dei festivi risulta ridotto del 16% rispetto a quello dei feriali, e quello dei prefestivi risulta ridotto di appena il 6%. Maggiormente significative risultano le variazioni dei flussi nella mattina: prendendo in considerazione il periodo fra le 7 e le 12, se la riduzione fra prefestivi e feriali si mantiene inferiore al 10%, quella fra festivi e feriali è dell'ordine del 45%.

Le emissioni di altro tipo ed in particolare quelle prodotte dalla combustione per il riscaldamento degli ambienti hanno un andamento meno re-

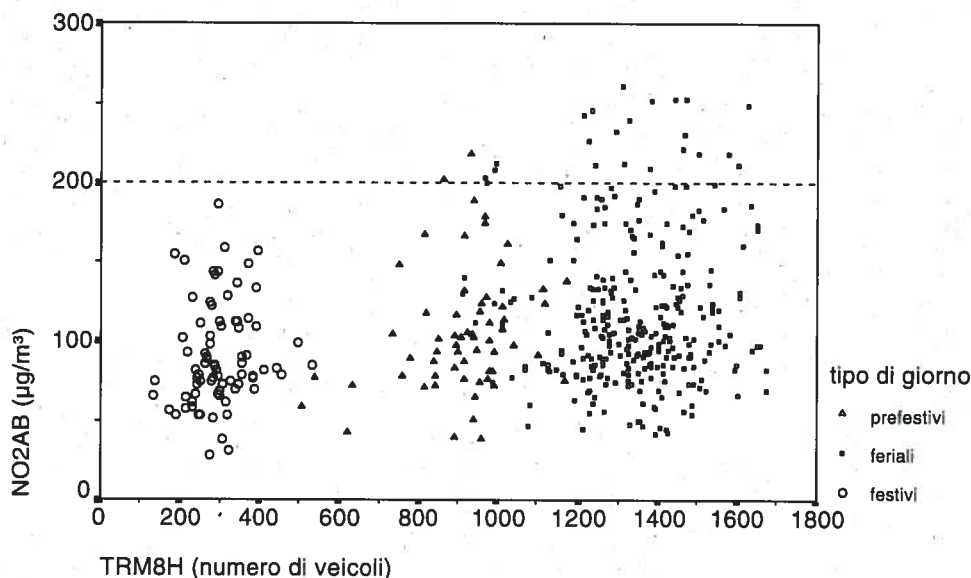


Figura 3.1.3: relazione tra NO₂AB e traffico veicolare per i diversi tipi di giorno. TRM8H indica il numero di veicoli transitati presso la stazione di Via Ponte alle Mosse fra le ore 7 e le ore 8 di ogni giorno (serie dei dati 1993÷1996).

golare essendo in parte legate a condizioni meteorologiche momentanee (temperatura). Sono comunque presenti per queste emissioni anche tendenze stagionali (emissioni minori a novembre e massime a gennaio e febbraio, legate cioè alle temperature medie stagionali) e settimanali: ad esempio esiste un certo decremento nei giorni festivi dovuto alla chiusura degli edifici pubblici e degli esercizi commerciali^{4,D}.

Nelle Figure 3.1.3 e 3.1.4 sono mostrate le corrispondenze fra i flussi di traffico misurati presso la stazione di via Ponte alle Mosse fra le ore 7 e le 8 (TRM8H) ed i valori degli indicatori NO₂AB e COAC.

Si osserva come il numero di veicoli rilevato rappresenti un ottimo indicatore della specificità dei diversi giorni: i festivi, i prefestivi ed i feriali risultano, tranne rare eccezioni, raggruppati fra loro e nettamente distinti.

Risulta poi evidente come gli episodi acuti dovuti all'inquinante NO₂ non si siano mai verificati nei giorni festivi mentre siano presenti alcuni casi nella categoria dei prefestivi. Episodi acuti dovuti a CO sono invece

4. Una stima effettuata nel 1993 valutava in circa il 10% il decremento nei giorni festivi rispetto a quelli feriali nelle emissioni di NO_x relative agli impianti di riscaldamento (vedi riferimento bibliografico D).

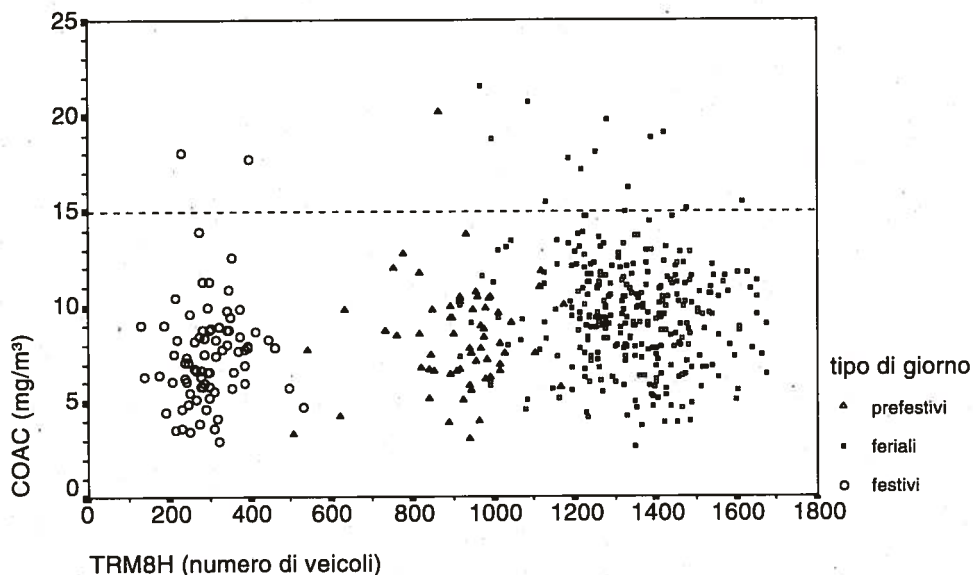


Figura 3.1.4: relazione tra COAC e traffico veicolare per i diversi tipi di giorno (serie dei dati 1993÷1996).

presenti in ognuna delle tre categorie.

Dal punto di vista fenomenologico si può quindi ritenere improbabile il verificarsi di episodi acuti per l' NO_2 in giorni festivi o con analoghi flussi di traffico nella mattina; empiricamente può essere fissato un valore di soglia, intorno agli 800 veicoli orari, come limite del flusso veicolare fra le ore 7 e le 8 nella stazione di via Ponte alle Mosse, al di sotto del quale l'episodio critico risulta poco probabile.

Ciò può trovare giustificazione nella dinamica che porta al verificarsi degli episodi acuti. Le sostanze inquinanti prodotte nelle ore della mattina si accumulano, se non altrimenti disperse dai moti turbolenti dei bassi strati dell'atmosfera, e portano successivamente con l'irraggiamento solare ad elevate concentrazioni di NO_2 i cui massimi si verificano generalmente nel primo pomeriggio^E (fra le 12 e le 15). Quando le emissioni della mattina risultano sostanzialmente ridotte, pur in presenza di condizioni di stabilità atmosferica, la formazione di NO_2 è conseguentemente limitata. Occorre inoltre ricordare che questa riduzione delle emissioni nei giorni festivi interviene anche per le altre sorgenti inquinanti (impianti di riscaldamento degli edifici commerciali e pubblici, attività industriali).

Tuttavia è evidente che in condizioni di particolare gravità (in presenza cioè di elevata e perdurante stabilità nei bassi strati atmosferici) non si può escludere il raggiungimento dei limiti di legge anche in giorni festivi (a Firenze ad esempio si è verificato domenica 10/1/93).

Per quanto riguarda invece il CO è necessario tener presente che le sue concentrazioni (rilevate nelle stazioni C) sono fortemente correlate ai flussi di traffico e di conseguenza una riduzione di questi produce quasi automaticamente una riduzione delle concentrazioni^F. Ma occorre sottolineare che anche un singolo evento negativo di durata limitata (un'ora), quale un ingorgo o un grave rallentamento nel traffico vicino alla stazione di rilevamento, può portare al superamento delle soglie di legge.

Da questo punto di vista l'evento acuto dovuto al CO appare più imprevedibile, e può anche non coincidere con le situazioni di più grave inquinamento ovvero quelle nelle quali si mantengono per diverse ore concentrazioni elevate ma inferiori al limite di 15 mg/m^3 . Per questo motivo sarebbe forse preferibile definire gli eventi critici di inquinamento da CO attraverso lo standard di 10 mg/m^3 come media su 8 ore cui fa riferimento il D.P.C.M. 28/3/83 (adottato dall'inverno 1995-96 anche dall'Ordinanza n° 7644/95 del Sindaco di Firenze).

c) Dipendenza dai parametri meteorologici

Sono stati precedentemente richiamati i processi fisici e meteorologici che costituiscono le condizioni necessarie affinché si verifichino eventi critici di inquinamento atmosferico; in questa fase si cercheranno di evidenziare le corrispondenze fra i valori dei parametri meteorologici e la presenza di episodi acuti. Questo porterà a specificare e definire quali sono le variabili che possano meglio descrivere quelle particolari condizioni meteorologiche e quindi permettere di individuare gli episodi acuti d'inquinamento.

PIOGGIA

Già in un precedente studio^B relativo al periodo 1993-94 è stata esaminata l'influenza delle precipitazioni atmosferiche sulle concentrazioni di CO ed NO₂: i risultati allora ottenuti sono confermati anche dai dati rilevati negli anni successivi.

In Tabella 3.1.III sono riassunte le frequenze degli eventi critici verificatisi in giorni di pioggia o in giorni senza precipitazioni (le percentuali

sono riferite al campione complessivo). Sono stati considerati due indicatori della presenza di pioggia: PIO024, che rappresenta la precipitazione cumulata sull'intero giorno, e PIO010, relativa alle prime 10 ore del giorno.

Si osserva l'assenza di eventi acuti dovuti all' NO_2 nei giorni con precipitazioni atmosferiche, mentre gli eventi acuti dovuti al CO sono presenti in proporzione sostanzialmente equivalente a quella dei giorni di pioggia nel campione totale (6 eventi acuti sui 17 presenti nel campione complessivo corrispondono a giorni di pioggia, essendo questi il 33% del campione).

Tabella 3.1.III: frequenze degli eventi acuti nei giorni di pioggia.

	PIO024=0	PIO024>0	PIO010=0	PIO010>0
numero eventi	304 (67%)	149 (33%)	358 (79%)	95 (21%)
$\text{NO}_2\text{AB}>200\mu\text{g}/\text{m}^3$	23 (100%)	0 (0%)	23 (100%)	0 (0%)
$\text{COAC}>15\text{mg}/\text{m}^3$	11 (65%)	6 (35%)	11 (65%)	6(35%)

Tale risultato costituisce un elemento importante per la previsione degli episodi acuti da NO_2 in quanto oltre a far ritenere estremamente improbabile il verificarsi di tali episodi in presenza di pioggia (parametro PIO010), permette di impiegare per i giorni successivi le previsioni sulle precipitazioni eseguite dai Servizi Meteorologici.

La diversità di comportamento dei due inquinanti può essere considerata come il risultato del contributo contemporaneo di diversi elementi: da una parte occorre tener presente come le condizioni meteorologiche caratteristiche degli episodi critici da NO_2 si discostino decisamente in termini di stabilità atmosferica a scala locale e sinottica da quelle che portano a fenomeni di precipitazione. Inoltre la solubilità dell' NO_2 in l'acqua è contrapposta alla relativa insolubilità del CO. Infine si può ipotizzare anche un effetto legato alle emissioni del traffico veicolare, che in presenza di pioggia assume caratteristiche più favorevoli all'emissione di CO e meno a quelle degli ossidi di azoto a causa della riduzione della velocità di scorrimento.

VENTO

Il vento è il parametro dal quale maggiormente dipendono i fenomeni di diffusione e dispersione degli inquinanti atmosferici.

Le stazioni meteorologiche della rete di rilevamento forniscono misure della velocità e direzione del vento (medie orarie e direzioni prevalenti)

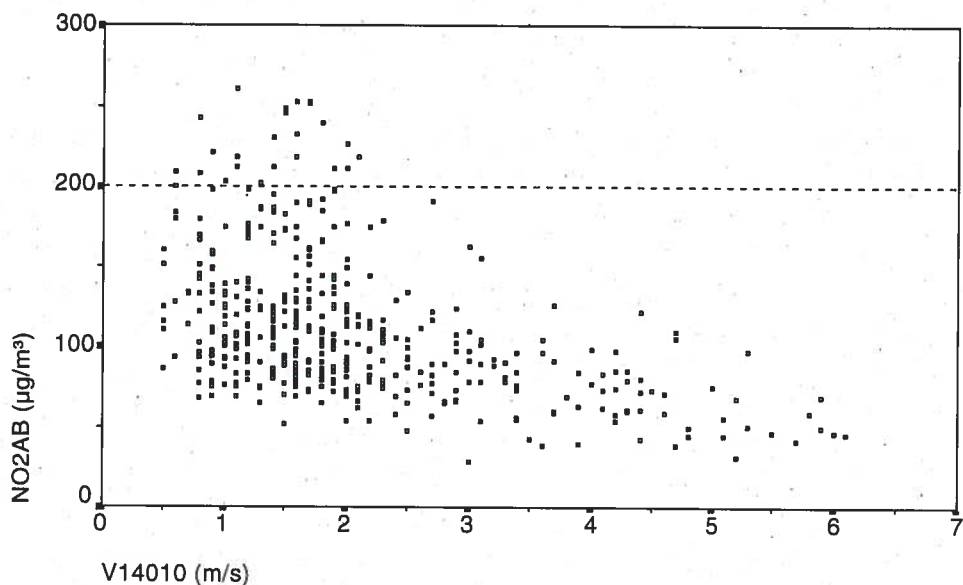


Figura 3.1.5: relazione tra NO₂AB e intensità del vento. V14010 indica il valore medio della velocità del vento misurata nella stazione Ximeniano fra le ore 0 e le ore 10 di ogni giorno (serie dei dati 1993÷1996).

sull'area urbana di Firenze (Ximeniano, nel seguito identificata anche con il n°14) ed in quota (Monte Morello, n°15). Questo permette di avere a disposizione praticamente in tempo reale indicazioni fondamentali per valutare le condizioni dispersive dei bassi strati atmosferici.

Fra i possibili parametri riassuntivi delle condizioni di vento nei diversi giorni, assume particolare importanza ai fini della previsione operativa l'informazione ottenibile entro le ore 10 della mattina. Nelle Figure 3.1.5 e 3.1.6 viene evidenziato il rapporto fra l'indicatore NO₂AB e la media fra le ore 0 e le ore 10 di ogni giorno della velocità del vento in ciascuna delle due stazioni meteo.

La totalità degli episodi acuti si trova in corrispondenza di velocità del vento inferiori ai 2.5 m/s sia in città (V14010) che in quota (V15010). Tale valore può quindi costituire una soglia al di sopra della quale gli eventi critici possono ritenersi storicamente improbabili.

È evidente che condizioni caratterizzate da valori inferiori di questi parametri non garantiscono l'automatico verificarsi di eventi acuti, ma l'esistenza di velocità del vento maggiori (in particolare nelle ore più prossime alle 10) assicura l'assenza di condizioni favorevoli all'accumulo degli

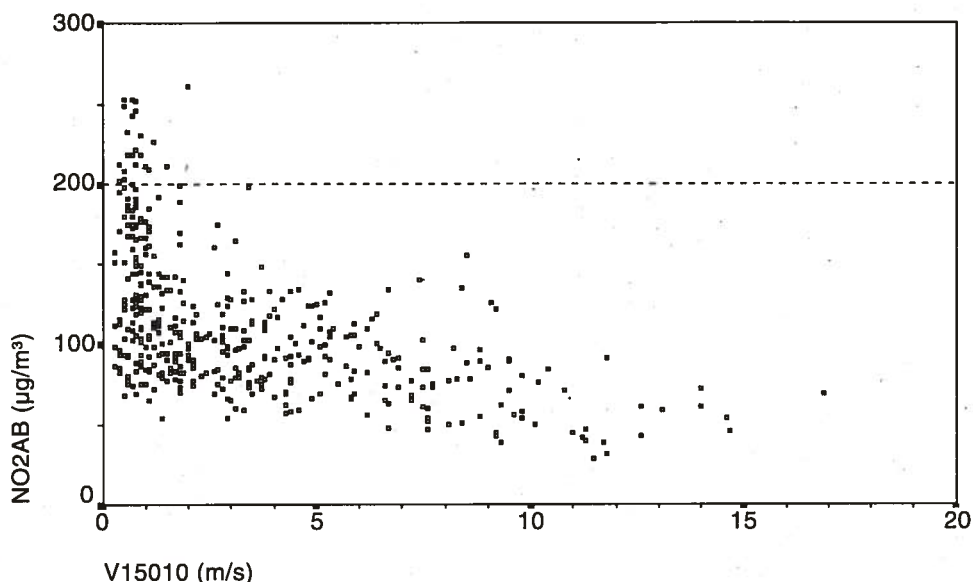


Figura 3.1.6: relazione tra NO₂AB e intensità del vento. V15010 indica il valore medio della velocità del vento misurata nella stazione di M. Morello fra le ore 0 e le ore 10 di ogni giorno (serie di dati 1993÷1996).

inquinanti atmosferici e quindi scarse possibilità di superamento dei limiti di legge.

Un comportamento analogo si riscontra anche impiegando altri indicatori della velocità del vento, ad esempio le medie giornaliere V14024 e V15024 oppure le medie sul periodo diurno (convenzionale: fra le ore 8 e le ore 20, V14820 e V15820); in questi casi però i possibili valori di soglia risultano lievemente più elevati soprattutto per quanto riguarda la stazione di Monte Morello (intorno ai 4 m/s per la V15820). Ciò risulta comprensibile tenendo conto che questi ulteriori indicatori riassumono l'andamento del vento su intervalli temporali che coprono periodi del giorno meno significativi per il fenomeno in studio. Si sono verificati infatti degli episodi acuti di durata limitata nei quali si sono raggiunte concentrazioni elevate nelle prime ore del pomeriggio e successivamente le concentrazioni hanno subito una drastica riduzione causata da rapide variazioni delle condizioni meteo, in genere legate all'afflusso di intense correnti⁵.

Per quanto riguarda le direzioni prevalenti del vento, considerando

5. Ad esempio il 20/11/95, nel quale NO₂AB=231 µg/m³, V15010=0.9 m/s mentre V15820=3.9 m/s.

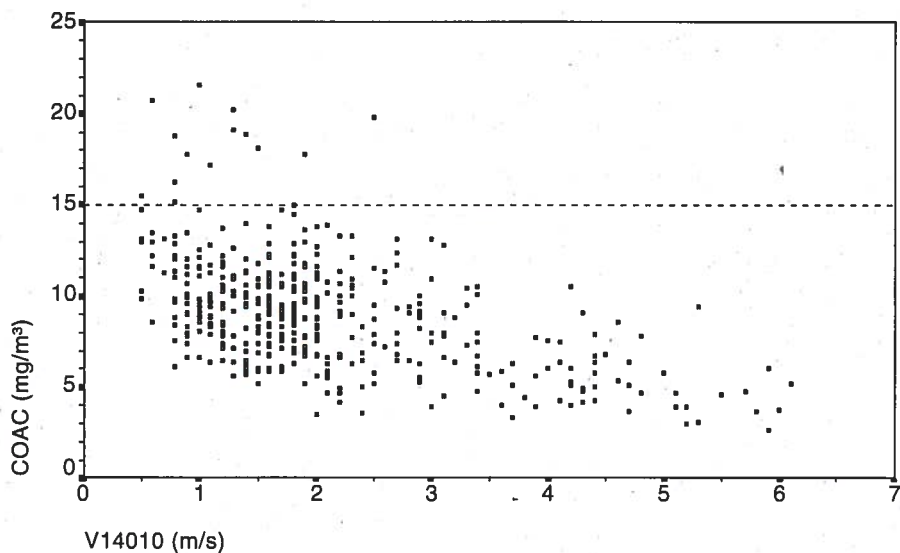


Figura 3.1.7: relazione tra COAC e intensità del vento. V14010 indica il valore medio della velocità del vento misurata nella stazione Ximeniano fra le ore 0 e le ore 10 di ogni giorno (serie dei dati 1993÷1996).

quelle relative alle prime 10 ore del giorno (D14010 e D15010), corrispondono ad episodi critici soltanto la classe SE (21 casi) e la classe relativa a venti variabili (VAR) con 2 casi per la stazione Ximeniano, mentre per quella di Monte Morello si hanno 2 eventi nella classe S, 2 nella N e ben 18 casi nella classe VAR (in 1 caso la stazione era momentaneamente fuori servizio).

Questa distribuzione risulta meno concentrata se si considerano indicatori su periodi diversi (ad esempio per D14820 gli eventi acuti si ridistribuiscono nel numero di 7 nella classe SE, 13 in VAR e 3 in W, mentre per D15820 si osserva un singolo caso nelle classi SE e NE, 9 in S e 11 in VAR).

In generale gli episodi acuti corrispondono quindi a situazioni meteo caratterizzate nelle ore della mattina da venti molto deboli o quasi totalmente assenti in quota, e da venti altrettanto deboli prevalentemente provenienti da SE sulla città. In genere la presenza di venti da NE o settentrionali nella mattina si mantiene e persiste nell'intero giorno e porta invece a bassi livelli di concentrazione degli inquinanti.

Per quanto riguarda gli episodi acuti prodotti dal CO le distribuzioni

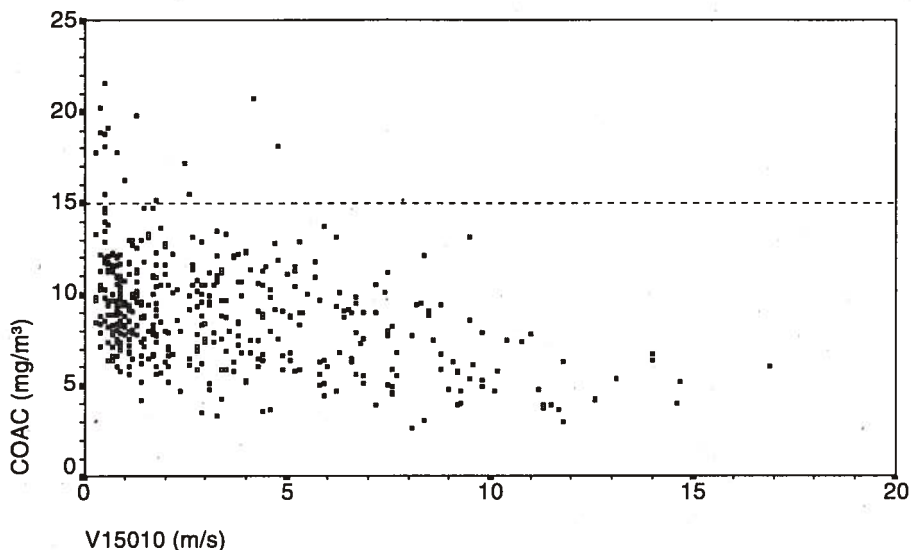


Figura 3.1.8: relazione tra COAC e intensità del vento. V15010 indica il valore medio della velocità del vento misurata nella stazione di M. Morello fra le ore 0 e le ore 10 di ogni giorno (serie dei dati 1993÷1996).

rispetto alla velocità del vento sono mostrate nelle Figure 3.1.7 e 3.1.8. Anche in questo caso è possibile estrarre empiricamente dei valori di soglia al di sopra dei quali risulta storicamente improbabile il superamento dei limiti di legge: 3 m/s per V14010 e 5 m/s per V15010. Queste soglie risultano tendenzialmente maggiori rispetto a quelle relative all' NO_2 e ciò è ancora giustificabile con la maggiore dipendenza delle concentrazioni massime orarie da fattori accidentali. Occorre inoltre sottolineare in questo caso che generalmente le concentrazioni massime orarie del CO si registrano nelle ore di punta del traffico veicolare del tardo pomeriggio e quindi temporalmente più lontane dall'indicazione contenuta nei parametri V14010 e V15010.

TEMPERATURA E INVERSIONE TERMICA

Si è già anticipato come sia ipotizzabile un'influenza del parametro temperatura sulle emissioni delle sostanze inquinanti prodotte dagli impianti di riscaldamento: quando la temperatura esterna si abbassa il mantenimento della temperatura degli ambienti interni richiede l'impiego di maggiori quantità di combustibile e quindi un incremento delle emissio-

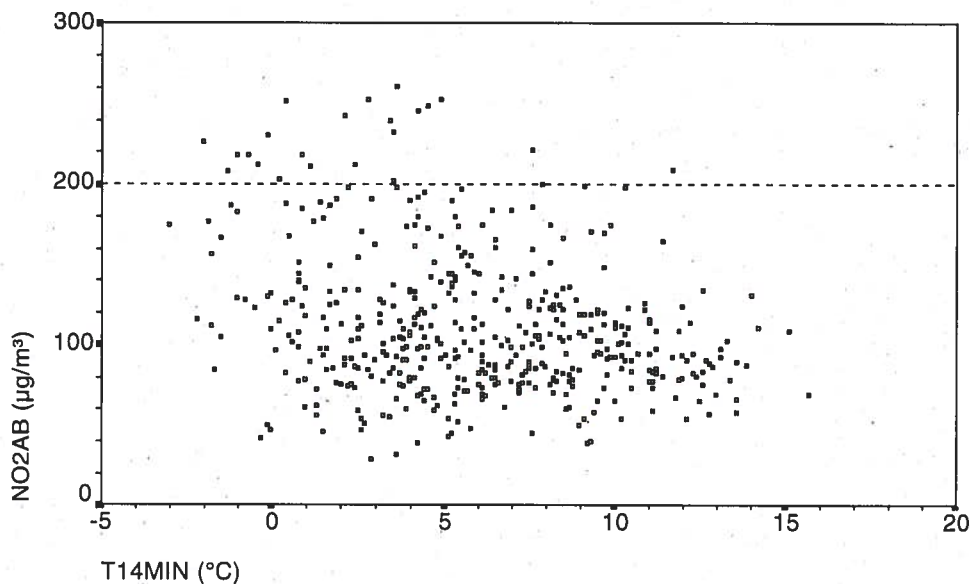


Figura 3.1.9: relazione tra NO₂AB e temperatura minima. T14MIN indica il valore della temperatura minima (media oraria) registrata nella stazione Ximeniano (serie dei dati 1993÷1996).

ni. Una relazione analoga si osserva per le emissioni da traffico.

Osservando in Figura 3.1.9 la distribuzione dell'indicatore NO₂AB rispetto ai valori della temperatura minima registrata nello stesso giorno (in genere nelle prime ore della mattina, fra le 4 e le 7, parametro T14MIN) si nota che gli episodi acuti, pur addensati nella zona delle basse temperature (T14MIN < 6 °C), non risultano esclusivamente delimitati in questa regione: si trovano distribuiti su tutto l'intervallo di temperature fino a circa 12 °C, che rappresenta un valore relativamente elevato per il periodo invernale. Ovviamente non tutti i giorni a temperatura più bassa corrispondono in effetti ad episodi critici, poiché talvolta basse temperature si rilevano in corrispondenza di afflussi di area fredda provenienti dall'Europa continentale caratterizzati da venti di una certa intensità che favoriscono la dispersione degli inquinanti atmosferici. La presenza di episodi acuti anche per temperature relativamente alte sembra inoltre confermare che le variazioni nelle emissioni legate a questo parametro non costituiscono un elemento determinante nel raggiungimento delle soglie di legge ma eventualmente hanno un carattere aggravante. Il parametro temperatura da solo

non fornisce indicazioni essenziali per caratterizzare gli episodi acuti d'inquinamento atmosferico.

Questi, come spiegato precedentemente (paragrafo 2.2), si verificano in condizioni di elevata stabilità atmosferica nei bassi strati, quindi venti deboli e soprattutto altezza di rimescolamento ridotta. Quando lo strato limite sulla città è di poche centinaia di metri le emissioni inquinanti si accumulano rapidamente e se queste condizioni si mantengono per tempi sufficientemente lunghi (dalla notte fino a mattina inoltrata o addirittura al primo pomeriggio) le concentrazioni possono superare i limiti di legge.

La presenza di inversione termica^G con base ad altezze relativamente basse o addirittura al suolo, si oppone ai moti convettivi verso l'alto e limita quindi fortemente la dispersione delle sostanze inquinanti. In generale il raffreddamento degli strati superficiali durante la notte porta ad un abbassamento dello strato limite ed all'instaurarsi del fenomeno di inversione termica, che di norma viene interrotto al mattino dal riscaldamento dovuto alla radiazione solare. In ambiente urbano la presenza di elevate fonti di calore e irraggiamento (isola di calore) limita questo fenomeno, tipico invece in ambiente rurale, e quindi soltanto raramente nel nostro clima si creano le condizioni che portano agli episodi acuti d'inquinamento.

La differenza di temperatura fra la stazione in quota di Monte Morello e quella situata al centro della città rappresenta un ottimo indicatore per rilevare la presenza di condizioni di inversione termica nei bassi strati, tenendo inoltre conto dell'effetto "isola di calore" dovuto all'agglomerato urbano.

Per analizzare questo fenomeno sono stati scelti una serie di indicatori che ne sintetizzano l'intensità e la durata.

In Figura 3.1.10 è mostrata la distribuzione dei valori NO₂AB rispetto al parametro INV010 che rappresenta la media della differenza di temperatura tra le due stazioni, fra le ore 0 e le ore 10 del mattino. Si osserva come gli eventi critici si siano finora sempre verificati per valori positivi di questo parametro, e come la loro densità relativa tenda ad aumentare col crescere di questo.

In Figura 3.1.11 è mostrata la distribuzione di NO₂AB rispetto al valore rilevato alle ore 10 (INV10H) ed in Figura 3.1.12 rispetto alla media fra le 13 e le 24 del giorno precedente a quello cui corrispondono i valori di NO₂AB. In entrambi i casi si nota come gli episodi acuti risultino maggiormente frequenti al crescere dei valori di tali parametri.

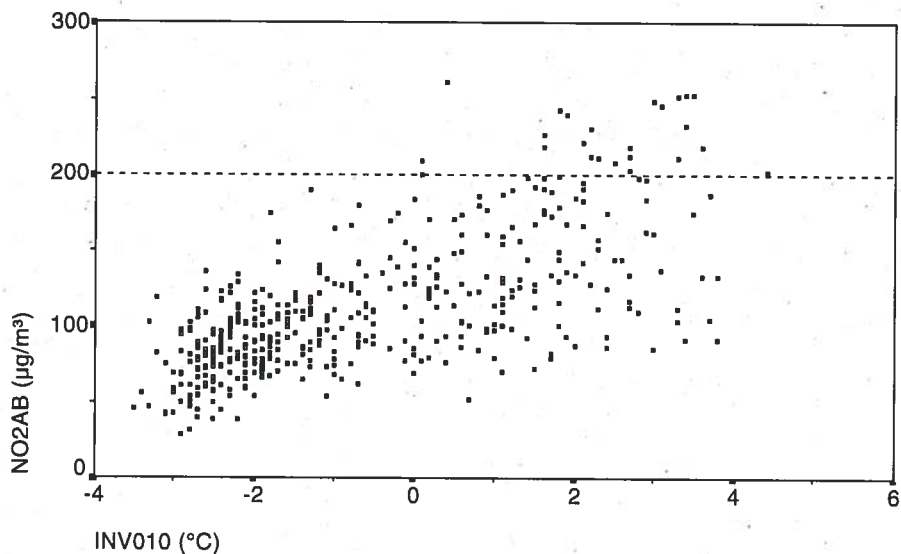


Figura 3.1.10: relazione tra NO₂AB e inversione termica. INV010 indica il valore medio della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M. Morello e Ximeniano fra le ore 0 e le ore 10 del mattino (serie dei dati 1993÷1996).

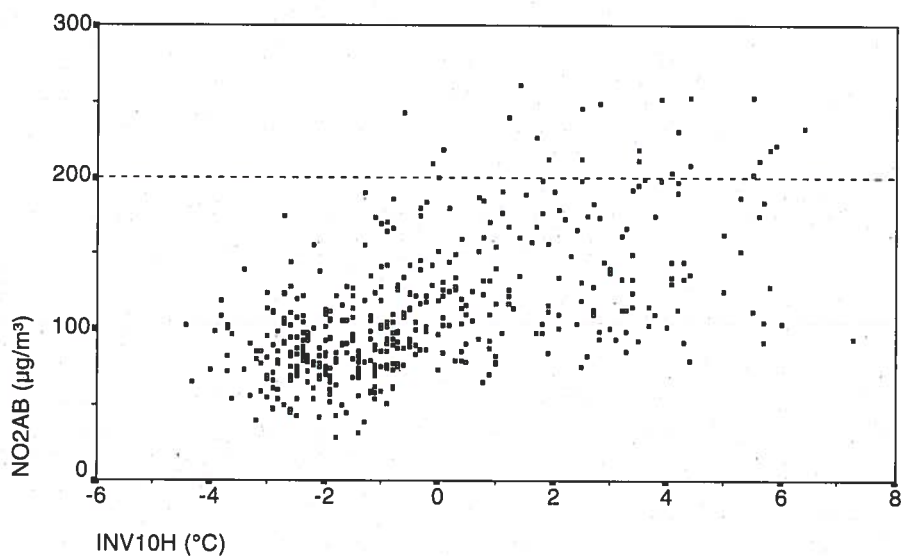


Figura 3.1.11: relazione tra NO₂AB e inversione termica. INV10H indica il valore della differenza di temperatura (media oraria) registrata fra le stazioni di M. Morello e Ximeniano alle ore 10 del mattino (serie dei dati 1993÷1996).

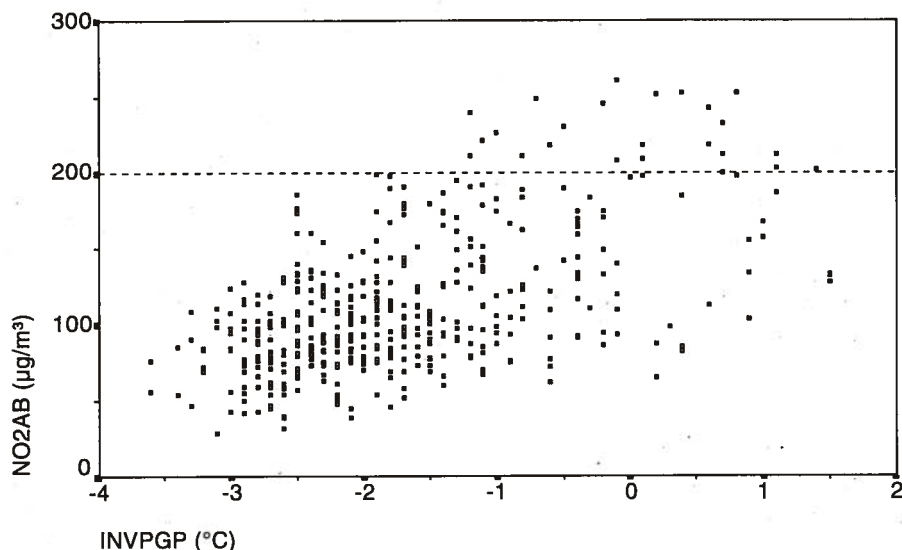


Figura 3.1.12: relazione tra NO₂AB e inversione termica. INVPGP indica il valore medio della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M. Morello e Ximeniano fra le ore 13 e le ore 24 del giorno precedente rispetto a quello cui si riferiscono i valori NO₂AB (serie dei dati 1993÷1996).

Nella Tabella 3.1.IV vengono mostrate le frequenze degli episodi acuti da NO₂ rispetto al parametro NOIT costituito dal numero di ore di inversione termica valutate a partire dalle ore 13 del giorno precedente fino alle ore 10 del giorno stesso, rispetto al parametro NOI010 (numero di ore di inversione termica fra le 0 e le 10) ed al parametro NOIPGP (numero di ore di inversione termica fra le 13 e le 24 del giorno precedente).

Si nota come la maggior parte degli eventi di interesse si sia verificata quando nella mattina il fenomeno dell'inversione termica si è protratto a lungo (il 96% degli eventi è relativo a NOI010>7 ore) e spesso quando era già in atto dalla serata del giorno precedente (il 70% degli eventi corrisponde a valori NOIPGP>4 ore). Esistono nella serie storica 35 giorni caratterizzati da valori NOI010>7 ore e contemporaneamente NOIPGP>4 ore; di questi ben 15 (43%) corrispondono ad episodi acuti da NO₂ (il 65% di tutti gli episodi acuti). Considerando la variabile NOIT si osserva ancora che ben 22 episodi acuti corrispondono a valori maggiori di 12 (il 32% dei 69 dati che soddisfano questa condizione).

Tabella 3.1.IV: relazione fra episodi acuti e numero di ore di inversione termica.

	NOI010≤2	3≤NOI010≤7	NOI010>7	dati assenti	totale
NO2AB≤200μg/m ³	257	69	99	4	429
NO2AB>200μg/m ³	0	1	22	0	23
dati assenti	2	0	0	0	2
totale	259	70	121	4	454
	NOIPGP=0	1≤NOIPGP≤4	NOIPGP>4	dati assenti	totale
NO2AB≤200μg/m ³	272	118	35	4	429
NO2AB>200μg/m ³	0	7	16	0	23
dati assenti	2	0	0	0	2
totale	279	125	51	4	454
	NOIT<9	9≤NOIT≤12	NOIT>12	dati assenti	totale
NO2AB≤200μg/m ³	312	66	47	4	429
NO2AB>200μg/m ³	0	1	22	0	23
dati assenti	2	0	0	0	2
totale	314	67	69	4	454

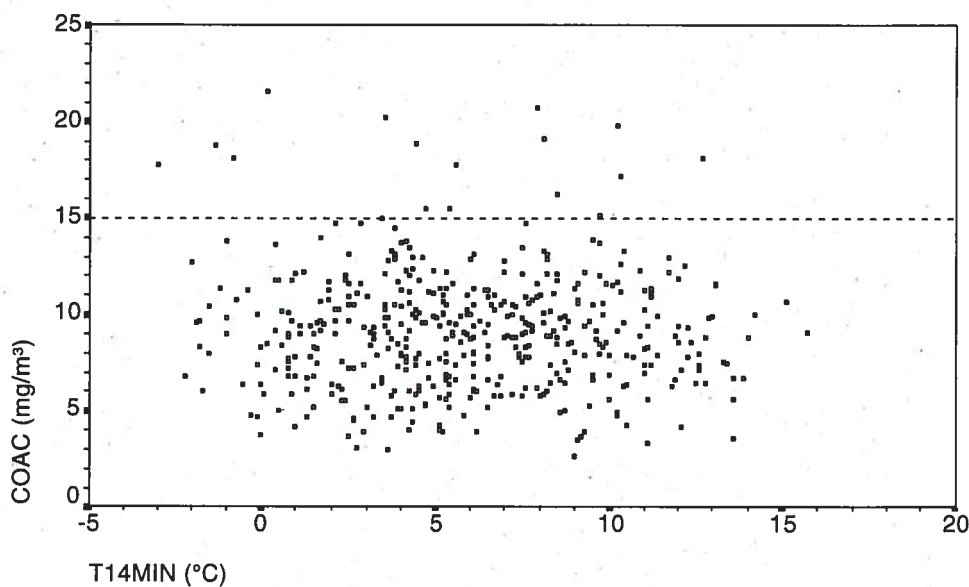


Figura 3.1.13: relazione tra COAC e temperatura minima (serie di dati 1993÷1996).

Per quanto riguarda gli episodi acuti dovuti al CO, sia la Figura 3.1.13 relativa alla distribuzione degli eventi rispetto alla temperatura minima, sia la Figura 3.1.14 relativa invece alla variabile INV010 indicano chiaramente l'assenza di un evidente legame fenomenologico con queste variabili.

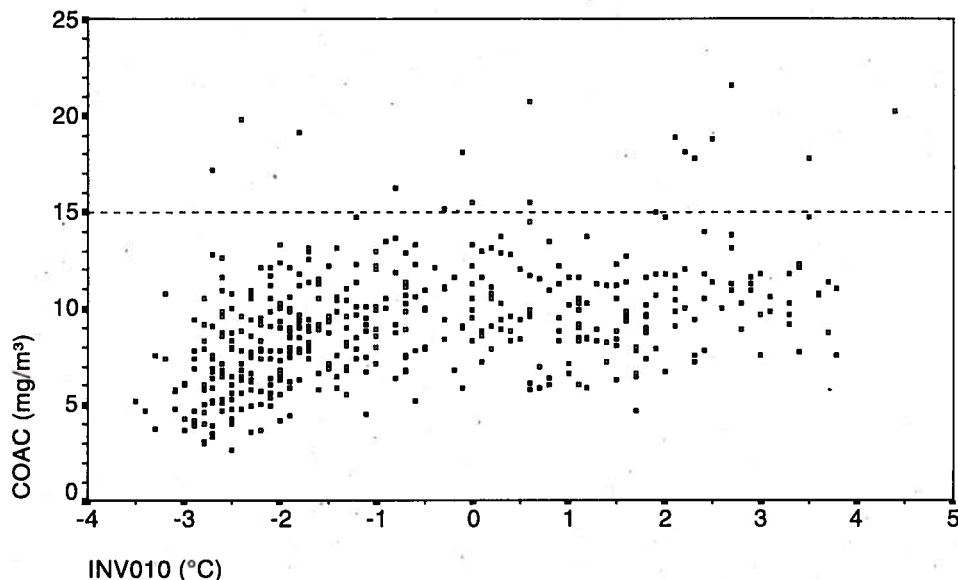


Figura 3.1.14: relazione tra COAC e inversione termica. INV010 indica il valore medio della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M. Morello e Ximeniano fra le ore 0 e le ore 10 del mattino (serie dei dati 1993÷1996).

PRESSIONE ATMOSFERICA E SITUAZIONE SINOTTICA

In un precedente studio^H erano stati analizzati anche i valori della pressione atmosferica al suolo osservando come questo parametro non risultasse nei fatti particolarmente significativo nell'individuare gli episodi critici d'inquinamento. Anche alla luce dei nuovi dati tale conclusione mantiene validità in quanto si osserva che si sono verificati casi di superamento delle soglie di legge in un intervallo estremamente ampio di valori, e quindi non appare possibile limitare né raggruppare i casi in studio per mezzo di questo indicatore: si hanno eventi critici per valori della pressione atmosferica (stazione Ximeniano) compresi fra i 995 e i 1026 mbar (contro un intervallo di variazione fra 983 e 1029 mbar).

Era stato però già evidenziato come gli episodi critici, pur non essendo direttamente legati ai singoli valori della pressione atmosferica, fossero in

relazione con la presenza di ben definite configurazioni sinottiche del campo di pressione. Questo è ben comprensibile dato che le condizioni di instabilità o stabilità locali dei bassi strati sono generalmente legate alle situazioni ed ai processi che avvengono a scala maggiore ed in particolare al campo barico presente al suolo ed in quota^{I,J,K}.

Nella Tabella 3.1.V sono riportate le corrispondenze fra episodi acuti prodotti da NO₂ e categorie sinottiche, ovvero classi omogenee del campo barico a mesoscala. Le classi indicate con la lettera A si riferiscono a situazioni di tipo anticiclonico, quelle con B a condizioni cicloniche; le lettere successive, se presenti, si riferiscono alla posizione, relativa all'Italia centrale, del centro barico la cui circolazione interessa tale regione. In Appendice 3 è riportata una descrizione dettagliata della configurazione sinottica relativa a ciascuna categoria.

Tabella 3.1.V: corrispondenza fra episodi acuti e categorie sinottiche.

	A	AN	ANE	AW	B	BS	BNW	BW	totale
NO ₂ AB≤200µg/m ³	21	25	44	74	54	78	65	69	430
NO ₂ AB>200µg/m ³	3	1	0	13	3	0	2	1	23
dati assenti	0	0	0	0	1	0	1	0	2
totale	24	26	44	87	58	78	68	69	454

Condizioni di tipo anticiclonico sono caratterizzate in genere da sostanziale stabilità atmosferica, mentre condizioni cicloniche sono legate a presenza di instabilità ed al passaggio di fronti perturbati, quindi spesso associate a precipitazioni.

Si osserva come la maggior parte degli eventi di interesse corrisponda alla classe AW, e come nessun evento critico sia presente nelle classi caratterizzate da venti provenienti da NE (ANE e BS). Ben 17 episodi di inquinamento acuto sui 23 totali si sono verificati in categorie relative a condizioni anticicloniche, mentre soltanto 6 rientrano nelle categorie di tipo ciclonico. La presenza di eventi acuti in tali condizioni può apparire sorprendente, e soltanto l'osservazione diretta riesce a chiarire il fenomeno. Si è infatti notato che talvolta nell'intervallo di tempo immediatamente precedente l'arrivo di un sistema frontale, quindi già in situazioni classificabili come cicloniche, si innescano condizioni locali particolarmente favorevoli all'accumulo degli inquinanti atmosferici, con calma di vento e

isotermia nei bassi strati, aggravata talvolta dal richiamo in quota di aria calda di origine mediterranea o nordafricana (avvezione calda). Questi episodi possono durare anche molte ore e quindi provocare il superamento dei livelli di legge.

d) Dipendenza dell'NO₂ dai precursori

In questa fase di analisi esplorativa può essere d'interesse valutare gli eventuali legami fra le concentrazioni degli inquinanti precursori (sostanzialmente l'NO) e quelle dell'NO₂. Infatti essendo quest'ultimo un inquinante secondario che in massima parte si forma in atmosfera al seguito di una serie di reazioni chimico-fisiche di trasformazione dell'NO, si può ipotizzare che le concentrazioni di NO costituiscano un elemento utile per individuare l'insorgere di episodi acuti.

Nelle Figure 3.1.15 e 3.1.16 sono mostrate le distribuzioni delle medie delle concentrazioni di NO nelle prime 10 ore del giorno nelle stazioni (tipo B) di Via Bassi (NOB010) e Via di Novoli (NON010) rispetto all'indicatore NO2AB. Queste grandezze medie dovrebbero in qualche modo rendere conto dei fenomeni di accumulo del precursore NO.

Si osserva come gli episodi acuti si manifestino a partire da valori relativamente bassi di questi indicatori (poco sopra i 50 µg/m³) tenuto conto del loro intervallo di variazione (si hanno casi con concentrazioni di NO che arrivano intorno ai 500 µg/m³, quindi fino a 10 volte la soglia a cui iniziano a manifestarsi gli eventi critici). In Figura 3.1.17 è invece mostrata la relazione tra l'indicatore NO2AB ed il parametro NOMB5H, cioè rispetto alla media oraria delle concentrazioni di NO delle stazioni B fra le 4 e le 5 del mattino: anche in questo caso si osserva come gli episodi critici si presentino a partire da valori molto bassi.

Questi parametri relativi alle concentrazioni del precursore NO dovrebbero permettere di individuare quelle situazioni nelle quali si sono già innescati i fenomeni di accumulo degli inquinanti e quindi il livello di fondo dell'NO è in partenza già elevato. Costituiscono cioè una parziale alternativa all'impiego dei parametri meteorologici permettendo di riconoscere alcune particolari situazioni a rischio. Gli episodi acuti si presentano però anche in corrispondenza di ridotte concentrazioni dei precursori nelle prime ore della mattina, cioè in situazioni nelle quali il livello di fondo è invece minimo e quindi l'episodio acuto si manifesta a causa di una

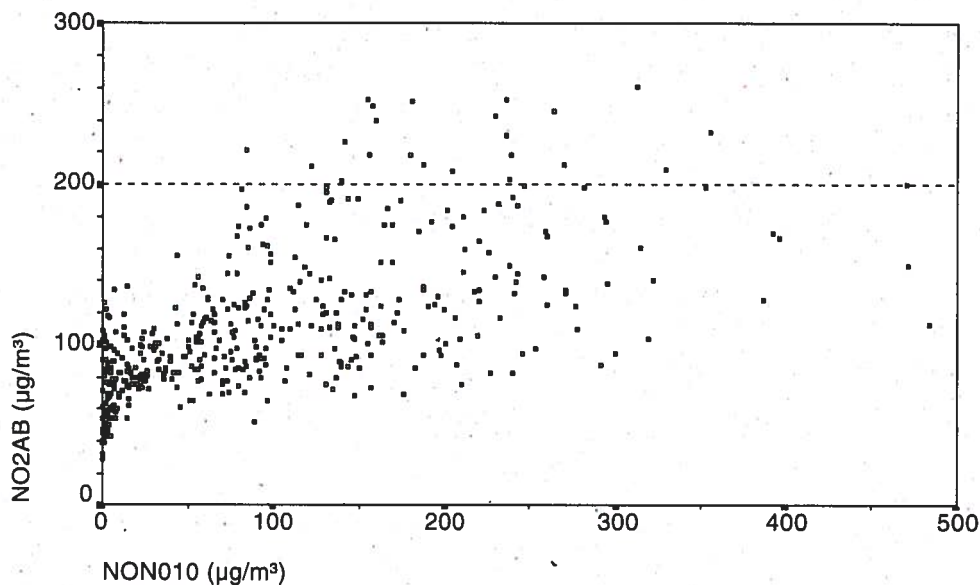


Figura 3.1.15: relazione tra NO₂AB e precursori. NON010 indica il valore medio della concentrazione di NO misurata nella stazione di Via di Novoli (B) fra le ore 0 e le ore 10 del mattino (serie dei dati 1993÷1996).

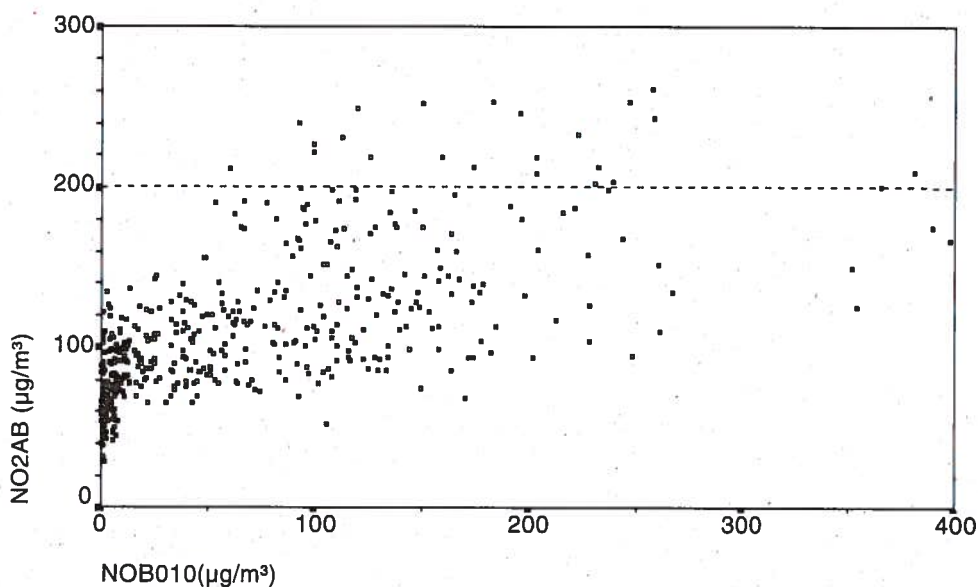


Figura 3.1.16: relazione tra NO₂AB e precursori. NOB010 indica il valore medio della concentrazione di NO misurata nella stazione di Via Bassi (B) fra le ore 0 e le ore 10 del mattino (serie dei dati 1993÷1996).

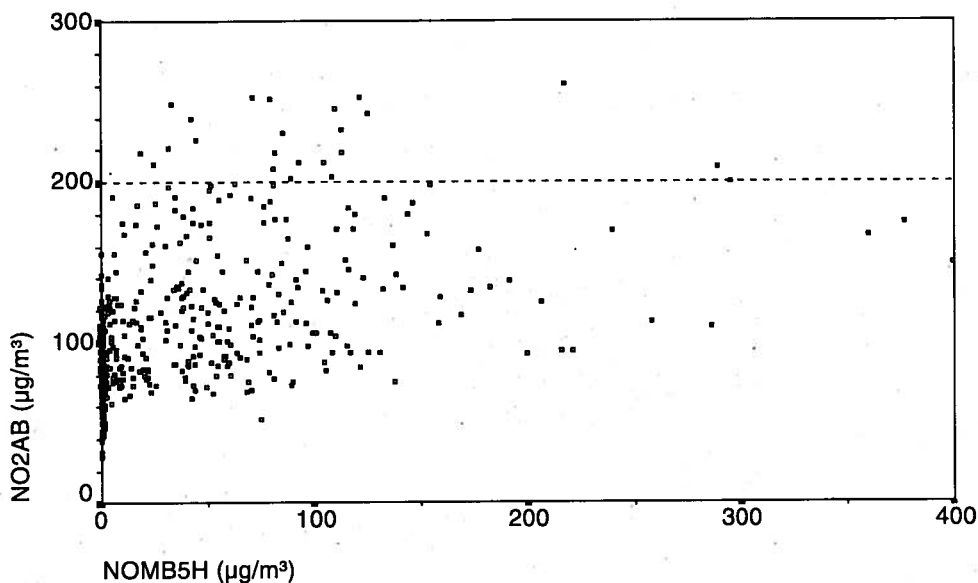


Figura 3.1.17: relazione tra NO₂AB e precursori. NOMB5H indica il valore medio delle concentrazioni di NO rilevate nelle tre stazioni di tipo B fra le ore 4 e le ore 5 del mattino (serie dei dati 1993÷1996).

situazione emissiva e meteorologica che non ha legami o dipendenze dirette con quanto accaduto precedentemente ma si sviluppa rapidamente nell'arco della mattina e del primo pomeriggio.

Si possono avere e si sono verificate situazioni nelle quali per tutta la notte e per i giorni precedenti le condizioni sono risultate estremamente favorevoli all'accumulo degli inquinanti e ciononostante l'evento critico non si è verificato a causa di un repentino mutamento di queste condizioni, ad esempio per l'ingresso sulla città di forti correnti settentrionali. Oppure si sono verificati episodi acuti a partire da concentrazioni precedenti estremamente ridotte di NO₂ e dei suoi precursori, a causa del rapido instaurarsi di condizioni critiche, per le quali anche le sole emissioni prodotte nella mattina sono state sufficienti a portare le concentrazioni di NO₂ al di sopra dei limiti di legge.

Quanto detto sopra chiarisce anche alcuni aspetti sulla dipendenza dei valori di concentrazione massima degli inquinanti atmosferici dalle concentrazioni misurate in tempi precedenti: il legame esistente fra le concentrazioni misurate in due giorni consecutivi (Figura 3.1.18) è debole e sostanzialmente prodotto dalla persistenza delle condizioni al contorno

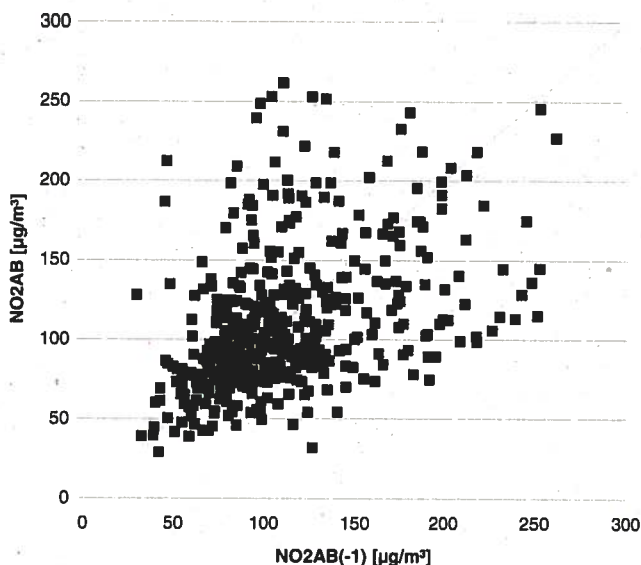


Figura 3.1.18: mappa di primo ritorno per la serie temporale dei valori di NO₂AB. La figura mostra la relazione esistente fra i valori NO₂AB di due giorni consecutivi. Ogni punto ha come coordinate il valore di un dato giorno e quello del giorno precedente [NO₂AB(-1) asse delle ascisse] (serie dei dati 1993÷1996).

(emissive e meteorologiche) che effettivamente condizionano e definiscono l'insorgere degli episodi acuti.

Al riguardo è assai significativo considerare la durata e la persistenza degli eventi critici verificatisi negli inverni qui considerati: in un solo caso gli episodi acuti si sono protratti per ben tre giorni (28, 29 e 30/12/93); per tre casi l'episodio ha avuto una durata di due giorni; quindici volte si sono verificati episodi di un solo giorno (soltanto tre di questi sono stati seguiti o preceduti da valori abbastanza elevati di NO₂AB, cioè maggiori di 180 µg/m³).

La conoscenza della situazione meteorologica e della sua evoluzione prevista appare più significativa ed utile alla comprensione dei fenomeni ed alla loro previsione rispetto al comportamento delle concentrazioni stesse nelle ore immediatamente precedenti.

Nella Figura 3.1.18 è mostrata la mappa di primo ritorno per la serie NO₂AB, (i punti hanno come coordinate sui due assi i valori NO₂AB di due giorni consecutivi). Si osserva chiaramente come le coppie di dati NO₂AB-NO₂AB(-1) mostrino una variabilità crescente al aumentare delle concentrazioni. Mentre esiste un addensamento vicino alla diagonale per concentrazioni basse, per concentrazioni elevate si nota un evidente allon-

tanamento dalla diagonale in entrambe le direzioni ad ulteriore conferma dell'assenza di un legame evidente fra le concentrazioni di giorni consecutivi, in particolare quando una di queste è elevata.

e) Osservazioni multivariate: box degli eventi critici

Riunendo insieme le osservazioni finora svolte singolarmente per ciascuna variabile è possibile ottenere una prima chiara identificazione degli episodi acuti da NO_2 .

Se si considera ogni singolo evento della serie storica definito attraverso tutte le variabili esaminate e si limitano i valori di queste entro gli intervalli che racchiudono gli episodi d'interesse, si ottengono soltanto 48 giorni-evento dei quali 22 costituiti da episodi acuti⁶. Restringendo ancora gli intervalli, ad esempio considerando solo i giorni con $\text{NOIT} > 12$, il campione viene ulteriormente ridotto fino a 35 giorni dei quali 21 rappresentano ancora eventi critici (60%); dei rimanenti 14 ben 8 corrispondono a concentrazioni NO_2AB comprese fra 180 e 200, cioè estremamente vicine al limite di legge, tenuto conto anche della precisione delle misure^{7,L}.

Nella Figura 3.1.19 sono mostrati al variare di uno dei parametri fondamentali (INV010) i 48 giorni contenuti in un box multidimensionale che racchiude tutti gli episodi acuti. Per valori di $\text{INV010} > 1.5^\circ\text{C}$ i punti corrispondenti agli episodi critici costituiscono la maggioranza degli eventi presenti nel box.

Il box è definito dai seguenti intervalli:

$\text{VV1410} < 2.2 \text{ m/s}$	$\text{VV1510} < 2.2 \text{ m/s}$	$\text{TRM8H} > 850$	$\text{PIO024} = 0 \text{ mm}$
$(\text{PIO010} = 0)$	$\text{INV010} > 0^\circ\text{C}$	$\text{INV10H} > -1^\circ\text{C}$	$\text{NOIPGP} > 0$
$\text{T14MIN} < 12.5^\circ\text{C}$	$\text{NOB010} > 50 \mu\text{g/m}^3$	$\text{NON010} > 50 \mu\text{g/m}^3$	

Un giorno caratterizzato da valori di questi parametri interni al box ha una elevata possibilità di costituire un episodio acuto.

Le variabili impiegate nel definire il box sono state volutamente scelte fra quelle disponibili al momento della previsione, quindi permettono già di determinare in anticipo (di 3 ÷ 6 ore) se un dato giorno può portare al

6. Fra questi è assente l'episodio del 17/2/95 per il quale non sono disponibili i dati di tutti i parametri.

7. Anche per una rete di monitoraggio controllata, verificata ed efficiente come quella della Provincia di Firenze, difficilmente l'indeterminazione sui valori delle concentrazioni dovuta agli errori di misura può essere considerata inferiore al 10% (si veda anche la referenza bibliografica L).

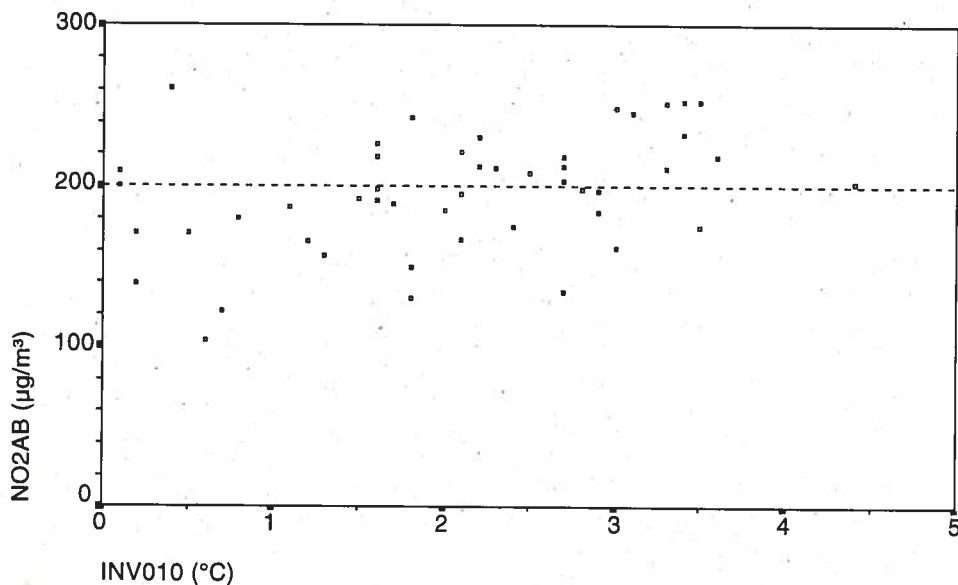


Figura 3.1.19: box degli eventi critici. Rispetto alla variabile INV010 sono mostrati i 48 eventi racchiusi all'interno del box multidimensionale che racchiude tutti gli episodi acuti (serie dei dati 1993 ÷ 1996).

superamento dei limiti di legge. Giorni caratterizzati da valori dei parametri all'esterno del box sono invece da considerare "storicamente" non a rischio.

f) Conclusioni

Appare a questo punto utile riassumere gli elementi qualitativi ottenuti da questa prima analisi che permettono già di individuare la direzione nella quale occorre muoversi per affrontare il problema della previsione degli episodi acuti.

1. La misura di alcuni parametri meteorologici e ambientali permette di descrivere in modo convincente e coerente con la fisica dei fenomeni il presentarsi di episodi acuti.
2. I parametri utili all'individuazione degli episodi d'interesse sono numerosi e le relazioni stabilite non possono avere carattere deterministico, ma a causa delle ampie variabilità delle grandezze in gioco appare necessario l'impiego di tecniche statistiche e probabilistiche.

3. La previsione per il giorno stesso in linea di principio può essere basata sui valori dei parametri più significativi misurati dalla rete di monitoraggio, ma richiede sempre la conoscenza dell'evoluzione prevista delle condizioni meteorologiche. La previsione per tempi più lunghi (48÷72 ore) può essere eseguita soltanto impiegando previsioni meteorologiche.

3.1.2 Variazione delle condizioni meteorologiche e del quadro emissivo

In questo paragrafo sono presentati alcuni raffronti statistici relativi alle condizioni meteorologiche che hanno caratterizzato i tre inverni oggetto del presente lavoro, con particolare riferimento alle variabili più rilevanti per il verificarsi degli episodi acuti di inquinamento.

Tali raffronti consentono di individuare i periodi potenzialmente più critici e quindi anche di offrire ulteriori elementi di giudizio rispetto all'andamento dell'inquinamento atmosferico nei periodi invernali considerati, come già illustrato al paragrafo 3.1.1, lettera a).

In particolare si sono considerati i seguenti parametri: V14024 e D14024, V15024 e D15024, NOIT e INVT, PIO024, SIN. Sono state realizzate alcune tabelle riepilogative, suddivise nei tre inverni 1993-94, 1994-95 e 1995-96, che consentono di evidenziare le principali differenze e gli andamenti tipici.

Per quanto riguarda il vento presso la stazione Ximeniano, in Tabella 3.1.VI è riportata la distribuzione di frequenza congiunta di V14024 e D14024.

Tabella 3.1.VI: distribuzione della velocità media del vento rispetto alla direzione prevalente di provenienza, misurate alla stazione Ximeniano dalle 0 alle 24 (ND: non disponibile).

periodo invernale	D14024	V14024 (m/s)				ND	Totale
		$v < 1$	$1 \leq v < 2$	$2 \leq v < 3$	$v \geq 3$		
1993-94	N	0.2%	0.9%	2.2%	2.2%	0.0%	5.5%
	NE	0.0%	1.3%	1.5%	3.3%	0.0%	6.2%
	E	0.7%	1.1%	0.2%	0.4%	0.0%	2.4%
	SE	2.6%	3.5%	0.0%	0.0%	0.0%	6.2%
	S	0.2%	1.1%	0.4%	0.0%	0.0%	1.8%
	SW	0.7%	2.0%	1.1%	1.1%	0.0%	4.8%
	W	0.2%	3.1%	2.0%	0.7%	0.0%	5.9%
	NW	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%	0.0%	0.4%
	Totale	4.6%	13.2%	7.5%	7.9%	0.0%	33.3%
1994-95	N	0.0%	0.4%	1.5%	1.5%	0.0%	3.5%
	NE	0.0%	1.1%	2.6%	4.0%	0.0%	7.7%
	E	0.0%	2.9%	0.7%	0.0%	0.0%	3.5%
	SE	0.7%	7.0%	1.1%	0.0%	0.0%	8.8%
	S	0.0%	0.4%	0.7%	0.2%	0.0%	1.3%
	SW	0.0%	0.2%	1.1%	0.7%	0.0%	2.0%
	W	0.2%	1.3%	1.5%	0.9%	0.0%	4.0%
	ND	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.4%	2.4%
	Totale	0.9%	13.4%	9.3%	7.3%	2.4%	33.3%
1995-96	N	0.0%	0.2%	0.9%	1.8%	0.0%	2.9%
	NE	0.0%	1.8%	6.4%	6.6%	0.0%	14.8%
	E	0.2%	2.9%	1.3%	0.0%	0.0%	4.4%
	SE	0.0%	5.5%	0.7%	0.0%	0.0%	6.2%
	S	0.0%	0.7%	0.0%	0.7%	0.0%	1.3%
	SW	0.0%	0.4%	1.3%	0.2%	0.0%	2.0%
	W	0.0%	1.1%	0.2%	0.7%	0.0%	2.0%
	Totale	0.2%	12.6%	10.8%	9.9%	0.0%	33.5%
Totale complessivo		5.7%	39.2%	27.5%	25.1%	2.4%	100.0%

Dalla Tabella 3.1.VI si può notare come gli inverni 1993-94 e 1994-95 si differenzino poco l'uno dall'altro (a parte una maggiore frequenza di venti deboli, $V14024 < 1$ m/s, nel primo), mentre l'inverno 1995-96 presenta caratteristiche assai diverse, con venti più intensi (è maggiormente frequente la classe $V14024 \geq 3$ m/s: 9.9%), con una netta prevalenza della componente da NE (che appare circa nel doppio dei casi rispetto agli altri due inverni: 14.8%), e meno frequentemente da SW e da W (che appaiono

in circa la metà dei giorni: 4.0% complessivamente).

Queste osservazioni sono per lo più confermate nella Tabella 3.1.VII, dove sono presentati i dati relativi alla stazione Monte Morello.

Considerando quindi il vento, l'inverno 1995-96 presenta caratteristiche più dispersive rispetto agli altri due.

Tabella 3.1.VII: distribuzione della velocità media del vento rispetto alla direzione prevalente di provenienza, misurate alla stazione Monte Morello dalle 0 alle 24 (ND: non disponibile).

periodo invernale	D15024	V15024 (m/s)					Totale
		v < 1	1 ≤ v < 2	2 ≤ v < 3	v ≥ 3	ND	
1993-94	N	0.4%	0.4%	0.7%	4.2%	0.0%	5.7%
	NE	0.0%	0.4%	0.9%	5.3%	0.0%	6.6%
	E	0.9%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	1.3%
	SE	0.7%	1.1%	0.7%	0.7%	0.0%	3.1%
	S	2.0%	4.8%	1.8%	2.2%	0.0%	10.8%
	SW	0.7%	2.6%	0.4%	0.4%	0.0%	4.2%
	W	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
	NW	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
	ND	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	1.1%
	Totale	4.8%	10.1%	4.6%	12.8%	0.9%	33.3%
1994-95	N	0.7%	0.4%	1.1%	5.3%	0.0%	7.5%
	NE	0.2%	0.7%	1.5%	4.2%	0.0%	6.6%
	E	0.4%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%
	SE	0.2%	0.7%	0.7%	1.1%	0.0%	2.6%
	S	2.9%	3.1%	1.8%	1.8%	0.0%	9.5%
	SW	0.4%	1.1%	0.7%	0.4%	0.0%	2.6%
	NW	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%
	ND	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.5%	3.5%
	Totale	4.8%	6.2%	5.7%	13.0%	3.5%	33.3%
1995-96	N	0.7%	0.0%	0.4%	1.8%	0.0%	2.9%
	NE	0.0%	1.5%	1.8%	11.7%	0.0%	15.0%
	E	0.2%	1.8%	0.4%	0.2%	0.0%	2.6%
	SE	0.4%	1.5%	1.1%	2.2%	0.0%	5.3%
	S	0.4%	2.6%	0.7%	2.0%	0.0%	5.7%
	SW	0.0%	1.1%	0.2%	0.0%	0.0%	1.3%
	NW	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	ND	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%	0.7%
	Totale	1.8%	8.6%	4.6%	17.8%	0.7%	33.5%
Totale complessivo		11.5%	24.9%	15.0%	43.6%	5.1%	100.0%

Altro parametro rilevante è l'inversione termica: in particolare sono stati considerati i parametri INVT e NOIT, ovvero la media della differenza di temperatura tra Morello e Ximeniano e il numero totale di ore di inversione termica, tra le 13 del giorno precedente e le 10 del giorno corrente (Tabelle 3.1.VIII e 3.1.IX).

In Tabella 3.1.VIII è riassunta la distribuzione percentuale del numero di ore di inversione termica in ciascuno dei tre inverni. Si nota come il 1994-95 sia quello che presenta la minor frequenza di giorni senza inversione (35.8% per NOIT=0) e la maggior frequenza di giorni con elevato numero di ore di inversione (19.9% per NOIT>12). Ciò è confermato dalla Tabella 3.1.IX, dove sono presentate le medie della differenza di temperatura tra Morello e Ximeniano (INVT), suddivise per il numero di ore di inversione (NOIT).

Tabella 3.1.VIII: distribuzione del numero totale di ore di inversione termica (ND: non disponibile).

periodo invernale	NOIT (numero ore)					Totale per periodo
	n = 0	0 < n ≤ 6	6 < n ≤ 12	n > 12	ND	
1993-94	46.4%	19.2%	23.8%	10.6%	0.0%	100.0%
1994-95	35.8%	23.8%	17.2%	19.9%	3.3%	100.0%
1995-96	39.5%	25.7%	19.7%	15.1%	0.0%	100.0%
Totale	40.5%	22.9%	20.3%	15.2%	1.1%	100.0%

Tabella 3.1.IX: valori medi della differenza media della temperatura (°C) tra Morello e Ximeniano tra le 12 del giorno precedente e le 10 del giorno corrente (INVT), suddivise per il numero totale di ore di inversione termica (NOIT).

periodo invernale	NOIT (numero ore)				Media per periodo
	n = 0	0 < n ≤ 6	6 < n ≤ 12	n > 12	
1993-94	-2.28	-1.48	-0.29	+1.17	-1.29
1994-95	-2.23	-1.55	-0.26	+0.90	-1.07
1995-96	-2.33	-1.49	-0.44	+0.93	-1.25
Media totale	-2.28	-1.51	-0.33	+0.97	-1.20

In particolare in Tabella 3.1.IX si può notare come l'inverno 1994-95 sia risultato quello con il valore medio complessivo della differenza di temperatura più elevato (-1.07°C), anche se con il valore medio più basso nella fascia di maggior durata dell'inversione ($+0.90^{\circ}\text{C}$ per $\text{NOIT}>12$), cioè nei casi più rilevanti per il verificarsi degli episodi acuti.

Ciò, contestualmente con l'analisi delle Tabelle 3.1.VI e 3.1.VII sui venti nonché della Tabella 3.1.VIII sul numero di ore di inversione termica, sembra suggerire la conclusione che l'inverno 1994-95 sia stato quello mediamente più critico relativamente alla dispersione degli inquinanti atmosferici, mentre l'inverno 1995-96 quello tendenzialmente più dispersivo.

Tali considerazioni sono avvalorate dall'analisi delle precipitazioni nei tre inverni, riassunte nelle Tabelle 3.1.X e 3.1.XI.

Tabella 3.1.X: distribuzione dei giorni per fasce di precipitazione cumulata nelle 24 ore, rilevata alla stazione Ximeniano (ND: non disponibile).

periodo invernale	PIO024 (mm)				Totale per periodo
	$p = 0$	$0.2 \leq p \leq 1$	$p > 1$	ND	
1993-94	63.6%	13.2%	23.2%	0.0%	100.0%
1994-95	68.2%	6.0%	25.2%	0.7%	100.0%
1995-96	69.1%	9.2%	21.7%	0.0%	100.0%
Totale	67.0%	9.5%	23.3%	0.2%	100.0%

In Tabella 3.1.X si nota come l'inverno 1993-94 sia risultato quello con più giorni di pioggia ($13.2+23.2=36.4\%$), mentre i due inverni successivi presentano percentuali analoghe (si veda la colonna $\text{PIO024}=0$); quello 1994-95 ha presentato una leggera prevalenza di giorni con pioggia più sostenuta (25.2% di giorni con $\text{PIO024}>1$ mm).

La Tabella 3.1.XI mostra come l'inverno 1993-94, pur in presenza di un maggior numero di giorni piovosi, sia stato caratterizzato da una minore quantità complessiva di precipitazioni (333.4 mm). I due inverni successivi, pur con la stessa frequenza di giorni piovosi, si differenziano per la quantità di precipitazione, che è risultata maggiore nel 1995-96 (388.4 mm).

Quindi anche rispetto alla pioggia, e limitatamente agli effetti sull' NO_2 , l'inverno 1994-95 appare quello più critico, mentre quello 1995-96 quello più dispersivo.

Tabella 3.1.XI: valore cumulato delle precipitazioni giornaliere rilevate alla stazione Ximeniano, suddivise per intervalli di intensità.

periodo invernale	PIO024 (mm)			Totale per periodo
	p = 0	0.2 ≤ p ≤ 1	p > 1	
1993-94	0.0	8.6	324.8	333.4
1994-95	0.0	3.2	342.2	345.4
1995-96	0.0	6.4	382.0	388.4
Totale	0.0	18.2	1049.0	1067.2

Infine in Tabella 3.1.XII è riassunta la distribuzione tra le diverse categorie sinottiche, verificatesi in ciascun giorno dei tre inverni.

Ricordato che la classificazione di ciascuna giornata secondo categorie sinottiche è un'informazione che in certo qual modo assorbe in sé altri parametri (quali vento e inversione termica), si nota come l'inverno 1995-96 sia stato caratterizzato da una netta prevalenza di giorni con categoria sinottica di carattere nettamente dispersivo, così come individuate nel paragrafo 3.1.1 (ANE 19.1%, BS 23.7%, BW 17.8%: il totale è pari al 60.6%, contro il 33.0% e il 32.5% dei due inverni precedenti). I due inverni 1993-94 e 1994-95 appaiono invece pressoché equivalenti in termini di frequenze di apparizione delle diverse categorie. Tale conclusione è confermata anche dalle percentuali riferite alle sole tre categorie AW (la più critica per la qualità dell'aria), ANE e BS (le più dispersive)⁸.

Tabella 3.1.XII: distribuzione delle categorie sinottiche.

periodo invernale	SIN								Totale per periodo
	A	AN	ANE	AW	B	BS	BNW	BW	
1993-94	6.0%	4.0%	4.6%	25.8%	12.6%	13.2%	18.5%	15.2%	100.0%
1994-95	4.0%	6.6%	5.3%	24.5%	13.9%	14.6%	18.5%	12.6%	100.0%
1995-96	5.9%	6.6%	19.1%	7.2%	11.8%	23.7%	7.9%	17.8%	100.0%
Totale	5.3%	5.7%	9.7%	19.2%	12.8%	17.2%	15.0%	15.2%	100.0%

Tutte queste considerazioni portano alla conclusione che l'inverno con condizioni più critiche per l'inquinamento atmosferico appare il 1994-95, mentre il meno critico il 1995-96. Ciò può in parte dare conto dell'andamento dell'NO₂ rappresentato in Tabella 3.1.II del paragrafo 3.1.1, in cui l'inverno 1994-95 è risultato quello con il maggior numero di giorni di

8. Si veda anche la Tabella 3.1.V.

attenzione dovuti a questo inquinante (10), contro i 6 del 1993-94 e i 7 del 1995-96. Ciò si è verificato nonostante il consistente numero di giorni in cui è stato adottato il provvedimento di limitazione della circolazione veicolare (24, di cui 20 programmati nei giorni di lunedì e giovedì). D'altra parte, tenuto conto che nel frattempo è cambiata la strategia dell'Amministrazione comunale di Firenze (con provvedimenti assunti in base alle previsioni delle condizioni meteo potenzialmente critiche), ciò spiega in parte come mai durante l'inverno 1995-96 tale provvedimento è stato adottato solo in 5 giorni (si veda il paragrafo 5.2).

Per confermare tali conclusioni, si possono considerare i giorni potenzialmente critici (60), come individuati tramite il box multidimensionale definito al paragrafo 3.1.1 lettera e):

VV1410<2.2 m/s VV1510<2.2 m/s TRM8H>850 v/h PIO010=0 mm
INV010>0 °C INV10H>-1 °C NOIPG>0 T14MIN<12.5°C

dove si è volutamente escluso l'uso dei parametri riferiti all'NO con l'obiettivo di valutare la sola influenza delle condizioni meteorologiche.

La distribuzione dei valori dell'indicatore NO2AB nei giorni così individuati è riassunta in Tabella 3.1.XIII, dove si nota chiaramente come l'inverno 1994-95 sia risultato quello con più giorni potenzialmente critici: 25 (ovvero il 42% dei casi nel box), di cui 7 caratterizzati da $\text{NO2AB} \geq 220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ovvero il 64% dei casi in questo intervallo). L'inverno 1995-96 è invece quello che presenta il minor numero di eventi potenzialmente critici: 15 (ovvero il 25% dei casi nel box), di cui 2 caratterizzati da $\text{NO2AB} \geq 220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ovvero il 18% dei casi in questo intervallo).

Tabella 3.1.XIII: distribuzione dei giorni potenzialmente critici, individuati all'interno del box multidimensionale (solo parametri meteo).

periodo invernale	NO2AB ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Totale per periodo
	$\text{NO}_2 < 100$	$100 \leq \text{NO}_2 < 180$	$180 \leq \text{NO}_2 < 220$	$\text{NO}_2 \geq 220$	
1993-94	2	9	7	2	20
1994-95	1	10	7	7	25
1995-96	0	4	9	2	15
Totale	3	23	23	11	60

La Tabella 3.1.XIV, che riassume la distribuzione del parametro NO₂SUP (numero dei superamenti giornalieri della soglia di attenzione per l'NO₂ nelle stazioni A e B) all'interno del box sopracitato, conferma queste considerazioni. Infatti l'inverno 1994-95 è risultato quello con più giorni in cui si sono verificati superamenti della soglia (12+11=23), quello con il maggior numero di superamenti orari (88, ovvero il 50% del totale) e con il maggior numero di giorni con elevato numero di superamenti orari (11 nella colonna NO₂SUP \geq 3, ovvero il 44% dei casi in questo intervallo). L'inverno 1995-96 è risultato invece quello con il minor numero di giorni in cui si sono verificati superamenti della soglia (5+7=12), seppur con un numero di superamenti orari appena superiore a quelli del 1993-94 (45, contro 44). Peraltro il 1993-94 si è caratterizzato per un maggior numero di giorni con pochi superamenti orari (9 nella colonna $1 \leq \text{NO}_2\text{SUP} < 3$) rispetto al 1995-96 (5).

Tabella 3.1.XIV: distribuzione dei superamenti della soglia di attenzione per l'NO₂ (stazioni A e B).

periodo invernale		NO ₂ SUP			Totale per periodo
		n = 0	$1 \leq n < 3$	$n \geq 3$	
1993-94	numero di giorni	133	9	7	149
	superamenti orari	0	13	31	44
1994-95	numero di giorni	128	12	11	151
	superamenti orari	0	17	71	88
1995-96	numero di giorni	140	5	7	152
	superamenti orari	0	8	37	45
Totale	numero di giorni	401	26	25	452
	superamenti orari	0	38	139	177

Naturalmente la variazione delle condizioni meteo spiega solo in parte l'andamento delle concentrazioni degli inquinanti monitorati. Occorre infatti considerare le eventuali variazioni nel quadro emissivo, che può essere mutato nel tempo per quantità e qualità. Nel caso del CO la drastica e progressiva diminuzione degli episodi acuti e dei superamenti delle soglie di legge (anche nell'inverno potenzialmente più critico, 1994-95: si veda la Tabella 3.1.II) può essere spiegata solo considerando che:

1. tale sostanza è emessa quasi esclusivamente dal traffico veicolare alimentato a benzina (il cui contributo in area urbana è stimato pari al 94% delle emissioni totali da traffico^M);
2. dal 1° gennaio 1993 è vigente l'obbligo di vendita di autoveicoli dotati di dispositivo di abbattimento delle emissioni (la cosiddetta "marmitta catalitica")^A: non è nota la percentuale esatta dei veicoli catalizzati circolanti, tuttavia il tasso stimato è tra il 30 e il 40%^{N,O};
3. dalla primavera 1995 il Comune di Firenze ha adottato, con successive Ordinanze del Sindaco (nn° 197/95, 8635/95, 645/96, 2053/97), il divieto permanente di circolazione per gli autoveicoli non dotati di catalizzatore (con massa complessiva a pieno carico non superiore a 35 q) e che non abbiano superato positivamente un controllo annuale delle emissioni, secondo i limiti e le modalità stabilite dal Nuovo Codice della Strada^P (ed in particolare dall'Appendice VIII e X delle norme di attuazione^Q)^{9,R}.

L'analisi qui illustrata conferma, semmai, che questi provvedimenti strutturali hanno effettivamente prodotto benefici tangibili e durevoli per quanto riguarda il CO, tali da "neutralizzare" gli effetti negativi delle condizioni meteorologiche sfavorevoli ed il contestuale aumento del parco circolante.

Per quanto concerne l'NO₂ si deve concludere che tali provvedimenti non hanno ancora dispiegato gli effetti sperati, nonostante che la progressiva catalizzazione del parco circolante incida anche su tale inquinante (l'abbattimento degli NO_x operato dal catalizzatore è intorno al 90%^S). Ciò può essere imputato con grande probabilità a due fattori principali:

1. i veicoli per i quali non è ancora previsto l'obbligo di dispositivi di abbattimento delle emissioni (veicoli a trazione diesel e a gpl, motocicli) contribuiscono in misura rilevante alle emissioni di ossidi di azoto (in area urbana il loro contributo è stimato intorno al 50% delle sole emissioni da traffico);
2. in inverno le emissioni di ossidi di azoto provengono in misura sensibile anche da altre fonti: a Firenze si tratta principalmente del riscaldamento.

9. Il decremento delle emissioni di CO a seguito delle operazioni di messa a punto della carburazione imposta dalle Ordinanze del Sindaco è risultato superiore al 60% (si veda riferimento bibliografico R).

mento degli edifici (si tratterebbe di un contributo compreso tra il 20 e il 30% del totale^D).

Si deve perciò ritenere che nei tre anni considerati il quadro emissivo abbia subito solo una modesta riduzione: assumendo che le emissioni di ossidi di azoto dalle sorgenti non di traffico si siano mantenute costanti, che il numero di veicoli circolanti sia rimasto pressoché invariato e adottando i valori più ottimistici delle stime su ricordate, le emissioni di ossidi di azoto nel 1996 si sarebbero ridotte solo del 14% circa rispetto al 1992. In tale situazione non meraviglia che condizioni meteo sfavorevoli possano condurre ancora ad un numero sensibile di superamenti delle soglie di legge per l'NO₂.

3.2 Analisi statistica preliminare

Lo studio delle distribuzioni statistiche chiarisce le difficoltà insite nella previsione degli episodi acuti: il loro verificarsi è da considerare un evento eccezionale e quindi la loro previsione richiede tecniche particolari. Non è perciò sufficiente impiegare strumenti e metodi che forniscano previsioni mediamente corrette, ovvero con ottimi indici statistici medi: è necessario predisporre strumenti che ottengano il massimo rendimento sulle code delle distribuzioni.

Molte delle considerazioni svolte nel precedente paragrafo possono essere quantificate impiegando test statistici confermativi^{10,T,U}. Si osserva infatti che raggruppando a parte gli eventi acuti rispetto al resto della popolazione i valori delle grandezze che caratterizzano i primi si discostano in modo statisticamente significativo da quelli della popolazione rimanente. Suddividendo in classi i valori delle variabili si possono costruire delle tabelle di contingenza che forniscono indicazioni probabilistiche sul verificarsi di episodi acuti. Infine l'analisi di correlazione, di autocorrelazione e di correlazione parziale può essere impiegata, oltre che per la conferma degli elementi emersi nel paragrafo 3.1, anche per mettere in luce e quantificare l'apporto delle variabili più significative e la loro interdipendenza nell'individuare gli eventi d'interesse.

10. Per la terminologia, le definizioni ed il significato degli strumenti statistici impiegati in questo paragrafo si rimanda ai riferimenti bibliografici T ed U.

3.2.1 Distribuzioni statistiche e test

Nelle Figure 3.2.1 e 3.2.2 sono mostrate le distribuzioni statistiche complessive degli indicatori NO₂AB e COAC, insieme ai loro fit con distribuzioni normali. Nella Tabella 3.2.I sono riepilogate le statistiche descrittive delle due popolazioni campionarie.

Tabella 3.2.I: statistiche descrittive del campione.

statistica / indicatore	NO ₂ AB ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	COAC (mg/m^3)
media (μ)	112	9.1
errore std	2.1	0.14
varianza	1978	9.3
deviazione std (s)	44.5	3.1
mediana	102	9.0
minimo	29	2.7
massimo	261	21.6
skewness	1.04	0.81
curtosi	0.23	1.62
n° osservazioni	452	454
intervallo di confidenza per la media 95%	107.7 - 115.9	8.7 - 9.3

La distribuzione di NO₂AB risulta asimmetrica a destra (skewness positiva) e leggermente leptocurtica (curtosi positiva, cioè valori più addensati e code più estese rispetto alla normale), mentre quella di COAC è meno asimmetrica e più leptocurtica. Per entrambi gli indicatori risulta invece evidente lo scostamento sulle code dai fit delle distribuzioni normali (valori estremi). In effetti l'adattamento delle distribuzioni normali è sufficientemente accettabile per COAC mentre non lo è per NO₂AB per il quale appare più indicato un fit con la distribuzione lognormale. Infatti il test di adattamento di Kolmogorov-Smirnov rispetto alla distribuzione normale produce un livello di significato praticamente nullo per NO₂AB, contro un valore di 0.20 per COAC, mentre l'adattamento rispet-

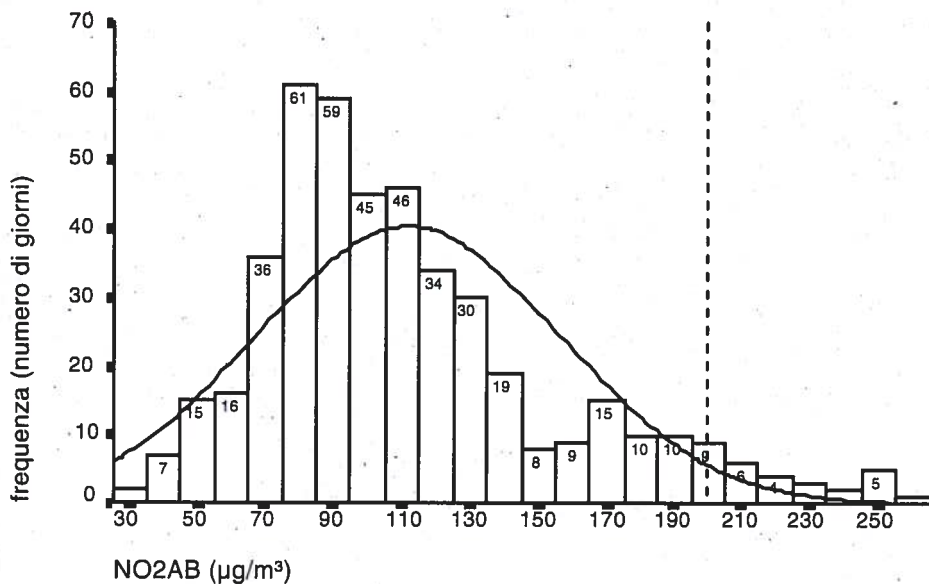


Figura 3.2.1: distribuzione di frequenza e relativo fit con distribuzione normale (di media $\mu=112$ e deviazione standard $\sigma=44.5$) per il campione complessivo (1993÷1996) dei dati NO2AB.

to ad una distribuzione lognormale per NO2AB è evidente portando ad un livello di significato di 0.57 (in questo caso l'adattamento è anche confermato dal più stringente test K-S modificato Lilliefors che produce un livello di significato maggiore di 0.20).

La distribuzione di NO2AB appare addirittura bimodale per la presenza nella coda di destra (valori elevati) di un secondo debole ma evidente picco di frequenza: questo fa supporre che la distribuzione globale sia in realtà il prodotto della sovrapposizione di due distinte distribuzioni campionarie relative a situazioni o condizioni diverse. Ciò appare in accordo qualitativo con i risultati ottenuti nel paragrafo precedente: i valori elevati di NO2AB sono infatti originati da particolari condizioni e non possono essere considerati una semplice fluttuazione statistica. Considerazioni analoghe non appaiono evidenti per la distribuzione di COAC, per i motivi illustrati al paragrafo 3.1.1 lettera a).

L'analisi svolta precedentemente ha indicato nelle condizioni emissive, grossolanamente schematizzate e distinte attraverso una semplice classificazione dei giorni (feriali, festivi e prefestivi), un elemento caratterizzante la probabilità degli eventi acuti d'inquinamento; analogamente si è anche

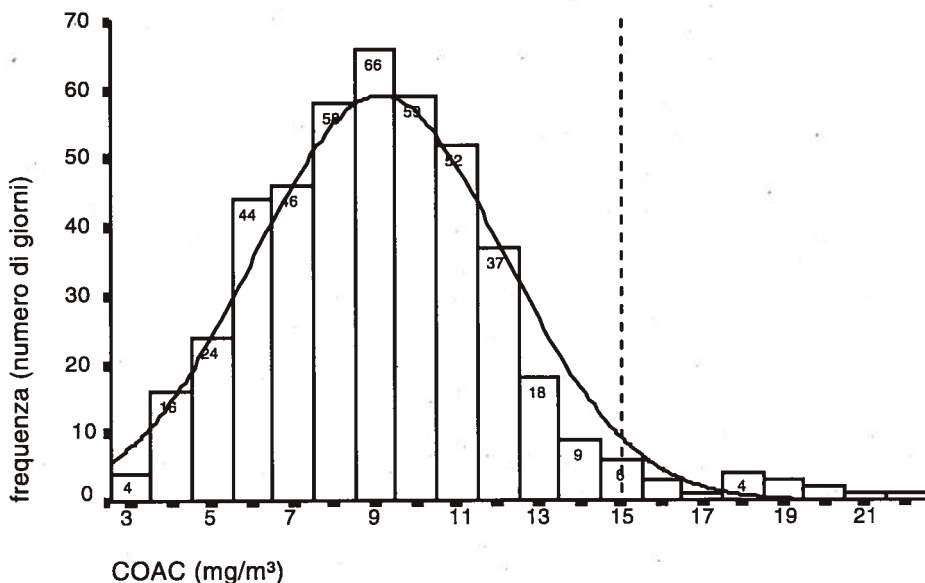


Figura 3.2.2: distribuzione di frequenza e relativo fit con distribuzione normale (di media $\mu=9.1$ e deviazione standard $\sigma=3.1$) per il campione complessivo (1993÷1996) dei dati COAC.

evidenziata l'importanza delle condizioni sinottiche generali (Tabella 3.1.V).

Con lo scopo di chiarire l'importanza di questi due elementi e valutarne i limiti in termini previsionali, nel seguito viene analizzato in dettaglio il comportamento degli indicatori NO₂AB e COAC rispetto a queste variabili categorizzate a priori.

a) Tipo di giorno

Nella Figura 3.2.3 sono sintetizzate mediante diagrammi tipo boxplot¹¹ le distribuzioni dei valori NO₂AB nelle tre categorie relative alle tipologie emissive giornaliere. Il grafico mostra chiaramente come gli eventi critici

11. Nei grafici boxplot sono mostrati: la mediana (linea più spessa interna al box), il 25° e il 75° percentile che delimitano il box (che quindi rappresenta l'intervallo al cui interno è presente il 50% dei casi); i limiti esterni (whiskers) che corrispondono al più piccolo ed al più grande valore campionario non outliers, cioè con distanza dal 25° e dal 75° percentile minore di 1.5 volte la lunghezza del box. Infine gli outliers suddivisi a seconda della loro distanza dal 25° e dal 75° percentile (sono indicati con l'asterisco quelli con distanza maggiore di 3 volte la lunghezza del box, mentre gli altri sono rappresentati dai cerchi).

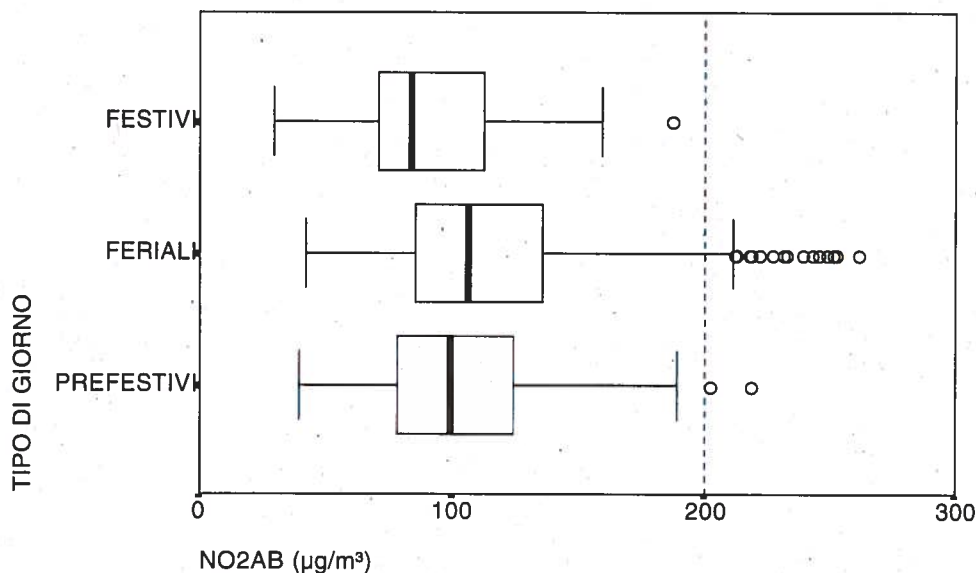


Figura 3.2.3: grafico boxplot per la variabile NO₂AB e le classi di giorni festivi, feriali e prefestivi. La sola classe dei feriali ha valori non outliers superiori ai 200 µg/m³. Per le altre due classi valori sopra al livello di attenzione risultano veramente eccezionali (per la descrizione dei grafici boxplot si fa riferimento alla nota 11)

risultino “outliers” delle distribuzioni; per la sola classe dei feriali valori non outliers si trovano oltre il livello di 200 µg/m³, mentre nelle altre categorie valori NO₂AB superiori alla soglia di legge devono essere veramente considerati eccezionali.

Le distribuzioni di frequenza dei valori NO₂AB nelle singole classi sono mostrate in Appendice 4 ed appaiono simili di forma, asimmetriche a destra, e sufficientemente assimilabili a delle distribuzioni normali per le classi dei festivi e dei prefestivi (test Kolmogorov-Smirnov, livello di significato pari a 0.12 e 0.25 rispettivamente), mentre per tutte le categorie, ma in particolare per quella dei feriali, si evidenzia ancora maggiormente l'aspetto bimodale.

I valori medi dell'indicatore NO₂AB nelle classi dei giorni feriali e dei festivi risultano fra loro statisticamente distinti. Dal punto di vista statistico è cioè confermata la differenziazione fra i giorni feriali ed i festivi in termini dei valori NO₂AB e delle loro distribuzioni, mentre tale diversificazione non si riscontra fra i feriali ed i prefestivi e fra prefestivi e festivi. Questi risultati sono stati ottenuti con test ANOVA (livello di significato per la statistica $F < 0.001$), valutando gli intervalli di confidenza delle me-

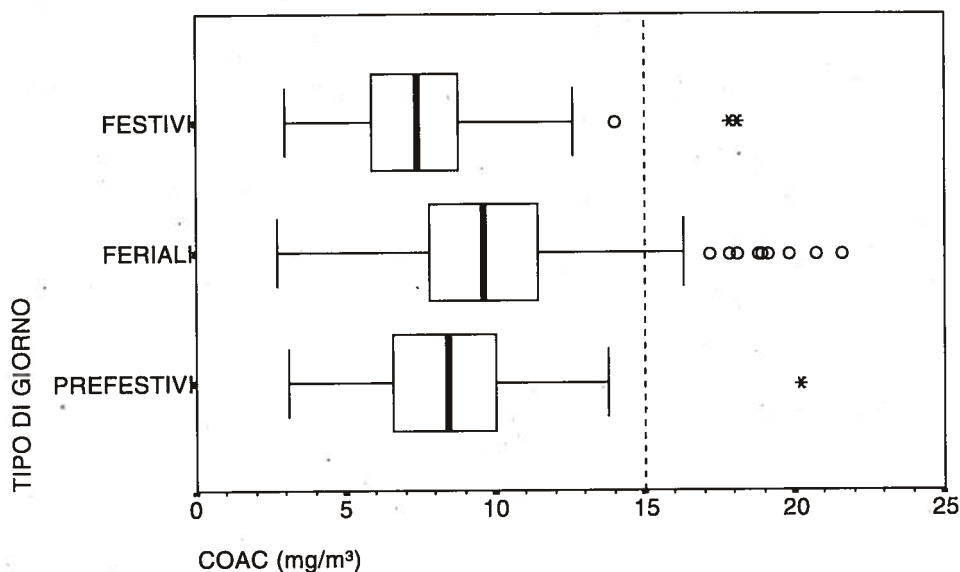


Figura 3.2.4: grafico boxplot per la variabile COAC e le classi di giorni festivi, feriali e prefestivi. Anche in questo caso, come per NO₂AB, la sola classe dei feriali ha valori non outliers superiori al livello di attenzione (15 mg/m³).

die secondo i metodi Tukey-HSD e Scheffé (livello di significato del 5%) e sono stati confermati indirettamente dal test non-parametrico di Kruskal-Wallis.

Per quanto riguarda le distribuzioni dell'indicatore COAC i cui boxplot sono mostrati in Figura 3.2.4, il test di Kolmogorov-Smirnov di adattamento rispetto a distribuzioni normali fornisce livelli di significato accettabili (0.20 per i festivi, 0.26 per i feriali e 0.57 per i prefestivi); le distribuzioni sono poi da considerare omoscedastiche (varianze simili, livello di significato pari a 0.38 per il test di Levene^V sull'omogeneità delle varianze).

La distinzione che si ottiene per i valori medi dei gruppi attraverso il test ANOVA ed i confronti multipli delle medie (confermata nuovamente dal test non parametrico di Kruskal-Wallis) indica in questo caso diversificazione della classe dei feriali rispetto ad entrambe le altre classi.

In Tabella 3.2.II sono riportate le statistiche descrittive delle sottopopolazioni per entrambi gli indicatori.

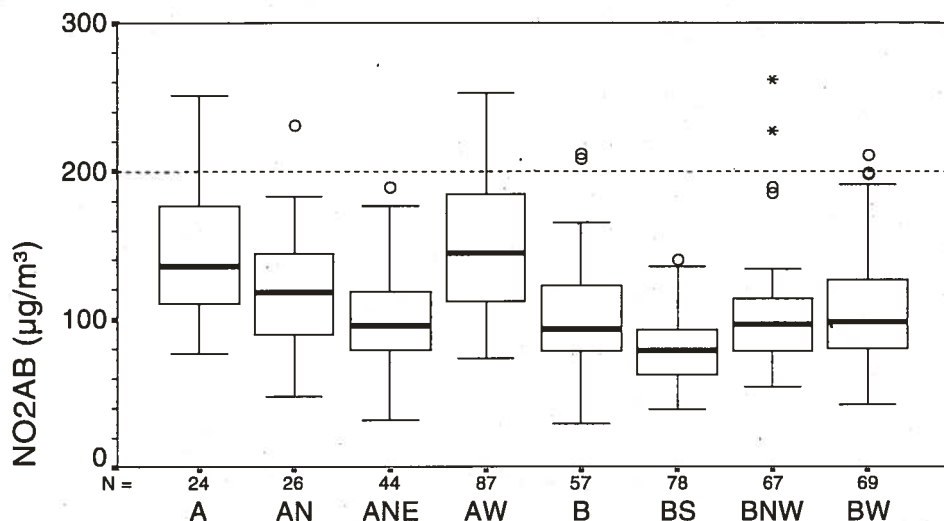
Tabella 3.2.II: statistiche per classi giornaliere.

indicatori	NO2AB			COAC		
statistiche/classi	festivi	prefestivi	feriali	festivi	prefestivi	feriali
media	92.0	105.9	118.0	7.6	8.4	9.6
mediana	83.7	99.5	106.2	7.4	8.5	9.5
errore std	3.6	4.9	2.6	0.3	0.4	0.2
varianza	1042	1502	2174	7.5	7.8	9.1
deviazione std	32.3	38.8	46.6	2.7	2.8	3.0
n	79	62	311	79	62	313
intervallo di confidenza 95% per la media	84.7-99.2	96.0-115.7	112.8-123.2	6.9-8.2	7.7-9.1	9.3-10.0
minimo	29.2	39.2	41.9	3.0	3.1	2.7
massimo	187.3	218.1	261.4	18.1	20.2	21.6
skewness	0.68	0.86	0.99	1.47	1.06	0.73
curtosi	0.13	0.64	0.49	4.04	4.05	1.58

b) Categorie sinottiche

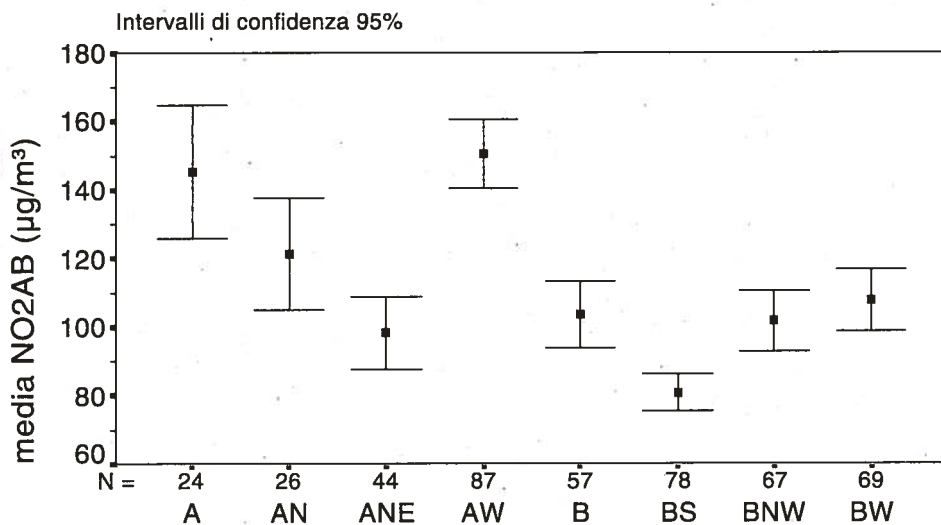
Nelle Figure 3.2.5 e 3.2.6 sono mostrati i diagrammi boxplot e gli intervalli di confidenza 95% dei valori medi dei campioni suddivisi nelle classi relative alle categorie sinottiche. In termini di valori medi le categorie A, AW raggiungono livelli nettamente superiori rispetto alle altre; i diagrammi indicano invece come siano presenti sporadici eventi acuti anche in altre categorie, in particolare nelle AN, B, BNW e BW. È da osservare la distribuzione nella classe BNW dove i dati NO2AB sono ben addensati su livelli di concentrazione decisamente bassi ma sono presenti degli outliers eccezionali anche al di sopra del livello di attenzione. Situazioni simili ma meno eclatanti si ritrovano nelle altre classi che contengono eventi acuti. Alle classi A e AW nelle quali si raccoglie il maggior numero di eventi critici corrispondono i valori medi più elevati.

L'analisi della varianza (ANOVA) sui valori medi delle categorie conferma statisticamente le diversità segnalate (livello di significato del test



CATEGORIE SINOTTICHE

Figura 3.2.5: grafico boxplot per la variabile NO₂AB rispetto alle categorie sinottiche del campo di pressione



CATEGORIE SINOTTICHE

Figura 3.2.6: nel grafico sono mostrati gli intervalli di confidenza al 95% per i valori medi di NO₂AB nelle classi corrispondenti alle diverse categorie sinottiche.

$F < 0.0001$) ed in particolare quelle fra le categorie A e AW rispetto alle ANE, B, BS, BNW e BW (sia secondo il test Tukey-HSD che quello di Scheffé al livello di significato del 5%).

Poiché questi risultati sono relativi ai valori medi, l'individuazione o la previsione della categoria sinottica pur rappresentando un elemento importante non appare sufficiente per eseguire la previsione degli eventi critici. L'informazione che proviene dalla classificazione sinottica può essere utilizzata in termini statistici riferendosi alla diversa probabilità degli eventi acuti in determinate condizioni del campo di pressione a mesoscala.

c) Test sui valori medi

La caratterizzazione degli eventi acuti ottenuta empiricamente nel paragrafo 3.1 viene confermata indirettamente mettendo a confronto i valori medi delle variabili ambientali relativi agli eventi critici ed ai giorni non critici.

La popolazione campionaria è stata suddivisa in due gruppi, la classe degli eventi critici corrispondenti a valori NO₂AB maggiori o uguali a 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e denominata UP (U) composta da 44 eventi (circa il 10% della popolazione campionaria), e la classe costituita dai restanti eventi (408), quindi con valori NO₂AB < 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicata con DOWN (D). Per ciascuna variabile sono stati calcolati e posti a confronto i valori medi nelle due classi utilizzando il test t-Student (ed il test di Levene sull'omogeneità delle varianze). I livelli di significato relativi all'ipotesi di medie uguali risultano estremamente bassi ($<< 0.001$ per il test a 2 code) per la maggior parte delle variabili, e permettono quindi di affermare una diversità statistica sostanziale fra i due campioni. Ad esempio, il campione UP risulta così caratterizzato da valori medi di velocità del vento inferiori rispetto a quelli del campione DOWN, valori medi di inversione termica più elevati, temperatura minima inferiore ecc. Nella Tabella 3.2.III sono riportate le medie delle due classi per tutte quelle variabili che hanno mostrato differenze statisticamente significative ad un livello inferiore a 0.005 (per una completa descrizione dei nomi delle variabili si fa riferimento all'Appendice 2).

Tabella 3.2.III: valori medi nelle classi UP e DOWN.

variabili	NO2AB UP	NO2AB DOWN
INV010 (°C)	2.06	-0.90
INV10H (°C)	2.74	-0.53
INVPGP (°C)	-0.37	-1.85
INV820 (°C)	0.17	-1.58
INVT (°C)	0.74	-1.41
V14010 (m/s)	1.42	2.13
V14024 (m/s)	1.44	2.44
V14820 (m/s)	1.31	2.69
V15010 (m/s)	0.89	3.69
V15820 (m/s)	1.38	3.83
T14MIN (°C)	3.18	6.19
T14010 (°C)	4.17	7.69
PIO010 (mm)	0	1.2
PIO024 (mm)	0	2.6
TRM8H (veicoli)	1281	1079
TRM10H (veicoli)	1345	1230
NOB010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	162	62
NON010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	203	90
NOM5H ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	87	38
NMH010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2340	1906
NOP010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	180	56
NO2P ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	152	91
COAC (mg/m^3)	12.1	8.8

Sono risultate non significative le differenze fra le medie delle sole variabili TRM024 (numero di veicoli transitati in un giorno dalla stazione di Via Ponte alle Mosse) e T14MAX (media oraria massima della temperatura nella stazione Ximeniano), mentre ha mostrato una significatività inferiore la variabile RTN024 (radiazione globale normalizzata giornaliera) con livello di significato intorno al 4%.

Da osservare in particolare la riga che si riferisce all'indicatore COAC: mediamente alla classe UP di NO₂AB corrispondono anche valori più elevati di concentrazioni di CO. Questo può significare che le condizioni che portano ad eventi critici di NO₂ favoriscono la presenza di elevate concentrazioni di CO, anche se, come è stato osservato nel paragrafo precedente, la corrispondenza fra gli episodi acuti dei due inquinanti è molto limitata.

Si osserva inoltre l'elevato valore medio della variabile NO₂P relativa alla stazione di Prato San Paolo (152 µg/m³) per la classe UP, valore quasi doppio rispetto a quello della classe DOWN: ciò indica una buona corrispondenza fra le situazioni critiche a Firenze e quelle a Prato.

Si sottolinea ancora una volta che questi risultati corrispondendo ai valori medi possono difficilmente essere impiegati direttamente in fase di previsione degli eventi acuti, ma costituiscono elementi quantitativi importanti per la conoscenza delle condizioni che portano al verificarsi di tali eventi.

3.2.2 Suddivisione in classi discrete e tabelle di contingenza

In termini complementari alle analisi svolte nel paragrafo 3.2.1, ma con maggiore utilità per quanto riguarda il problema della previsione degli eventi acuti, si può procedere suddividendo in classi i valori delle variabili ambientali per osservare e sottoporre a verifica statistica confermativa i valori medi dell'indicatore NO₂AB e le frequenze degli episodi critici in queste classi. Incrociando le classi di più variabili si ottengono delle tabelle di contingenza che riproducono in termini statisticamente quantitativi le osservazioni già effettuate. La suddivisione in classi discrete delle variabili ambientali è stata eseguita empiricamente in modo arbitrario o talvolta in base all'osservazione degli scatterplot con l'indicatore NO₂AB, ed è riportata in dettaglio nell'Appendice 2. Occorre anticipare che questa operazione risulta necessaria anche per l'applicazione della tecnica CHAID che verrà esposta successivamente (paragrafo 4.1) e con la quale sono stati predisposti e testati alcuni interessanti modelli previsionali.

Tenendo conto delle osservazioni svolte precedentemente, in questa fase il campione dei dati analizzato è costituito dai soli giorni feriali e pre-

festivi privi di precipitazioni (252 eventi).

Nella Tabella 3.2.IV sono indicati i valori medi di NO₂AB nelle diverse categorie individuate dalle classi discrete (sottointervalli) delle variabili INV010 e V14010. Queste erano risultate fra le più interessanti nella caratterizzazione degli episodi acuti, ed infatti dai valori riportati nella tabella si evince in modo abbastanza evidente un comportamento pressoché monotono delle concentrazioni al variare delle classi: un aumento dei valori medi all'aumentare dell'inversione termica ed una loro diminuzione al crescere dell'intensità del vento. Il ridotto numero di elementi del campione all'interno di alcune celle, soprattutto per le classi estreme, rende conto delle difformità di comportamento delle singole medie rispetto alle medie marginali (ultima riga e ultima colonna). Occorre anche considerare come entrambe le variabili qui impiegate si riferiscano a valori misurati nella mattina che quindi, risultando indicativi di una situazione in senso statistico o probabilistico, non rappresentano deterministicamente le condizioni del periodo nel quale si verificano i valori massimi delle concentrazioni¹². Infatti scendendo nel dettaglio si osserva ad esempio come il valore di 133.5 µg/m³ relativo alla cella INV010 ≥ 3 °C e V14010 < 1 m/s, cioè ad una situazione che dovrebbe portare in generale a concentrazioni molto elevate, si riferisca ad un unico giorno (16/12/95) nel quale durante la tarda mattinata hanno fatto irruzione sulla città intensi venti settentrionali che hanno evidentemente portato ad una rapida dispersione degli inquinanti atmosferici.

In modo ancora più chiaro viene evidenziato il comportamento dell'indicatore NO₂AB nella Tabella 3.2.V dove la variabile INV010 è incrociata con l'intensità del vento in quota V15010. L'andamento delle medie marginali per questa variabile ricalca evidentemente quello già segnalato per V14010, ma in questo caso la diversa distribuzione degli eventi nelle celle relative a basse velocità del vento permette di evidenziare più nettamente le situazioni critiche per la qualità dell'aria: i valori medi di NO₂AB delle celle corrispondenti a V15010 < 1 m/s e INV010 > 2 °C superano il valore dei 200 µg/m³. Esistono comunque anche per questa variabile situazioni meno chiare nelle quali l'esiguo numero di eventi in alcune celle porta a valori medi non in linea con gli andamenti marginali.

12. Si vedano in Appendice 6 le tabelle di confronto fra queste variabili e quelle omogenee giornaliere o mediate su periodi diversi.

Tabella 3.2.IV: valori medi di NO₂AB ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) per le classi di INV010 e V14010.

		V14010 (m/s)					
INV010 (°C)	dati	V14010<1	1≤V14010<2	2≤V14010<3	V14010≥3	non disponibile	totali
INV010<-2	media n	0	100.8 11	99.0 17	70.0 39	95.5 1	82.6 68
-2≤INV010<-1	media n	113.3 4	107.0 25	98.4 12	92.3 8	0	102.8 49
-1≤INV010<0	media n	130.9 5	119.6 13	104.8 5	0	0	118.8 23
0≤INV010<1	media n	180.6 6	138.7 23	118.3 2	0	0	145.5 31
1≤INV010<2	media n	179.7 3	162.6 22	137.7 12	0	136.9 3	154.5 40
2≤INV010<3	media n	188.2 3	176.9 16	156.7 4	163.0 1	0	174.4 24
INV010≥3	media n	133.5 1	205.9 12	138.3 3	0	0	188.7 16
non disponibile	media n	0	0	120.6 1	0	0	120.6 1
totali	media	157.9	142.7	115.0	75.6	126.6	124.7
	n	22	122	56	48	4	252

Tabella 3.2.V: valori medi di NO₂AB ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) per le classi di INV010 e V15010.

		V15010 (m/s)					
INV010 (°C)	dati	V15010<1	1≤V15010<2	2≤V15010<3	V15010≥3	non disponibile	totali
INV010<-2	media n	103.4 3	94.8 7	105.0 7	76.2 50	95.5 1	82.6 68
-2≤INV010<-1	media n	128.8 7	112.6 9	107.3 4	93.7 28	79.7 1	102.8 49
-1≤INV010<0	media n	124.9 7	119.5 9	93.9 1	114.9 6	0	118.8 23
0≤INV010<1	media n	153.9 12	153.8 8	164.1 3	117.5 8	0	145.5 31
1≤INV010<2	media n	170.8 15	161.9 10	122.2 4	122.8 7	162.5 4	154.5 40
2≤INV010<3	media n	201.1 14	173.6 4	93.9 1	95.2 3	147.6 2	174.4 24
INV010≥3	media n	230.9 9	186.5 2	104.0 1	115.9 4	0	188.7 16
non disponibile	media n	0	0	0	0	120.6 1	120.6 1
totali	media	170.0	136.6	116.0	91.3	137.9	124.7
	n	67	49	21	106	9	252

Per ridurre questo inconveniente e poter applicare i test statistici per verificare la significatività e l'interazione fra le variabili si è ritenuto necessario provvedere ad un accorpamento di alcune classi ed i risultati relativi sono riportati nelle Tabelle 3.2.VI e 3.2.VII.

Tabella 3.2.VI: classi raggruppate di INV010 e V14010: valori medi e frequenze di NO2AB, UP e DOWN.

INV010 (°C)	dati	V14010 (m/s)		
		V14010<2	V14010≥2	totali
INV010≤0	media (µg/m ³)	111.7	84.6	96.5
	n	63	81	144
	UP	2	0	2
	DOWN	61	81	142
0<INV010≤2	media (µg/m ³)	158.2	134.9	153.2
	n	51	14	65
	UP	15	1	16
	DOWN	36	13	49
INV010>2	media (µg/m ³)	190.9	150.6	182.4
	n	30	8	38
	UP	19	2	21
	DOWN	11	6	17
media (µg/m ³)		155.5	96.6	124.6
n		134	103	247
UP		36	3	39
DOWN		108	100	208

Tabella 3.2.VII: classi raggruppate di INV010 e V15010: valori medi e frequenze di NO2AB, UP e DOWN.

INV010 (°C)	dati	V15010 (m/s)		
		V15010<2	V15010≥2	totali
INV010≤0	media (µg/m ³)	117.2	87.5	96.6
	n	43	99	142
	UP	2	0	2
	DOWN	41	99	140
0<INV010≤2	media (µg/m ³)	162.1	129.2	151.8
	n	44	20	64
	UP	14	2	16
	DOWN	30	18	48
INV010>2	media (µg/m ³)	206.3	107.5	184.3
	n	28	8	36
	UP	22	0	22
	DOWN	6	8	14
media (µg/m ³)		155.7	95.3	124.1
n		115	127	242
UP		38	2	40
DOWN		77	125	202

In queste tabelle (3.2.VI e 3.2.VII) sono riportate in ciascuna cella anche le frequenze delle classi UP e DOWN di NO₂AB. Si osservano quindi alcune situazioni nelle quali gli eventi appartenenti alla classe UP risultano raggruppati e talvolta in maggioranza nella popolazione della cella. Queste devono quindi essere considerate condizioni statisticamente a rischio per la qualità dell'aria. In particolare si segnalano le celle relative agli intervalli INV010>2 °C e V14010<2 m/s, con media 190.9 µg/m³ (19 casi UP su 30, pari al 63% degli eventi contenuti nella cella) e INV010>2 °C e V15010<2 m/s (media 206.3 µg/m³, 22 casi UP su 28, pari al 79% degli eventi).

Si evidenziano inoltre situazioni a minore rischio, celle relative a 0<INV010≤2 e V14010<2 (15 casi UP su 51, 29%), INV010>2 con V14010≥2 (2 casi UP su 8, 25%) e 0<INV010≤2 con V15010<2 (14 casi UP su 30, 47%); situazioni a bassissimo rischio, celle INV010≤0 con V14010<2 (2 casi UP su 63, 3%), 0<INV010≤2 con V14010≥2 (1 caso UP su 14, 7%), INV010≤0 con V15010<2 (2 casi UP su 43, 5%) e 0<INV010≤2 con V15010≥2 (2 casi UP su 20, 10%).

Applicando il test ANOVA per valutare gli effetti delle variabili considerate si ottiene una evidente significatività statistica per ciascuno dei fattori, ma in particolare risulta significativo (con livello di significato P<0.001) anche il termine di interazione fra le variabili, ovvero viene evidenziata la interdipendenza fra i livelli dei fattori nel determinare il comportamento della variabile NO₂AB. Il prerequisito di normalità delle popolazioni interne alle celle appare sufficientemente soddisfatto (il test K-S Lilliefors di adattamento alla distribuzione normale è risultato positivo per quasi tutte le celle, per entrambe le coppie di variabili INV010-V14010 e INV010-V15010) mentre si sono osservati scostamenti dall'omoscedasticità.

Nella sostanza si possono quindi ritenere confermate in senso statistico le osservazioni qualitative effettuate in precedenza.

In Figura 3.2.7 sono mostrati gli intervalli di confidenza al 95% per i valori medi di NO₂AB delle diverse classi di INV010-V14010.

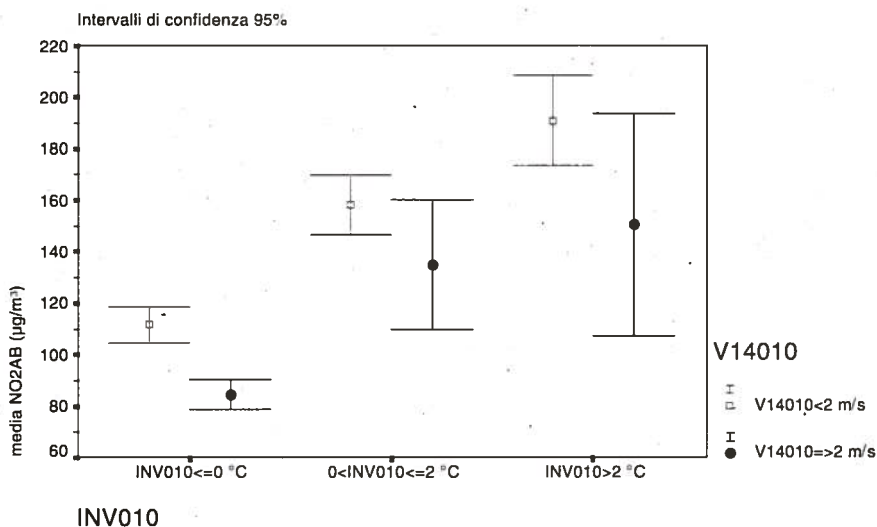


Figura 3.2.7: Intervalli di confidenza 95% delle medie dei valori NO2AB per le diverse classi delle variabili V14010 e INV010.

Tabella 3.2.VIII: classi raggruppate di INVPGP e T14MIN: valori medi e frequenze di NO2AB, UP e DOWN.

INVPGP (°C)	dati	T14MIN (°C)		
		T14MIN < 6	T14MIN \geq 6	totali
INVPGP ≤ -2	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	93.8	101.0	96.9
	n	64	48	112
	UP	0	1	1
	DOWN	64	47	111
-2 < INVPGP ≤ -1	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	143.8	112.8	131.8
	n	49	32	81
	UP	12	2	14
	DOWN	37	30	67
INVPGP > -1	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	177.5	148.6	169.9
	n	42	15	57
	UP	23	5	28
	DOWN	19	10	29
media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		132.3	112.4	124.7
n		155	95	240
UP		35	8	43
DOWN		120	87	207

Con procedimento analogo possono essere investigate e confermate le relazioni evidenziate su altre variabili. Nella Tabella 3.2.VIII sono riportati

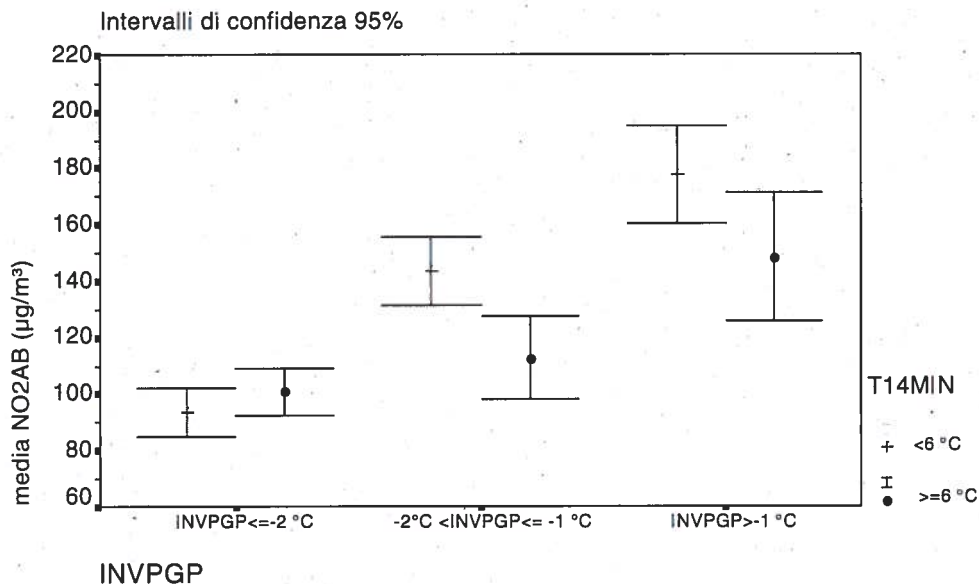


Figura 3.2.8: Intervalli di confidenza 95% delle medie dei valori NO2AB per le diverse classi delle variabili T14MIN e INVPGP.

i risultati relativi alla suddivisione in classi discrete per le variabili INVPGP e T14MIN.

Anche in questo caso sono individuabili condizioni più e meno rischiose per la qualità dell'aria (in senso statistico) corrispondenti alla diversa densità di casi UP e alle diverse medie delle celle: in particolare le situazioni corrispondenti a $INVPGP \leq -2$ possono essere considerate non a rischio, mentre la cella $INVPGP > -1$ °C e $T14MIN < 6$ °C raccoglie una maggioranza di casi UP (23 su 42, pari al 55%) e la media più elevata di $177.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, costituendo quindi la situazione più rischiosa.

In Figura 3.2.8 sono mostrati gli intervalli di confidenza al 95% dei valori medi di NO2AB rispetto alle diverse classi di INVPGP-T14MIN. Si osserva chiaramente come la sostanziale coincidenza delle due classi di T14MIN per $INVPGP \leq -2$ °C si trasformi in una separazione piuttosto netta con il passare alle altre classi del parametro legato all'inversione termica, cioè passando a condizioni di maggiore stabilità atmosferica; in questo caso poi la classe relativa a temperature inferiori corrisponde a medie NO2AB più elevate.

Tabella 3.2.IX: classi raggruppate di INV820 e V14820: valori medi e frequenze di NO2AB, UP e DOWN.

		V14820 (m/s)		
INV820 (°C)	dati	V14820<2	V14820≥2	totali
INV820≤-1.5	media (µg/m ³)	119.9	87.9	94.5
	n	25	92	117
	UP	2	1	3
	DOWN	23	91	114
-1.5<INV820≤0	media (µg/m ³)	166.3	114.3	138.9
	n	41	47	88
	UP	13	3	16
	DOWN	28	44	72
INV820>0	media (µg/m ³)	187.1	108.5	179.3
	n	35	4	39
	UP	22	0	22
	DOWN	13	4	17
media (µg/m ³)		161.8	97.4	124.7
n		101	143	244
UP		37	4	41
DOWN		64	139	203

Nella Tabella 3.2.IX sono invece riportati i risultati relativi alle variabili INV820 e V14820. Questi parametri si riferiscono alla situazione meteorologica presente in un dato giorno nel periodo diurno comprendendo sia la mattina che il pomeriggio, non sono quindi valori disponibili al momento in cui la previsione viene eseguita, ma servono ad individuare e comprendere quale evoluzione o situazione diurna risulta mediamente più favorevole al manifestarsi degli episodi critici.

Le situazioni con bassa intensità media del vento (V14820<2 m/s) al crescere della differenza di temperatura fra la stazione in quota e quella urbana mostrano un incremento deciso della frequenza di eventi critici: per -1.5<INV820≤0 °C sono presenti 13 casi UP (32%) con una media della cella pari a 166.3 µg/m³, mentre con INV820>0 gli eventi UP risultano 22 pari al 63% dei casi contenuti nella cella, e corrispondono ad una media di ben 187.1 µg/m³. Le celle relative a valori V14820≥2 presentano invece frequenze trascurabili di eventi critici.

Anche per le coppie di indicatori INVPGP-T14MIN e INV820-V14820 l'applicazione del test ANOVA mostra la presenza di significatività statistica per il termine d'interazione fra le variabili (P<0.01); questo significa che i valori medi di NO2AB dipendono contemporaneamente dai valori delle due variabili, cioè dalla combinazione dei loro livelli più che dai singoli livelli di ciascuna variabile.

Nella Tabella 3.2.X vengono considerate le variabili V15820 e RTN024 (radiazione globale normalizzata¹³) anch'esse riepilogative delle condizioni medie durante l'intero giorno. La RTN024 è una misura della presenza di radiazione solare la quale costituisce un elemento essenziale nei processi di trasformazione e formazione dell'NO₂. Per la variabile V15820 l'andamento delle medie marginali e delle frequenze degli eventi critici è coerente con quello evidenziato dagli altri indicatori legati all'intensità del vento: le medie più elevate di NO₂AB si riscontrano con basse velocità del vento e gli eventi UP tendono a ridursi percentualmente al crescere dell'intensità di questo.

Tabella 3.2.X: classi ad intervalli di V15820 e RTN024: valori medi e frequenze di NO₂AB, UP e DOWN.

		RTN024 (unità normalizzate)				
V15820 (m/s)	dati	RTN024<0.25	0.25≤RTN024<0.5	0.5≤RTN024<0.75	RTN024≥0.75	totali
V1580≤1	media (µg/m ³)	152.0	161.9	185.1	194.2	168.4
	n	8	11	9	2	30
	UP	2	5	5	2	14
	DOWN	6	6	4	0	16
1≤V15820<2	media (µg/m ³)	117.4	147.6	162.5	149.9	152.3
	n	6	20	32	10	68
	UP	1	5	9	3	18
	DOWN	5	15	23	7	50
2≤V15820<3	media (µg/m ³)	131.1	118.1	125.8	139.4	126.9
	n	4	11	14	8	37
	UP	0	1	1	2	4
	DOWN	4	10	13	6	33
V15820≥3	media (µg/m ³)	97.9	81.0	87.5	101.1	91.4
	n	5	20	43	36	104
	UP	0	1	1	0	2
	DOWN	5	19	42	36	102
media (µg/m ³)		97.6	125.3	126.3	118.9	123.9
n		133	62	98	56	239
UP		5	12	16	7	38
DOWN		128	50	82	49	201

Decisamente meno chiaro il comportamento delle medie marginali relative agli intervalli di radiazione, con i valori maggiori nelle classi centrali. In effetti occorre considerare che da un lato la presenza di radiazione è necessaria alla formazione di elevate concentrazioni di NO₂, ma anche che spesso i valori più elevati di questo parametro si raggiungono in condizioni caratterizzate da venti intensi che favoriscono l'assenza di foschie, nebbie e di nuvolosità: infatti si osserva il deciso addensamento di casi relativi

13. La radiazione globale giornaliera (in W/m²) misurata nella stazione Ximeniano è normalizzata rispetto al suo valore massimo atteso nello stesso giorno, nell'ipotesi quindi di cielo completamente sereno.

alla classe $RTN024 \geq 0.75$ u.n. in corrispondenza di $V15820 \geq 3$ m/s (36, pari al 64% dei giorni in quella fascia di valori di RTN024).

Tabella 3.2.XI: classi raggruppate di INV010 e NOB010: valori medi e frequenze di NO2AB, UP e DOWN.

		NOB010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
INV010 ($^{\circ}\text{C}$)	dati	NOB010<80	$80 \leq \text{NOB010} < 180$	NOB010 ≥ 180	totale
INV010 ≤ 0	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	92.0	109.7	175.3	96.4
	n	117	21	3	141
	UP	1	0	1	2
	DOWN	116	21	2	139
$0 < \text{INV010} \leq 2$	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	124.2	155.2	173.8	152.4
	n	12	42	12	66
	UP	1	11	6	18
	DOWN	11	31	6	48
INV010 > 2	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	174.2	170.8	213.0	182.4
	n	4	22	11	37
	UP	3	10	10	23
	DOWN	1	12	1	14
media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		97.6	148.0	190.5	124.6
n		133	85	26	244
UP		5	21	17	43
DOWN		128	64	9	201

Tabella 3.2.XII: classi raggruppate di INV010 e NON010: valori medi e frequenze di NO2AB, UP e DOWN.

		NON010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
INV010 ($^{\circ}\text{C}$)	dati	NON010<70	$70 \leq \text{NON010} < 150$	NON010 ≥ 150	totale
INV010 ≤ 0	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	85.7	111.7	121.0	96.4
	n	90	35	15	140
	UP	0	1	1	2
	DOWN	90	34	14	138
$0 < \text{INV010} \leq 2$	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	110.2	153.0	160.7	152.4
	n	5	25	35	65
	UP	0	6	12	18
	DOWN	5	19	23	47
INV010 > 2	media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	111.7	168.5	198.0	182.4
	n	1	13	22	36
	UP	0	6	16	22
	DOWN	1	7	6	14
media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		87.3	135.70	163.8	124.4
n		96	73	72	241
UP		0	13	29	42
DOWN		96	60	43	199

Di particolare interesse appaiono anche i risultati mostrati nelle Tabelle 3.2.XI e 3.2.XII, nelle quali sono incrociate le classi ad intervalli delle variabili NOB010 ed NON010 con INV010. Infatti questi indicatori si riferiscono alle concentrazioni di NO (precursore dell'NO₂) nelle prime ore della mattina, insieme alla variabile che meglio descrive le condizioni di stabilità atmosferica, e permettono quindi di evidenziare da un lato il legame fra concentrazione dei precursori ed NO₂ e dall'altro di confermare la dipendenza degli stessi precursori dalla situazione meteorologica.

Nello specifico si osserva la stretta corrispondenza fra elevati valori delle concentrazioni di NO ed elevati valori di inversione termica; queste sono evidentemente le situazioni nelle quali si sono manifestati con maggior frequenza gli eventi critici con percentuali di casi della classe UP superiori al 70%. Situazioni corrispondenti invece ad elevate concentrazioni di NO e valori bassi o negativi di INV010 risultano piuttosto rare e presentano ridotte frequenze di eventi critici, mentre questi appaiono più frequenti in quelle situazioni, peraltro anch'esse piuttosto rare, nelle quali si hanno elevati valori di inversione termica ma basse concentrazioni dei precursori. Queste corrispondono presumibilmente a situazioni nelle quali le condizioni di stabilità favorevoli all'accumulo degli inquinanti atmosferici si stanno innescando nella mattina stessa, a partire da condizioni precedenti tendenzialmente dispersive.

I risultati del test ANOVA indicano la significatività statistica dei fattori NOB010, NON010, INV010 (con livello di significato <0.001) ma in questo caso non risultano significativi i termini d'interazione (INV010-NOB010 e INV010-NON010). I valori medi di NO2AB sono quindi legati sia ai valori di INV010 che a quelli delle concentrazioni dei precursori, ma i singoli contributi esplicativi di queste variabili appaiono indipendenti. Questo non significa che le variabili siano veramente indipendenti, anzi come verrà evidenziato nel paragrafo successivo queste sono così fortemente legate che il contributo informativo che producono è sostanzialmente simile.

3.2.3 Analisi di correlazione

L'analisi dei coefficienti di correlazione (lineare o R_p di Pearson; per ranghi: r_s di Spearman e T di Kendall) permette di misurare e valutare la significatività statistica del grado di associazione fra gli indicatori dello sta-

to d'inquinamento atmosferico (NO2AB, COAC) e fra questi ed i parametri predittori. Per mezzo della correlazione parziale è poi possibile evidenziare le interdipendenze fra le variabili e valutarne l'importanza esplicativa.

Gli andamenti tendenzialmente lineari notati nel paragrafo precedente fra l'indicatore NO2AB ed alcune variabili meteorologiche vengono qui confermati dagli elevati coefficienti di correlazione. Le matrici di correlazione complete per i tre coefficienti e per tutte le variabili studiate sono riportate in Appendice 5, mentre nella Tabella 3.2.XIII ci si è limitati a mostrare i valori più elevati ottenuti rispetto a NO2AB.

Le tre statistiche di correlazione non sono direttamente confrontabili fra loro perché misurano proprietà e caratteristiche diverse delle distribuzioni campionarie, ma i valori riportati in tabella mostrano un comportamento coerente nella misura dell'associazione e dell'importanza delle diverse variabili: viene confermato l'evidente legame fra NO2AB e le concentrazioni misurate a Prato San Paolo (NO2P), mentre l'associazione con COAC pur significativa non risulta fra le più elevate.

Tabella 3.2.XIII: coefficienti di correlazione (sull'intero campione, livello di significato <0.001).

	NO2AB			COAC		
variabile	R _p	r _s	T	R _p	r _s	T
NO2AB	1	1	1	0.57	0.62	0.44
COAC	0.57	0.62	0.44	1	1	1
NO2P	0.82	0.84	0.66	0.58	0.60	0.43
INVT	0.68	0.65	0.47	0.48	0.50	0.35
INV010	0.67	0.67	0.49	0.44	0.49	0.34
INV820	0.63	0.61	0.44	0.43	0.40	0.28
INV10H	0.57	0.58	0.40	0.34	0.35	0.24
INVPGP	0.55	0.49	0.34	0.45	0.44	0.31
NOP010	0.64	0.67	0.49	0.56	0.65	0.47
NOB010	0.63	0.68	0.49	0.54	0.60	0.43
NON010	0.59	0.67	0.49	0.54	0.63	0.45
V14820	-0.59	-0.64	-0.46	-0.59	-0.56	-0.42
V14010	-0.46	-0.49	-0.35	-0.50	-0.46	-0.33
V15820	-0.55	-0.60	-0.43	-0.45	-0.46	-0.33
V15010	-0.53	-0.58	-0.42	-0.43	-0.42	-0.29

Le variabili che producono i più elevati valori di correlazione con l'indicatore NO₂AB sono sostanzialmente quelle relative alla presenza di inversione termica, quelle relative alle concentrazioni del precursore NO e quelle relative all'intensità del vento. Ovviamente per queste ultime il coefficiente di correlazione è negativo indicando cioè una tendenza alla diminuzione delle concentrazioni al crescere della velocità del vento.

Gli indicatori relativi all'inversione termica svolgono un ruolo predominante nella correlazione con NO₂AB, e risultano avere anche forti correlazioni con le variabili relative alle concentrazioni di NO (il coefficiente lineare R_p fra INVT e NOB010, NON010, NOP010 è pari a 0.72, 0.66 e 0.70 rispettivamente), a conferma di quanto emerso nell'analisi del paragrafo precedente. L'analisi di correlazione parziale (Tabella 3.2.XV) mostra che utilizzando per controllo il parametro INVT i coefficienti (parziali) per le variabili relative alle concentrazioni di NO si riducono sensibilmente (ad esempio il coefficiente lineare fra NO₂AB e NOB010 passa dimezzandosi da 0.65 a 0.29, e analogamente per gli altri) confermando che il contenuto informativo di questi due gruppi di variabili è molto simile.

Rispetto all'indicatore COAC si ottengono valori di correlazione inferiori per quasi tutte le variabili, ma mantengono un ruolo ancora importante quelle relative alle concentrazioni di NO¹⁴. Per COAC non risultano particolarmente esplicative neppure le variabili relative ai flussi di traffico (correlazioni inferiori a 0.3), confermando ancora le caratteristiche di maggiore accidentalità e casualità di questo rispetto ad NO₂AB.

Nella Tabella 3.2.XIV sono riportati i coefficienti di correlazione lineare fra alcune variabili e l'indicatore NO₂AB ottenuti considerando dati campionari parziali. In particolare vengono mostrati i valori relativi ai tre diversi periodi invernali, quelli relativi al campione complessivo escludendo i giorni festivi ed i giorni con pioggia, quelli relativi ai soli giorni feriali senza precipitazioni ed infine ai soli eventi della classe UP.

Per alcune variabili si osservano differenze anche sensibili fra i tre periodi invernali, ad esempio variazioni percentuali sopra il 10% per COAC e per INVT. In generale per le variabili relative all'inversione termica si

14. Questo appare del tutto naturale se si pensa che sia il CO che l'NO sono inquinanti primari.

ottengono correlazioni maggiori per il 94-95, mentre per le variabili relative all'NO i coefficienti maggiori si ottengono per il 95-96.

In generale i coefficienti ottenuti sui campioni filtrati risultano superiori a quelli del campione complessivo. Sui soli casi UP invece la maggior parte dei coefficienti perde di significatività e si ottengono soltanto deboli ma significative correlazioni per alcune variabili relative all'inversione termica.

Tabella 3.2.XIV: coefficiente di correlazione lineare R_p con l'indicatore NO2AB.

variabile	campione dei dati				tipo di giorni		
	93÷96	93-94	94-95	95-96	feriali e prefestivi senza pioggia	solo feriali senza pioggia	casi UP (*P<10%) (**P<5%) n.s.: non significativo
COAC	0.57	0.52	0.67	0.60	0.60	0.58	n.s.
NO2P	0.82	0.86	0.80	0.82	0.80	0.79	0.27*
INVT	0.68	0.64	0.75	0.64	0.73	0.76	0.39**
INV010	0.67	0.64	0.72	0.65	0.72	0.76	0.33**
INV820	0.63	0.60	0.68	0.63	0.67	0.70	0.26*
INV10H	0.57	0.54	0.60	0.57	0.60	0.63	n.s.
INVPGP	0.55	0.49	0.64	0.50	0.60	0.61	n.s.
NOB010	0.63	0.60	0.64	0.67	0.65	0.65	n.s.
NON010	0.59	0.55	0.58	0.62	0.59	0.60	n.s.
V14010	-0.46	-0.49	-0.45	-0.48	-0.55	-0.55	n.s.
V15010	-0.53	-0.53	-0.55	-0.51	-0.68	-0.63	n.s.

È evidente che gli indicatori legati alle stesse grandezze fisiche, chimiche o meteorologiche risultino fra loro per lo più fortemente correlati e

quindi in qualche modo intercambiabili nei termini della semplice misura di associazione. Tuttavia essi si differenziano sia nella loro disponibilità al momento della previsione che nella loro capacità di definire al meglio gli eventi critici: le misure di correlazione qui utilizzate continuano a rappresentare le caratteristiche medie del campione in studio.

Nella Tabella 3.2.XV sono riportati alcuni coefficienti di correlazione parziale che quantificano l'associazione fra variabili al netto del contributo prodotto dalle variabili di controllo.

Da questi valori è possibile stimare il contributo netto che i diversi predittori forniscono nella spiegazione del comportamento degli indicatori della qualità dell'aria: il parametro INVT rimane quello con la maggiore associazione ad NO₂AB mantenendo un valore di correlazione lineare $R_p=0.45$ al netto dei contributi forniti dagli altri parametri rilevanti, relativi alle concentrazioni di NO e all'intensità del vento. Anche la correlazione con le velocità del vento, in particolare per quella in quota, si mantiene rilevante (-0.38) al netto di quelle degli altri parametri (INVT e NOB010), mentre come accennato precedentemente, il contributo delle concentrazioni dei precursori si riduce maggiormente scendendo a valori molto bassi (0.18) quando viene considerato al netto delle correlazioni di più variabili meteorologiche (INVT, V14010 e V15010).

Tabella 3.2.XV: coefficienti lineari di correlazione parziale (campione 1993÷96 escluso festivi e giorni di pioggia, livello di significato <0.01).

variabili associate	coefficiente lineare di correlazione parziale	variabili di controllo
NO ₂ AB-NO ₂ P	0.60 0.49	INVT INVT, V14010, V15010, NOB010
NO ₂ AB-COAC	0.23	INVT, V14010, V15010, NOB010
NO ₂ AB-NOB010	0.29 0.18	INVT INVT, V14010, V15010
NO ₂ AB-INVT	0.45	V14010, V15010, NOB010
NO ₂ AB-V14010	-0.23	INVT, NOB010
NO ₂ AB-V15010	-0.38	INVT, NOB010

Infine nelle Figure 3.2.9 e 3.2.10 sono presentate le funzioni di cross-correlazione (Figura 3.2.9 (a): NO₂AB-NO₂P, (b): NO₂AB-COAC), di

autocorrelazione (Figura 3.2.10 (a), (c)) e di autocorrelazione parziale (Figura 3.2.10 (b), (d)) degli indicatori NO2AB e COAC.

La sostanziale simmetria e la presenza del valore massimo di correlazione per ritardo nullo nelle funzioni di cross-correlazione, indica come il comportamento delle variabili risulti, come era da attendersi, mediamen-

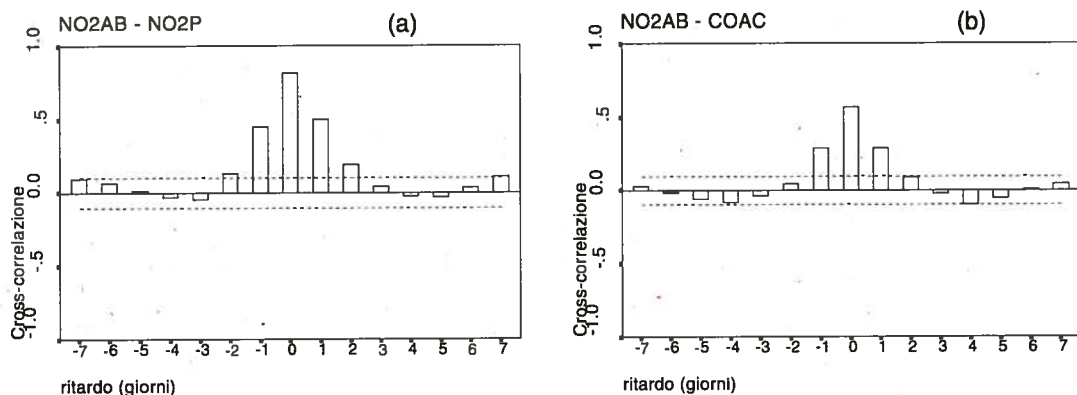


Figura 3.2.9: Funzione di cross-correlazione fra gli indicatori NO2AB-NO2P (a) e fra gli indicatori NO2AB-COAC (b).

te in fase; la correlazione fra i due indicatori relativi all' NO_2 come pure quella fra NO2AB e COAC risulta assumere valori relativamente elevati per 1 giorno di ritardo (lag).

Per l'indicatore NO2AB sia la funzione di autocorrelazione che la funzione di autocorrelazione parziale presentano un unico termine abbastanza elevato (con coefficiente intorno a 0.4 per lag 1), ciò indica un rapido decadimento della correlazione fra i valori di giorni adiacenti della serie. Anche se in assenza di altri coefficienti rilevanti, il profilo delle due funzioni lascia intravedere la possibile presenza di una periodicità a lag 6-7-8 e quindi 13-14-15, facilmente comprensibile tenuto conto della periodicità settimanale dei giorni festivi e prefestivi.

Questa caratteristica di periodicità settimanale risulta anche ben evidente nella funzione di autocorrelazione ed in quella di autocorrelazione parziale dell'indicatore COAC, le quali presentano peraltro lo stesso rapido decadimento.

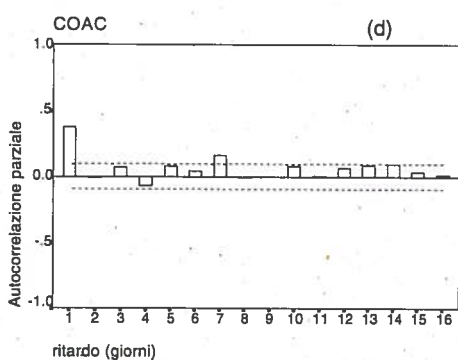
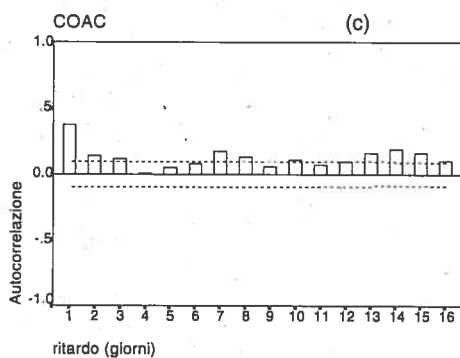
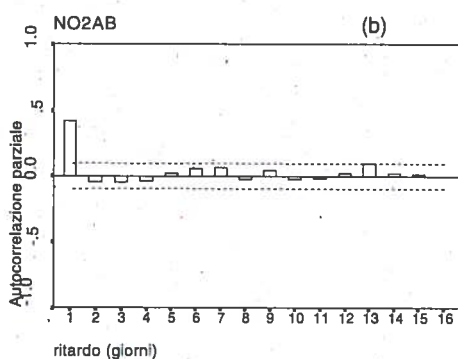
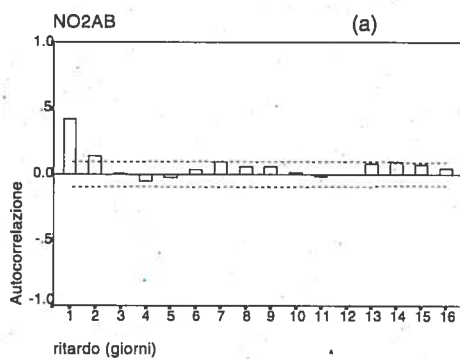
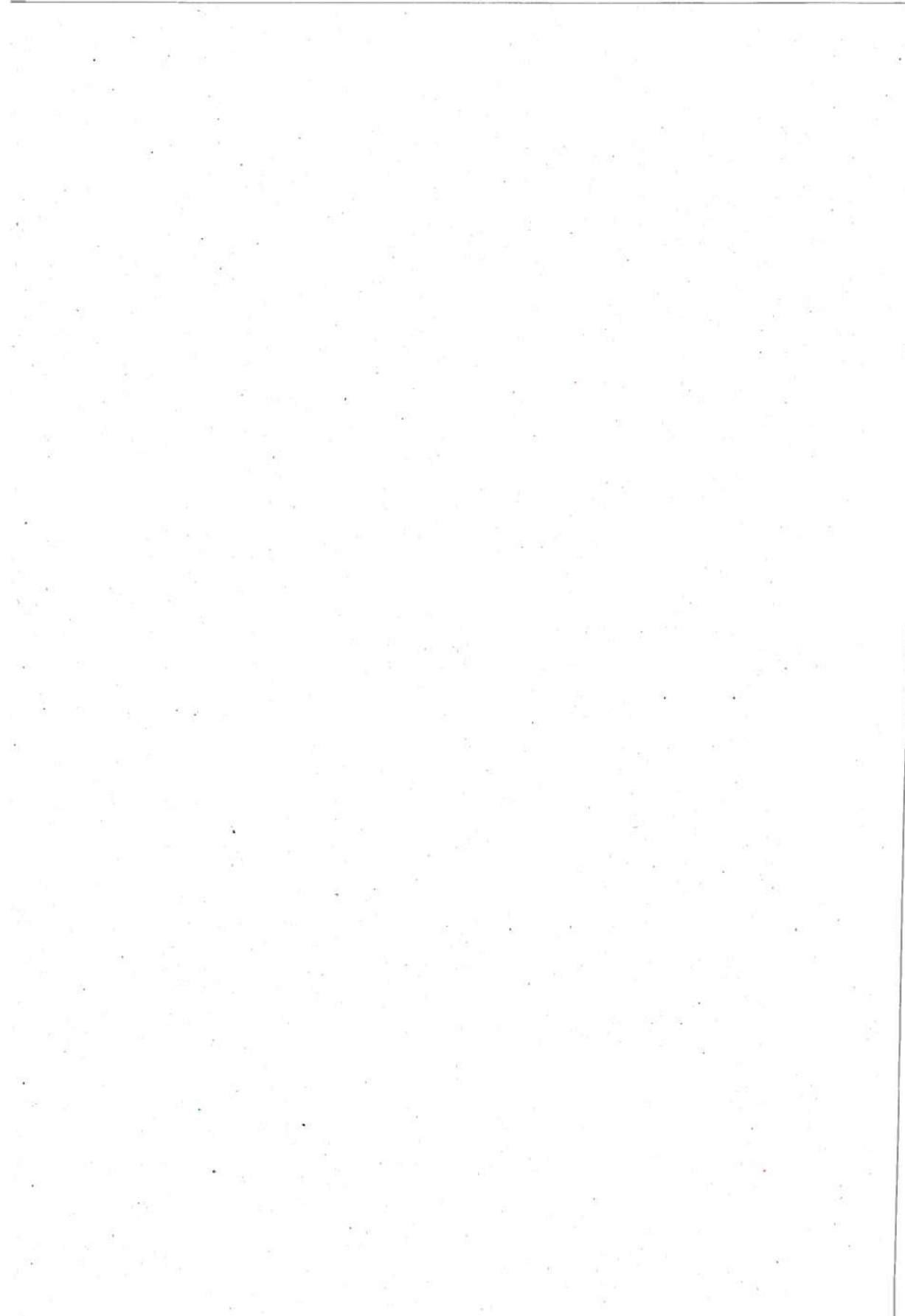


Figura 3.2.10: Funzioni di autocorrelazione per gli indicatori NO2AB (a) e COAC (c), e relative funzioni di autocorrelazione parziale (b, d).

Riferimenti bibliografici

- A Decreto del Ministro dell'Ambiente con il Ministro della Sanità ed il Ministro dei Trasporti 28/12/91, "Recepimento della Direttiva 91/441/CEE in materia di emissioni di autoveicoli", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 7, 7/1/92.
- B Barbaro A. e Giovannini F., "Pioggia e variazioni di concentrazione di CO e NO₂", *AER*, 1995, 9, 4-7.
- C Giovannini F., *Analisi statistica sui flussi globali di traffico nella città di Firenze*, Rapporto dell'Unità Operativa Fisica Ambientale, SMPA-U.S.L.10 Firenze, 25/1/95.
- D Barbaro A. e Battini P., *Inquinamento atmosferico nell'area fiorentina - Applicazione del D.M. 12/11/92*, Rapporto dell'Unità Operativa Fisica Ambientale, SMPA-U.S.L.10/A Firenze, 5/1/93.
- E Horowitz J. L., *Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning*, MIT Press, Cambridge, Massachussets, 1982, 68-71 e 77-83.
- F Horowitz J. L., *Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning*, MIT Press, Cambridge, Massachussets, 1982, 39-63.
- G Santomauro L., *Dinamica dell'inquinamento atmosferico da impianti industriali*, Calderini, Bologna, 1975, 5-23.
- H Barbaro A., Giovannini F. e Nannini P., "Un primo studio sulle relazioni fra inquinamento da NO₂ e condizioni meteorologiche nell'area urbana di Firenze", *AER*, 1994, 6, 4-9.
- I Tibaldi S., "Fenomeni meteorologici a larga scala che influenzano la capacità di dispersione degli inquinanti: situazioni di blocco e loro predicibilità", atti del Convegno *Il controllo della qualità dell'aria*, Roma 24 novembre 1987, ANIPLA, 1988, 9-22.
- J Hernandez E., Garcia R. e Finzi G., "The SO₂ pollution in Madrid: I. A study of meteorological and statistical aspects", *Il Nuovo Cimento*, 1983, 6 C, 595-603.
- K Kallos G., Kassomenos P. e Pielke R.A., "Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens, Greece", *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 62, 163-184.
- L Gallo F. (coord.to scientifico), *Il controllo della qualità dell'aria: reti di monitoraggio, strumenti normativi e tecniche statistiche*, atti del Workshop, Roma 5 ottobre 1994, Annali di Statistica, ISTAT, 1995, 7, 90-92 e 99-100.
- M *Censimento delle emissioni di inquinanti dell'aria nella Provincia di Firenze*, Rapporto Finale RA 4/94, TECHNE, Roma, 1994, 45.
- N Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale, "Parere della CCTN riguardante la stima del rischio di tumore polmonare da idrocarburi policiclici aromatici da emissioni autoveicolari (1° dicembre 1995)", in *Raccolta dei pareri espressi dalla CCTN nel 1995*, Serie Relazioni, Istituto Superiore di Sanità, 96/3, Roma 1996, 54.
- O *Benzene: rischi sanitari e ambientali e impegno dell'industria per la loro riduzione*, Rapporto dell'Unione Petrolifera, 1996, 10.
- P Decreto Legislativo 30/4/92, n° 285, "Nuovo codice della strada", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 74, 18/5/92.
- Q Decreto del Presidente della Repubblica 16/12/92, n° 495, "Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, 134, 28/12/92.
- R Giovannini F., *Aggiornamento dei risultati della campagna di controllo delle emissioni dei veicoli 1995*, comunicazione ARPAT-Fisica Ambientale al Comune di Firenze, 13/1/1997.
- S Lies K.-H., *Unregulated motor vehicle exhaust gas components*, Volkswagen AG Research and Development, Wolfsburg (D), 1989.
- T Zar J.H., *Biostatistical Analysis*, Prentice-Hall, Engelwood Cliffs (USA), 1984.
- U Siegel S. e Castellan N.J. Jr., *Nonparametric Statistical for Behavioral Sciences*, Mc Graw-Hill, Singapore, 1988.
- V Norusis M.J., *SPSS for Windows - Base System User's Guide - Release 6.0*, SPSS Inc., Chicago (USA), 1993, 187.



4 Modelli statistici per la previsione

I risultati delle analisi precedentemente descritte hanno consentito di indirizzare la ricerca verso metodi e tecniche di previsione a carattere statistico che permettano di impiegare al meglio le informazioni fornite dai dati disponibili.

In particolare sono state scelte delle tecniche statistiche (CHAID e K-nn) aventi la caratteristica di individuare nel campione a disposizione gli eventi fra loro "simili" o "vicini". Questi metodi sono stati applicati per la prima volta in questo caso al problema della previsione degli episodi acuti di inquinamento atmosferico. Per confronto sono poi stati determinati anche modelli basati su tecniche statistiche classiche (regressione multi-lineare e logistica).

4.1 Modelli CHAID

In fase di analisi esplorativa (capitolo 3) è stato evidenziato come sia possibile definire ed individuare gli episodi critici, almeno in senso statistico-probabilistico, utilizzando una serie di variabili meteorologiche e ambientali. Infatti considerando simultaneamente opportuni intervalli di variazione di questi indicatori è possibile delimitare campioni di eventi della serie storica caratterizzati dalla presenza di elevate frequenze di episodi acuti. Questo tipo di operazione sviluppata empiricamente nei paragrafi precedenti, può essere effettuata ricorrendo a tecniche statistiche di segmentazione del campione^A.

L'analisi dei dati per mezzo della tecnica statistica CHAID (CHi squared Automatic Identification Detector) di segmentazione del campione degli eventi presenti nella serie storica, permette di produrre una serie di modelli statistici utilizzabili in fase di previsione.

In questo paragrafo vengono presentati e valutati i modelli ottenuti impiegando questa tecnica.

4.1.1 Cenni sulla tecnica di segmentazione CHAID

La tecnica CHAID^B (implementata nel software statistico SPSS) analizza con un modello statistico log-lineare la tabella di contingenza (a doppia entrata) fra ogni variabile predittore (distribuita su livelli discreti, ordinali o no) e la variabile dipendente o criterio (anch'essa discretizzata).

Per ogni variabile predittore vengono prodotti modelli statistici corrispondenti a tutti i possibili accorpamenti fra le sue categorie, con lo scopo di determinare la configurazione che meglio spiega i livelli della variabile dipendente. Ciascun modello fit è ottenuto per mezzo di criteri di massima verosimiglianza, mentre la scelta del modello migliore ovvero della configurazione ottimale della variabile è basata sulla statistica di χ^2 . Viene quindi fornita la configurazione (e la corrispondente significatività statistica) che rende massima la dipendenza fra la variabile predittore e la variabile criterio. Per le variabili che mostrano una capacità esplicativa significativa, eseguendo la segmentazione del campione secondo la configurazione scelta, si ottengono dei sottocampioni internamente omogenei e fra loro distinti sia sulla base dei valori della variabile predittore che su quelli della variabile dipendente. Su ciascun nuovo gruppo l'analisi può essere ripetuta. Alla fine della procedura si ottiene una suddivisione del campione originale in gruppi di casi omogenei, caratterizzati cioè dagli stessi valori delle variabili predittori ma ognuno dei quali corrispondente ad una propria distribuzione statistica di valori della variabile dipendente.

I possibili stati o gruppi finali ottenuti nel modello presentano una distribuzione in frequenza degli eventi per ognuna delle classi della variabile dipendente che può essere interpretata come la probabilità che un certo evento, caratterizzato da determinati valori delle variabili predittori, risulti appartenere alla data classe della variabile dipendente. Il risultato della segmentazione può essere facilmente sintetizzato attraverso un diagramma ad albero (vedi a titolo di esempio la successiva Figura 4.1.1).

4.1.2 Applicazione della tecnica CHAID per la realizzazione di modelli di previsione degli episodi acuti d'inquinamento atmosferico

Come per tutti i metodi e le tecniche utilizzate in questo studio i modelli ottenuti per la previsione sono stati identificati su una parte del campione, i periodi invernali 1993-94 e 1994-95, mentre per l'analisi ed i test di valutazione delle previsioni è stata impiegata la parte rimanente del campione cioè il periodo invernale 1995-96.

La tecnica CHAID richiede l'impiego di variabili discrete, quindi le variabili continue fra i predittori e la variabile criterio sono state trasformate in variabili ordinali su scala ad intervalli, la cui definizione è riportata in Appendice 2 ed è già stata utilizzata nei paragrafi precedenti.

In questo caso si è preferito classificare la variabile dipendente (NO₂AB) su 4 livelli discreti anziché nelle sole classi UP e DOWN, tentando così di ottenere una migliore definizione degli eventi critici e soprattutto una possibile distinzione statistica fra le situazioni maggiormente gravi e quelle più incerte. Tuttavia i risultati ottenuti mostrano che con il campione utilizzato soltanto raramente, ovvero soltanto per alcune particolari situazioni, i modelli prodotti permettono una tale distinzione¹. Viene riportata di seguito la categorizzazione della variabile dipendente:

- 1=[valori NO₂AB <100 µg/m³]
- 2=[100 ≤ valori NO₂AB <180 µg/m³]
- 3=[180 ≤ valori NO₂AB <220 µg/m³]
- 4=[valori NO₂AB ≥220 µg/m³]

Le classi 1 e 2 corrispondono a situazioni nelle quali le concentrazioni di NO₂ si sono mantenute al di sotto delle soglie di legge, e insieme formano la classe DOWN, mentre le classi 3 e 4 corrispondono alle situazioni definite "critiche" formando insieme la precedente classe UP. Le classi 3 e 4 distinguono le situazioni di maggiore incertezza circa il superamento dei limiti di legge (classe 3) da quelle in cui si sono raggiunti valori decisamente superiori al limite.

1. Questa difficoltà nel distinguere fra i casi meno gravi (classe 3) e gli eventi più gravi (classe 4) è in parte da ascrivere alla ridotta dimensione del campione di identificazione ed in particolare all'esiguo numero di eventi presenti nella classe 4, soltanto 12 rispetto ai 31 della classe 3.

La ridotta dimensione del campione limita la possibilità di costruire modelli nei quali intervengano in successione molti predittori e quindi di produrre gruppi molto caratterizzati. Si possono però costruire modelli complementari, che cioè sfruttano predittori diversi, e utilizzarli in parallelo per ottenere maggiore affidabilità e sicurezza nell'individuare gli eventi potenzialmente critici. Modelli complementari possono essere impiegati anche in cascata per chiarire eventuali situazioni di maggiore incertezza quando cioè la probabilità degli eventi di interesse non risulti sufficientemente bassa da poter escludere il verificarsi di situazioni critiche o sufficientemente elevata da poter affermare il loro verificarsi. Inoltre l'impiego di più modelli definiti con predittori diversi (cioè che utilizzano variabili differenti per spiegare i valori di NO₂AB) può rivelarsi utile nell'eventualità che i valori di alcuni predittori non risultino disponibili al momento della previsione e quindi che i modelli basati su queste variabili siano inutilizzabili².

L'operazione di accorpamento dei livelli di un predittore e quindi la scelta della sua configurazione più esplicativa viene effettuata raggruppando quelle categorie del predittore che risultano omogenee rispetto alla variabile dipendente, cioè che producono risposte statisticamente indistinguibili; il livello di tale omogeneità statistica (merge level³) risulta un elemento caratterizzante l'identificazione del modello. Nel caso dei modelli qui presentati è stato fissato un valore fra 0.05 e 0.15. Sono stati inoltre fissati pari a 5 il numero minimo di eventi presenti in ciascun gruppo dopo la segmentazione e pari a 10 il numero minimo di eventi presenti in un gruppo affinché su di esso si possa procedere ad una nuova ulteriore segmentazione. Inoltre è stato posto pari a 0.10 il livello di significato affinché un predittore possa portare un contributo esplicativo significativo, cioè possa essere inserito nel processo di segmentazione del campione.

La metodologia statistica con la quale vengono identificati i modelli fit

2. Fra le categorie dei predittori viene creata automaticamente anche una classe relativa ai casi nei quali il valore del predittore è assente, e questa classe è trattata analogamente alle altre; nei diagrammi la classe dei dati mancanti è individuata da un punto; è evidente che i risultati relativi a questa classe sono sempre da considerare interlocutori ed è preferibile il risultato di un modello con dati completi.

3. Questo significa che due categorie del predittore vengono raggruppate insieme se i modelli fit ottenuti con le due categorie insieme o separate risultano distinti ad un livello di significato superiore al merge level. Merge level piccoli favoriscono l'accorpamento delle categorie, mentre un merge level pari a 1 impedisce qualsiasi accorpamento.

varia se il predittore viene considerato ordinale, cioè se si è in presenza di relazioni d'ordine (monotone) fra le diverse categorie, o se invece queste vengono considerate prive di legame ordinale. Per semplicità nel presente caso tutte le variabili sono sempre state considerate non ordinali, anche se in realtà, molte di loro lo erano. Nei modelli ottenuti non si sono però mai verificati casi di accorpamenti fra categorie non contigue per predittori che di fatto erano ordinali, e quindi l'ordinamento delle categorie è risultato preservato senza essere stato imposto⁴.

4.1.3 Modelli CHAID per la previsione degli episodi acuti d'inquinamento atmosferico: selezione dei modelli

Nella costruzione dei modelli CHAID l'obiettivo è quello di produrre una suddivisione del campione d'identificazione in gruppi di eventi all'interno di quali risulti massima la percentuale (interpretabile come probabilità) corrispondente agli eventi critici. In questo caso i valori dei predittori che caratterizzano tali gruppi spiegano ed individuano gli episodi acuti. Altrettanto importante risulta anche la presenza di gruppi nei quali la percentuale di eventi critici è minima, i quali permettono di individuare le condizioni che non portano ad episodi acuti.

Applicando la procedura di costruzione del modello ci si accorge che molte variabili risultano significative, nel senso cioè che portano un contributo esplicativo statisticamente rilevante dei livelli della variabile NO₂AB. Fra queste ottengono la massima significatività quelle legate al fenomeno di inversione termica ed all'intensità del vento. L'impiego nei primi passi della segmentazione di variabili fortemente significative può portare ad un rapido esaurimento del processo, in quanto le variabili rimanenti possono non risultare più significative a causa delle correlazioni e delle dipendenze reciproche.

Per utilizzare compiutamente l'informazione prodotta da più variabili è talvolta preferibile iniziare la segmentazione con variabili meno significative il cui contributo informativo sarebbe altrimenti perduto, "coperto" dalla segmentazione prodotta da quelle maggiormente significative.

4. In realtà le tecniche di costruzione ed identificazione dei modelli statistici differiscono leggermente se i predittori sono ordinali o no.

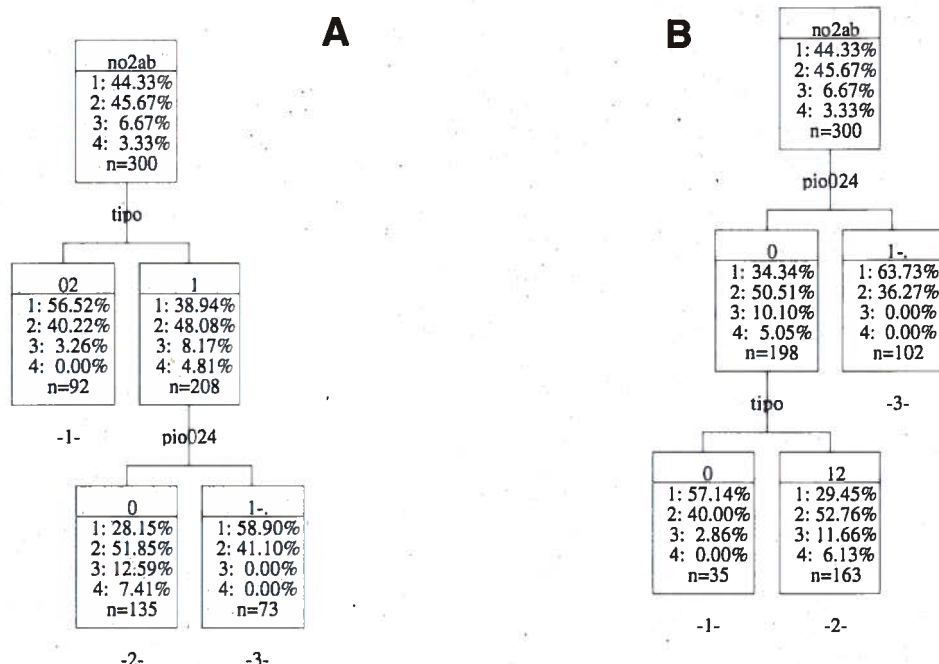


Figura 4.1.1: diagrammi ad albero dei modelli CHAID “base”, a monte dei modelli successivi presentati. Le variabili predittori che agiscono nella segmentazione del campione sono costituite da: “tipo” ovvero classe del giorno (festivo=0, feriale=1, prefestivo=2); “pio024” cioè precipitazione cumulata giornaliera (0=nessuna precipitazione, 1=presenza di pioggia).

Nella parte superiore di ciascun riquadro compaiono i numeri che individuano le classi della variabile predittore; nella parte inferiore sono indicate le frequenze percentuali per ciascuna classe della variabile dipendente (NO2AB); “n” è il numero totale dei casi presenti in quello stato.

Per le considerazioni sopra esposte e seguendo le indicazioni ottenute nei precedenti paragrafi, per tutti i modelli qui presentati i primi passi del processo di costruzione sono stati eseguiti con le variabili TIPO e PIO024 (diagrammi ad albero in Figura 4.1.1 A e B).

Questo nella sostanza equivale a selezionare un campione che escluda i giorni di pioggia (PIO024=0) e consideri o i soli giorni feriali o escluda i giorni festivi.

Infatti come si può osservare dal diagramma (A) la segmentazione sulla variabile TIPO porta a due campioni caratterizzati da un lato dal valore TIPO=1 corrispondente ai giorni feriali e dall’altro dai valori TIPO=0 o 2 relativi ai giorni festivi e prefestivi rispettivamente. Nel secondo gruppo

(individuato nel diagramma A di Figura 4.1.1 con il numero 1) sono presenti 92 casi dei quali 3 (3.26%) rappresentano eventi critici (cioè della classe UP, ma nessuno di questi è relativo al superamento della soglia di attenzione), mentre nel primo gruppo risultano 208 casi dei quali 27 sono eventi critici (circa il 13% del campione).

Sempre riferendosi al diagramma A, eseguendo successivamente la segmentazione rispetto alla variabile PIO024 (che è significativa soltanto sul gruppo TIPO=1) il nuovo segmento che contiene i casi d'interesse è ridotto a 135 eventi nei quali gli eventi critici risultano ora in percentuale pari al 20%. Il segmento (numero 3) corrispondente a $PIO024 \neq 0$ non contiene invece eventi d'interesse.

Il diagramma rappresentato in Figura 4.1.1 B è invece ottenuto invertendo l'ordine di ingresso delle due variabili nel processo di segmentazione. La differenziazione prodotta dalla variabile PIO024 porta a raggruppare tutti gli eventi critici in un unico segmento di 198 casi (dei quali circa il 15% relativo alla classe UP). Il successivo intervento della variabile TIPO su questo segmento produce una suddivisione in due gruppi: TIPO=0, i giorni festivi, al cui interno è presente un solo caso UP, ed il gruppo relativo ai giorni non festivi (feriali e prefestivi) con 42 casi critici pari a circa il 18% dei 163 eventi presenti nel gruppo (numero 2 del diagramma B).

Si può quindi osservare che i diagrammi ottenuti invertendo l'ordine d'ingresso delle variabili risultano diversi poiché la procedura statistica porta a selezionare dei campioni d'interesse (ovvero con la maggior parte di casi critici) di dimensioni diseguali e soprattutto caratterizzati da valori diversi dei predittori: in un caso solo i giorni feriali, nell'altro ai feriali sono associati anche i prefestivi. A questa diversificazione fa d'altra parte riscontro la sostanziale conferma delle suddivisioni eseguite empiricamente nelle precedenti paragrafi, cioè l'osservazione che: 1) la presenza di pioggia o di condizioni che portano a precipitazioni rende estremamente improbabile il verificarsi di episodi acuti d'inquinamento; 2) la probabilità di incorrere in episodi acuti è nei giorni festivi decisamente ridotta, e ciò non può che essere imputato alle diverse caratteristiche emissive.

Tutti i modelli qui di seguito discussi hanno a monte uno dei due diagrammi presentati in Figura 4.1.1; quelli che discendono dal diagramma A sono identificati con questa lettera e le loro segmentazioni si sviluppano a partire dal gruppo 2 di questo diagramma comprensivo di 135 casi dei qua-

li 27 della classe UP (17 in classe 3 e 10 in classe 4 di NO2AB); i modelli identificati con la lettera B discendono invece dal gruppo 2 del diagramma B contenente 163 casi di cui 29 della classe UP (19 della classe 3 e 10 della classe 4 di NO2AB).

MODELLO A1

In Figura 4.1.2 è presentato uno dei più semplici ed efficaci modelli identificati. Questo modello impiega come prima variabile di segmentazione NOIT suddividendo il campione di partenza in tre nuovi gruppi, il primo dei quali relativo al valore $\text{NOIT}=0$ (nessuna ora di inversione termica fra le 13 del giorno precedente e le 10 del giorno stesso) accorpato al gruppo di dati per i quali non è disponibile il valore di NOIT (individuato da un punto nel diagramma). Questo primo gruppo (identificato dal numero 1 nel diagramma) è composto da 44 casi e non contiene alcun evento della classe UP, individua quindi delle condizioni nelle quali è estremamente improbabile il verificarsi di episodi acuti. La frequenza-probabilità degli eventi critici è per questo gruppo nulla.

Il secondo gruppo è relativo a NOIT pari a 1 e 2 (cioè, secondo la discretizzazione riportata in Appendice 2, corrisponde ad un numero di ore di inversione termica comprese fra 1 e 12): contiene 64 casi dei quali circa il 14% appartenente alla classe UP. Su questo gruppo risulta agire in modo significativo la variabile V15010 che porta ad un'ulteriore segmentazione in due nuovi gruppi. Il primo di questi (numero 2 del diagramma), corrispondente alle categorie $\text{V15010}=0$ ($\text{V15010}<1$ m/s) ed alla classe di dati assenti, contiene 25 casi dei quali 9 (36%) della classe UP (8 in classe 3 ed 1 in classe 4 di NO2AB).

Questo gruppo (caratterizzato nel complesso da un numero di ore di inversione termica compreso tra 1 e 12 e da velocità media del vento nelle prime 10 ore del giorno minore di 1 m/s nella stazione di M.Morello) individua situazioni nelle quali la probabilità del verificarsi di eventi acuti non è trascurabile. Poiché però gli eventi della classe UP al suo interno non costituiscono la maggioranza dei casi presenti, a tali condizioni non può essere fatta corrispondere neppure una probabilità elevata del verificarsi di eventi acuti. Questo gruppo individua perciò situazioni di incertezza, nelle quali è possibile ma non altamente probabile il verificarsi di eventi acuti.

Il secondo gruppo (numero 3 nel diagramma) corrisponde invece agli altri valori del predittore V15010 ($\text{V15010}>1$ m/s) ed al suo interno su di un totale

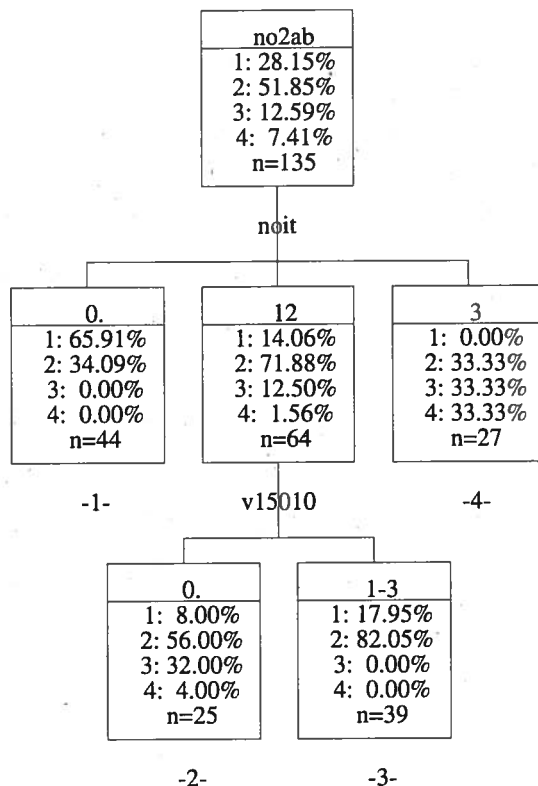


Figura 4.1.2: diagramma ad albero per il modello CHAID A1. Il diagramma si sviluppa a partire dallo stato 2 del diagramma di Figura 4.1.1 A. Le segmentazioni sono ottenute con le variabili "noit" e "v15010". Dei quattro gruppi o stati finali in due (numeri 1 e 3 della figura) sono assegnate probabilità nulle per gli eventi UP (classi individuate con i numeri 3 e 4 all'interno delle celle). Nei rimanenti stati il numero 4 assegna elevata probabilità agli eventi UP (33.33%+33.33%), mentre il gruppo 3 è caratterizzato da una frequenza intermedia di eventi UP (32%+4%)

di 39 casi non è presente alcun evento UP. Questo gruppo individua quindi condizioni nelle quali è molto improbabile il verificarsi di episodi acuti.

L'ultimo gruppo presente nel diagramma, individuato dal numero 4 è ancora relativo alla prima segmentazione effettuata e corrisponde al valore NOIT=3, cioè numero di ore di inversione termica maggiore di 12. In questo sono presenti 27 casi dei quali ben 18 (pari al 67%) corrispondono alla classe UP, equamente distribuiti tra le classi 3 e 4 di NO2AB. Esso individua quindi condizioni nelle quali è molto probabile il verificarsi di episodi acuti.

MODELLO A2

In questo modello (diagramma in Figura 4.1.3) i predittori che intervengono a determinare i gruppi o stati finali sono tre: INV10H, V14010 e INV010, variabili non impiegate nel precedente modello A1.

I gruppi finali che si ottengono sono 6, il gruppo 1 è identificato dal solo valore INV10H=0 (cioè valore della differenza di temperatura fra le stazioni di M.Morello e Ximeniano alle ore 10 minore o uguale di -1 °C), contiene 48 casi dei quali soltanto uno della classe UP, e caratterizzato quindi da condizioni nelle quali il verificarsi di episodi acuti è sostanzialmente improbabile. Il gruppo 2 è identificato dai valori INV10H=1 (accorpato alla classe dei dati assenti) e V1410=0 (velocità media del vento nelle prime 10 ore del giorno misurata presso la stazione Ximeniano inferiore ad 1 m/s), contenente soltanto 9 casi dei quali 5 della classe UP, e individua situazioni nelle quali il verificarsi di eventi critici è assai probabile. Il gruppo 3 (ancora INV10H=1 e dati mancanti, e relativo a tutti gli altri valori di V14010) contiene 36 casi dei quali soltanto 2 appartenenti alla classe

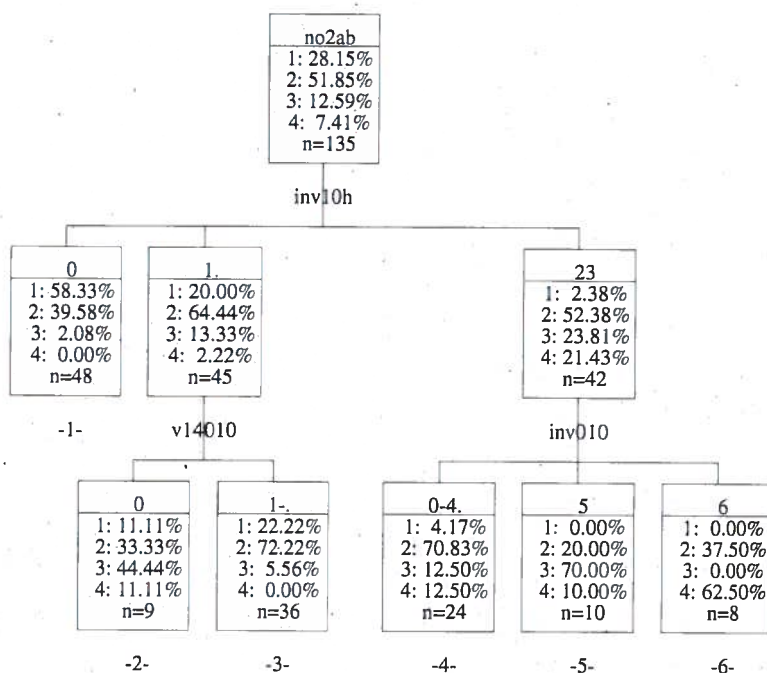


Figura 4.1.3: diagramma ad albero del modello CHAID A2. I predittori che producono la segmentazione del campione sono "inv10h" e "inv010" relativi all'inversione termica e "v14010" relativo all'intensità del vento.

UP, è quindi anch'esso corrispondente a situazioni nelle quali il verificarsi degli eventi critici è assai improbabile. I gruppi 4, 5 e 6 sono individuati a partire dai valori INV10H uguale a 2 e 3 (inversione termica alle ore 10 maggiore di 1° C) e corrispondono ai diversi livelli del predittore INV010. Il gruppo 4 (INV010 uguale 0, 1, 2, 3, 4 e gruppo dei dati assenti, cioè in sostanza $INV010 < 2^\circ \text{C}$) contiene 24 casi dei quali 6 della classe UP, corrisponde quindi a situazioni di incertezza nelle quali vi sono probabilità non trascurabili del manifestarsi di eventi acuti. Il gruppo 5 (INV010 uguale 5) contiene 10 casi dei quali ben 8 della classe UP, così come il gruppo 6 (INV010 uguale 6) con 5 eventi UP su 8 casi presenti, rappresentano invece condizioni nelle quali gli eventi critici risultano molto probabili.

MODELLI A2b e A2c

Partendo dalla prima segmentazione del precedente modello A2, ottenuta con la variabile INV10H ed impiegando per le ulteriori suddivisioni variabili diverse si ottengono altri modelli i cui diagrammi sono mostrati nelle Figure 4.1.4 (A2b) e 4.1.5 (A2c)

Nel modello A2b oltre a INV10H vengono utilizzate le variabili NOIPGP (numero di ore di inversione termica fra le 13 e le 24 del giorno precedente) e V15010.

Il processo di segmentazione porta ad identificare 6 gruppi finali, il primo dei quali coincidente con il numero 1 del modello A2. Questo, insieme ai gruppi 2 e 4 corrisponde a situazioni nelle quali la probabilità di eventi critici è estremamente bassa; il gruppo numero 6 è invece indicativo di situazioni più incerte (la frequenza dei casi UP è del 22%, 2 eventi su 9) mentre il gruppo 3 presenta una frequenza-probabilità di episodi acuti piuttosto rilevante (5 eventi UP su 11 pari a circa il 45% dei casi). Infine il gruppo 5 con 16 casi nella classe UP su un totale di 23 (70%) corrisponde a condizioni di elevata probabilità di episodi acuti.

Il modello A2c impiega oltre al predittore INV10H le variabili INV010, V15010 e NOIPGP. Si ottengono 8 gruppi finali dei quali il numero 1 (analogo al numero 1 dei modelli A2 e A2b) e il numero 2 sono corrispondenti a condizioni nelle quali gli episodi critici appaiono improbabili. I gruppi numero 3, 5 e 8 corrispondono a condizioni con bassa probabilità di episodi critici. I gruppi finali numero 4 e soprattutto 6 e 7 corrispondono invece ad elevate probabilità di episodi critici, con frequenze di eventi del-

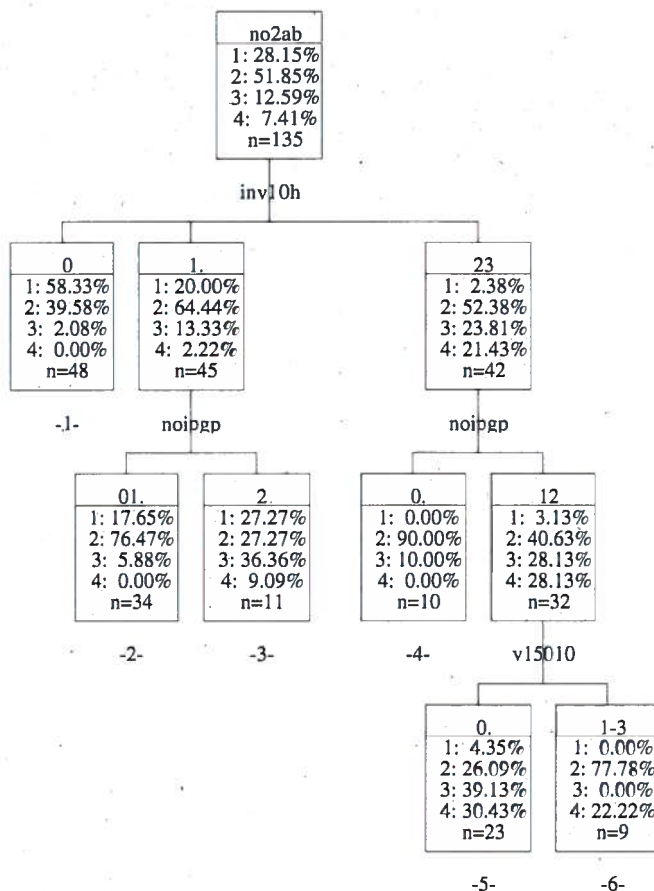


Figura 4.1.4: diagramma ad albero del modello CHAID A2b. Le variabili impiegate sono “inv10h” e “noipgp” relative all’inversione termica e “v15010” relativa all’intensità del vento.

la classe UP pari a circa il 55% (5 su 9), l’89% (8 su 9) e l’83% (5 su 6) rispettivamente.

Rispetto all’A2b il modello A2c porta ad una maggiore suddivisione del campione, i gruppi finali che si ottengono hanno dimensioni relativamente basse ed i casi d’interesse sono presenti in modo più o meno rilevante in diversi di questi. Si ottiene quindi una definizione più fine e precisa dei gruppi finali in base ai valori dei predittori, ma anche un indesiderato effetto di dispersione degli eventi UP.

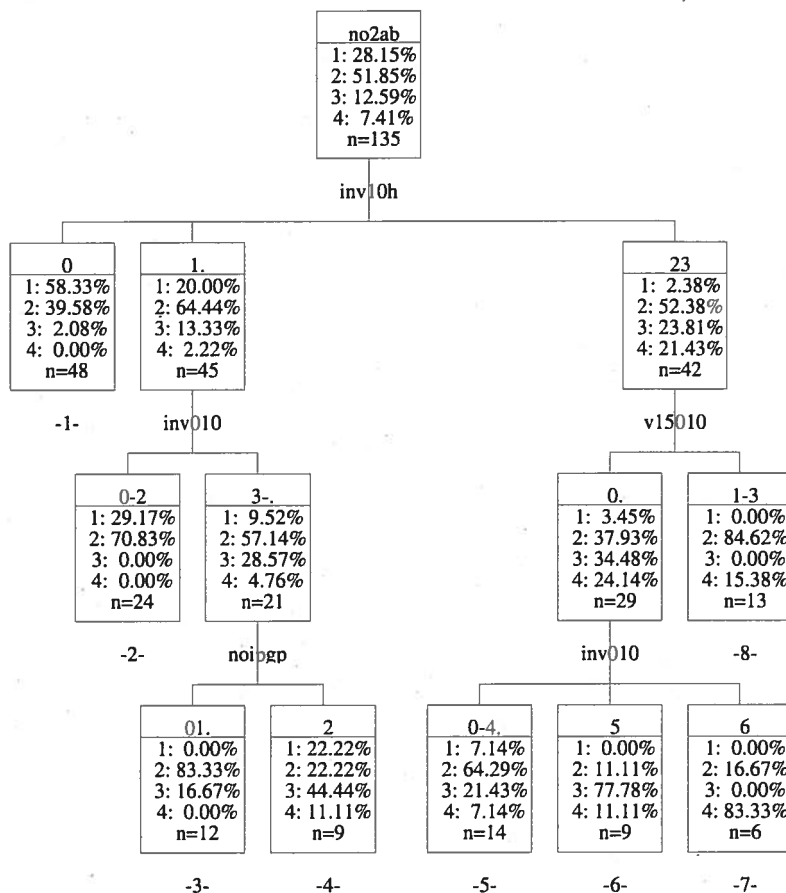


Figura 4.1.5: diagramma ad albero del modello CHAID A2c.

MODELLO A3

Il modello A3 (Figura 4.1.6) impiega come predittore al primo livello la variabile INV010C producendo tre gruppi relativi ai tre valori di questa (0, 1, 2). Sui primi due gruppi (0 e 1) opera poi la variabile V14010, mentre sul terzo gruppo (il numero 2 di INV010C, che presenta il maggior numero di eventi della classe UP) opera un'ulteriore segmentazione la variabile V15010. Si ottengono infine 6 stati finali dei quali i numeri 1 e 2 del diagramma presentato in Figura 4.1.6 corrispondono a probabilità-frequenze trascurabili degli eventi d'interesse; i gruppi identificati dai numeri 4 e 6 corrispondono a situazioni più incerte caratterizzate però da una modesta

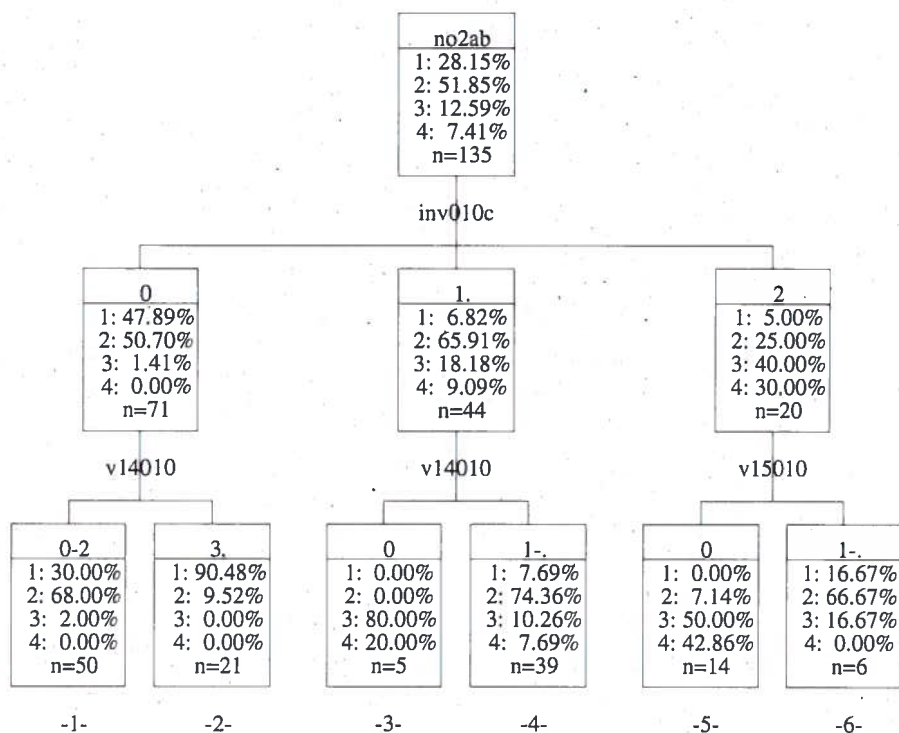


Figura 4.1.6: diagramma ad albero del modello CHAID A3.

probabilità degli eventi UP (18% e 17% rispettivamente); ed infine gli stati 3 e 5 sono caratterizzati invece da elevata probabilità di eventi acuti (100% e 93% rispettivamente).

MODELLO A4

I predittori impiegati nella segmentazione sono 4: V14010 (due volte), V15010, INV010 e NOIPGP (Figura 4.1.7). Per primo agisce V14010 producendo una suddivisione che separa i valori 0 e 1 (e dati assenti) da 2 e 3. Questi ultimi producono gli stati finali 7 e 8 relativi a situazioni con eventi UP improbabili. Il primo gruppo viene poi suddiviso attraverso la variabile V15010 in due ulteriori segmenti. Sul secondo (V15010 ≠ 0) interviene poi NOIPGP che porta agli stati finali 5 (caratterizzato dall'assenza di eventi UP) e 6, che corrisponde a situazioni di incertezza con una probabilità di eventi UP intorno al 26%.

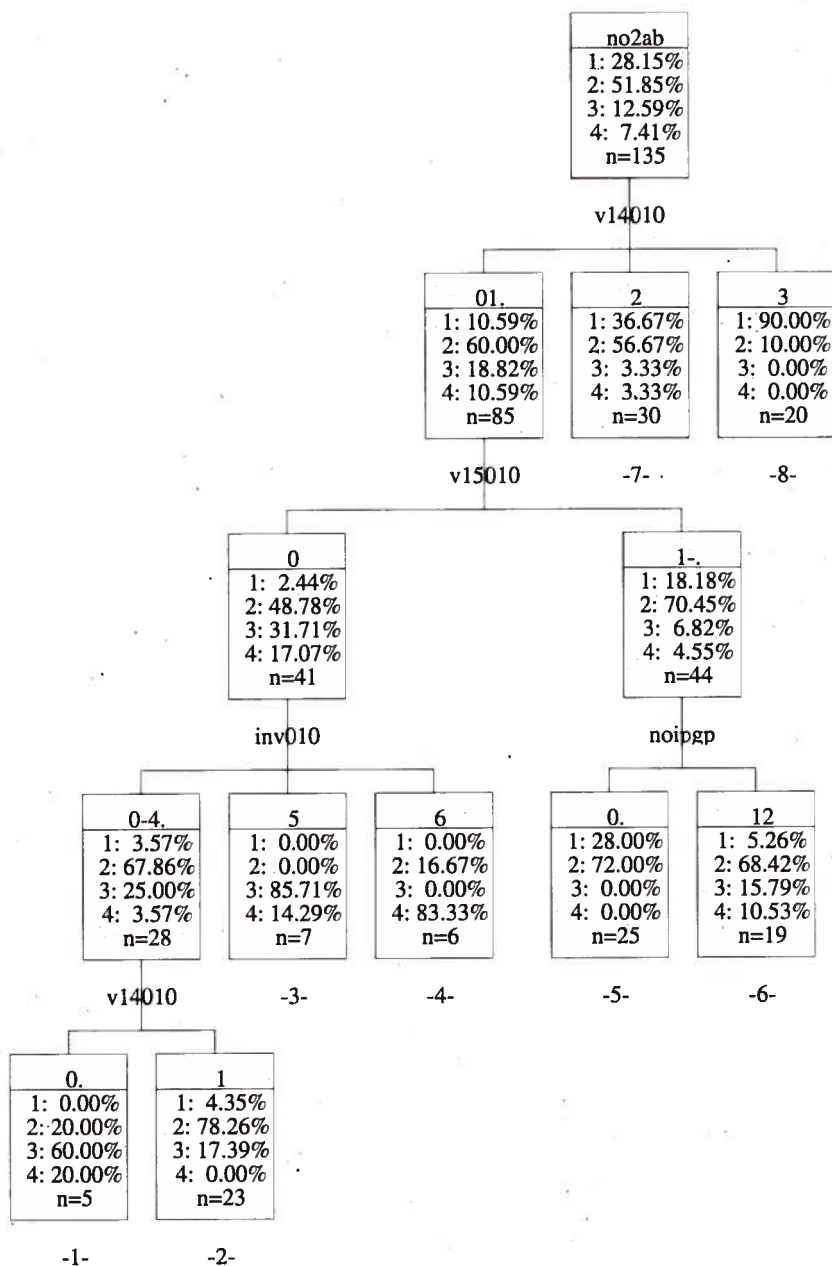


Figura 4.1.7: diagramma ad albero del modello CHAID A4.

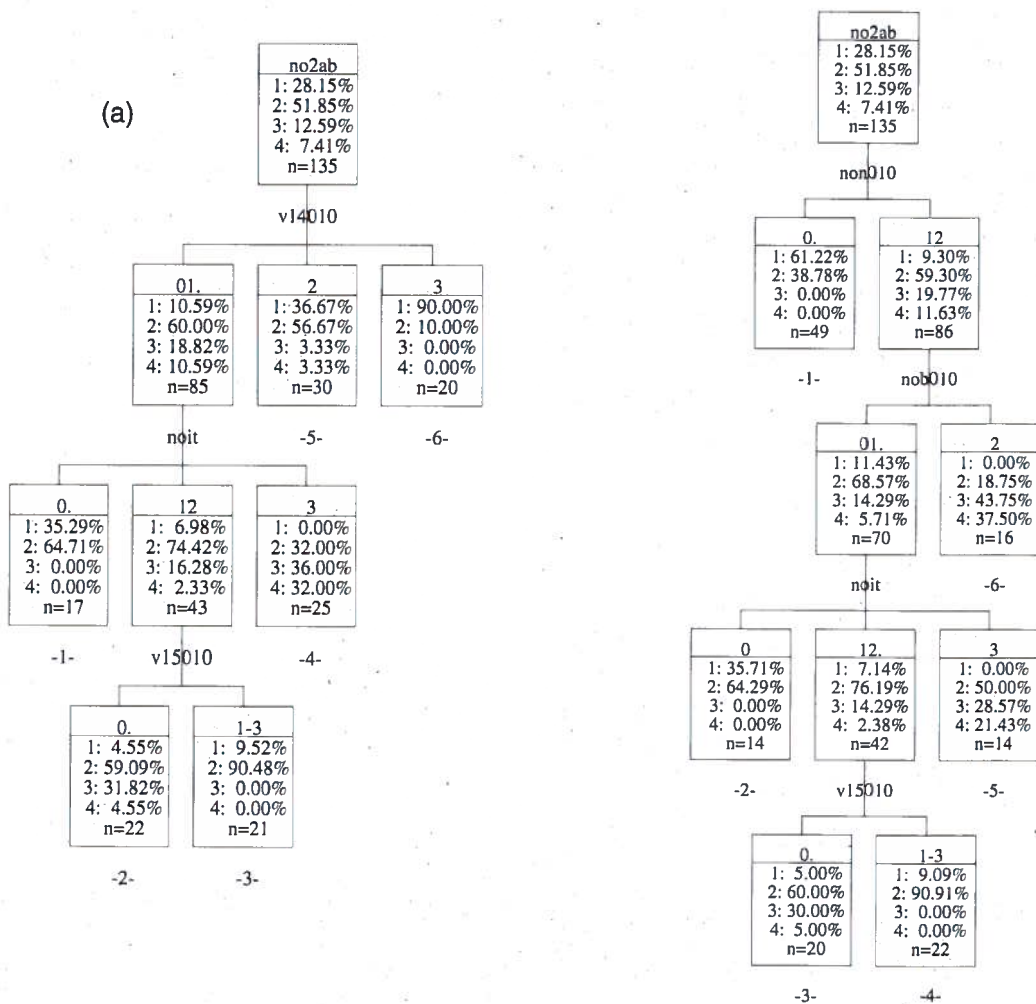


Figura 4.1.8: (a) diagramma ad albero del modello CHAID A5; (b) diagramma ad albero del modello CHAID A6.

Il segmento relativo a V15010=0 è ulteriormente suddiviso per mezzo del predittore INV010 in tre gruppi; il primo (INV010<5) viene ancora separato da un nuovo intervento della variabile V14010, mentre gli altri producono gli stati finali 3 e 4 caratterizzati da elevate frequenze degli eventi di interesse (100% e 83% rispettivamente). Dall'ulteriore azione della variabile V14010 si determinano gli stati finali 1 e 2 caratterizzati

il primo da elevata probabilità di eventi UP (80%) ed il secondo da una situazione di incertezza con bassa frequenza di casi UP (circa il 17%).

MODELLO A5

In questo modello vengono impiegate le variabili V14010, NOIT e V15010. Si ottengono 6 stati finali: i numeri 1, 3 e 6 (diagramma in Figura 4.1.8 (a)) non contengono eventi della classe UP, il gruppo 5 corrisponde ad una frequenza trascurabile di eventi d'interesse (circa il 7%, 2 casi su 30), il gruppo 2 presenta una situazione d'incertezza con 8 eventi UP su 22, pari ad una probabilità di circa il 36%. Infine il segmento 4 presenta una elevata frequenza di eventi d'interesse con 17 casi su 25, corrispondenti al 68% del campione presente nel gruppo.

MODELLO A6

Nel modello A6 mostrato in Figura 4.1.8 (b), diversamente da tutti i precedenti, sono state impiegate come predittori alcune variabili relative alle concentrazioni dei precursori dell' NO_2 : NON010 e NOB010. Nelle segmentazioni successive vengono poi utilizzate le variabili NOIT e V15010.

Si ottengono 6 stati finali: i numeri 1, 2 e 4 non contengono casi relativi ad eventi della classe UP; il gruppo 3 presenta invece una frequenza pari al 35% di eventi UP e corrisponde quindi ad una situazione di incertezza, mentre gli stati 5 e 6 presentano maggiori percentuali di eventi d'interesse, con il 50% (7 casi su 14) per il gruppo 5 e l'81% (13 casi su 16) per il gruppo 6.

MODELLI A7a, A7b, A7c

Vengono di seguito presentati tre modelli che non utilizzano come predittore alcuna variabile legata all'inversione termica.

In Figura 4.1.9 è mostrato il diagramma del modello A7a che impiega come predittori le variabili V14010, V15010 e T14010 (temperatura media registrata presso la stazione Ximeniano fra le ore 00 e le ore 10).

Gli stati finali che si ottengono sono 6 dei quali il numero 1 ed il 3 corrispondenti ad elevate frequenze degli eventi della classe UP (76%, 16 casi su 21 per il gruppo 1; 50%, 4 casi su 8 per il gruppo 3). Fra gli stati rimanenti quello indicato nel diagramma con il numero 2 presenta una bassa probabilità di eventi UP (14% cioè 2 casi su 14) mentre per gli altri (indicati dai numeri 4, 5 e 6) le frequenze degli eventi UP sono ancora inferiori, indicando quindi una probabilità trascurabile di incorrere in episodi acuti caratterizzati da quei valori dei predittori.

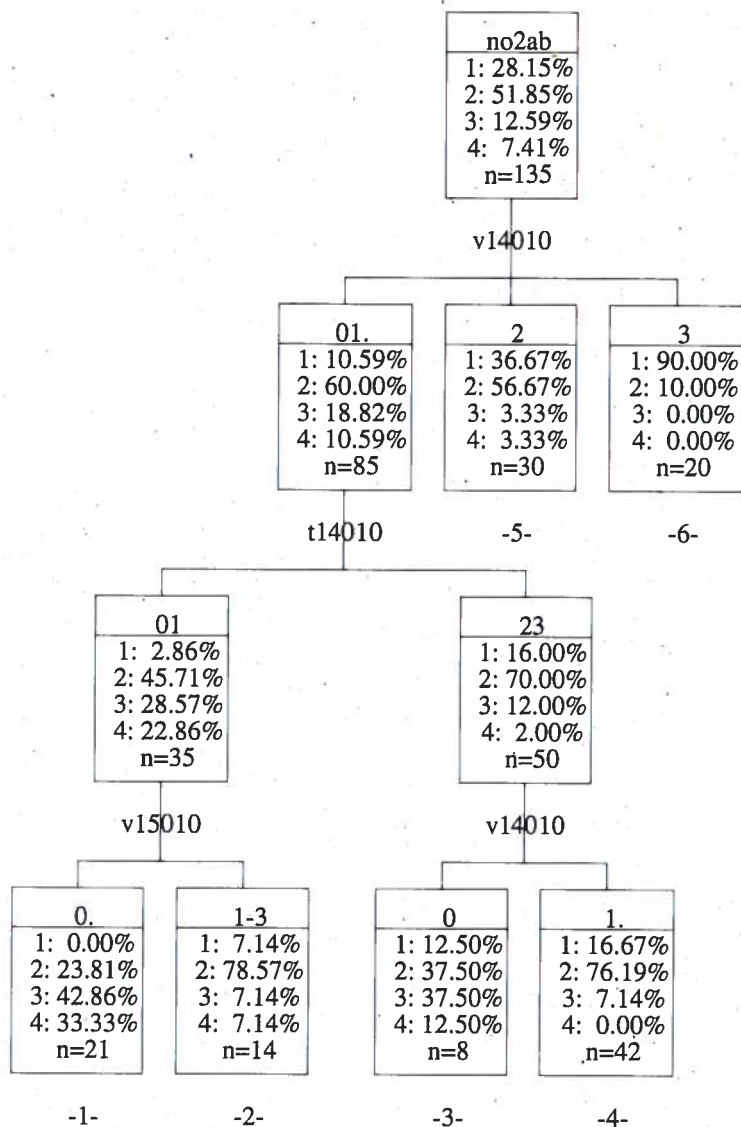


Figura 4.1.9: diagramma ad albero del modello CHAID A7a.

In questo modello (e ciò vale anche per i successivi) è da segnalare la presenza di un predittore, T14010, legato alla temperatura, che tuttavia non fornisce indicazioni sulla presenza del fenomeno di inversione termica. L'apporto informativo di questo predittore risulta significativo e

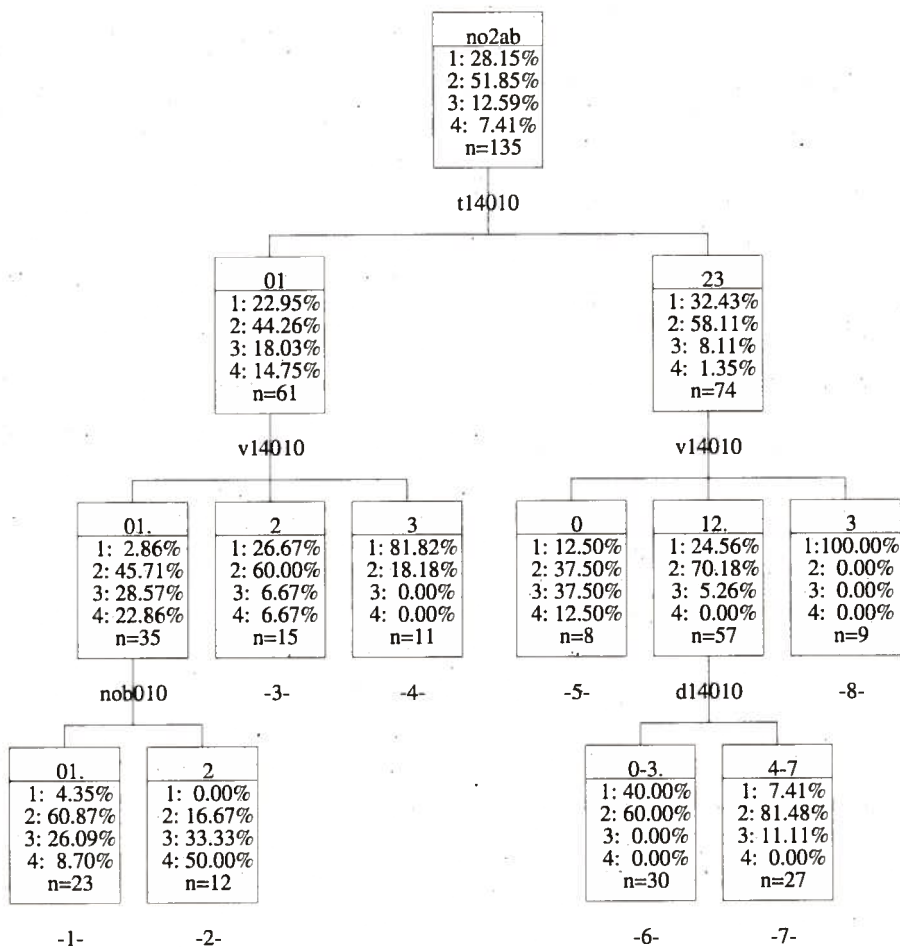


Figura 4.1.10: diagramma ad albero del CHAID A7b.

permette di suddividere il gruppo V14010<2, che contiene la maggioranza degli eventi d'interesse, in due segmenti caratterizzati da valori distinti di temperatura (si veda la ramificazione del diagramma di Figura 4.1.9). Da una parte, relativa alle temperature più basse (inferiori a 6°C), vengono a trovarsi 35 casi dei quali ben 18 appartenenti alla classe UP, dall'altra, per temperature superiori, si trovano 50 casi dei quali 7 della classe UP. Questa suddivisione permette in qualche modo di valutare l'influenza del parametro temperatura nel verificarsi degli episodi

critici d'inquinamento (si veda la discussione fatta nel paragrafo 3.1.1 lettera c).

In Figura 4.1.10 è mostrato il diagramma del modello A7b che impiega come predittori le variabili T14010, V14010, D14010 (direzione prevalente del vento nella stazione Ximeniano fra le ore 00 e le ore 10) e NOB010.

Gli stati finali che si ottengono sono 8, dei quali i numeri 4, 6 e 8 non contengono eventi della classe UP. I gruppi 3 e 7 contengono basse frequenze di presenza degli eventi d'interesse (13% il numero 3, 11% il numero 7). Il gruppo 1 corrisponde a condizioni maggiormente incerte con una frequenza-probabilità degli eventi UP del 35% (8 casi su 23), mentre gli stati finali 2 e 5 corrispondono alle situazioni di massima probabilità degli episodi acuti con frequenze dei casi d'interesse pari a 83% (8 casi su 12) per il gruppo 2 e pari al 50% (4 casi su 8) per il gruppo 5.

Si osserva che l'intervento della variabile D14010 è relativamente poco rilevante ai fini della previsione perché agisce su un campione con una bassa frequenza di eventi d'interesse (5%) portando allo stato finale 7 nel quale si mantiene sostanzialmente molto bassa la presenza degli eventi UP. L'effetto maggiormente rilevante è quello di individuare lo stato 6 nel quale sono del tutto assenti gli eventi d'interesse.

L'importanza di un modello come questo sta soprattutto nel fatto che le variabili meteorologiche utilizzate appartengono ad una sola stazione (Ximeniano) e quindi può essere utilizzato quando non siano noti per motivi di qualsiasi natura i dati meteorologici dell'altra stazione (M. Morrello).

In Figura 4.1.11 è riportato il diagramma relativo al modello A7c, che impiega come variabili predittori soltanto V15010 e T14010.

I gruppi finali che si ottengono sono 5 dei quali i numeri 4 e 5 relativi a situazioni nelle quali appare improbabile il verificarsi degli eventi acuti d'inquinamento.

Gli stati 2 e 3 corrispondono invece a situazioni di incertezza: nel gruppo 2 la frequenza degli eventi UP risulta del 26%, cioè sono presenti 6 casi UP su 23; nel gruppo 3 si trovano invece 5 eventi UP su 16 con una frequenza di circa il 31%.

Infine nello stato 1 è presente una maggioranza di eventi UP (15 su 20) corrispondente ad una frequenza-probabilità del 75%.

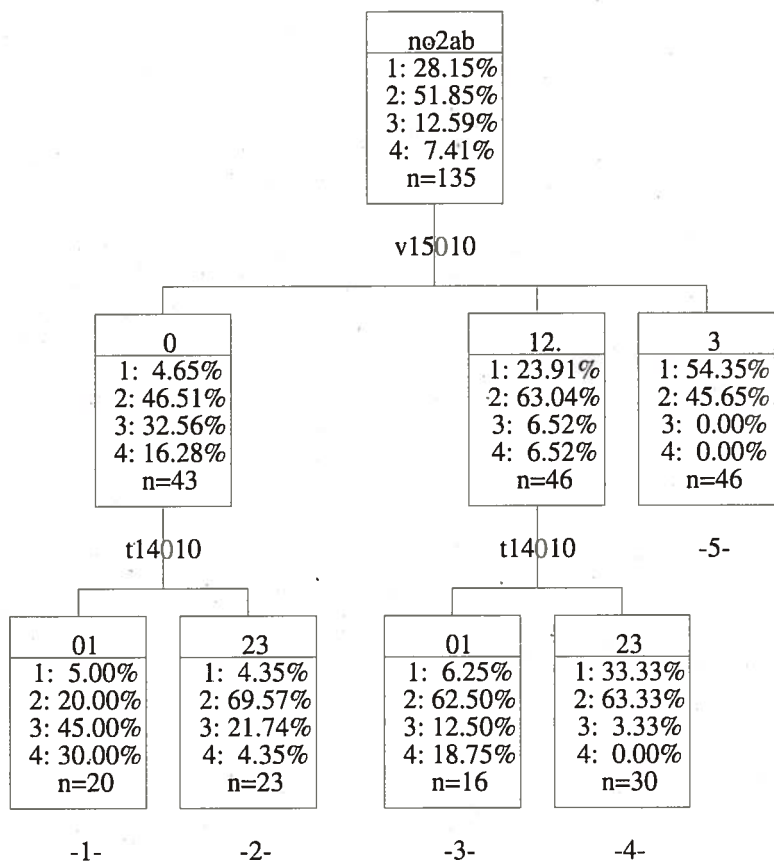


Figura 4.1.11.: diagramma ad albero del modello CHAID A7c.

MODELLO B1

Utilizzando come campione iniziale quello relativo al gruppo 2 del diagramma B di Figura 4.1.1 si ottiene una nuova serie di modelli per molti aspetti simili ma non esattamente uguali ai precedenti.

Il modello B1 mostrato in Figura 4.1.12 ha una struttura analoga a quella del modello A1, utilizzando come predittori le variabili NOIT e V15010; viene inoltre utilizzato (perché significativo) TRM8H (numero di veicoli contati fra le 7 e le 8 della mattina presso la stazione di via Ponte alle Mosse) variabile che tiene ben conto delle caratteristiche emissive del traffico veicolare⁵.

5. Si vedano i paragrafi precedenti (in particolare il 3.1.1 lettera b).

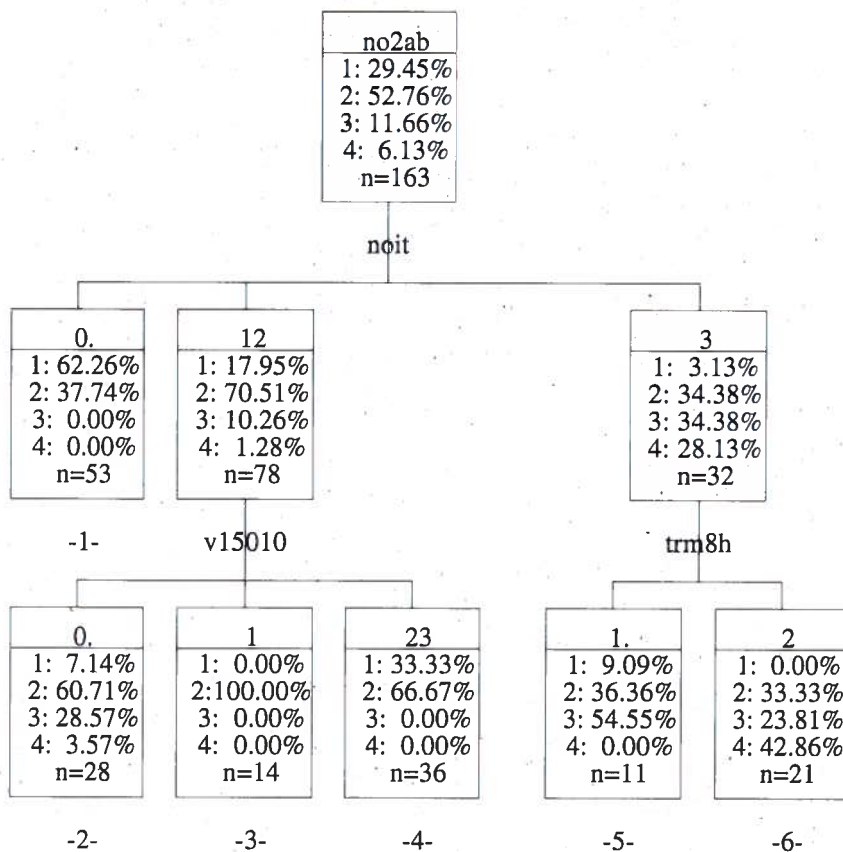


Figura 4.1.12: diagramma ad albero del modello CHAID B1.

Gli stati finali che si ottengono sono 6 dei quali i numeri 1, 3 e 4 relativi a condizioni nelle quali gli episodi acuti risultano assolutamente improbabili (nessun caso appartenente alla classe UP). Il gruppo identificato nel diagramma dal numero 2 corrisponde invece a condizioni di incertezza con 8 casi appartenenti alla classe UP (32%) sui 28 del gruppo, ed è individuato da valori dei parametri predittori esattamente uguali a quelli dell'analogo gruppo del modello A1. Infine gli stati 5 e 6 corrispondono a quelli con le maggiori frequenze di eventi critici: 55% (6 su 11) per il gruppo 5 e 67% (14 su 21) per il gruppo 6. Questa suddivisione, di rilevante significato in quanto ripartisce il campione in base alle caratteristiche emmissive, non è invece presente nel modello A1.

Nella sostanza è solo questa suddivisione che porta diversità rispetto al

modello A1, ma tenuto conto del fatto che in quel caso (A1) sono assenti dal campione i giorni prefestivi e che il valore di TRM8H che porta allo stato 5 del modello B1 corrisponde di fatto ai giorni di minor traffico e quindi in massima parte ai prefestivi, le informazioni fornite in più dal modello B1 corrispondono soltanto ad una definizione delle frequenze di eventi d'interesse in questi giorni particolari.

MODELLO B2

Il diagramma presentato in Figura 4.1.13 mostra il processo di segmentazione che porta a determinare il modello B2. Questo impiega come predittori le variabili INV010, V14010 e T14MIN (temperatura minima giornaliera registrata nella stazione Ximeniano).

Si ottengono 7 stati finali: i numeri 1 e 2 corrispondono a situazioni

no2ab				
1: 29.45%				
2: 52.76%				
3: 11.66%				
4: 6.13%				
n=163				
inv010				
0	12	34	5	6
1: 72.97%	1: 30.61%	1: 6.00%	1: 17.65%	1: 0.00%
2: 27.03%	2: 67.35%	2: 70.00%	2: 23.53%	2: 40.00%
3: 0.00%	3: 2.04%	3: 16.00%	3: 52.94%	3: 10.00%
4: 0.00%	4: 0.00%	4: 8.00%	4: 5.88%	4: 50.00%
n=37	n=49	n=50	n=17	n=10
-1-	-2-	v14010	t14min	-7-
0	1-	0	1-3	
1: 0.00%	1: 6.82%	1: 0.00%	1: 27.27%	
2: 16.67%	2: 77.27%	2: 0.00%	2: 36.36%	
3: 66.67%	3: 9.09%	3: 100.00%	3: 27.27%	
4: 16.67%	4: 6.82%	4: 0.00%	4: 9.09%	
n=6	n=44	n=6	n=11	
-3-	-4-	-5-	-6-	

Figura 4.1.13: diagramma ad albero del modello CHAID B2.

nelle quali risulta improbabile il verificarsi di episodi acuti di inquinamento atmosferico; gli stati 4 e 6 individuano invece situazioni di incertezza con frequenze degli eventi UP pari a circa il 16% (7 casi su 44) per lo stato 4 e circa il 36% (4 casi su 11) per lo stato 6. Mentre nei gruppi indicati con i numeri 3, 5 e 7 gli eventi UP costituiscono la maggioranza dei rispettivi segmenti campionari, con frequenze del 83% (5 casi su 6) per il gruppo 3, del 100% (6 casi su 6) per il gruppo 5 e del 60% (6 casi su 10) per il gruppo 7.

MODELLO B3

Nella Figura 4.1.14 è mostrato il diagramma relativo al modello B3, il quale impiega come variabili predittori INV010C, V14010 e V15010.

Questo modello è l'analogo del modello A3 (stessi predittori e stesse

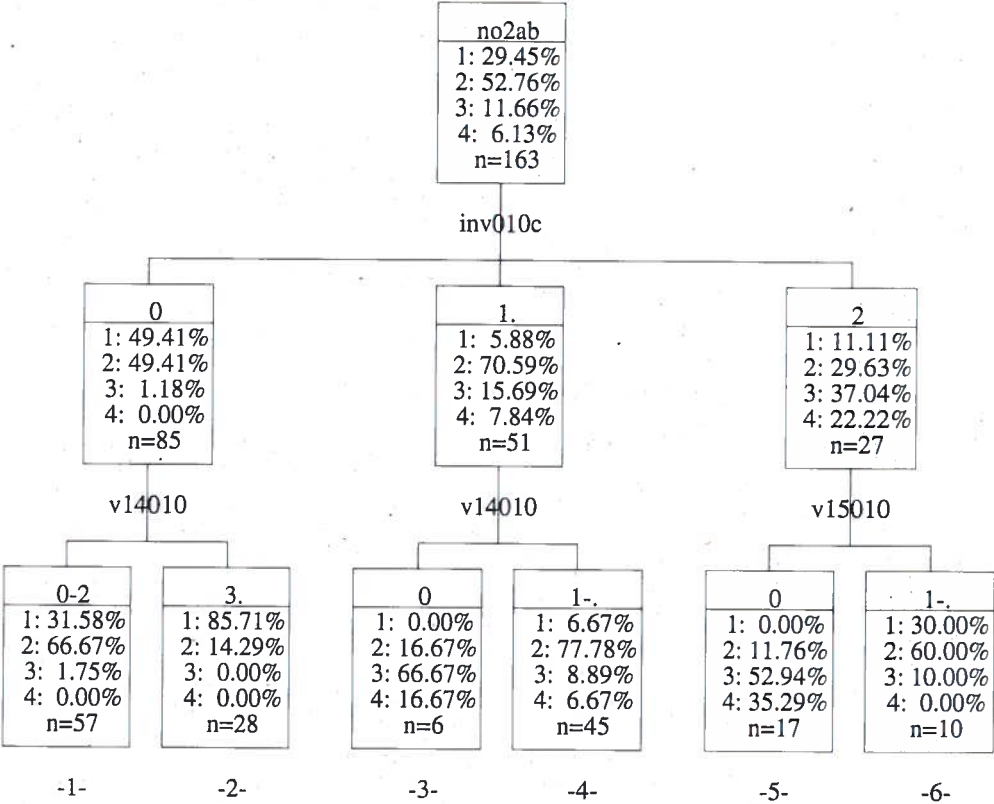


Figura 4.1.14: diagramma ad albero del modello CHAID B3.

suddivisioni) ottenuto però sul campione di partenza contenente anche i giorni prefestivi.

In sostanza si ottengono gli stessi stati finali (cioè gruppi caratterizzati dagli stessi valori dei predittori) con soltanto piccole differenze per quanto riguarda le frequenze degli eventi UP all'interno dei gruppi. In genere in questo modello si hanno frequenze dei casi d'interesse leggermente inferiori rispetto a quelle analoghe ottenute nel modello A3: ciò è comprensibile tenendo conto che le segmentazioni risultano coincidenti e che la

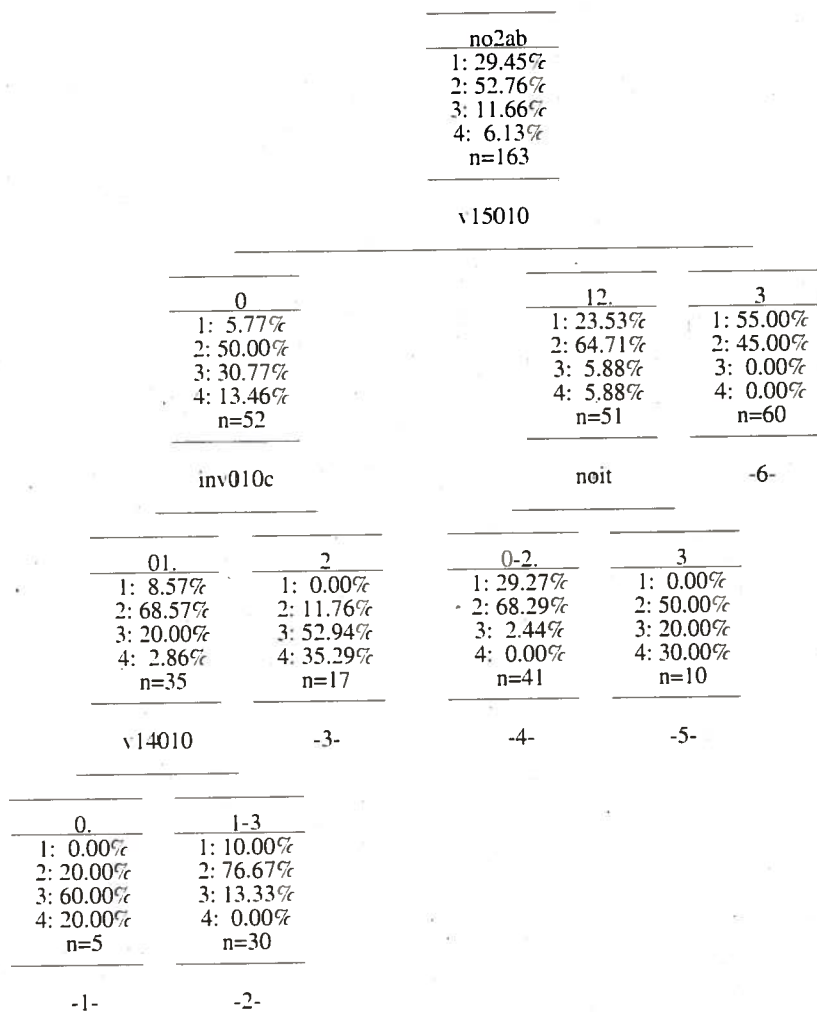


Figura 4.1.15: diagramma ad albero del modello CHAID B4.

percentuale di eventi UP sul campione di partenza è in questo caso inferiore a quella del campione da cui si genera il modello A3.

MODELLO B4

Il modello B4 mostrato in Figura 4.1.15 impiega come predittori le variabili V15010, INV010C, NOIT e V14010. Si ottengono 6 stati finali dei quali i numeri 4 e 6 relativi a situazioni nelle quali il verificarsi di eventi UP appare improbabile; lo stato 2 relativo a condizioni di incertezza (circa il 13% di eventi UP); gli stati 5 (50% eventi UP), 1 (80% UP) e 3 (86% UP) corrispondono invece a situazioni nelle quali appare probabile il verificarsi di episodi acuti d'inquinamento.

4.1.4 Risultati ottenuti e valutazione dei modelli CHAID

Le capacità predittive-esplicative dei modelli descritti nel paragrafo precedente sono state verificate e valutate sui giorni-evento del periodo novembre 1995 ÷ marzo 1996 (152 giorni).

Per quanto detto in sede di identificazione, i modelli di tipo A si riferiscono ai soli giorni feriali e quindi i giorni festivi ed i prefestivi presenti nel campione di validazione sono stati tutti considerati giorni a probabilità pressoché nulla del verificarsi di episodi critici d'inquinamento⁶. Analogamente nei modelli di tipo B sono stati così considerati (probabilità nulla degli eventi UP) i soli giorni festivi⁷.

Tutti i modelli si riferiscono anche a giorni nei quali sono assenti precipitazioni, e conseguentemente anche questi giorni all'interno del campione di validazione sono stati considerati a probabilità nulla di eventi critici (si vedano i diagrammi in Figura 4.1.1). Evidentemente in questo modo si elimina l'incertezza relativa alla previsione delle precipitazioni atmosferiche (infatti nell'identificazione dei modelli compare la variabile PIO024 corrispondente alla pioggia cumulata sulle 24 ore del giorno, dato non disponibile al momento della previsione), si assume cioè che la previ-

6. Come è possibile leggere nel diagramma A della Figura 4.1.1, la frequenza degli eventi UP relativa allo stato 1 corrispondente ai giorni festivi e prefestivi risulta pari a circa il 3%, cioè 3 eventi (della classe 3 di NO2AB) sui 92 casi presenti nel gruppo.

7. Sempre facendo riferimento alla Figura 4.1.1, diagramma B, la frequenza degli eventi UP nella classe dei festivi risulta inferiore al 3%.

sione sulla presenza di pioggia sia certa. Poiché in realtà al momento della previsione non esiste questa certezza, anche se si hanno informazioni attendibili sulle probabilità di precipitazioni, si è ritenuto opportuno anche verificare il comportamento dei modelli qualora si consideri il dato certo delle precipitazioni cumulate nelle prime dieci ore del giorno (PIO010 anziché PIO024). A tal fine si può osservare che nel campione di validazione sono presenti 47 giorni di pioggia dei quali 35 (74%) con precipitazioni già verificatesi entro le ore 10 del mattino; di conseguenza per valutare il comportamento dei modelli in questa particolare situazione è sufficiente esaminare le previsioni che si ottengono nei 12 giorni rimanenti (in realtà poiché 3 di questi sono giorni festivi, rimangono soltanto 9 giorni sui quali si può osservare come varia l'attendibilità dei modelli quando non si utilizzano informazioni aggiuntive sulle precipitazioni oltre a quelle certe).

Il primo tipo di verifica eseguito consiste nella valutazione della rispondenza fra le frequenze-probabilità degli stati finali dei modelli e quelle che si sono invece ottenute con il campione di validazione. In questo caso l'interesse maggiore risiede anzitutto nella corrispondenza fra gli eventi acuti verificatisi e gli eventi della classe UP previsti (cioè gli stati ad elevata probabilità di eventi UP), ma anche nella corrispondenza fra quelli previsti e quelli non verificatisi (falsi allarmi).

Nelle tabelle seguenti per ogni modello vengono riportati i numeri complessivi e le frequenze percentuali degli stati finali ottenuti sul campione di validazione, ripartiti rispetto alla classe di valori NO₂AB effettivamente verificatisi. Lo stato finale indicato con "nd" raccoglie tutti i casi sui quali il modello non forniva previsione, cioè i casi ai quali è stata assegnata a priori probabilità nulla del verificarsi degli episodi acuti (come discusso sopra).

Per i modelli di tipo A in questa situazione ricadono 80 eventi (52 nella classe 1 di NO₂AB, 26 nella classe 2, 1 nella classe 3), dei quali uno soltanto risulta appartenere al gruppo UP (ma non corrisponde al raggiungimento dello stato di attenzione). Viene quindi confermata la validità della suddivisione del diagramma di Figura 4.1.1 A. Stesse considerazioni valgono per i modelli di tipo B, per i quali 64 casi ricadono nello stato "nd" e nessuno di questi corrisponde ad eventi della classe UP di NO₂AB (46 nella classe 1, 18 nella classe 2, nessuno nelle classi 3 e 4).

In Tabella 4.1.I sono riportati i risultati ottenuti con il modello A1 (Figura 4.1.2). Confrontando le frequenze degli eventi UP previste dal modello con quelle degli eventi effettivamente verificatisi (colonne 2 e 8) si

osserva una sostanziale corrispondenza: tutti i 28 eventi assegnati dal modello allo stato 1 appartengono alla classe DOWN verificando esattamente la prevista frequenza nulla degli eventi UP per le condizioni individuate da questo stato. Allo stato 2 che indicava invece situazioni incerte, con una probabilità assegnata agli eventi UP del 36%, sono stati assegnati soltanto 4 casi del campione, e di questi 1 è risultato relativo alla classe 3 di NO2AB, confermando nella sostanza l'incertezza delle condizioni individuate da questo stato. Allo stato 3 sono assegnati 24 eventi dei quali 23 (96%) corrispondenti alla classe DOWN ed 1 (4%) alla classe UP, mentre in questo stato era prevista dal modello una percentuale nulla di eventi UP. Nello stato 4 era prevista una frequenza di eventi UP del 66% e questo stato corrispondeva di fatto alle situazioni più critiche per la qualità dell'aria; nel campione di validazione 15 eventi sono assegnati a questo stato, di questi 4 appartengono alla classe DOWN ed i rimanenti 11 alla classe UP (9 nella classe 3 e 2 nella 4 di NO2AB) per una percentuale del 73%.

Tabella 4.1.I: verifica modello A1.

A1		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	0%	19	9	28 100%	0	0	0 0%	28
2	36%	1	3	4 80%	1	0	1 20%	5
3	0%	11	12	23 96%	1	0	1 4%	24
4	66%	1	3	4 27%	9	2	11 73%	15
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Quindi dei 14 eventi UP del campione di validazione 11 sono assegnati allo stato 4 e corrispondono quindi a situazioni ben individuate e predette dal modello A1, un evento è assegnato allo stato 2, situazione attesa date le caratteristiche di incertezza associate a questo stato. Un altro evento UP è assegnato allo stato "nd", corrisponde quindi a situazioni considerate a ridottissima probabilità per il verificarsi degli eventi critici, ed ancora un altro allo stato 3 per il quale il modello escludeva la possibilità di un tale evento.

In pratica soltanto 2 eventi UP sono stati "imprevisti", cioè assegnati a

gruppi finali nei quali la presenza di eventi di tale tipo era talmente ridotta dal ritenere improbabile il loro verificarsi. Di questi il caso relativo al gruppo "nd" (17/02/96, sabato, $\text{NO}_2\text{AB}=189 \mu\text{g}/\text{m}^3$) risulta comune a tutti i modelli A perché giorno prefestivo. In effetti l'osservazione dei valori delle variabili ambientali indica che le condizioni relative a questo giorno sono da considerare piuttosto critiche per la qualità dell'aria (presenza di inversione termica e venti deboli). L'altro caso (11/01/96, giovedì, $\text{NO}_2\text{AB}=199 \mu\text{g}/\text{m}^3$) risulta più interessante per valutare le capacità predittive del modello A1: infatti corrisponde ad un giorno nel quale le tipiche condizioni di stabilità atmosferica che portano al verificarsi degli episodi acuti d'inquinamento si sono manifestate con intensità a partire dalla mattina stessa dopo alcuni giorni caratterizzati da venti moderati meridionali. L'inversione termica inizia ad osservarsi dalle ore 1 della notte (è cioè assente dalla mattina del giorno precedente e durante le prime ore della notte) ed il vento si mantiene piuttosto elevato in quota fino al mattino mentre è assente in città. La situazione sinottica è dominata da un circolazione ciclonica di debole intensità (tanto che in questo e nei giorni successivi non si registrano precipitazioni). Il modello A1 che impiega come variabili predittori il numero di ore di inversione termica a partire dalle 13 del giorno precedente, inizia a classificare questo giorno nel secondo gruppo (si veda il diagramma di Figura 4.1.2) relativo ai valori NOIT 1 e 2, quindi fra le situazioni più incerte; l'intervento del predittore V15010 data la presenza di vento in quota assegna il giorno al gruppo finale indicato nel diagramma con il numero 3 e nel quale non sono presenti eventi del gruppo UP. Questo porta a sottostimare attraverso il modello le probabilità di avere un evento a rischio per la qualità dell'aria.

Nel complesso il modello A1 sembra portare a previsioni efficienti degli eventi acuti, anche se ovviamente esistono, come evidenziato, alcune situazioni che sfuggono al semplice quadro predittivo del modello.

Occorre senz'altro sottolineare che entrambi i casi più critici (classe 4 di NO_2AB) vengono correttamente assegnati dal modello allo stato 4 corrispondente alla più elevata frequenza prevista degli eventi UP.

Se si analizza il comportamento del modello A1 sui giorni con precipitazioni verificatesi esclusivamente dopo le ore 10, quindi non presenti nel dato PIO010, escludendo i tre giorni festivi (26/11/95, 28/01/96 e 26/03/96) si osserva che per 6 volte il modello indica comunque stati finali a probabilità nulla di eventi UP; per 2 giorni si ottiene invece lo stato finale 2 rela-

tivo alla situazione di incertezza (36% di eventi UP previsti), ed in un caso addirittura lo stato 4 relativo alla massima probabilità di eventi UP, in sostanza un falso allarme (4/01/96)⁸.

Gli altri falsi allarmi prodotti dal modello sono 4 (predizioni dello stato finale 4 risultati poi giorni in classe DOWN), ed esaminando in dettaglio i valori delle variabili ambientali si osserva che corrispondono a situazioni caratterizzate dal fenomeno di inversione termica protrattosi per molte ore e contemporaneamente dalla presenza costante di venti moderati meridionali (temperati) sufficienti a disperdere le sostanze inquinanti.

Tabella 4.1.II: verifica modello A2.

A2		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	2%	19	8	27 100%	0	0	0 0%	27
2	56%	0	2	2 100%	0	0	0 0%	2
3	6%	9	8	17 89%	2	0	2 11%	19
4	25%	4	8	12 80%	3	0	3 20%	15
5	80%	0	1	1 17%	4	1	5 83%	6
6	63%	0	0	0 0%	2	1	3 100%	3
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

In Tabella 4.1.II sono riportati i risultati relativi al modello A2 (diagramma in Figura 4.1.3).

Anche in questo caso si osserva in sostanza una buona corrispondenza fra le percentuali degli eventi UP previste dal modello nei diversi stati finali e le frequenze ottenute con il campione di validazione. I 14 eventi UP sono distribuiti nello stato 6 (3 casi) con una frequenza del 100% contro il 63% atteso, nello stato 5 (5 casi) con frequenza del 1'83% rispetto ad un

8. Questo evento rappresenta un tipico esempio della necessità di utilizzare le previsioni meteorologiche per poter valutare anche l'evoluzione a breve termine della situazione. Infatti l'esame diretto dei dati relativo a questo giorno mostra una situazione iniziale (che perdura fino a mattina inoltrata) di particolare ed elevata stabilità atmosferica con forte inversione termica destinata però a mutare rapidamente e sostanzialmente a partire dalla tarda mattinata con l'irruzione di un sistema frontale.

valore atteso dell'80%, nello stato 4 (3 casi su 15) con frequenza del 20% rispetto al 25% previsto, nello stato 3 (2 casi su 19) corrispondenti all'11% contro un 6% atteso. Nessun evento UP risulta assegnato allo stato finale 1 (frequenza UP prevista pari al 2%), anche se a questo stato sono assegnati ben 27 casi, e nessuno allo stato 2 (che invece era caratterizzato da una percentuale piuttosto elevata di eventi UP, il 56%) al quale il modello ha assegnato soltanto 2 casi sull'intero campione di validazione.

Riassumendo, 8 eventi UP (dei quali i due di classe 4 di NO2AB) sono stati classificati in stati finali nei quali era prevista una elevata frequenza di eventi critici, sono cioè stati ben previsti dal modello. Invece ben 5 eventi UP sono stati assegnati a stati caratterizzati da situazioni di incertezza, ed in particolare quelli relativi allo stato finale 3 possono essere considerati come "mancati allarmi". Occorre segnalare che il modello A2 presenta una struttura maggiormente dettagliata rispetto all'A1 con più stati finali relativi a situazioni di incertezza.

Possono invece essere considerati come possibili falsi allarmi l'evento della classe DOWN assegnato allo stato 5 (11/12/95, che è risultato tale anche per il modello A1) ed eventualmente i due casi assegnati allo stato 2 (22/01/96 e 25/01/96).

Per quanto riguarda la risposta del modello ottenibile utilizzando i valori noti di PIO010 anziché quelli di PIO024, dei 9 casi effettivi del campione di validazione ne vengono assegnati 4 allo stato 1, 3 allo stato 3 ed uno ciascuno agli stati 4 e 6, evento quest'ultimo che può essere considerato come possibile ulteriore falso allarme (anche se si tratta ancora del 4/01/96 già segnalato e discusso per il modello A1).

Nelle Tabelle 4.1.III e 4.1.IV sono invece riportati i risultati prodotti dai modelli A2b e A2c.

Anche per questi la corrispondenza fra frequenze attese e frequenze ottenute nei vari stati con il campione di validazione appare buona; semmai è ancora l'elevato numero degli stati con caratteristiche di incertezza che limita le capacità dei modelli sotto l'aspetto della previsione degli episodi acuti.

Nel modello A2b, 6 eventi UP (fra i quali i due più importanti) sono correttamente assegnati allo stato a maggiore frequenza attesa (il numero 5) con nessun possibile falso allarme. I rimanenti eventi UP sono assegnati a stati con caratteristiche di incertezza con in particolare un eccesso di frequenza (4 casi, pari al 40%) per lo stato 6 (nel quale era invece atteso appena il 22%).

Tabella 4.1.III: verifica modello A2b.

A2b		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	2%	19	8	27 100%	0	0	0 0%	27
2	6%	9	9	18 95%	1	0	1 5%	19
3	45%	0	1	1 50%	1	0	1 50%	2
4	10%	2	5	7 88%	1	0	1 12%	8
5	70%	0	0	0 0%	4	2	6 100%	6
6	22%	2	4	6 60%	4	0	4 40%	10
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Tabella 4.1.IV: verifica modello A2c.

A2c		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	2%	19	8	27 100%	0	0	0 0%	27
2	0%	9	6	15 100%	0	0	0 0%	15
3	17%	0	3	3 75%	1	0	1 25%	4
4	56%	0	1	1 50%	1	0	1 50%	2
5	29%	0	0	0 0%	0	0	0 0%	0
6	89%	0	0	0 0%	3	1	4 100%	4
7	83%	0	0	0 0%	1	1	2 100%	2
8	15%	4	9	13 72%	5	0	5 28%	18
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Nel modello A2c si ripete questa stessa situazione nello stato 8, nel quale, a fronte di una frequenza prevista di eventi UP del 15%, il modello assegna una percentuale del 28% (ben 5 eventi). Anche in questo caso 6 eventi UP (compresi i due della classe 4 di NO2AB) vengono correttamente assegnati agli stati 6 e 7 corrispondenti alle maggiori frequenze UP attese, ed ancora in questi stati non si ritrovano possibili falsi allarmi.

Nella Tabella 4.1.V sono riportati i risultati ottenuti dal modello A3.

Si evidenziano in questo caso alcune importanti differenze fra le frequenze previste e quelle ottenute sul campione di validazione. In partico-

lare nello stato 3 relativo ad una percentuale del 100% assegnata agli eventi UP vengono assegnati soltanto 3 casi dei quali ben 2 corrispondenti alla classe DOWN, che quindi devono essere considerati come possibili falsi allarmi. Viceversa nello stato 6 al quale era assegnata una percentuale di eventi UP piuttosto bassa (17%) cadono 3 eventi UP su 4 casi.

Nel complesso 6 eventi UP (compresi i due più rilevanti) vengono ben predetti, mentre i rimanenti sono assegnati a stati relativi a condizioni di incertezza ma caratterizzati da frequenze previste UP piuttosto basse.

Tabella 4.1.V: verifica modello A3.

A3		classi NO2AB						totali
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	
1	2%	16	14	30 100%	0	0	0 0%	30
2	0%	13	3	16 100%	0	0	0 0%	16
3	100%	1	1	2 67%	1	0	1 33%	3
4	18%	2	8	10 71%	4	0	4 29%	14
5	93%	0	0	0 0%	3	2	5 100%	5
6	17%	0	1	1 25%	3	0	3 75%	4
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Tabella 4.1.VI: verifica modello A4.

A4		classi NO2AB						totali
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	
1	8%	0	1	1 100%	0	0	0 0%	1
2	17%	2	1	3 60%	2	0	2 40%	5
3	100%	0	0	0 0%	2	1	3 100%	3
4	83%	0	0	0 0%	0	1	1 100%	1
5	0%	6	8	14 93%	1	0	1 7%	15
6	26%	3	6	9 69%	4	0	4 31%	13
7	7%	8	7	15 88%	2	0	2 12%	17
8	0%	13	4	17 100%	0	0	0 0%	17
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

In Tabella 4.1.VI vengono riportati i risultati ottenuti con il modello A4.

Questo modello presenta (come il modello A2c) ben 8 stati finali e quindi numerose situazioni di incertezza. Ciò si riflette in modo evidente anche sui risultati, infatti soltanto 4 eventi UP (compresi i due più significativi) vengono correttamente previsti, essendo assegnati agli stati a maggiore frequenza UP, mentre i rimanenti eventi UP sono distribuiti nei diversi stati incerti.

In Tabella 4.1.VII sono invece mostrati i risultati del modello A5.

In questo modello vengono correttamente previsti ben 9 eventi UP (compresi i due più importanti) assegnati allo stato 4 relativo alla maggiore frequenza prevista di eventi UP.

Tabella 4.1.VII: verifica modello A5.

A5		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	0%	5	4	9 100%	0	0	0 0%	9
2	36%	1	2	3 75%	1	0	1 25%	4
3	0%	5	8	13 93%	1	0	1 7%	14
4	68%	0	2	2 18%	7	2	9 82%	11
5	7%	8	7	15 88%	2	0	2 12%	17
6	0%	13	4	17 100%	0	0	0 0%	17
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Dei rimanenti, uno è assegnato ad uno stato di notevole incertezza (stato 2, con frequenza UP prevista del 36%), due sono assegnati allo stato 5 (frequenza UP prevista pari al 7% contro una frequenza effettiva risultata pari al 12%) ed infine uno è stato assegnato allo stato 3 (frequenza UP prevista nulla contro una frequenza effettiva risultata pari al 7%).

Tabella 4.1.VIII: verifica modello A6.

A6		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	0%	24	10	34 97%	1	0	1 3%	35
2	0%	2	2	4 100%	0	0	0 0%	4
3	35%	1	3	4 80%	1	0	1 20%	5
4	0%	4	8	12 92%	1	0	1 8%	13
5	50%	1	2	3 27%	6	2	8 73%	11
6	81%	0	2	2 50%	2	0	2 50%	4
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Nella Tabella 4.1.VIII sono riportati i risultati ottenuti per il modello A6.

Si osserva un'inversione fra le frequenze previste e ottenute per gli eventi UP negli stati 5 e 6 con un 50% previsto contro il 73% (8 eventi UP su 11) ottenuto nel primo, ed un 81% previsto contro il 50% (2 eventi UP su 4 casi) per il secondo.

Nel complesso 10 eventi UP vengono però assegnati a questi due stati ed un altro allo stato 3 relativo a condizioni di incertezza (frequenza UP prevista 35%, frequenza UP ottenuta del 20%), mentre possono essere considerati errori di previsione gli eventi UP assegnati agli stati 1 e 4.

Nelle Tabelle 4.1.IX, 4.1.X e 4.1.XI sono riportati i risultati ottenuti per i modelli A7a, A7b e A7c.

Tabella 4.1.IX: verifica modello A7a.

A7a		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	76%	0	1	1 13%	5	2	7 87%	8
2	14%	4	6	10 83%	2	0	2 17%	12
3	50%	1	2	3 75%	1	0	1 25%	4
4	7%	6	7	13 93%	1	0	1 7%	14
5	7%	8	7	15 88%	2	0	2 12%	17
6	0%	13	4	17 100%	0	0	0 0%	17
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Il modello A7a assegna 7 eventi UP (fra i quali i due più significativi) allo stato 1 con una frequenza dell'87% contro una frequenza prevista del 76%. Gli altri eventi UP sono assegnati ai numerosi stati relativi a condizioni di incertezza: 2 allo stato 2 (frequenze UP prevista ed effettiva del 14% e del 17% rispettivamente), uno ciascuno agli stati 3 e 4 (frequenze UP prevista ed effettiva del 50% e del 25% per lo stato 3 e del 7% entrambe per lo stato 4); infine 2 eventi UP sono assegnati allo stato 5 (frequenza UP prevista del 7% ed effettiva del 12%).

Nel complesso le frequenze UP ottenute si accordano sufficientemente bene con quelle previste; il caso più discordante è lo stato 3 anche se occorre segnalare che in esso sono presenti soltanto 4 casi.

Il modello A7b presenta una distribuzione dei casi UP del campione di validazione molto diversa rispetto a quella attesa in base alle frequenze previste nei diversi stati.

Ben 7 eventi UP (compresi i due più significativi) sono assegnati allo stato 1, il quale in base alla frequenza prevista corrispondeva invece a condizioni di incertezza (35%). Gli altri eventi UP sono distribuiti uno ciascuno negli stati 3, 4, 5 e 6.

Tabella 4.1.X: verifica modello A7b.

A7b		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	35%	3	7	10 53%	7	2	9 47%	19
2	83%	1	0	1 100%	0	0	0 0%	1
3	13%	3	7	10 91%	1	0	1 9%	11
4	0%	4	2	6 86%	1	0	1 14%	7
5	50%	1	2	3 75%	1	0	1 25%	4
6	0%	17	9	26 96%	1	0	1 4%	27
7	11%	0	0	0 0%	0	0	0 0%	0
8	0%	3	0	3 100%	0	0	0 0%	3
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Anche il modello A7c presenta una distribuzione degli eventi UP in evidente disaccordo con quella prevista, e molto simile a quella discussa per il modello A7b.

Ancora, ben 7 eventi UP sono risultati assegnati allo stato 3 (frequenza UP prevista del 31% contro il 78% ottenuto) considerato relativo a situazioni di incertezza. Soltanto 4 eventi UP pari al 27% dei casi sono assegnati allo stato 1 che corrispondeva invece alle situazioni individuate come più critiche dal modello con un 75% di frequenza prevista per i casi UP.

Tabella 4.1.XI: verifica modello A7c.

A7c		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	75%	4	7	11 73%	4	0	4 27%	15
2	26%	3	7	10 91%	1	0	1 9%	11
3	31%	0	2	2 22%	5	2	7 78%	9
4	3%	2	1	2 100%	0	0	0 0%	3
5	0%	23	10	33 97%	1	0	1 3%	34
nd	0%	53	26	79 99%	1	0	1 1%	80
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Nel seguito vengono esaminati i risultati ottenuti dai modelli di tipo B, per i quali ricordiamo ancora che lo stato indicato con "nd" si riferisce ai giorni festivi ed a quelli nei quali si sono manifestate precipitazioni.

Tabella 4.1.XII: verifica modello B1.

B1		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	0%	22	10	32 100%	0	0	0 0%	32
2	32%	1	5	6 86%	1	0	1 14%	7
3	0%	2	6	8 89%	1	0	1 11%	9
4	0%	11	9	20 100%	0	0	0 0%	20
5	55%	2	2	4 80%	1	0	1 20%	5
6	66%	1	3	4 27%	9	2	0 73%	15
nd	0%	46	18	64 100%	0	0	0 0%	64
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

I risultati del modello B1 (in Tabella 4.1.XII) ricalcano in sostanza quelli del modello A1; l'unica diversità rilevante si riferisce allo stato 5 nel quale il modello inserisce l'evento UP verificatosi in un giorno prefestivo (sabato 17/02/96, NO2AB=189 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) che nei modelli di tipo A era assegnato alla classe "nd".

Il modello B2 (Tabella 4.1.XIII) individua correttamente 7 eventi UP assegnandoli agli stati 3, 5 e 7. Peraltro gli altri 7 eventi UP sono comunque assegnati a stati relativi a condizioni di incertezza. Molte delle frequenze UP ottenute si discostano però in modo sensibile da quelle previste dal modello.

Tabella 4.1.XIII: verifica modello B2.

B2		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	0%	21	10	31 100%	0	0	0 0%	31
2	2%	12	11	23 100%	0	0	0 0%	23
3	83%	1	1	2 67%	1	0	1 33%	9
4	16%	4	9	13 72%	5	0	5 28%	18
5	100%	0	1	1 25%	2	1	3 75%	4
6	36%	0	1	1 33%	2	0	2 67%	3
7	60%	1	2	3 50%	2	1	3 50%	6
nd	0%	46	18	64 100%	0	0	0 0%	64
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Anche il modello B3 (Tabella 4.1.XIV) mostra scostamenti evidenti tra le frequenze UP previste e quelle ottenute sul campione di validazione. Comunque 6 eventi UP vengono correttamente assegnati agli stati 3 (1 su 3 casi) e 5 (5 eventi UP, compresi i due più significativi, su 6 casi, per una frequenza pari all'83% contro una frequenza prevista dell'88%). Dei rimanenti casi UP ben 5 vengono assegnati allo stato 4 con una frequenza del 31% rispetto a quella prevista del 16%; ed infine 3 casi UP sono assegnati allo stato 6 con frequenza del 43% rispetto a quella predetta del 10%.

Tabella 4.1.XIV: verifica modello B3.

B3		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	2%	18	18	36 100%	0	0	0 0%	36
2	0%	16	4	20 100%	0	0	0 0%	20
3	83%	1	1	2 67%	1	0	1 33%	3
4	16%	3	8	11 69%	5	0	5 31%	16
5	88%	0	1	1 17%	3	2	6 83%	6
6	10%	1	3	4 57%	3	0	3 43%	7
nd	0%	46	18	64 100%	0	0	0 0%	64
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Tabella 4.1.XV: verifica modello B4.

B4		classi NO2AB						
stati	probabilità UP	1	2	DOWN (1-2)	3	4	UP (3-4)	totali
1	80%	0	2	2 100%	0	0	0 0%	2
2	13%	2	3	5 71%	2	0	2 29%	7
3	88%	0	1	1 17%	3	2	5 83%	6
4	2%	6	12	18 95%	1	0	1 5%	19
5	50%	1	2	3 38%	5	0	5 63%	8
6	0%	30	15	45 98%	1	0	1 2%	46
nd	0%	46	18	64 100%	0	0	0 0%	64
totali		85	53	138 91%	12	2	14 9%	152

Il modello B4 (Tabella 4.1.XV) assegna 5 eventi UP allo stato 3 con una frequenza dell'83% molto vicina a quella prevista del'88%; ancora ben 5 eventi UP sono assegnati allo stato 5 con una frequenza del 63% rispetto al 50% previsto; infine 2 eventi UP sono assegnati allo stato 2 (29% rispetto al 13%), uno allo stato 4 (5% rispetto al 2% previsto), uno allo stato 6 (corrispondente ad una frequenza del 2% mentre quella prevista era nulla). Soltanto 2 casi e fra questi nessun evento UP sono

assegnati allo stato 1, per il quale era prevista una frequenza UP dell'80%.

Tabella 4.1.XVI: riepilogo delle previsioni di ciascun modello sugli eventi UP.

eventi UP		modello														
NO2AB	data	A1	A2	A2b	A2c	A3	A4	A5	A6	A7a	A7b	A7c	B1	B2	B3	B4
183	lun-06/11/95	66%	80%	70%	89%	17%	26%	68%	0%	76%	35%	75%	66%	100%	10%	50%
199	mar-07/11/95	66%	80%	70%	89%	93%	100%	68%	50%	76%	35%	31%	66%	36%	88%	88%
248	gio-09/11/95	66%	63%	70%	83%	93%	83%	68%	50%	76%	35%	31%	66%	60%	88%	88%
231	lun-20/11/95	66%	80%	70%	89%	93%	100%	68%	50%	76%	35%	31%	66%	100%	88%	88%
211	ven-24/11/95	66%	63%	22%	15%	17%	26%	68%	81%	14%	35%	75%	66%	60%	10%	50%
212	mar-12/12/95	66%	80%	70%	89%	93%	100%	68%	50%	76%	35%	31%	66%	36%	88%	88%
192	mar-09/01/96	66%	25%	22%	15%	18%	26%	68%	50%	14%	35%	75%	66%	16%	16%	50%
199	gio-11/01/96	0%	25%	10%	15%	18%	0%	0%	0%	7%	13%	26%	0%	16%	16%	2%
198	ven-12/01/96	66%	25%	22%	15%	100%	26%	68%	81%	50%	0%	0%	66%	83%	83%	0%
218	gio-18/01/96	66%	63%	70%	83%	93%	7%	7%	50%	7%	50%	31%	66%	60%	88%	88%
218	ven-19/01/96	66%	6%	45%	56%	18%	17%	68%	50%	76%	35%	31%	66%	16%	16%	13%
189	sab-17/02/96	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	55%	16%	16%	50%
212	ven-01/03/96	66%	80%	22%	15%	17%	7%	7%	50%	7%	0%	75%	66%	100%	10%	50%
187	gio-07/03/96	36%	6%	6%	17%	18%	17%	36%	35%	76%	35%	31%	32%	16%	16%	13%
probabile (>50%)		11	8	6	7	6	4	9	2	7	0	4	12	7	6	5
incerto		1	3	5	6	7	6	1	9	3	11	8	1	7	5	7
improbabile(≤10%)		2	3	3	1	1	4	4	3	4	3	2	1	0	3	2
falsi allarmi		4	3	0	1	0	1	2	2	1	1	11	8	5	3	3

In Tabella 4.1.XVI sono riportate le probabilità assegnate da ciascun modello agli eventi UP del campione di validazione. Il confronto fra le prestazioni dei diversi modelli viene esplicitato nelle ultime quattro righe di riepilogo, nelle quali vengono classificati come probabili gli eventi UP ai quali il modello assegna probabilità superiori al 50%, sono considerati improbabili gli eventi UP con probabilità non superiore al 10% ed incerti i rimanenti (probabilità compresa fra il 10 ed il 50%), e viene inoltre riportato il numero di falsi allarmi prodotto da ciascun modello sulla parte rimanente del campione di validazione.

Nel complesso le prestazioni migliori nell'individuare gli eventi d'int-

resse sono ottenute dai modelli A1 e B1 con rispettivamente il 79% (11 su 14) e l'86% (12 su 14) di successi di previsione degli eventi UP, ed in particolare la corretta previsione di tutti gli episodi acuti d'inquinamento (stato di attenzione, $\text{NO}_2\text{AB} > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Possono invece essere considerate piuttosto insoddisfacenti le prestazioni dei modelli A2b, A3, A4, A6, A7b, A7c, B3 e B4 con successi di previsione inferiori al 50% dei casi UP.

Queste considerazioni sono però ridimensionate dall'osservazione della riga relativa ai falsi allarmi, cioè alle previsioni di eventi UP che non si sono in realtà verificati. Infatti in questo caso sono i modelli A2b ed A3 che producono le prestazioni migliori (nessun falso allarme), mentre il modello A1 ed in particolare il B1 portano a numerosi errori (4 ed 8 rispettivamente). Per quest'ultimo occorre però segnalare che ben 4 falsi allarmi si riferiscono a giorni prefestivi; in sostanza data l'analoga struttura dei due modelli si può rilevare che l'introduzione nel campione di identificazione anche dei giorni prefestivi, che porta a costruire il modello B1, produce un miglioramento nell'individuazione degli eventi UP ma porta altresì ad aumentare i possibili errori.

Nella Tabella 4.1.XVII, complementare alla precedente, è invece esaminata la risposta complessiva del gruppo dei modelli rispetto agli eventi UP del campione di validazione. Per ogni evento UP viene mostrato il numero di modelli che hanno predetto le diverse situazioni (probabile, incerto, improbabile). Si osserva che soltanto due eventi UP, giovedì-11/01/96 e sabato-17/02/96, sono stati previsti "improbabili" dalla maggioranza dei modelli; per il secondo questo è dovuto al fatto che trattandosi di un prefestivo è stato automaticamente assegnato alla classe "nd" per tutti i modelli di tipo A, mentre il primo rappresenta senz'altro un episodio particolare di difficile previsione che necessita di ulteriori indagini.

Da segnalare inoltre che l'evento UP di giovedì-07/03/96 corrispondente ad un valore di NO_2AB pari a $187 \mu\text{g}/\text{m}^3$, quindi relativamente basso, risulta previsto da ben 12 dei 15 modelli come "incerto". Inoltre i due eventi di classe 4 di NO_2AB hanno ottenuto il numero massimo (12) di previsioni "probabile", e quattro dei sei eventi nei quali si è raggiunto lo stato di attenzione hanno ottenuto una maggioranza assoluta di previsioni "probabile".

Tabella 4.1.XVII: riepilogo delle previsioni dei modelli sugli eventi UP.

eventi UP		numero di modelli		
NO2AB	data	probabile (>50%)	incerto	improbabile ($\leq 10\%$)
183	lun-06/11/95	9	4	2
199	mar-07/11/95	11	4	0
248	gio-09/11/95	12	3	0
231	lun-20/11/95	12	3	0
211	ven-24/11/95	7	7	1
212	mar-12/12/95	11	4	0
192	mar-09/01/96	4	11	0
199	gio-11/01/96	0	7	8
198	ven-12/01/96	7	5	3
218	gio-18/01/96	9	3	3
218	ven-19/01/96	4	9	2
189	sab-17/02/96	1	3	11
212	ven-01/03/96	4	5	6
187	gio-07/03/96	1	12	2

Questi risultati indicano che al di là delle prestazioni dei singoli modelli è l'intero insieme a contenere e riprodurre informazioni globalmente corrette sulla possibilità del verificarsi degli episodi acuti d'inquinamento.

4.1.5 Modelli CHAID operativi

Da quanto osservato nei precedenti paragrafi si può ritenere che il problema della previsione degli episodi acuti possa essere affrontato con successo utilizzando alcuni modelli ottenuti con la tecnica CHAID. Appare però necessario impiegarne più di uno, fra loro complementari, ed in particolare esaminarne e conoscerne il comportamento su ogni singolo caso, senza limitarsi a risposte automatiche, poiché le previsioni sono sempre costituite da frequenze-probabilità (fondate sulla serie storica dei dati della rete di monitoraggio): hanno cioè carattere probabilistico.

Nel caso specifico dei modelli qui proposti, per ottenere una previsione attendibile sul giorno in corso è assolutamente necessario integrare le informazioni statistiche fornite dai modelli con altre fonti relative in particolare alle emissioni (giorni feriali o festivi) e alle condizioni meteorologiche previste nel giorno stesso (pioggia, vento, ecc.).

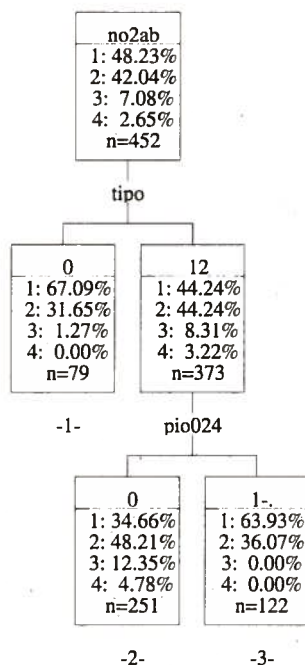


Figura 4.1.16: diagramma ad albero del modello base (a monte) per l'inverno 1996-97. I modelli successivi si sviluppano a partire dallo stato 2 di questo.

Dal punto di vista teorico non esistono ostacoli nel tentare di impiegare i modelli CHAID per le previsioni anche sui giorni successivi. Occorre però in questo caso disporre di una serie storica sufficientemente estesa e controllata (cioè verificata e validata) di previsione dei principali parametri meteorologici (per classi o numeriche) e su di essa eseguire il processo di identificazione dei modelli.

Partendo dai promettenti risultati qui mostrati, utilizzando per l'identificazione l'intero campione della serie storica (periodi invernali 1993-94, 1994-95 e 1995-96), sono quindi stati costruiti dei nuovi modelli CHAID di previsione degli episodi acuti che sono stati quotidianamente impiegati in fase operativa durante l'inverno 1996-97.

Questi modelli (i cui diagrammi sono mostrati nelle Figure 4.1.16, 4.1.17, 4.1.18, 4.1.19 e 4.1.20) costituiscono attualmente una parte degli strumenti fondamentali che affiancano e facilitano il lavoro dell'operatore esperto chiamato ad eseguire la previsione circa il verificarsi degli episodi acuti di inquinamento atmosferico.

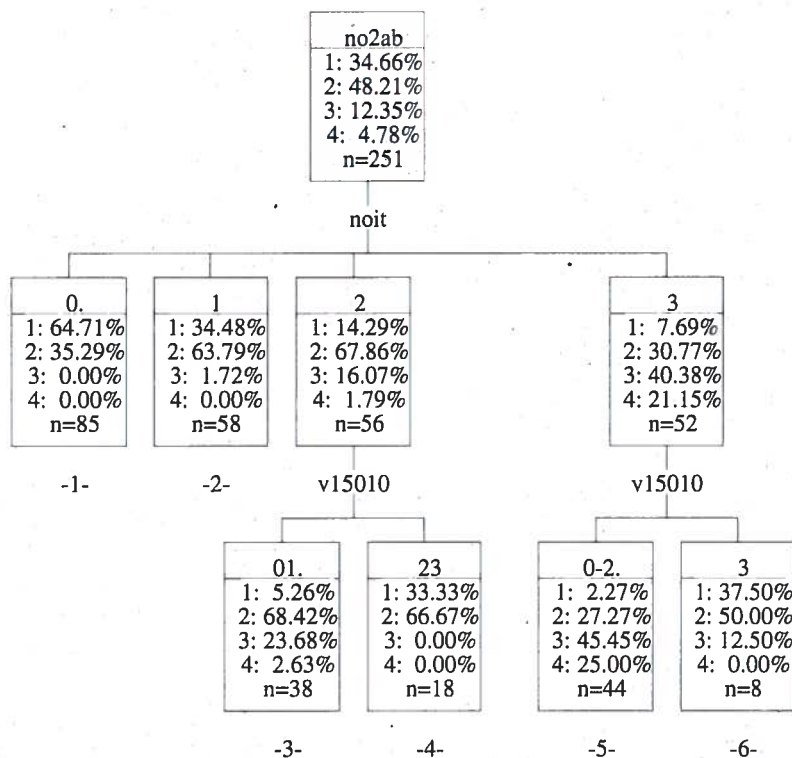


Figura 4.1.17: diagramma ad albero del modello B1-96 per l'inverno 1996-97.

In Figura 4.1.16 è mostrato il diagramma del modello base con la suddivisione fra i giorni festivi da un lato ed i feriali e prefestivi dall'altro; su questa seconda classe interviene il parametro relativo alle precipitazioni (PIO024). I modelli successivi si sviluppano tutti a partire dallo stato 2 di questo modello base, il quale in termini di ordine di ingresso delle variabili corrisponde al modello base di Figura 4.1.1 A (relativo alla serie di dati fino al marzo 1995). Si può però osservare che i gruppi prodotti dalla segmentazione per mezzo della variabile TIPO (sulla serie di dati fino al marzo 1996) differiscono nell'accorpamento delle classi che era stato allora ottenuto, per cui lo stato 2 sul quale agiscono i modelli successivi viene ora invece a corrispondere con lo stato 2 dell'altro modello base di Figura 4.1.1 B (che impiegava gli stessi due predittori in ordine inverso). Lo stato 2 del modello base contiene adesso circa il 17% di eventi UP. Lo stato 1 relativo invece ai giorni festivi ha una frequenza di eventi UP intorno all'1%.

no2ab					
1: 34.66%					
2: 48.21%					
3: 12.35%					
4: 4.78%					
n=251					
noi010					
0		12		3	
1: 63.00%		1: 23.53%		1: 6.06%	
2: 36.00%		2: 65.88%		2: 43.94%	
3: 1.00%		3: 7.06%		3: 36.36%	
4: 0.00%		4: 3.53%		4: 13.64%	
n=100		n=85		n=66	
invpgpc		noipgp		v15010	
01.		01.		01.	
1: 65.96%		1: 23.29%		1: 1.85%	
2: 34.04%		2: 71.23%		2: 38.89%	
3: 0.00%		3: 4.11%		3: 42.59%	
4: 0.00%		4: 1.37%		4: 16.67%	
n=94		n=73		n=54	
2		2		23	
1: 16.67%		1: 25.00%		1: 25.00%	
2: 66.67%		2: 33.33%		2: 66.67%	
3: 16.67%		3: 25.00%		3: 8.33%	
4: 0.00%		4: 16.67%		4: 0.00%	
n=6		n=12		n=12	
-1-		inv010c		noipgp	
-2-		-5-		-9-	
0		1-		01.	
1: 31.58%		1: 14.29%		1: 0.00%	
2: 68.42%		2: 74.29%		2: 57.14%	
3: 0.00%		3: 8.57%		3: 35.71%	
4: 0.00%		4: 2.86%		4: 7.14%	
n=38		n=35		n=28	
-3-		-4-		-6-	
				inv010c	
				01.	
				1: 16.67%	
				2: 50.00%	
				3: 33.33%	
				4: 0.00%	
				n=6	
				2	
				1: 0.00%	
				2: 10.00%	
				3: 55.00%	
				4: 35.00%	
				n=20	
				-7-	
				-8-	

Figura 4.1.18: diagramma ad albero del modello B2-96 per l'inverno 1996-97.

In Figura 4.1.17 è mostrato il diagramma ad albero del modello B1-96 che è l'analogo dei modelli A1 e B1 precedentemente analizzati. Lo stato finale 5 corrisponde alle situazioni con prevalenza di eventi UP, gli stati 3 e 7 presentano frequenze di eventi UP non trascurabili ma inferiori al 50% ed i rimanenti stati 1, 2, 4, corrispondono a situazioni con presenza di eventi UP nulla o trascurabile.

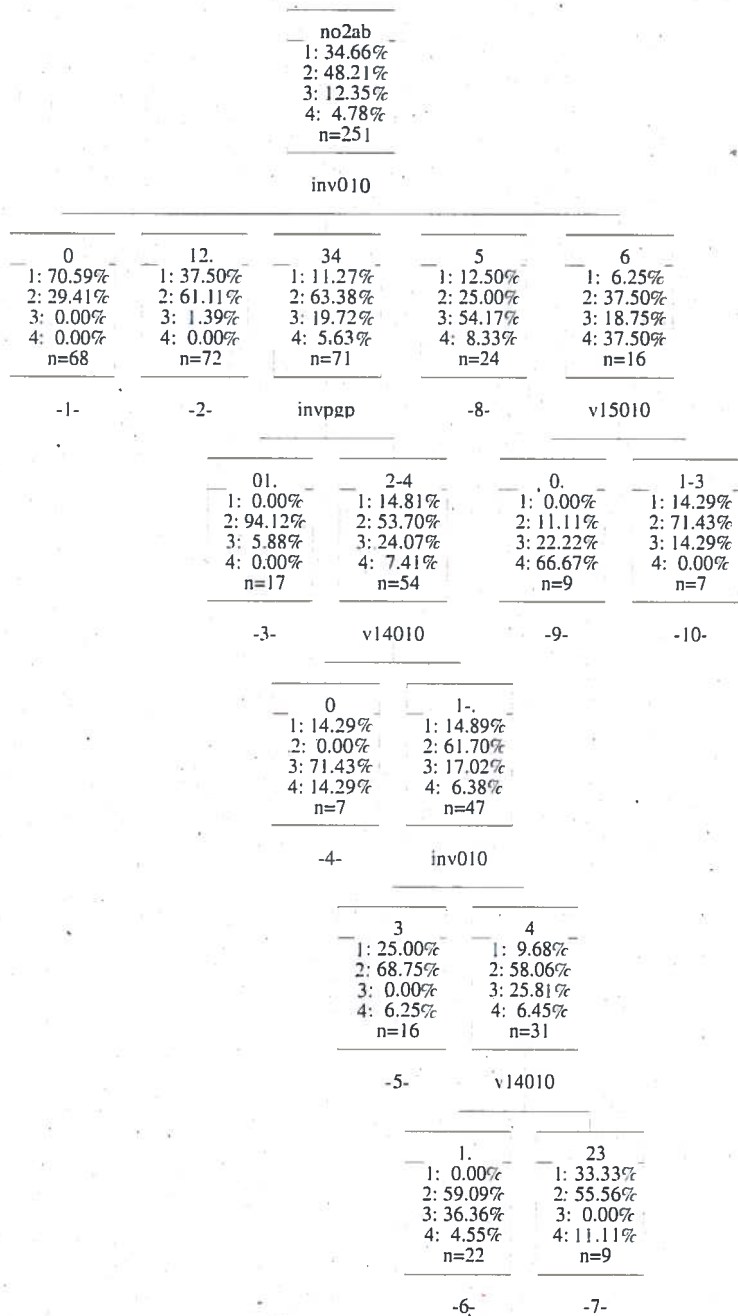


Figura 4.1.19: diagramma ad albero del modello B3-96 per l'inverno 1996-97.

In Figura 4.1.18 è presentato il diagramma ad albero di un altro modello (B2-96) costruito sui dati dell'intera serie storica nel quale il solo stato 8 presenta una maggioranza di eventi UP, mentre molti stati corrispondono a situazioni di incertezza, cioè a frequenze di eventi UP non trascurabili ma neppure maggioritarie.

In Figura 4.1.19 è mostrato il diagramma ad albero del modello B3-96 nel quale tre stati finali (4, 8 e 9) corrispondono a situazioni con frequenze di eventi UP superiori al 50%.

4.2 Modelli K-nn

Nello spazio definito dai parametri meteorologici e ambientali la densità dei punti-evento relativi agli episodi acuti d'inquinamento non è uniforme (si veda la Figura 4.2.1). Nel paragrafo 3.1.1 lettera e) è stato osservato come sia possibile individuare una zona all'interno della quale siano presenti in maggioranza eventi acuti. Questi possono quindi essere contraddistinti da certi valori caratteristici dei diversi parametri che descrivono le condizioni meteorologiche e ambientali sulla città. D'altra parte gli eventi della serie storica (con i valori di tutte le variabili che li descrivono) contengono la massima informazione disponibile per la previsione. Quando un dato giorno ha parametri con valori "vicini" cioè simili a quelli corrispondenti agli eventi acuti è allora probabile che il giorno stesso risulti critico per la qualità dell'aria.

Disponendo di una serie storica sufficientemente estesa, la previsione sulla possibilità che un dato giorno corrisponda ad un evento acuto può essere eseguita individuando quali giorni della serie storica risultano più "vicini" a quello in oggetto e se fra questi vi sono eventi critici. Questa in sintesi l'idea sulla quale si fonda il metodo K-nearest neighbours o dei primi K-vicini^{9,C,D}.

9. Questo metodo è stato qui elaborato in modo originale, salvo poi scoprire il suo impiego in campi più o meno affini, dal riconoscimento di forme negli studi sull'intelligenza artificiale, ai modelli di previsione delle valanghe (si veda il riferimento bibliografico C); altri autori hanno proposto un principio analogo per il confronto fra le concentrazioni di più giorni (si veda il riferimento bibliografico D).

4.2.1 Il metodo K-nn (K-nearest neighbours)

Il principio sul quale si basa il metodo di previsione K-nearest neighbours è molto semplice e consiste nel prevedere lo stato futuro di un sistema sulla base di una conoscenza attuale parziale e degli stati precedentemente verificatisi. Si ricercano fra gli eventi già verificatisi quelli (K) più "vicini" sulla base delle informazioni disponibili sullo stato da prevedere. Quindi si può valutare in vario modo la probabilità dei diversi stati futuri.

Più precisamente, dato un insieme di N punti in uno spazio a n dimensioni (es. una serie storica di stati di un sistema dinamico) e dato un nuovo punto osservato P , di cui sono note, poniamo, $m=n-x$ coordinate, si individuano i K punti più vicini al punto P nel sottospazio definito dalle m coordinate note. Ciò può consentire di stimare le x coordinate incognite e quindi di fare una previsione sul nuovo stato P del sistema.

La vicinanza fra punti viene quantificata attraverso la loro distanza, che definisce o è definita dalle proprietà metriche dello spazio.

In uno spazio m -dimensionale a metrica euclidea la distanza d_E tra i punti P_h e P_k è data dall'usuale espressione:

$$d_E(P_h, P_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{hi} - x_{ki})^2} \quad (4.1)$$

dove x_{hi} e x_{ki} rappresentano le i -esime coordinate dei due punti. Questa corrisponde al caso in cui le m coordinate sono assunte ortogonali fra loro.

In relazione alle caratteristiche delle variabili che descrivono gli eventi (continue, ordinali, nominali, ecc.) in statistica vengono impiegate diverse espressioni per misurare la loro prossimità^E; nell'analisi statistica occorre tener conto che spesso non è assicurata l'indipendenza fra le variabili-coordinate e anche che queste assumono gradi diversi di importanza nello spiegare i valori delle variabili dipendenti. Inoltre ogni variabile assume in genere un proprio intervallo di variazione ed è misurata su una propria scala di misura: ciò rende spesso necessario inserire nell'espressione della misura di prossimità un fattore di ponderazione in modo da bilanciare il peso delle differenze relative. Nel caso di variabili continue questo può essere fatto standardizzandole in senso statistico, cioè eseguendo la trasformazione lineare:

$$x_{ki} \rightarrow x'_{ki} = \frac{x_{ki} - \mu_i}{\sigma_i} \quad (4.2)$$

in cui μ_i rappresenta il valore medio della i -esima coordinata e σ_i la relativa deviazione standard.

Analogamente una funzione peso può essere inserita per tener conto della diversa importanza delle variabili^F.

Quando le coordinate risultano correlate fra loro per valutare la prossimità tra eventi si può utilizzare la distanza euclidea generalizzata o di Mahalanobis nella quale vengono automaticamente considerate le mutue dipendenze fra le variabili-coordinate impiegando la matrice di varianze-covarianze W (o di correlazione ρ se le variabili sono standardizzate in senso statistico):

$$d_M(P_h, P_k) = (x_h - x_k)^T W^{-1} (x_h - x_k) = (x'_h - x'_k)^T \rho^{-1} (x'_h - x'_k) \quad (4.3)^{10}$$

Quando le variabili sono debolmente correlate la (4.3) corrisponde nella sostanza alla distanza euclidea.

I punti-evento, ovvero gli stati del sistema, risultano quindi ordinati gerarchicamente sulla base della loro prossimità all'evento d'interesse del quale occorre stimare uno o più parametri incogniti. La stima di questi richiede in genere l'applicazione di altre tecniche statistiche, quali ad esempio metodi di regressione o probabilistici, che dipendono dal problema concreto e dalle informazioni richieste.

Soggiace al metodo l'ipotesi che il sistema sia in uno stato stazionario o stabile dal punto di vista strutturale nel senso che le relazioni statistiche o deterministiche fra le diverse variabili-coordinate si mantengano inalterate nella serie storica e per gli eventi da prevedere.

4.2.2 Applicazione del metodo K-nn per la previsione degli episodi acuti d'inquinamento atmosferico: scelta dei modelli e della tecnica di previsione

Nel caso presente il metodo K-nn è stato studiato ed impiegato per ottenere informazioni di supporto per la previsione degli episodi acuti di inquinamento da NO_2 . La variabile da prevedere è ancora il valore NO_2AB

10. L'uguaglianza delle due espressioni è risultato dell'invarianza della distanza di Mahalanobis rispetto a trasformazioni lineari.

e la serie storica degli eventi, ovvero la popolazione sulla quale viene eseguita la ricerca, è quella descritta nei paragrafi precedenti (periodi invernali 1993-94 e 1994-95). Le variabili-coordinate scelte ed analizzate per descrivere i punti-evento sono quelle generalmente disponibili al momento della previsione (10 a.m.).

Per le considerazioni già espresse nei paragrafi precedenti sono esclusi (o meglio non considerati nei risultati) i giorni festivi e quelli con precipitazioni¹¹.

Per motivi di semplicità e per facilitare l'analisi è stata impiegata come misura di prossimità la distanza euclidea calcolata su variabili standardizzate, anche se erano presenti variabili fortemente correlate. Evidentemente i risultati dipendono anche dal numero di eventi primi vicini che vengono estratti: considerazioni pratiche e di tipo empirico su risultati preliminari hanno portato a limitare l'analisi fino ad un numero $K=12 \div 13$ di eventi primi vicini.

Un modello K-nn è definito dal gruppo di variabili-coordinate che descrivono gli eventi e dalla procedura di stima dello stato o delle specificità dell'evento da prevedere: una volta determinati i primi vicini è infatti necessario individuare i parametri ed i metodi con i quali eseguire la previsione, cioè determinare la relazione fra gli eventi vicini e l'evento previsto.

Questo aspetto, necessariamente unito a quello della valutazione delle prestazioni dei modelli, ha comportato l'esame di numerose grandezze estratte o calcolate sulla sequenza dei primi vicini per ogni giorno-evento dell'intero periodo di validazione (novembre 1995 ÷ marzo 1996, 72 giorni feriali privi di precipitazioni, dei quali 13 in classe UP).

Sono stati valutati come possibili stimatori del valore NO₂AB da prevedere i valori NO₂AB relativi al 1°, 2°, 3°12° evento vicino; i valori medi di questi su tutti i gruppi che includono un numero crescente di primi vicini fino al 12°; i valori di mediana di questi stessi gruppi. Inoltre per valutare anche l'importanza della prossimità degli eventi sono stati esaminati i valori medi, ponderati con la distanza e con il suo quadrato, dei gruppi costituiti ancora dai primi vicini presi in numero via via crescente fino al 12°.

Il tipo di previsione richiesto, cioè la possibilità di raggiungere lo stato di attenzione per l'inquinante NO₂, più che il valore NO₂AB, ha portato inol-

11. Per semplificare le procedure automatiche di calcolo connesse ai modelli K-nn sono stati esclusi dalla popolazione di ricerca gli eventi con dati incompleti sulle variabili più significative. La popolazione si discosta quindi leggermente da quella utilizzata per i modelli CHAID.

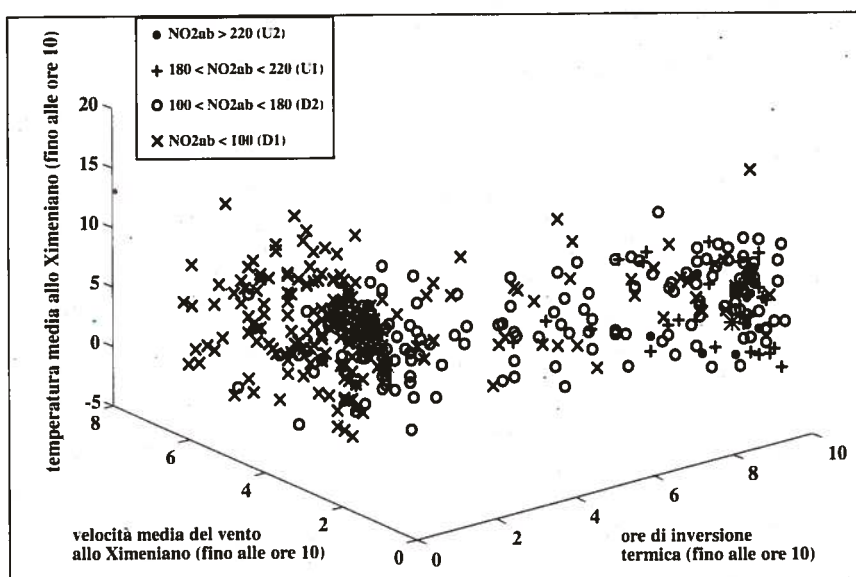


Figura 4.2.1: metodo dei K primi vicini; rappresentazione semplificata (in uno spazio tridimensionale) dei punti della serie storica.

tre a valutare il numero di primi vicini corrispondenti ad episodi acuti (in sostanza appartenenti alla classe UP di NO₂AB) all'interno dei K estratti, come grandezza legata alla probabilità dell'evento acuto. Questa è risultata poi essere l'informazione scelta per l'impiego operativo dei modelli.

In fase preliminare sono stati selezionati i gruppi di variabili-coordinate che apparivano maggiormente significative nell'individuazione degli eventi acuti.

Sono quindi stati selezionati 11 modelli la cui composizione è mostrata nella Tabella 4.2.I. Alcuni di questi sono basati su informazioni molto parziali con lo scopo di valutare e predisporre strumenti anche quando particolari dati non risultassero disponibili (ad esempio in presenza di malfunzionamento di alcuni strumenti di misura o di intere stazioni).

Tabella 4.2.I: variabili-coordinate impiegate nei modelli K-nn.

modelli	V14010	V15010	T14010	INV010	INV10H	INVPGP	NOB010	NON010	TRM8H
M1	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M2	x	x	x	x	x		x		x
M3	x	x	x	x	x		x		0.5*
M4	x			x	x	x	x	x	x
M5	x	x		x		x		x	x
M6	x	x		x	x	x			x
M7	x	x		x	x	x			
M8	x	x	x	x	x	x			
M9	x	x	x	x	x	x			x
M10	x	x					x	x	x
M11			x				x	x	x

* Nel modello M3 la variabile TRM8H compare nell'espressione della distanza con un fattore di peso pari a 0.5.

Le Figure 4.2.1 e 4.2.2 forniscono una rappresentazione, seppur qualitativa ed incompleta all'interno di uno spazio tridimensionale, del metodo dei primi vicini. Nella Figura 4.2.1 è rappresentata la distribuzione della serie storica degli eventi ovvero i punti sui quali viene eseguita la ricerca. Nella Figura 4.2.2 viene visualizzata in dettaglio la zona dello spazio intorno ad un particolare giorno (18/01/96, episodio acuto) del quale sono poi indicati i primi vicini individuati con i corrispondenti valori di NO2AB. La situazione mostrata in figura si riferisce ai risultati ottenuti per quel giorno dal modello M3, che conduce in realtà una ricerca in uno spazio a 7 dimensioni.

Dal punto di vista euristico, poiché nella popolazione sono presenti 29 eventi della classe UP su un totale di 147 casi, con una frequenza percentuale pari al 19%, la frequenza degli eventi UP nel gruppo dei K primi vicini può rappresentare un indicatore della probabilità che l'evento da prevedere appartenga o meno a questa classe.

Se si ipotizza una estrazione casuale senza reintroduzione di K eventi dalla popolazione di N casi, la probabilità di ottenerne j appartenenti ad una determinata classe presente con M casi nella popolazione è data dalla distribuzione ipergeometrica^G:

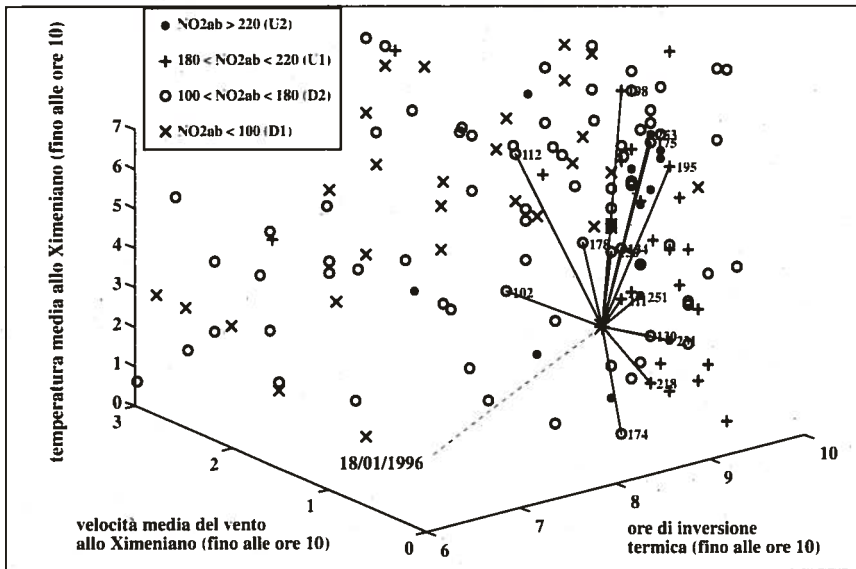


Figura 4.2.2: metodo dei K primi vicini; viene mostrato l'esito della ricerca, cioè i 12 giorni-evento più vicini al giorno 18/01/96 e la loro posizione in uno spazio tridimensionale (in realtà la ricerca si riferisce a uno spazio di dimensione 7)

$$P(j, K; M, N) = \begin{cases} \frac{\binom{M}{j} \binom{N-M}{K-j}}{\binom{N}{K}} & \text{per } j = 0, 1, \dots, K \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4.4)$$

Calcolando le probabilità con i valori dei parametri della popolazione in studio ($K=13$, $M=29$, $N=147$) si osserva che in una estrazione puramente casuale la probabilità di ottenere 7 o più eventi UP fra i 13 estratti è inferiore al 5%; quella di non estrarre eventi UP risulta intorno al 5%. Quindi individuare fra i primi 13 vicini un gruppo di 7 o più eventi UP non può essere casuale e di conseguenza indica una elevata probabilità che l'evento da prevedere appartenga anch'esso alla classe UP. Viceversa non avere eventi UP fra i primi vicini indica una elevata probabilità che l'evento da prevedere non appartenga alla classe UP.

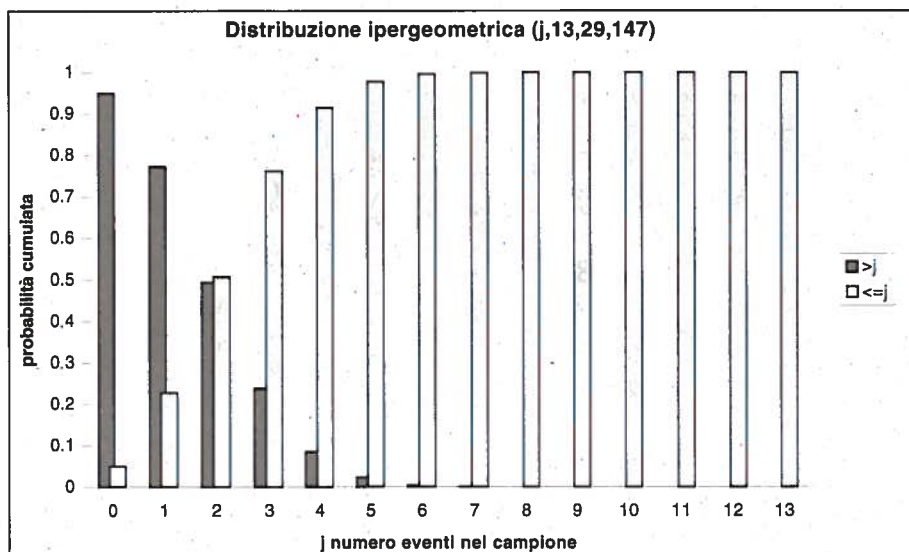


Figura 4.2.3: probabilità cumulata di trovare un numero di eventi di interesse maggiore di j (minore o uguale a j) in un campione di 13 eventi estratto da una popolazione di 147 casi, in cui vi sono 29 episodi di interesse.

In Figura 4.2.3 sono mostrate le probabilità cumulate della distribuzione ipergeometrica per i valori $K=13$, $M=29$ ed $N=147$, al variare del numero di eventi UP dentro il campione estratto.

Per $K=13$ la probabilità fornita dalla distribuzione ipergeometrica di ottenere un numero di eventi UP uguale o superiore a 4 ($j \geq 4$) è circa del 24%, e cresce al 30% se invece si considera il campione costituito di $K=12$ eventi. Evidentemente queste situazioni intermedie, caratterizzate cioè da un numero di eventi UP compreso fra 4 e 6 eventi all'interno del gruppo dei primi vicini, risultano "incerte", nel senso che la presenza di questi eventi UP può anche essere considerata in parte casuale. Per questo motivo i risultati ottenuti dai modelli sono stati analizzati anche al variare di questo intervallo di incertezza.

Nel presente caso di applicazione del metodo dei primi vicini ai dati di inquinamento atmosferico possono sollevarsi fondati dubbi sul fatto che si siano mantenute inalterate, stabili, le condizioni strutturali del sistema in studio: in effetti per quanto riguarda il traffico veicolare, dal 1993 ad oggi le emissioni possono essersi gradualmente ridotte in virtù delle campagne

di controllo dei gas di scarico succedutesi negli ultimi anni^H, e soprattutto per il ricambio del parco circolante e quindi per la crescente presenza di veicoli dotati di catalizzatore^I.

Se le emissioni sono ridotte in modo significativo è evidente che a parità di condizioni meteorologiche potenzialmente critiche per la qualità dell'aria le concentrazioni devono risultare tendenzialmente ridotte. Di conseguenza il metodo dei primi vicini dovrebbe produrre una sovrastima della probabilità degli eventi acuti essendo basato su di una serie storica relativa ad emissioni e concentrazioni maggiori delle attuali.

Allo stato attuale non è possibile ottenere una stima attendibile della possibile riduzione delle emissioni, e del conseguente effetto sulle concentrazioni, per cui solo i risultati dei modelli K-nn e la loro efficacia predittiva possono in qualche modo confermare ed evidenziare questa tendenza.

Emerge in questo modo un ulteriore possibile impiego del metodo dei primi vicini: la ricerca di eventi simili (ad esempio dal punto di vista meteorologico) può permettere di valutare l'effetto di provvedimenti o di variazioni di altri parametri.

4.2.3 Risultati ottenuti e valutazione dei modelli K-nn

In questa parte vengono presentati i risultati ottenuti dai diversi modelli K-nn sul campione di validazione costituito da 72 giorni feriali privi di precipitazioni dell'inverno 1995-96. La scelta dei giorni feriali, con quindi l'esclusione dei prefestivi (il sabato in particolare) è stata fatta con l'intenzione di utilizzare un campione il più possibile omogeneo in termini di quantità e caratteristiche temporali delle emissioni.

Nella Tabella 4.2.II sono riportati i valori di correlazione lineare fra alcuni stimatori calcolati sui primi vicini estratti giornalmente dalla serie storica ed il corrispondente valore NO₂AB effettivamente verificatosi. Nella tabella sono mostrati in dettaglio i dati relativi ai modelli basati su 12 primi vicini (12-nn), e vengono considerate le due grandezze che per ogni modello hanno fornito i valori massimi di correlazione.

Tabella 4.2.II: correlazioni lineari massime con NO₂AB sul periodo di validazione.

modello 12-nn	1° coefficiente di correlazione lineare	1° stimatore calcolato sui primi vicini	2° coefficiente di correlazione lineare	2° stimatore calcolato sui primi vicini
M1	0.84	mediana su 12	0.84	mediana su 10
M2	0.84	mediana su 12	0.84	mediana su 11
M3	0.86	mediana su 12	0.85	mediana su 11
M4	0.83	mediana su 9	0.83	mediana su 10
M5	0.84	media su 8	0.84	media pesata con la distanza su 8
M6	0.83	media pesata con la distanza su 12	0.83	media pesata col quadrato della distanza su 12
M7	0.83	media su 12	0.83	media pesata con la distanza su 12
M8	0.84	mediana su 12	0.83	mediana su 10
M9	0.84	mediana su 7	0.84	media su 7
M10	0.76	media su 12	0.76	media pesata con la distanza su 12
M11	0.74	media su 12	0.74	media pesata con la distanza su 12

Si osserva subito come si siano ottenute correlazioni piuttosto elevate e sostanzialmente equivalenti per tutti i modelli, comprese fra 0.74 e 0.86. I valori inferiori sono quelli corrispondenti ai modelli M10 e M11 nei quali non compare fra le variabili-coordinate alcun indicatore legato all'inversione termica. In particolare il modello M11 contiene come unica variabile meteorologica la temperatura nella stazione Ximeniano (si veda la Tabella 4.2.I) e impiega invece le concentrazioni di NO.

Si rileva che nella tabella si presentano grandezze differenziate per ogni modello, con una maggioranza relativa per quelle calcolate sull'intero gruppo dei primi vicini (12). Per alcuni modelli però (M4, M5, M9) sembrano produrre correlazioni maggiori stimatori riferiti a gruppi meno numerosi di primi vicini. In tutti i casi i valori di correlazione del primo e del secondo stimatore (ed in vari casi anche per i successivi) presentano differenze minime.

Sulla base del metodo di previsione ipotizzato, fondato sul numero di eventi della classe UP presenti nel campione di primi vicini estratto, sono

stati analizzati i risultati prodotti dai diversi modelli per i valori $K=12$ e $K=13$. Inoltre per ciascun modello e ciascun valore K sono stati valutati i risultati che si ottengono variando le tre classi di frequenza degli eventi UP all'interno dei K primi vicini. Sono state adottate le seguenti tre suddivisioni delle classi di probabilità:

- a) *improbabile 0-4, incerto 5-6, probabile 7-K*
- b) *improbabile 0-4, incerto 5, probabile 6-K*
- c) *improbabile 0-3, incerto 4-5, probabile 6-K*

Vengono quindi valutate le prestazioni di ciascun modello in sei diverse configurazioni.

Una prima valutazione parziale dei risultati di previsione dei modelli può essere eseguita osservando la Tabella 4.2.III nella quale sono riassunte le frequenze di eventi UP correttamente individuati, cioè assegnati alla classe probabile.

Tabella 4.2.III: previsione degli eventi UP (numero di eventi UP previsti correttamente).

eventi UP	n° di eventi UP nel campione: 13						
n° primi vicini	K=12			K=13			
Configurazioni Modelli	0-4,5-6,7-K	0-3,4-5,6-K	0-4,5,6-K	0-4,5-6,7-K	0-3,4-5,6-K	0-4,5,6-K	medi
M1	8	10	10	9	12	12	10.2
M2	4	6	6	5	9	9	6.5
M3	5	10	10	6	13	13	9.5
M4	3	8	8	5	10	10	7.3
M5	7	9	9	8	10	10	8.8
M6	8	8	10	9	10	10	9.2
M7	6	7	7	7	8	8	7.2
M8	4	7	7	5	7	7	6.2
M9	6	10	10	10	10	10	9.3
M10	0	3	3	1	4	4	2.5
M11	1	3	3	1	4	4	2.7
medie	4.7	7.4	7.5	6.0	8.8	8.8	7.2
	6.5			7.9			

In termini sia del numero medio di eventi UP individuati riferito a tutte le configurazioni, sia delle frequenze assolute ottenute, si distinguono per prestazioni decisamente inferiori i modelli M10 e M11. Con prestazioni intermedie risultano i modelli M7 e M8, ed in parte M2 che presenta un valore medio piuttosto basso ma che per alcune configurazioni porta a predire il 69% degli eventi UP (9 su 13). Gli altri modelli: M1, M3, M4, M5, M6 e M9 hanno prestazioni medie superiori e individuano almeno 10 eventi UP (77% dei casi) in almeno una configurazione.

Per quanto riguarda il numero di primi vicini appare mediamente preferibile in termini di prestazioni medie e assolute il valore $K=13$.

Dalla tabella traspare anche un'indicazione sulla suddivisione in classi di probabilità: risultano mediamente migliori le configurazioni $[K; 0-4, 5, 6-K]$ e $[K; 0-3, 4-5, 6-K]$.

La valutazione dei modelli non può però limitarsi all'esame dei successi tralasciando l'altro aspetto fondamentale costituito dagli errori della previsione. Per questo è maggiormente significativo ottenere una valutazione globale delle prestazioni.

I risultati complessivi ottenuti sono quindi presentati e riassunti nelle successive tabelle di contingenza che quantificano le prestazioni dei modelli fornendo il numero dei mancati allarmi: n° giorni UP nella classe *improbabile*; il numero dei falsi allarmi: n° giorni DOWN nella classe *probabile*; e il numero dei giorni definibili come incerti: n° giorni UP e DOWN nella classe intermedia (*incerto*). La valutazione può essere anche resa quantitativa pesando i diversi errori del modello con dei coefficienti moltiplicativi, in modo da avere un indice di prestazione confrontabile fra i diversi modelli.

In via indicativa è stato adottato il seguente indice di prestazione:

$$I_p = (\text{n°giorni UP in classe } \textit{improbabile}) \times 3 + \\ + (\text{n°giorni DOWN in classe } \textit{probabile}) \times 2 + \\ + (\text{n°giorni UP e DOWN in classe } \textit{incerto})$$

La differenza nei pesi degli errori è giustificata dalla considerazione cautelativa che un mancato allarme (coefficiente 3) può essere ritenuto più grave di un falso allarme (coefficiente 2). I casi incerti, anche se non possono considerarsi veri e propri errori del modello, rientrano comunque nell'indice di prestazione (coefficiente 1) in quanto, in teoria, è

preferibile un modello che a parità di errori presenti la minor incertezza possibile. Tale indice di errore (tanto più basso quanto migliore è la prestazione del modello) viene riportato nelle tabelle di contingenza in alto a destra e in sede riepilogativa nella Tabella 4.2.XV.

MODELLO M1

Il modello impiega tutte le variabili selezionate (si veda la Tabella 4.2.I). Nella Tabella 4.2.IV sono mostrati i risultati ottenuti per il modello M1.

Le frequenze percentuali di successi di previsione ottenuti nelle diverse configurazioni (cioè casi UP correttamente assegnati alla classe probabile e casi DOWN assegnati alla classe *improbabile*) risultano estremamente confortanti, si oscilla dall'85% (61 eventi correttamente classificati su 72) all'89% (64 su 72). Si registrano in sostanza diversificazioni minime fra le varie configurazioni, con prestazioni lievemente migliori per quella nella quale l'intervallo di incertezza è limitato al solo valore di 5 eventi UP fra i primi vicini. L'indice di prestazione I_p migliore, pari a 13, corrisponde alle configurazioni $[K=12; 0-3, 4-5, 6-12]$ e $[K=13; 0-4, 5, 6-13]$.

In generale il numero di eventi UP non previsti oscilla fra 0 ed 1, mentre quello degli eventi UP correttamente individuati varia fra 8 (62%) e 12 (92%) rispetto ai 13 verificatisi.

Ricordando che le variabili impiegate nei modelli sono tutte relative alle ore 10 della mattina, e che quindi non vengono utilizzate informazioni o previsioni sull'andamento delle variabili meteorologiche nel prosieguo della giornata, si conclude che le prestazioni previsionali sono da ritenere eccellenti.

Tabella 4.2.IV: risultati per il modello M1.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=15
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	53 (90%)	4 (7%)	2 (3%)	59
UP	1 (8%)	4 (31%)	8 (62%)	13
totale	54 (75%)	8 (11%)	10(14%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=15
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	52 (88%)	5 (8%)	2 (3%)	59
UP	1 (8%)	3 (23%)	9 (69%)	13
totale	53 (74%)	8 (11%)	11(15%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=13
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	52 (72%)	8 (11%)	13 (18%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	49 (83%)	7 (12%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	1 (8%)	12 (92%)	13
totale	49 (68%)	8 (11%)	15 (21%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	2 (15%)	10 (77%)	13
totale	54 (75%)	5 (7%)	13 (18%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=13
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	0 (0%)	12 (92%)	13
totale	53 (74%)	4 (6%)	15 (21%)	72

MODELLO M2

Nella Tabella 4.2.V sono presentati i risultati ottenuti con il modello M2 che si differenzia dal precedente M1 in quanto non tiene conto della presenza di inversione termica nel giorno precedente a quello oggetto di previsione, ed inoltre contiene soltanto una variabile legata alla concentrazione del precursore NO (si veda la Tabella 4.2.I).

Tabella 4.2.V: risultati per il modello M2.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=20
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	54 (92%)	3 (5%)	2 (3%)	59
UP	2 (15%)	7 (54%)	4 (31%)	13
totale	56 (78%)	10 (14%)	6 (8%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=20
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	53 (90%)	4 (7%)	2 (3%)	59
UP	2 (15%)	6 (46%)	5 (38%)	13
totale	55 (76%)	10 (14%)	7 (10%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	6 (46%)	6 (46%)	13
totale	53 (74%)	10 (14%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=15
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	51 (86%)	5 (8%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	4 (31%)	9 (69%)	13
totale	51 (71%)	9 (13%)	12 (17%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=17
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	54 (93%)	2 (3%)	3 (5%)	59
UP	2 (15%)	5 (38%)	6 (46%)	13
totale	56 (78%)	7 (10%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	2 (15%)	2 (15%)	9 (69%)	13
totale	55 (76%)	5 (7%)	12 (17%)	72

Le frequenze percentuali di successi di previsione ottenuti nelle diverse configurazioni (cioè casi UP correttamente assegnati alla classe probabile e casi DOWN assegnati alla classe improbabile) variano fra l'81% (58 eventi correttamente classificati su 72) e l'86% (62 su 72). Quest'ultimo dato si riferisce alla configurazione $[K=13; 0-4, 5, 6-13]$, nella quale sono ridotti al minimo gli eventi classificati nella zona di incertezza (5 casi). La configurazione che produce il miglior indice di prestazione è invece $[K=13; 0-3, 4-5, 6-13]$, con I_p pari a 15; dall'esame della Tabella 4.2.V si può ricondurre facilmente questo risultato all'assenza di mancati allarmi. Gli eventi UP classificati nella categoria improbabile oscillano fra 0 e 2, mentre quelli assegnati alla categoria probabile variano fra 4 e 9.

Nel complesso questo modello ha fornito risultati senz'altro soddisfacenti anche se lievemente inferiori a quelli del modello M1.

MODELLO M3

Il modello M3 si distingue dal precedente soltanto per l'adozione di un coefficiente di ponderazione pari a 0.5 per la variabile TRM8H nel calcolo della distanza. Viene cioè ridotto della metà il peso della variabile relativa ai flussi di traffico (si veda la Tabella 4.2.I).

I risultati ottenuti dal modello M3 sul periodo di validazione sono presentati nella Tabella 4.2.VI.

Le frequenze degli eventi correttamente previsti variano fra l'81% (58 casi su 72) e il 92% (66 eventi su 72) che rappresenta il valore massimo ottenuto fra tutti i modelli. A questo corrisponde la configurazione $[K=13; 0-4, 5, 6-13]$ ed evidentemente il miglior indice di prestazione $I_p=10$, con 2 soli eventi nella zona di incertezza, nessun "allarme mancato" e 4 falsi allarmi. Da segnalare per gli ottimi risultati anche la configurazione $[K=13; 0-3, 4-5, 6-13]$ con una frequenza di casi correttamente previsti del 90% ($I_p=11$).

Tabella 4.2.VI: risultati per il modello M3.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=17
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	8 (62%)	5 (38%)	13
totale	53 (74%)	11 (15%)	8 (11%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	7 (54%)	6 (46%)	13
totale	53 (74%)	10 (14%)	9 (13%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	3 (5%)	4 (7%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	52 (72%)	6 (8%)	14 (19%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=11
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	52 (88%)	3 (5%)	4 (7%)	59
UP	0 (0%)	0 (0%)	13 (100%)	13
totale	52 (72%)	3 (4%)	17 (24%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=13
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	53 (90%)	2 (3%)	4 (7%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	53 (74%)	5 (7%)	14 (19%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=10
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	53 (90%)	2 (3%)	4 (7%)	59
UP	0 (0%)	0 (15%)	13 (100%)	13
totale	53 (74%)	2 (3%)	17 (24%)	72

MODELLO M4

Il modello M4 non contiene la variabile relativa al vento in quota (V15010) ed alla temperatura, mentre utilizza tutte le informazioni relative al fenomeno di inversione termica, alle concentrazioni dei precursori ed ai flussi di traffico (si veda la Tabella 4.2.I). Questo modello può quindi risultare estremamente utile in presenza di malfunzionamenti dell'anemometro della stazione di M. Morello.

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 4.2.VII.

Tabella 4.2.VII: risultati per il modello M4.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=21
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	53 (90%)	5 (8%)	1 (2%)	59
UP	2 (15%)	8 (62%)	3 (23%)	13
totale	55 (76%)	13 (18%)	4 (6%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	7 (54%)	5 (38%)	13
totale	54 (75%)	10 (14%)	8 (11%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=17
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	4 (30%)	8 (62%)	13
totale	53 (74%)	8 (11%)	11 (15%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=15
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	2 (15%)	10 (77%)	13
totale	53 (74%)	6 (8%)	13 (18%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=18
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	2 (15%)	3 (23%)	8 (62%)	13
totale	55 (76%)	6 (8%)	11 (15%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	53 (90%)	3 (5%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	2 (15%)	10 (77%)	13
totale	54 (75%)	5 (7%)	13 (18%)	72

L'impiego di questo modello ha prodotto frequenze di eventi correttamente previsti fra il 77% e l'88%. I valori migliori anche in termini di indice I_p corrispondono ancora alle configurazioni $[K=13; 0-4, 5, 6-13]$ e $[K=13; 0-3, 4-5, 6-13]$ con rispettivamente 63 e 62 eventi individuati su 72.

Gli eventi UP assegnati alla classe probabile variano da un minimo di 3 ad un massimo di 10, mentre quelli assegnati alla categoria improbabile variano da 1 a 2.

Le prestazioni complessive del modello appaiono intermedie rispetto a quelle dei modelli precedentemente esaminati e variano in modo sensibile con le configurazioni.

MODELLO M5

I risultati del modello M5 sono presentati nella Tabella 4.2.VIII (per la composizione del modello si veda la Tabella 4.2.I).

Nelle diverse configurazioni si ottengono percentuali di successi molto vicine comprese fra l'82% e l'85%. Le prestazioni migliori in termine di indice corrispondono alla configurazione $[K=12; 0-4, 5, 6-12]$ con $I_p=14$.

In tutti i casi non si registrano allarmi mancati e gli eventi UP individuati variano fra un minimo di 7 ed un massimo di 10.

Tabella 4.2.VIII: risultati per il modello M5.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	6 (62%)	7 (54%)	13
totale.	52 (72%)	10 (14%)	10 (14%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	51 (86%)	5 (8%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	5 (38%)	8 (62%)	13
totale	51 (71%)	10 (14%)	11 (15%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=15
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	51 (86%)	5 (8%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	4 (31%)	9 (69%)	13
totale	51 (71%)	9 (13%)	12 (17%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=17
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	50 (85%)	4 (7%)	5 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (15%)	10 (77%)	13
totale	50 (69%)	7 (10%)	15 (20%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	4 (31%)	9 (69%)	13
totale	52 (72%)	8 (11%)	12 (17%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	51 (86%)	3 (5%)	5 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (15%)	10 (77%)	13
totale	51 (71%)	6 (8%)	15 (20%)	72

MODELLO M6

I risultati del modello M6 sono presentati nella Tabella 4.2.IX. Nel modello non vengono utilizzate variabili relative alle concentrazioni di NO (si veda la Tabella 4.2.I).

In termini di frequenze di successi si ottengono valori decisamente elevati compresi fra l'83% (60 su 72) ed il 90% (65 su 72). Meno buoni i risultati se valutati per mezzo dell'indice Ip, in quanto il valore migliore

risulta pari a 15. Ciò è dovuto alla presenza per tutte le configurazioni di alcuni mancati allarmi. Nel complesso questi oscillano fra 1 e 3, mentre i falsi allarmi variano tra 1 e 4 e gli eventi UP previsti fra 8 e 10.

Tabella 4.2.IX: risultati per il modello M6.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	55 (93%)	3 (5%)	1 (2%)	59
UP	3 (23%)	2 (15%)	8 (62%)	13
totale	58 (81%)	5 (7%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	54 (92%)	2 (3%)	3 (5%)	59
UP	2 (15%)	2 (15%)	9 (69%)	13
totale	56 (77%)	4 (6%)	12 (17%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=15
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	6 (10%)	1 (2%)	59
UP	1 (8%)	4 (31%)	8 (62%)	13
totale	53 (74%)	10 (14%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	52 (88%)	3 (5%)	4 (7%)	59
UP	1 (8%)	2 (15%)	10 (77%)	13
totale	53 (74%)	5 (7%)	14 (19%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=17
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	55 (93%)	0 (0%)	4 (7%)	59
UP	3 (23%)	0 (0%)	10 (77%)	13
totale	58 (81%)	0 (0%)	14 (19%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	54 (92%)	1 (2%)	4 (7%)	59
UP	2 (15%)	1 (8%)	10 (77%)	13
totale	56 (77%)	2 (3%)	14 (19%)	72

MODELLO M7

I risultati del modello M7 sono presentati nella Tabella 4.2.X. Le variabili impiegate nel modello sono soltanto 5 e tutte di tipo meteorologico,

relative all'intensità del vento ed alla presenza di inversione termica (è assente anche la temperatura, si veda la Tabella 4.2.I).

Il numero di successi di previsione ottenuto varia con le configurazioni fra 58 (81%) e 62 (86%), mentre i mancati allarmi oscillano fra 1 e 5, e questo spiega gli elevati valori dell'indice I_p . Gli eventi UP previsti variano fra 6 e 8.

Tabella 4.2.X: risultati per il modello M7.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=25$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	54 (92%)	2 (3%)	3 (5%)	59
UP	5 (38%)	2 (15%)	6 (46%)	13
totale	59 (82%)	4 (6%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=24$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	54 (92%)	2 (3%)	3 (5%)	59
UP	5 (38%)	1 (8%)	7 (54%)	13
totale	59 (82%)	3 (4%)	10 (14%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=20$
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	52 (88%)	4 (7%)	3 (5%)	59
UP	2 (15%)	4 (31%)	7 (54%)	13
totale	54 (75%)	8 (11%)	10 (14%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=19$
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	50 (85%)	6 (5%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	4 (31%)	8 (62%)	13
totale	51 (71%)	10 (14%)	11 (15%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=24$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	54 (92%)	2 (3%)	3 (5%)	59
UP	5 (38%)	1 (8%)	7 (54%)	13
totale	59 (82%)	3 (4%)	10 (14%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=23$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	54 (92%)	2 (3%)	3 (5%)	59
UP	5 (38%)	0 0%)	8 (62%)	13
totale	59 (82%)	2 (3%)	11 (15%)	72

MODELLO M8

I risultati del modello M8 sono presentati nella Tabella 4.2.XI. Questo modello utilizza tutte e soltanto le variabili meteorologiche (per la composizione si veda la Tabella 4.2.I).

Tabella 4.2.XI: risultati per il modello M8.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=22
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	54 (92%)	3 (5%)	2 (3%)	59
UP	3 (23%)	6 (46%)	4 (31%)	13
totale	57 (79%)	9 (13%)	6 (8%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=21
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	52 (88%)	5 (8%)	2 (3%)	59
UP	2 (15%)	6 (46%)	5 (38%)	13
totale	54 (75%)	11 (15%)	7 (10%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	50 (85%)	7 (12%)	2 (3%)	59
UP	1 (8%)	5 (38%)	7 (54%)	13
totale	51 (71%)	12 (17%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	50 (85%)	7 (12%)	2 (3%)	59
UP	1 (8%)	5 (38%)	7 (54%)	13
totale	51 (71%)	12 (17%)	9 (13%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	54 (92%)	3 (5%)	2 (3%)	59
UP	3 (23%)	3 (23%)	7 (54%)	13
totale	57 (79%)	6 (8%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=19
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	52 (88%)	5 (8%)	2 (3%)	59
UP	2 (15%)	4 (31%)	7 (54%)	13
totale	54 (75%)	9 (13%)	9 (13%)	72

Le frequenze percentuali dei successi di previsione variano fra il 79% (57 eventi su 72) e l'85% (61 su 72), quest'ultima corrispondente alla configurazione [K=12; 0-4, 5, 6-12]. Gli indici di prestazione I_p si mantengono fra 19 e 22 per la presenza in tutte le configurazioni di falsi allarmi e allarmi mancati. Il numero di eventi UP individuati varia fra 4 e 7.

MODELLO M9

Questo modello differisce dal precedente per l'inserimento fra le variabili del dato relativo ai flussi di traffico. Come si può osservare dai risultati presentati nella Tabella 4.2.XII, l'introduzione di questa informazione porta ad un miglioramento delle prestazioni. Infatti le frequenze di successo risultano per alcune configurazioni pari all'85% (61 eventi su 72) e per le altre addirittura del 90% (65 su 72). L'indice di prestazione migliore risulta pari a 10 per le configurazioni $[K=13; 0-4, 5, 6-13]$ e $[K=13; 0-4, 5-6, 7-13]$ con nessun "allarme mancato" e 10 eventi UP individuati su 13.

Tabella 4.2.XII: risultati per il modello M9.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=16
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	55 (93%)	1 (2%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	6 (46%)	6 (46%)	13
totale	56 (78%)	7 (10%)	9 (13%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=10
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	55 (93%)	1 (2%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	55 (76%)	4 (6%)	13 (18%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	51 (86%)	5 (8%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	51 (71%)	8 (11%)	13 (18%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=14
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	51 (86%)	5 (8%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	51 (71%)	8 (11%)	13 (18%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=12
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	55 (93%)	1 (2%)	3 (5%)	59
UP	1 (8%)	2 (15%)	10 (77%)	13
totale	56 (78%)	3 (4%)	13 (18%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=10
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	55 (93%)	1 (2%)	3 (5%)	59
UP	0 (0%)	3 (23%)	10 (77%)	13
totale	55 (76%)	4 (6%)	13 (18%)	72

MODELLO M10

Il modello M10 impiega come variabili oltre ai flussi di traffico, i dati relativi all'intensità del vento ed alle concentrazioni di NO; non contiene quindi informazioni legate alla temperatura né all'inversione termica. Il modello può quindi essere impiegato quando siano assenti del tutto o parzialmente i dati delle temperature delle due stazioni meteo. I risultati del modello M10 sono presentati nella Tabella 4.2.XIII.

Tabella 4.2.XIII: risultati per il modello M10.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=31
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	55 (93%)	4 (7%)	0 (0%)	59
UP	7 (54%)	6 (46%)	0 (0%)	13
totale	62 (86%)	10 (14%)	0 (0%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=27
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	54 (92%)	5 (8%)	0 (0%)	59
UP	5 (38%)	7 (54%)	1 (8%)	13
totale	59 (82%)	12 (17%)	1 (1%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=27
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	50 (85%)	7 (12%)	2 (3%)	59
UP	3 (23%)	7 (54%)	3 (23%)	13
totale	53 (74%)	14 (19%)	5 (7%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=25
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	49 (83%)	8 (14%)	2 (3%)	59
UP	2 (15%)	7 (54%)	4 (31%)	13
totale	51 (71%)	15 (21%)	6 (8%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=30
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	55 (93%)	2 (3%)	2 (3%)	59
UP	7 (54%)	3 (23%)	3 (23%)	13
totale	62 (86%)	5 (7%)	5 (7%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			Ip=26
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	54 (92%)	3 (5%)	2 (3%)	59
UP	5 (38%)	4 (31%)	4 (31%)	13
totale	59 (82%)	7 (10%)	6 (8%)	72

Le frequenze degli eventi correttamente previsti variano su valori percentua-

li lievemente inferiori (74%÷81%) rispetto a quelli ottenuti dai modelli precedenti. Anche i valori dell'indice di prestazione I_p risultano decisamente superiori per la presenza in ogni configurazione di alcuni allarmi mancati, oscillanti fra 2 e 7 casi. Gli eventi UP correttamente individuati variano tra 0 e 4.

MODELLO M11

Il modello M11 utilizza come variabili le concentrazioni di NO ed i dati relativi ai flussi di traffico, mentre fra le variabili meteorologiche impiega la sola temperatura (si veda la Tabella 4.2.I). I risultati sono presentati nella Tabella 4.2.XIV.

Tabella 4.2.XIV: risultati per il modello M11.

K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=35$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-12	totale
DOWN	50 (85%)	9 (15%)	0 (0%)	59
UP	7 (54%)	5 (38%)	1 (8%)	13
totale	57 (79%)	14 (19%)	1 (1%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=31$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5-6	probabile 7-13	totale
DOWN	50 (85%)	9 (15%)	0 (0%)	59
UP	5 (38%)	7 (54%)	1 (8%)	13
totale	55 (76%)	16 (22%)	1 (1%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=28$
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-12	totale
DOWN	49 (83%)	6 (10%)	4 (7%)	59
UP	2 (15%)	8 (62%)	3 (23%)	13
totale	51 (71%)	14 (19%)	7 (10%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=30$
classi NO2AB	improbabile 0-3	incerto 4-5	probabile 6-13	totale
DOWN	47 (83%)	7 (12%)	5 (8%)	59
UP	2 (15%)	7 (54%)	4 (31%)	13
totale	49 (71%)	14 (19%)	9 (13%)	72
K=12	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=37$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-12	totale
DOWN	50 (85%)	5 (8%)	4 (7%)	59
UP	7 (54%)	3 (23%)	3 (23%)	13
totale	57 (79%)	8 (11%)	7 (10%)	72
K=13	numero di primi vicini appartenenti alla classe UP			$I_p=33$
classi NO2AB	improbabile 0-4	incerto 5	probabile 6-13	totale
DOWN	50 (85%)	4 (7%)	5 (8%)	59
UP	5 (38%)	4 (31%)	4 (31%)	13
totale	55 (76%)	8 (11%)	9 (13%)	72

Le frequenze degli eventi correttamente previsti risultano per questo modello inferiori rispetto a quelle ottenute dagli altri modelli, oscillano infatti tra il 71% (51 casi su 72) ed il 75% (54 su 72). Anche i valori dell'indice I_p sono conseguentemente elevati (fra 28 e 37) a causa di numerosi allarmi mancati e falsi allarmi presenti in tutte le configurazioni.

Il numero di eventi UP correttamente previsti varia tra 1 e 4.

Nella Tabella 4.2.XV sono infine riassunti i valori dell'indice I_p ottenuti dai modelli nelle diverse configurazioni.

In termini di valori medi dell'indice, ovvero di comportamento complessivo, i modelli migliori risultano M9 (12.7) e M3 (13.5), i quali sono anche i modelli che ottengono il miglior valore I_p assoluto; appare inoltre preferibile il valore $K=13$ (I_p medio pari a 18.4) rispetto a $K=12$ (19.8). Per quanto riguarda invece le configurazioni degli intervalli di probabilità, per entrambi i valori di K , le medie minori dell'indice I_p competono alla $[K; 0-3, 4-5, 6-K]$. Occorre però osservare che i valori minimi assoluti dell'indice corrispondono invece (sia per $K=12$ che per $K=13$) alla configurazione $[K; 0-4, 5, 6-K]$.

Tabella 4.2.XV: indice di prestazione I_p (riepilogo e valori medi).

Indice I_p Configurazioni Modelli	K=12			K=13			medie
	0-4,5-6,7-K	0-3,4-5,6-K	0-4,5,6-K	0-4,5-6,7-K	0-3,4-5,6-K	0-4,5,6-K	
M1	15	13	14	15	14	13	14.0
M2	20	19	19	20	15	17	18.3
M3	17	14	13	16	11	10	13.5
M4	21	17	18	19	15	14	17.3
M5	16	15	14	16	17	16	15.7
M6	16	15	17	16	16	16	16.0
M7	25	20	24	24	19	23	22.5
M8	22	19	19	21	19	19	19.8
M9	16	14	12	10	14	10	12.7
M10	31	27	30	27	25	26	27.7
M11	35	28	37	31	30	33	32.3
medie	21.3	18.3	19.7	19.5	17.7	17.9	19.1
	19.8			18.4			

Questi risultati confermano e approfondiscono le osservazioni fatte in base alle frequenze di eventi UP previsti (Tabella 4.2.III).

Nel complesso si può dire che l'applicazione della tecnica K-nn sembra riuscire a produrre sistemi di previsione degli eventi acuti molto precisi e affidabili. Occorre però sottolineare ancora che queste prestazioni si ottengono ovviamente quando le variabili-coordinate utilizzate portano contributi significativi alla spiegazione del fenomeno da prevedere.

4.2.4 Modelli K-nn operativi

Durante l'inverno 1996-97 è stato impiegato il modello K-nn M9 (nella configurazione [K=13; 0-4, 5-6, 7-13]) come strumento di supporto alla previsione giornaliera dei livelli d'inquinamento atmosferico svolta dall'ARPAT di Firenze.

Il modello è implementato su di un foglio di calcolo (EXCEL 5.0): partendo dai dati misurati dalle stazioni della rete di monitoraggio fino alle ore 10 a.m., il programma esegue la ricerca sulla serie storica completa dei 3 anni di osservazioni (periodi invernali dal 1993 al 1996) ed ordina gerarchicamente gli eventi rispetto alla loro distanza dall'evento da prevedere. Vengono quindi mostrati in tabella (Figura 4.2.4) gli eventi nel loro ordine di prossimità, con i valori calcolati della distanza e tutti i valori delle loro variabili coordinate, utilizzate o meno nella distanza. Viene quindi evidenziato il numero di eventi UP corrispondenti a giorni feriali privi di precipitazioni presenti fra i primi 13 punti-evento (con le stesse particolarità), e viene indicato in base alla configurazione di probabilità in quale regione risulta posizionarsi l'evento da prevedere.

L'impiego operativo già svolto durante l'inverno precedente ha fatto ritenere maggiormente utile per l'operatore l'osservazione diretta dei risultati della ricerca^{12,J,K}, cioè degli eventi primi vicini e della loro prossimità all'evento da prevedere, rispetto all'indicazione probabilistica prodotta sulla base della configurazione scelta. Di fatto questa indicazione ha valore di pro-memoria, indicando approssimativamente dei limiti di riferimen-

12. Anche nell'impiego del metodo K-nn per la previsione delle valanghe l'informazione principalmente impiegata o ritenuta utile dagli operatori esperti è quella della successione dei primi vicini (si vedano i riferimenti bibliografici J e K).

km>180 Classe		Variabili - Data: 5 12 1996																
9	Alta(>6)	NO2AB	NO2SUP	V14010	d14010	V15010	D15010	T14010	INV010	INV10H	NO1PGP	INVPGP	NOIT	INVT	PIO010	TRM10H	TRM10H	NOB010
DST	oggi	232	16	1.5	SE	0.6	VAR	1.1	4.9	6	10	2.1	20	3.5	0	1418	1043	157
ordinate																		
1.80	sab 4 12 93	202	4	1.3	SE	0.4	VAR	4.6	4.4	5.5	9	1.4	19	2.8	0	863	1193	230.3
1.80	gio 1 12 94	104	0	1.8	SE	2.3	VAR	4.4	3.3	6	11	0.9	21	2.0	0	1417	1072	228.2
1.86	lun 12 12 94	233	5	1.6	SE	0.6	VAR	4.5	3.4	6.4	8	0.7	18	1.9	0	1294	934	222.9
2.00	mer 30 11 94	253	10	1.7	SE	0.5	VAR	4	3.5	5.5	7	0.4	17	1.8	0	1441	1424	246.7
2.08	mer 29 12 93	204	5	1	SE	0.5	VAR	0.7	2.7	4.1	10	1.1	20	1.8	0	967	1183	238.6
2.08	lun 21 11 94	253	5	1.6	SE	0.7	VAR	5.9	3.4	4.4	8	0.8	18	2.0	0	1470	1312	183.2
2.25	gio 2 02 96	251	8	1.7	SE	0.8	VAR	1.7	3.3	3.9	5	0.2	15	1.6	0	1381	1034	149.5
2.37	gio 30 12 93	212	4	1.1	SE	0.4	VAR	0.2	2.7	2.5	9	1.1	19	1.8	0	999	1163	232.3
2.52	mar 7 11 95	199	2	1.2	SE	0.5	N	3.4	2.8	3.9	7	0.1	17	1.3	0	1472	1665	107.7
2.52	gio 4 01 96	86	0	2	SE	3.4	NE	3.2	3	3.3	6	0.4	16	1.6	0	1379	1424	133.2
2.68	sab 16 12 95	134	0	0.8	SE	3.3	E	8.4	3.8	3.4	10	1.5	20	2.5	0	1114	1592	ND
2.69	mar 12 12 95	212	5	1.4	SE	0.8	VAR	3.2	2.2	1.9	7	0.7	17	1.4	0	1312	1601	174.4
2.75	ven 30 29 95	134	0	1.9	SE	3.9	VAR	2.7	3.6	4.3	4	-0.2	14	1.5	0	1342	1319	131.3
Legenda		n° ore di inversione termica dalle 12 alle 24 del giorno precedente																
		NO1PGT inversione termica media dalle 12 alle 24 del giorno precedente																
		NO2AB n° ore di inversione termica dalle 12 del giorno prima alle 10 odierne																
		NO2ABSUP n° di superamenti orari della soglia di attenzione stazioni A e B																
		V14010 velocità media del vento nella stazione Ximeniano dalle ore 0 alle 10																
		D14019 direzione prevalente del vento nella stazione Ximeniano dalle ore 0 alle 10																
		V15010 velocità media del vento nella stazione M. Morello dalle ore 0 alle 10																
		D15010 direzione prevalente del vento nella stazione M. Morello dalle ore 0 alle 10																
		T14010 temperatura media nella stazione Ximeniano dalle ore 0 alle 10																
		INV010 inversione termica media dalle ore 0 alle 10																
INV10H		SIN categoria sinottica del giorno																

Figura 4.2.4: viene mostrata la tabella dei risultati ottenuta con il modello operativo per il giorno 5/12/96 (evento acuto) nel quale NO2AB ha raggiunto il valore di 232 µg/m³ (riportato nella tabella sotto la riga di intestazione accanto alla cella "oggi"). Il modello ha individuato ben 9 eventi UP fra i 13 primi vicini, è quindi ALTA(>6) la probabilità che il giorno in corso corrisponda ad un evento UP.

to non stringenti, questo perché in ogni caso i risultati del modello devono poi essere valutati sulla base delle condizioni meteorologiche previste nel corso dello stesso giorno e dei giorni successivi.

L'esame della sequenza dei primi vicini corredati di tutte le informazioni disponibili può anche permettere di valutare come elemento aggiuntivo la distanza temporale fra gli eventi e quindi l'attendibilità del ripetersi degli eventi anche in corrispondenza con il mutare del quadro emissivo.

4.3 Modelli a regressione

In questo paragrafo vengono mostrati alcuni modelli previsionali ottenuti con metodi statistici classici. In particolare saranno esaminati i risultati prodotti dalle tecniche di regressione multilineare e logistica.

4.3.1 Modelli a regressione multilineare

Sono qui discussi i risultati ottenuti con alcuni modelli di regressione multilineare^{M,L}.

Per mezzo di questa tecnica i valori della variabile dipendente (da prevedere) vengono espressi in funzione (lineare) dei valori delle variabili predittori. La scelta dei predittori avviene in base ad indici statistici che permettono di valutare la significatività e l'importanza del predittore nello spiegare i valori (e la variabilità) della grandezza da prevedere. I coefficienti dell'espressione lineare che lega variabile dipendente e predittori vengono calcolati minimizzando gli scarti (quadratici) fra valore previsto e valore reale della variabile dipendente sui dati di identificazione del modello.

Come per i metodi affrontati precedentemente anche in questo caso i modelli sono stati costruiti sui dati del campione degli eventi dei periodi 1993-94 e 1994-95 escludendo i giorni festivi e quelli con precipitazioni (in totale 164 eventi) ed è stato successivamente valutato il loro comportamento predittivo rispetto alla variabile dipendente NO₂AB sul periodo 1995-96.

Ai modelli scelti si è arrivati partendo dal consueto gruppo di variabili

esplicative ed utilizzando la tecnica *forward*¹³ con livello di significato in ingresso del 5% ed in uscita del 10%. I modelli si differenziano ovviamente per l'impiego di variabili diverse, risultato che è stato ottenuto diversificando i gruppi di variabili di partenza.

Il primo modello (A) contiene come variabili indipendenti (in ordine di ingresso nella procedura di determinazione) INVT, V15010, TRM8H e NOMB5H; contiene inoltre il termine costante.

Nelle successive tabelle sono riassunti i coefficienti, i test e le statistiche relative a questo modello.

Tabella 4.3.I: modello a regressione multilineare A, coefficienti e loro statistiche.

variabile	coefficiente	SE coefficiente	intervallo di confidenza al 95%		t	livello di significato
INVT	21.2	2.4	16.5	25.9	8.95	0.000
NOMB5H	0.114	0.049	0.016	0.212	2.31	0.023
TRM8H	0.031	0.012	0.007	0.055	2.60	0.010
V15010	-4.3	0.9	-6.2	-2.5	-4.67	0.000
Costante	123	16	91	155	7.71	0.000

Tabella 4.3.II: modello a regressione multilineare A, correlazione e ANOVA.

coefficiente di correlazione multipla R		0.85	
varianza spiegata R ²		0.73	
R ² corretto		0.72	
Errore Standard		28.5	
Analisi della varianza:	g.d.l.	somma dei quadrati	media dei quadrati
Regressione	4	249772	62443
Residui	115	93614	814
F	76.7	livello di significato di F	0.000

Il modello risulta significativo nel suo complesso (livello di significato della statistica F in Tabella 4.3.II) e risultano ovviamente significative tutte le variabili introdotte (livelli di significato dei coefficienti, relativi alla statistica t, riportate nella Tabella 4.3.I).

Nel modello compaiono come variabili meteorologiche una grandezza

13. Esistono diversi metodi di selezione delle variabili indipendenti; nel caso presente è stata impiegata la tecnica *forward* con la quale vengono inseriti nel modello lineare i predittori via via più significativi, uno alla volta, e vengono eventualmente rimossi quelli divenuti non più significativi. La selezione cessa quando nessun altro predittore fra quelli disponibili risulta più significativo al livello di significato prefissato.

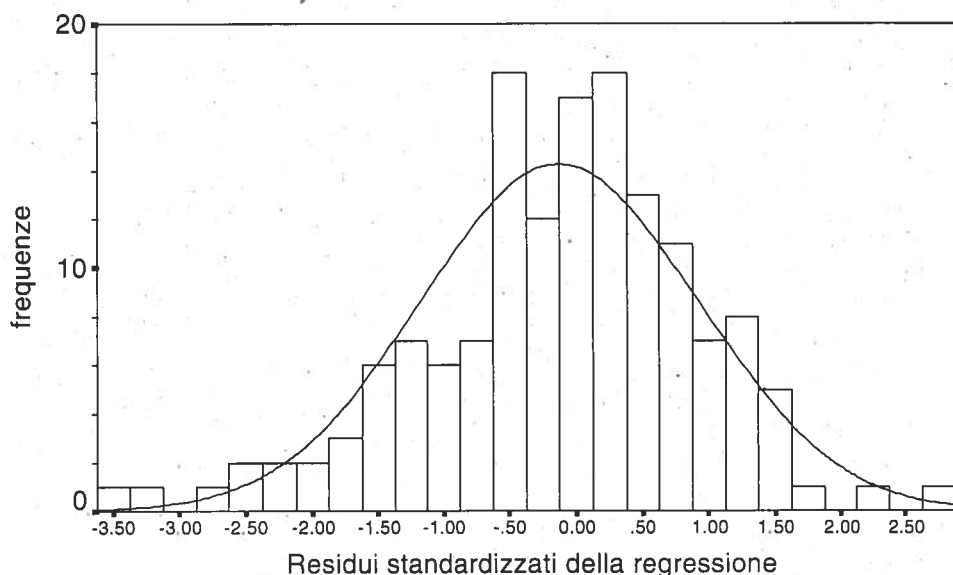


Figura 4.3.1: viene mostrato l'istogramma dei residui (differenze fra valore reale di NO₂AB e valore previsto dal modello a regressione A) insieme alla distribuzione normale fit. La normalità dei residui è una delle condizioni teoriche di validità del metodo (pre-requisito). In questo caso il Test di Kolmogorov-Smirnov di adattamento alla distribuzione normale fornisce un livello di significato pari a 0.35, indicando quindi un adattamento accettabile.

legata all'inversione termica INVT (quella che produce la massima correlazione lineare con la variabile dipendente NO₂AB) e l'intensità del vento in quota (V15010) il cui coefficiente è ovviamente negativo. Sono poi presenti due altre variabili legate però alle sorgenti di emissione (TRM8H) ed ai precursori (NOMB5H).

La presenza della variabile legata al traffico veicolare rappresenta un legame diretto con le emissioni di questa sorgente, favorito dalla presenza nel campione di giorni feriali e prefestivi. Anche se con una valenza statisticamente meno significativa la presenza della concentrazione media di NO sembra indicare che il contributo informativo delle concentrazioni dei precursori non è assorbito completamente dalle variabili meteorologiche.

In Figura 4.3.1 sono esaminati i residui della regressione (rispetto al campione di identificazione), mostrando la loro distribuzione di frequenza (residui standardizzati, media=-0.12, deviazione std=1.05, 150 dati) ed il corrispondente fit con la distribuzione normale. Il test di Kolmogorov-

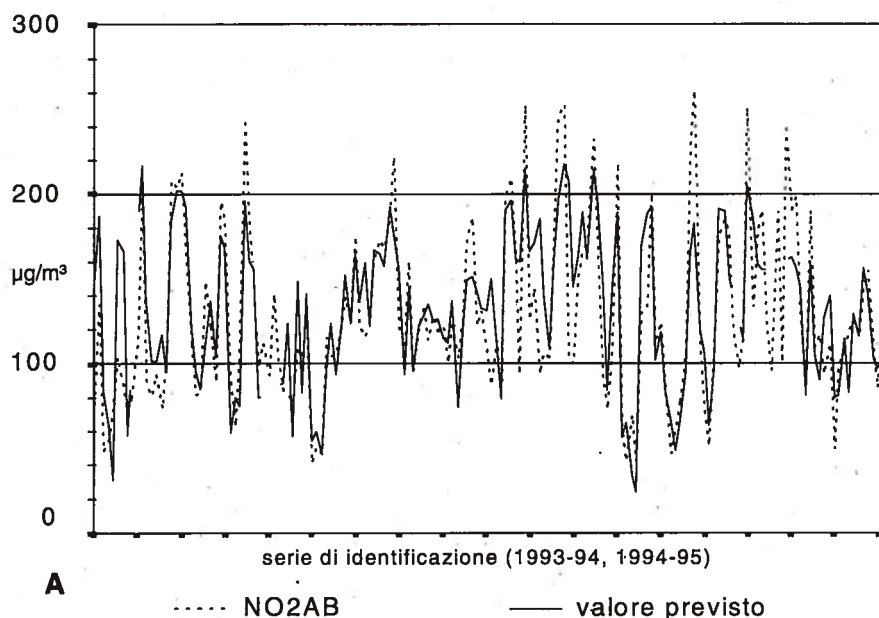


Figura 4.3.2: comportamento del modello a regressione A sulla serie di identificazione

Smirnov fornisce un livello di significato pari a 0.35, indicando un adattamento accettabile.

In Figura 4.3.2 sono mostrate la serie di identificazione e quella dei valori previsti. Si osserva come quest'ultima segua correttamente l'andamento e la maggior parte delle oscillazioni presenti nella prima. Si osserva però anche uno smorzamento dell'ampiezza delle oscillazioni nella serie dei valori previsti rispetto a quelle reali. Questo effetto è legato al procedimento stesso di identificazione che comporta di fatto l'individuazione dei valori che producono il miglior accordo "globale o in media" tra le due serie provocando in genere una sottostima dei valori elevati ed una sovrastima di quelli più bassi.

In Figura 4.3.3 è invece mostrata la corrispondenza fra i valori previsti dal modello e quelli della variabile dipendente relativi al campione di identificazione. I punti risultano abbastanza addensati sulla diagonale ma si osservano scostamenti piuttosto sistematici: nella regione di valori bassi di NO₂AB si hanno tendenzialmente valori previsti superiori con alcuni casi molto elevati, mentre nella regione di valori alti di NO₂AB si hanno valori previsti tendenzialmente inferiori; la distribuzione dei punti assume un andamento curvo o lineare a tratti.

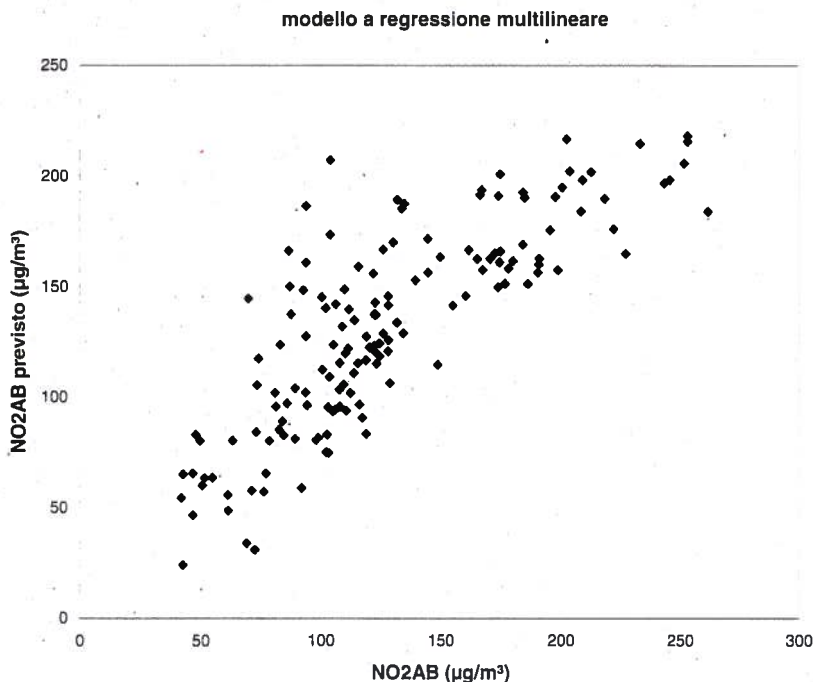


Figura 4.3.3: comportamento del modello a regressione A sulla serie di identificazione. Viene mostrata la relazione fra i dati NO₂AB reali e quelli previsti.

Lo stesso tipo di comportamento si ravvisa in Figura 4.3.4 dove è mostrata la relazione fra valori previsti e variabile dipendente ma relativa al campione di validazione (periodo invernale 1995-96).

In Figura 4.3.5 è confrontato il comportamento fra la serie dei dati NO₂AB del campione di validazione e la serie prevista dal modello di regressione. Si osserva chiaramente come l'andamento dei dati previsti segua in modo decisamente fedele le oscillazioni delle concentrazioni. Si nota però altrettanto chiaramente come i valori previsti risultino prevalentemente minori dei valori NO₂AB elevati e simmetricamente superiori ai valori NO₂AB più bassi.

Il coefficiente di correlazione lineare fra le due serie è pari a 0.76 e conferma il discreto accordo ed il comportamento in fase fra le serie. Per quanto attiene direttamente alle capacità predittive del modello nell'individuare gli episodi

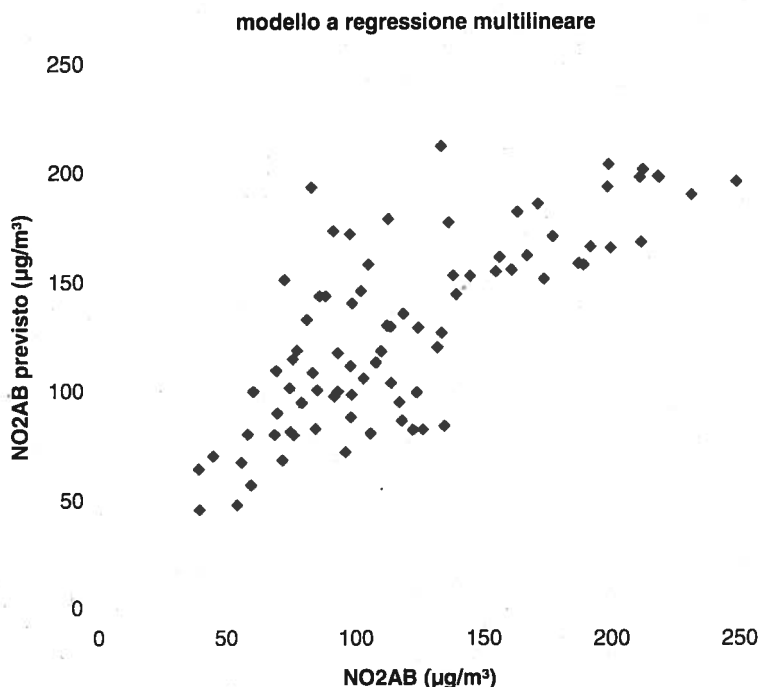


Figura 4.3.4: comportamento del modello a regressione A sulla serie di validazione. Viene mostrata la relazione fra i dati NO2AB reali e quelli previsti.

acuti si osserva che 8 eventi UP su 13 (62%) sono correttamente previsti come tali, corrispondono cioè ad un valore previsto superiore ai $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dei 69 eventi DOWN ne vengono correttamente predetti 65 pari al 94%, mentre 5 sono assegnati alla classe UP. Questi dati sono riepilogati nella Tabella 4.3.III, mentre nella Tabella 4.3.IV è ipotizzata una fascia intermedia corrispondente ad una zona d'incertezza quando il modello prevede valori compresi fra 155 e $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (il limite inferiore è stato scelto empiricamente).

Se si esaminano in dettaglio i casi relativi agli errori di previsione più evidenti, ed in particolare quelli dove il modello ha previsto valori elevati mentre NO2AB è risultato molto inferiore, si osserva che sono dovuti a situazioni tipiche nelle quali partendo da condizioni meteorologiche di elevata stabilità si è prodotto durante il giorno un netto cambiamento verso situazioni di in-

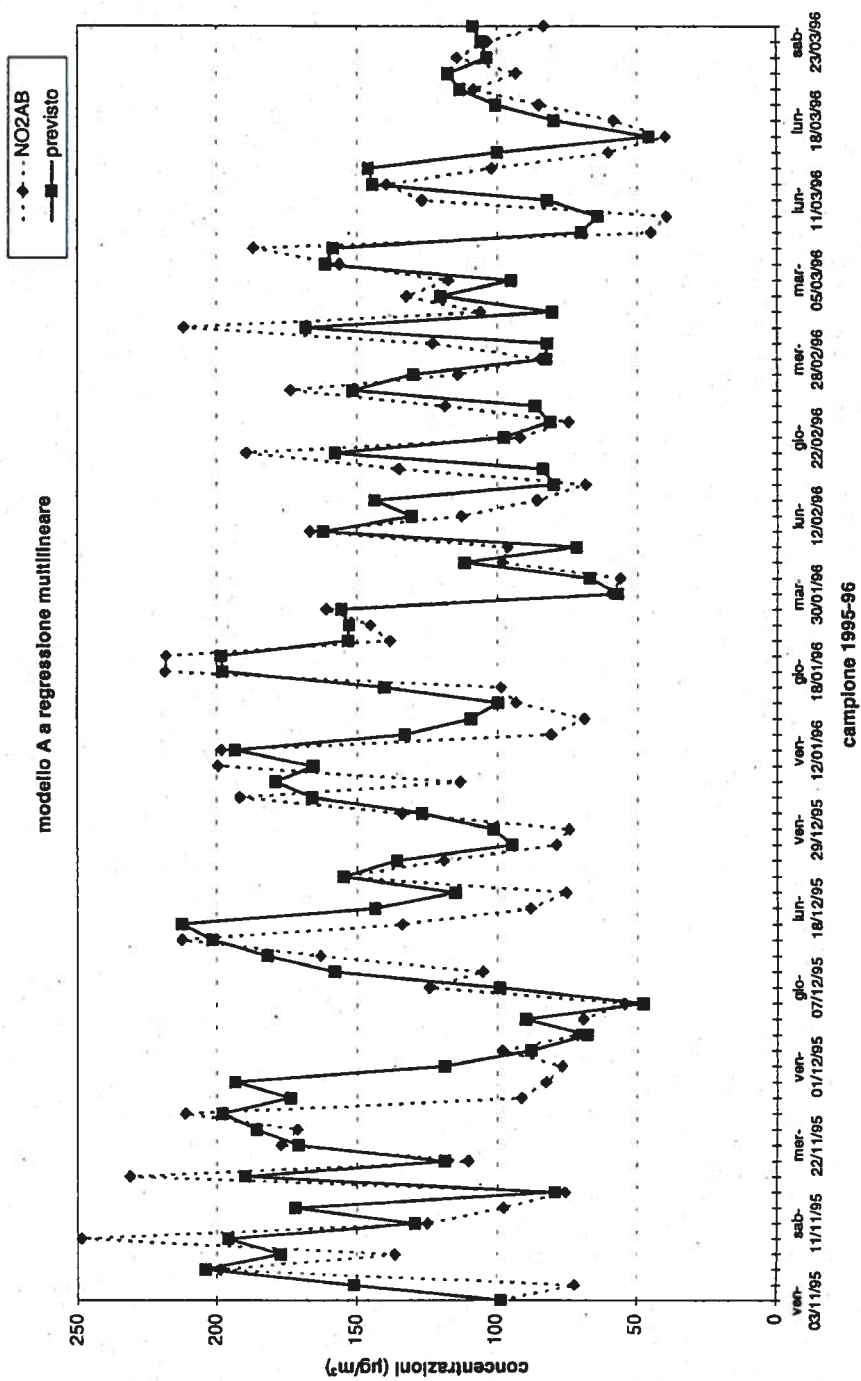


Figura 4.3.5: comportamento del modello a regressione A sulla serie di validazione.

stabilità atmosferica. Esempi tipici sono quelli del 30/11 (previsto 193, rilevato 83) e del 16/12 (previsto 212, rilevato 134) nei quali a partire dalla presenza condizioni meteo, particolarmente favorevoli al verificarsi di episodi acuti, si è avuto nella tarda mattinata l'ingresso sulla città di venti moderati da NE, evento che spiega chiaramente le basse concentrazioni misurate.

Tabella 4.3.III: prestazioni del modello A sugli eventi acuti.

	NO2AB previsto		
NO2AB	DOWN	UP	totale
DOWN	65 (94%)	4 (6%)	69
UP	5 (38%)	8 (62%)	13
totale	70	12	82

Tabella 4.3.IV: prestazioni del modello A.

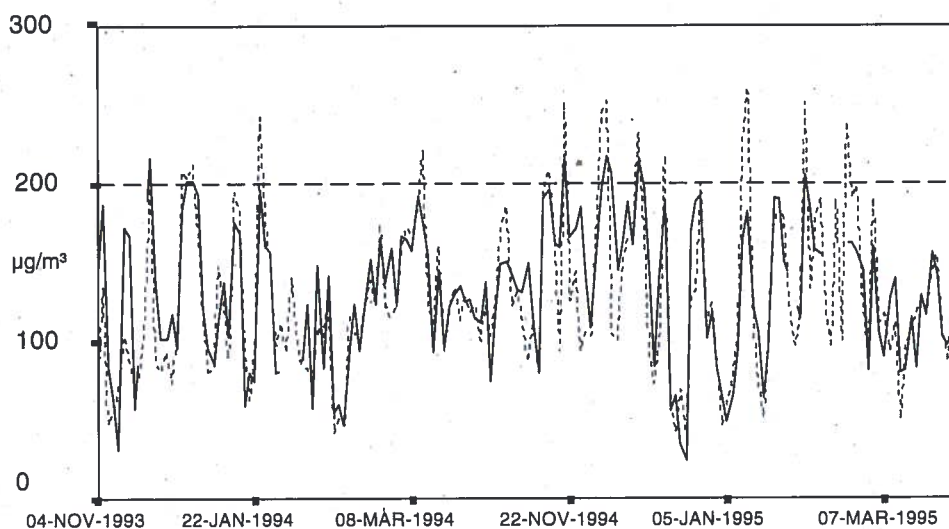
	NO2AB previsto			
NO2AB	DOWN	incerto	UP	totale
DOWN	56	9	4	69
UP	0	5	8	13
totale	56	14	12	82

Nelle Figure 4.3.6 e 4.3.7 sono mostrati gli andamenti delle serie prevista e reale sul campione di identificazione ottenuti con altri due modelli di regressione (B e C).

Il secondo modello (B) è quello che raggiunge il valore massimo di correlazione multilineare con la serie di identificazione (0.86) e differisce dal precedente (A) soltanto per lo scambio della variabile NOMBH5 con NOB010, cioè sostituendo una media spaziale con una media temporale più estesa di concentrazioni di NO.

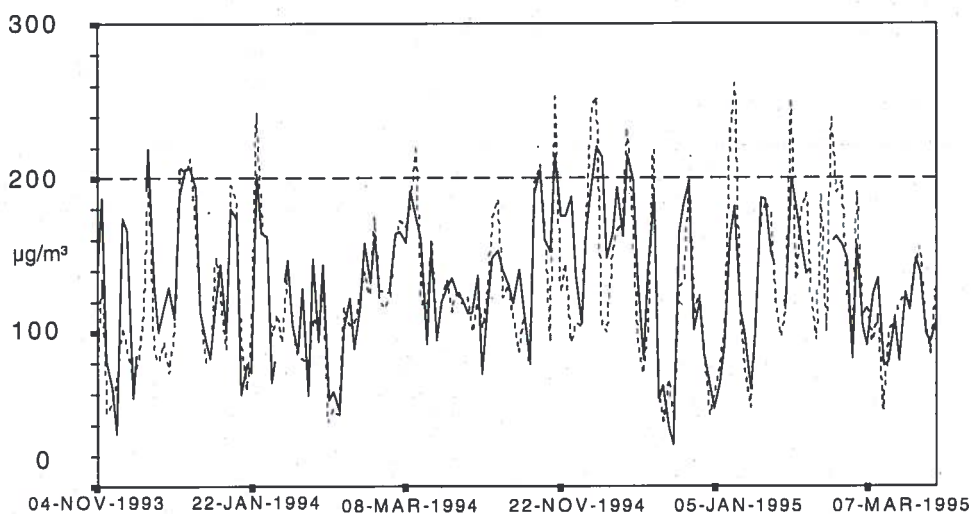
Il modello C assume come variabili predittive INV010, INVPGP, V15010, T14010 e NOMB5H ed ottiene un coefficiente di correlazione multilineare di 0.83.

Il confronto fra le Figure 4.3.2, 4.3.6 e 4.3.7 mostra chiaramente come tutti questi modelli presentino un comportamento sostanzialmente identico rispetto alla serie di identificazione. Nelle successive Tabelle 4.3.V e 4.3.VI sono riportati i coefficienti di regressione e le relative statistiche dei modelli B e C.



B giorno ----- NO2AB ————— valore previsto

Figura 4.3.6: comportamento del modello a regressione B sulla serie di identificazione.



C giorno ----- NO2AB ————— valore previsto

Figura 4.3.7: comportamento del modello a regressione C sulla serie di identificazione.

Tabella 4.3.V: modello a regressione multilineare B, coefficienti e loro statistiche.

variabile	coefficiente	SE coefficiente	intervallo di confidenza al 95%		t	livello di significato
INVT	18.1	2.7	12.7	23.5	6.60	0.000
NOB010	0.141	0.046	0.005	0.232	3.06	0.028
TRM8H	0.030	0.012	0.006	0.053	2.53	0.013
V15010	-3.9	.9	-5.8	-2.1	-4.26	0.000
Costante	113	17	91	155	7.71	0.000

Tabella 4.3.VI: modello a regressione multilineare C, coefficienti e loro statistiche.

variabile	coefficiente	SE coefficiente	intervallo di confidenza al 95%		t	livello di significato
INV010	8.08	2.1	4.0	12.1	3.93	0.000
INVPGP	6.95	3.7	-0.4	14.2	1.88	0.062
V15010	-5.5	1.0	-7.4	-3.5	-5.58	0.000
T14010	-1.6	0.8	-3.2	-0.1	-2.11	0.037
NOMB5H	0.131	0.055	0.023	0.239	2.40	0.018
Costante	166	10	146	185	16.52	0.000

Il modello B raggiunge un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.74 con un errore standard di $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ovviamente la regressione è altamente significativa).

Il modello C ha un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.69 ed un errore standard di $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anche in questo caso la regressione è altamente significativa).

Nella Tabella 4.3.VII sono riportati i risultati del modello B sulla serie di validazione del periodo 1995-96. Si osserva una percentuale del 92% di eventi correttamente assegnati nel complesso alle classi UP e DOWN; fra questi vengono individuati 8 eventi acuti (62%), mentre si registrano 5 mancati allarmi e un solo falso allarme. Confrontando questi risultati con quelli di Tabella 4.3.III per il modello A si osserva una riduzione dei falsi allarmi, mentre sia la percentuale complessiva di successi che quella relativa agli eventi UP si mantengono invariate.

Nella Tabella 4.3.VIII vengono riepilogati i risultati del modello con l'introduzione della fascia intermedia $155 \div 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ corrispondente ad una zona di incertezza.

Tabella 4.3.VII: prestazioni del modello B sugli eventi acuti.

	NO2AB previsto		
NO2AB	DOWN	UP	totale
DOWN	63 (98%)	1 (2%)	64
UP	5 (38%)	8 (62%)	13
totale	68	12	77

Tabella 4.3.VIII: prestazioni del modello B.

	NO2AB previsto			
NO2AB	DOWN	incerto	UP	totale
DOWN	53	10	1	64
UP	1	4	8	13
totale	54	14	9	77

Nelle Tabelle 4.3.IX e 4.3.X sono riportate le prestazioni del modello C nella classificazione degli eventi giornalieri della serie di validazione. La percentuale complessiva dei successi risulta pari al 91% e si discosta quindi in maniera trascurabile da quelle ottenute dai modelli A e B.

Diversamente si osserva un minor numero di successi (solo 6 pari al 46%) nell'individuazione dei casi UP e anche, di conseguenza, un maggior numero di allarmi mancati (7 rispetto ai 5 degli altri modelli).

Tabella 4.3.IX: prestazioni del modello C sugli eventi acuti.

	NO2AB previsto		
NO2AB	DOWN	UP	totale
DOWN	73 (99%)	1 (1%)	74
UP	7 (54%)	6 (46%)	13
totale	80	7	87

Tabella 4.3.X: prestazioni del modello C.

	NO2AB previsto			
NO2AB	DOWN	incerto	UP	totale
DOWN	61	12	1	74
UP	1	6	6	13
totale	62	18	12	87

Nelle Figure 4.3.8 e 4.3.9 sono mostrati i comportamenti dei modelli B e C sulla serie di validazione.

Il modello B ottiene il più elevato coefficiente di correlazione lineare con 0.79, mentre il modello C ottiene un coefficiente poco inferiore pari a 0.78.

Anche per questi due modelli sono confermate le osservazioni eseguite

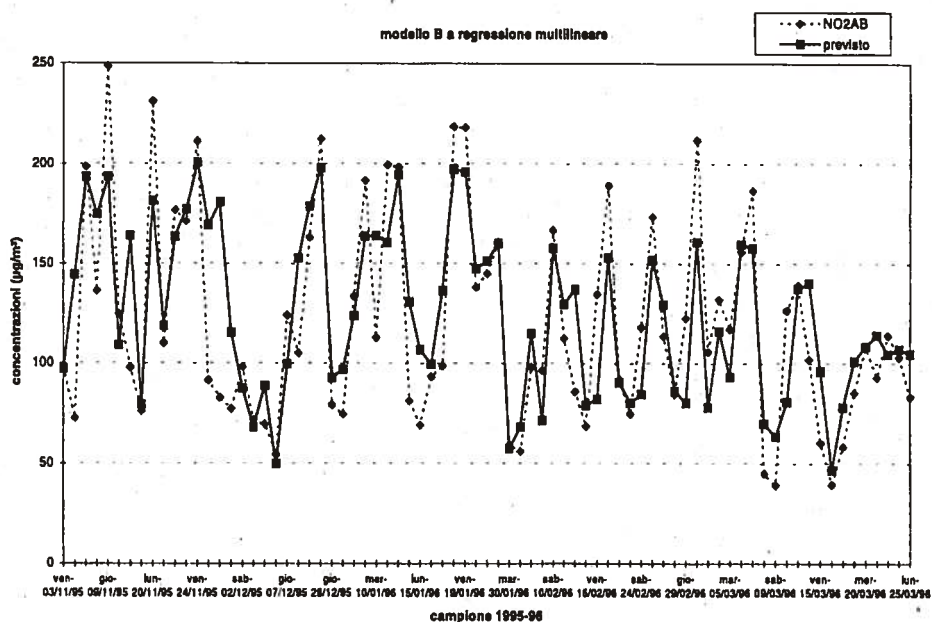


Figura 4.3.8: comportamento del modello a regressione B sulla serie di validazione.

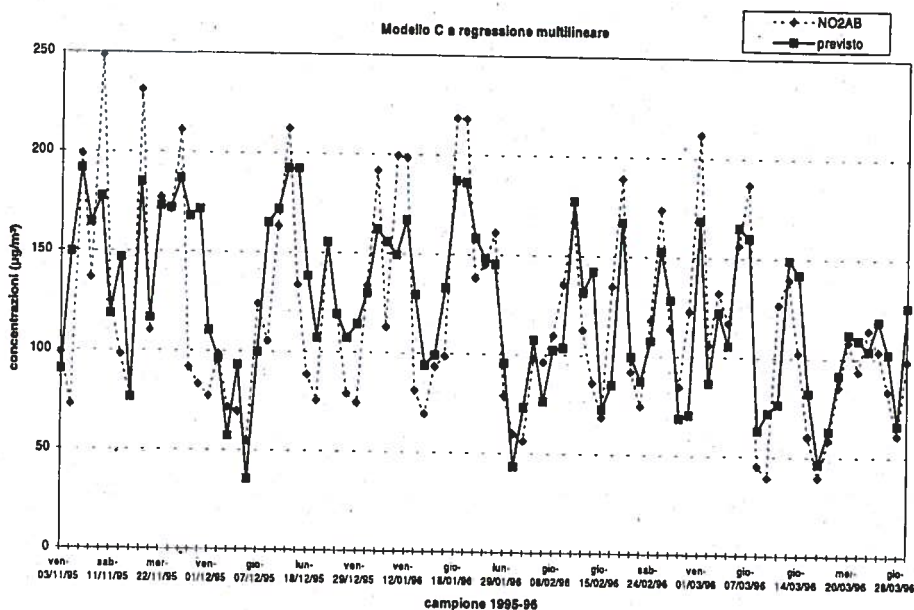


Figura 4.3.9: comportamento del modello a regressione C sulla serie di validazione.

per il modello A e riferite alla Figura 4.3.5: la risposta ottenuta è fortemente in fase con la serie dei valori reali, ma risulta sempre inferiore quando quest'ultimi sono elevati (il caso di maggior interesse in questo contesto) e viceversa tendenzialmente superiore per valori NO2AB bassi.

I modelli a regressione multilineare ottenuti si comportano quindi in modo piuttosto soddisfacente nell'individuazione degli eventi critici d'inquinamento atmosferico. Ciò è chiaramente dovuto all'impiego di variabili predittive con elevato contenuto informativo rispetto al fenomeno da prevedere.

Questi modelli possono essere impiegati come utile strumento di supporto per la previsione "short term", purché si tenga conto del limite intrinseco dovuto alla loro procedura di individuazione, costituito dall'ottimizzazione del comportamento medio, che porta quindi a sottostimare e sovrastimare i valori estremi.

Poiché per gli obiettivi del presente lavoro l'individuazione dei casi estremi è proprio l'oggetto della previsione, appare necessario migliorare i modelli a regressione proprio sotto l'aspetto dell'individuazione degli eventi acuti, ad esempio introducendo un fattore di peso che assegni im-

portanza maggiore agli eventi di interesse e/o utilizzando variabili trasformate¹⁴ o regressioni nonlineari.

Ottenere modelli a regressione con un legame esplicito fra concentrazioni e variabili legate alle emissioni può essere interessante per indagare ed avere stime qualitative sugli effetti ottenuti o ottenibili limitando le emissioni.

4.3.2 Modelli a regressione logistica

La regressione logistica è una tecnica statistica specifica per l'analisi e la previsione di variabili dicotomiche (o binarie) e quindi particolarmente adatta al problema di determinare il superamento o meno di valori soglia.

In questo paragrafo verranno descritti ed esaminati alcuni modelli di regressione logistica ottenuti per due tipi di soglie, il raggiungimento dello stato di attenzione (ATT) e l'individuazione degli eventi critici definiti come appartenenti alla classe UP.

Diversamente da quanto avviene nelle altre tecniche di regressione (lineare, multilineare e nonlineare) in questo caso l'obiettivo della regressione non è quello di individuare le variabili predittori che permettono per mezzo di una data relazione funzionale di spiegare i valori assunti dalla variabile dipendente, ma quello di individuare il legame ottimale fra valori dei predittori e probabilità di ottenere i due valori possibili di una variabile dicotomica. Nel caso presente si fa riferimento alle due variabili binarie UP (1 se $\text{NO}_2\text{AB} > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 0 altrimenti) e ATT (1 se $\text{NO}_2\text{AB} > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 0 altrimenti).

L'espressione funzionale della probabilità del modello logistico è data da:

$$\text{Pr}(\text{eventoUP}) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

14. Ad esempio, come già illustrato nel paragrafo 3.1.1 (Figure 3.1.5 e 3.1.6) il comportamento di NO_2AB rispetto alla variabile vento appare tutt'altro che lineare: per valori molto elevati, sopra i 4-5 m/s, le concentrazioni risultano sostanzialmente piatte, quasi costanti, mentre per valori estremamente bassi (intorno o inferiore 1 m/s) non si nota alcun andamento o relazione con le concentrazioni. Perciò è ipotizzabile una migliore capacità esplicativa di una variabile legata al vento in modo da non avere peso per valori bassi di questo, ed avere un peso determinante anche se negativo per valori alti.

in cui Z è una combinazione lineare delle variabili predittive. I parametri di questa combinazione lineare, che definiscono la presenza delle variabili nel modello, sono stimati attraverso il metodo di massima verosimiglianza.

Partendo dal consueto gruppo di variabili predittive e utilizzando la procedura di selezione forward (con livello di significato in ingresso pari al 5% ed in uscita del 10%) per la variabile UP è stato prodotto il modello riportato nella Tabella 4.3.XI, mentre in Tabella 4.3.XII è descritto il modello ottenuto per la variabile ATT.

Tabella 4.3.XI: modello UP (regressione logistica).

variabili	coefficienti	errore std dei coefficienti
NOIT	0.426	0.12
TRM8H	0.0053	0.0026
V15010	-3.568	1.29
Costante	-8.524	3.84

Tabella 4.3.XII: modello ATT (regressione logistica).

variabili	coefficienti	errore std dei coefficienti
INVPGP	3.075	0.83
TRM10H	0.0071	0.0029
V14010	-2.026	1.07
Costante	-5.919	3.36

Si osserva come fra i due modelli non ci sia stata coincidenza nella selezione delle variabili, anche se la tipologia di quelle scelte rimane simile, presentando entrambi i modelli una variabile legata al fenomeno di inversione termica, una al vento ed un'altra al traffico veicolare.

Nella procedura di identificazione dei modelli viene segnalata la presenza di alcuni eventi con scarti (residui) molto elevati; nel caso del modello UP sono presenti quattro eventi di questo tipo corrispondenti a tre falsi allarmi (comprensibili alla luce di quanto detto anche nel paragrafo precedente) e ad un mancato allarme; nel modello ATT si contano invece tre eventi con scarti elevati, un falso allarme e due allarmi mancati. Questi eventi sono indicati da frecce nelle Figure 4.3.10 e 4.3.12 che mostrano la

relazione fra i valori di probabilità previsti dai modelli ed i valori NO2AB della serie di identificazione (1993-95).

Per il modello UP nella Tabella 4.3.XIII viene riportata la corrispondenza fra eventi UP predetti e realmente verificatisi nella serie di identificazione, considerando una soglia di probabilità del 50%, (cioè vengono considerati eventi UP previsti quelli nei quali il modello di regressione stima una probabilità superiore al 50%), mentre nella Tabella 4.3.XIV viene introdotta una fascia di incertezza per valori di probabilità compresi tra il 30 ed il 70%.

Tabella 4.3.XIII: prestazioni del modello UP (soglia probabilità 50%).

	NO2AB previsto		
NO2AB	DOWN	UP	totale
DOWN	115 (93%)	9 (7%)	124
UP	5 (19%)	22 (81%)	27
totale	120	31	151

Tabella 4.3.XIV: prestazioni del modello UP (con zona di incertezza 30 ÷ 70%).

	NO2AB previsto			
NO2AB	DOWN	incerto	UP	totale
DOWN	108	10	6	124
UP	2	8	17	27
totale	110	18	23	151

Si osserva complessivamente una percentuale di eventi correttamente previsti del 91%, corrispondenti a 137 casi su 151; di questi 22 sono relativi agli eventi UP e corrispondono all'81% di quelli presenti nel campione. Gli errori del modello si suddividono in cinque mancati allarmi e nove falsi allarmi, dei quali sei eventi corrispondono a concentrazioni superiori ai $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, quindi piuttosto elevate e vicine alla soglia degli eventi UP.

Questi risultati sono evidenziati in Figura 4.3.10. Si può osservare che dei 16 eventi corrispondenti in effetti al raggiungimento dello stato di attenzione, il modello ne assegna correttamente 13 alla classe UP, pari ancora ad una percentuale dell'81%.

L'introduzione della zona di incertezza non permette un raffronto automatico vero-previsto ma corrisponde maggiormente alle informazioni ri-

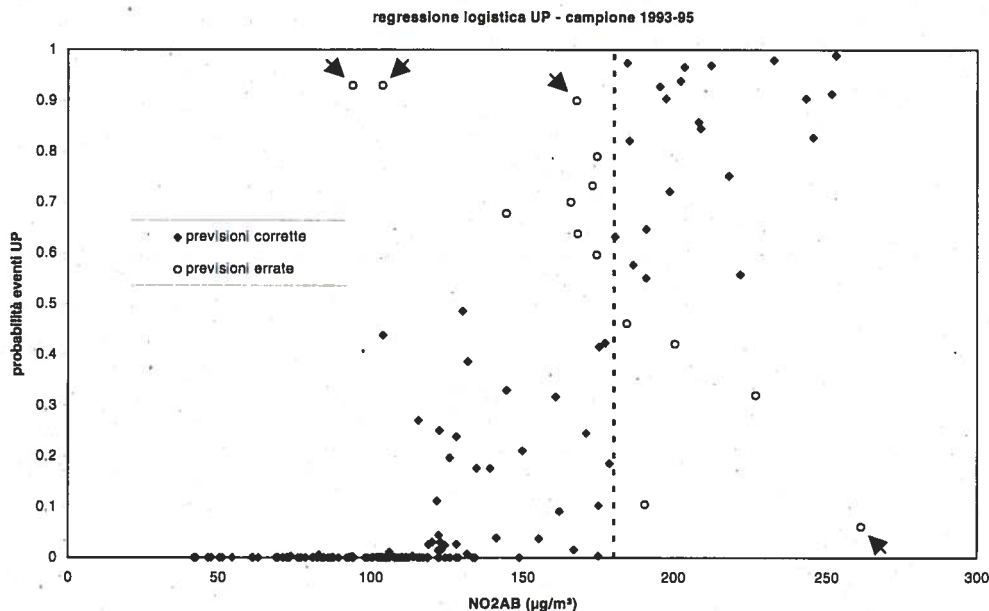


Figura 4.3.10: risultati ottenuti con il modello a regressione logistica UP sulla serie di identificazione. Vengono considerate previsioni corrette i punti del grafico corrispondenti a valori $\text{NO2AB} \leq 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con probabilità stimata dal modello inferiore al 50%, ed i punti con $\text{NO2AB} > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con probabilità stimata dal modello superiore al 50%. I giorni che il modello stimava caratterizzati da elevata probabilità ($>90\%$) che si verificasse una delle due possibili situazioni, mentre invece si è verificata la situazione opposta, sono indicati con delle frecce.

chieste nella dimensione operativa della previsione e permette un confronto dei risultati con le tecniche precedentemente descritte.

In Figura 4.3.11 è invece mostrata la corrispondenza fra la probabilità stimata dal modello UP e i valori NO2AB sulla serie di validazione (1995-96).

I risultati sono riportati nelle successive Tabelle 4.3.XV e 4.3.XVI.

La percentuale degli eventi correttamente individuati è pari all'89% (73 su 82), mentre quella relativa agli eventi UP è del 69% (9 su 13). Sono presenti quattro allarmi mancati e cinque falsi allarmi.

Il modello assegna comunque alla classe UP tutti i casi di eventi corrispon-

denti allo stato di attenzione (7), dei quali 5 ottengono probabilità superiori al 70%, mentre i rimanenti 2 hanno probabilità comprese fra il 50 ed il 70%.

Tabella 4.3.XV: prestazioni del modello UP (soglia probabilità 50%) relative alla serie di validazione (1995-96).

	NO2AB previsto		
NO2AB	DOWN	UP	totale
DOWN	64 (93%)	5 (7%)	69
UP	4 (31%)	9 (69%)	13
totale	68	14	82

Tabella 4.3.XVI: prestazioni del modello UP (con zona di incertezza 30÷70%) relative alla serie di validazione (1995-96).

	NO2AB previsto			
NO2AB	DOWN	incerto	UP	totale
DOWN	63	3	3	69
UP	2	3	7	13
totale	65	6	10	82

Nelle Tabelle 4.3.XVII e 4.3.XVIII sono riportati i risultati del modello ATT sulla serie di identificazione.

Tabella 4.3.XVII: prestazioni del modello ATT (soglia probabilità 50%).

	NO2AB previsto		
NO2AB	NON ATTENZIONE	ATTENZIONE	totale
NON ATTENZIONE	130 (94%)	8 (6%)	138
ATTENZIONE	5 (31%)	11 (69%)	16
totale	135	19	154

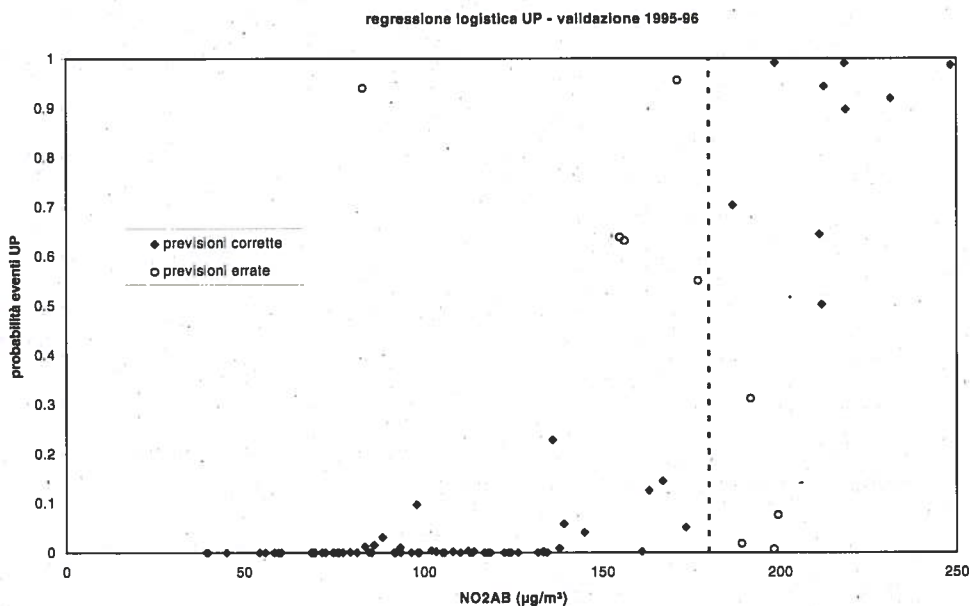


Figura 4.3.11: risultati del modello a regressione logistica UP sulla serie di validazione (1995-96).

Tabella 4.3.XVIII: prestazioni del modello ATT (con zona di incertezza 30÷70%).

NO2AB	NO2AB previsto			totale
	NON ATTENZIONE	incerto	ATTENZIONE	
NON ATTENZIONE	126	7	5	138
ATTENZIONE	3	5	8	16
totale	129	12	13	154

La percentuale dei successi raggiunge circa il 92%, con un parziale del 69% sugli eventi acuti. Si registrano 5 mancati allarmi e 8 falsi allarmi.

Nelle Tabelle 4.3.XIX e 4.3.XX sono riportati i risultati del modello ATT sulla serie di validazione.

La percentuale degli eventi correttamente assegnati raggiunge il 90% (75 su 83) e quella relativa agli stati di attenzione è pari al 71% corrispondendo a 5 eventi acuti correttamente individuati sui 7 presenti nel campione, quindi in linea o addirittura migliore di quanto ottenuto sulla serie di

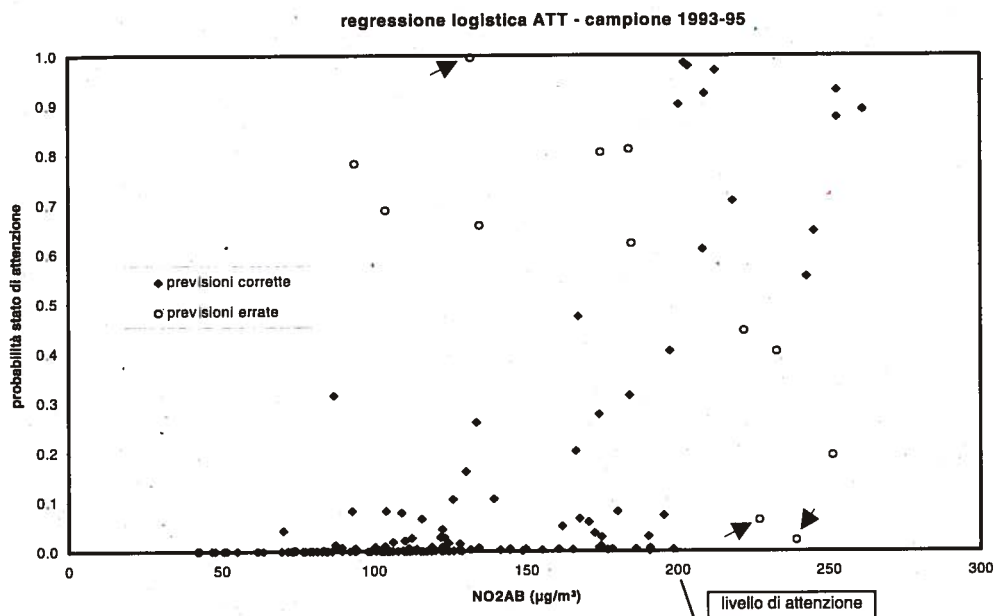


Figura 4.3.12: risultati ottenuti con il modello a regressione logistica ATT sulla serie di identificazioni. Vengono considerate previsioni corrette i punti del grafico corrispondenti a valori $\text{NO}_2\text{AB} \leq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con probabilità stimata dal modello inferiore al 50%, ed i punti con $\text{NO}_2\text{AB} > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con probabilità stimata dal modello superiore al 50%. I giorni che il modello stimava caratterizzati da elevata probabilità ($>90\%$) che si verificasse una delle due possibili situazioni, mentre invece si è verificata la situazione opposta, sono indicati con delle frecce.

identificazione. Occorre però tenere in considerazione la ridotta presenza di eventi acuti all'interno del campione. Si osservano anche 2 allarmi mancati e ben 6 falsi allarmi.

Tabella 4.3.XIX: prestazioni del modello ATT (soglia probabilità 50%) sul campione di validazione (1995-96).

NO2AB	NO2AB previsto		totale
	NON ATTENZIONE	ATTENZIONE	
NON ATTENZIONE	70 (92%)	6 (8%)	76
ATTENZIONE	2 (29%)	5 (71%)	7
totale	72	11	83

Tabella 4.3.XX: prestazioni del modello ATT (con zona di incertezza 30÷70%) sul campione di validazione (1995-96).

	NO2AB previsto			
NO2AB	NON ATTENZIONE	incerto	ATTENZIONE	totale
NON ATTENZIONE	68	3	5	76
ATTENZIONE	2	3	2	7
totale	70	6	7	83

Meno soddisfacenti, anche perché piuttosto inferiori rispetto a quelle sul campione di identificazione, appaiono le prestazioni del modello considerando la consueta fascia di incertezza sulla probabilità.

Nella Figura 4.3.13 è mostrata la corrispondenza fra la probabilità stimata dal modello ATT e i valori NO2AB sulla serie di validazione.

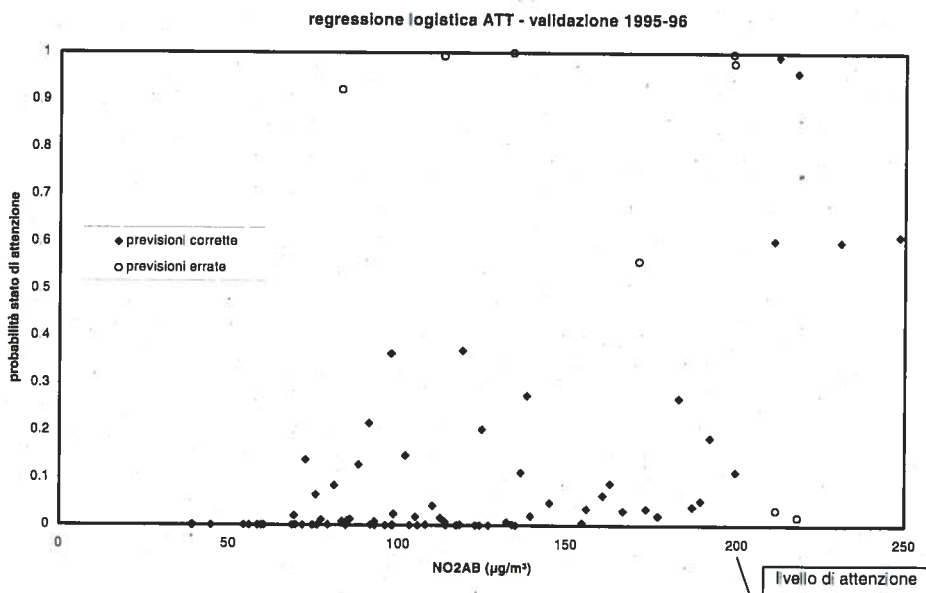


Figura 4.3.13: risultati del modello a regressione logistica ATT sulla serie di validazione (1995-96).

4.4 Confronto dei risultati e conclusioni

Nei precedenti paragrafi di questo capitolo sono stati presentati alcuni modelli di previsione degli eventi acuti d'inquinamento atmosferico fondati su tecniche statistiche. I risultati ottenuti indicano che questi modelli possono costituire dei validi strumenti di supporto per la previsione "short-term", ovvero per individuare nella mattina con elevata attendibilità la possibilità che nel giorno in corso si verifichi il superamento dei limiti di legge. Tutti i modelli presentati impiegano come predittori solo parametri in genere disponibili entro le ore 10 del mattino.

Il problema della previsione degli eventi acuti non si esaurisce tuttavia nella previsione "short-term" ma, è bene ricordarlo, richiede sistemi di previsione su tempi più lunghi. Tutte le tecniche statistiche qui presentate si prestano in teoria ad essere impiegate anche per previsioni su più giorni. Il problema in questo caso è costituito dalla possibilità di avere a disposizione previsioni (numeriche) affidabili dei parametri inseriti nei modelli. In alternativa possono essere determinati con le stesse tecniche dei modelli di previsione sulla base delle variabili per le quali sono disponibili dati numerici previsti per i giorni successivi.

In questo studio non sono stati presentati modelli prodotti con metodi autoregressivi, una delle tecniche classiche di previsione spesso impiegate anche in passato proprio sullo stesso problema^N. L'analisi delle funzioni di autocorrelazione svolta nel paragrafo 3.2.3 ha indicato come piuttosto limitata la componente autoregressiva contenuta nella serie temporale NO₂AB, ed inoltre lo sviluppo di modelli autoregressivi efficienti avrebbe richiesto l'impiego di serie di dati orari^O. In letteratura sono presenti molti esempi di applicazione di queste tecniche con risultati difformi^{P,Q}. Si ritiene che nel presente caso modelli autoregressivi con variabili esterne possano produrre predizioni "short-term" con risultati al più comparabili a quelli dei modelli qui presentati, mentre per previsioni su tempi più lunghi continua a valere quanto ricordato precedentemente.

Per valutare i risultati ottenuti da questi modelli rispetto ad altri sistemi di previsione è importante sottolineare che le difficoltà della previsione statistica crescono con la rarità degli eventi da prevedere: ottenere una percentuale di successi dell'80% per eventi che si verificano con una frequenza elevata ad esempio del 50%, è più semplice che nel caso in cui questi si verificano con una frequenza del 10%.

Una prima valutazione delle prestazioni dei modelli di previsione qui presentati può essere eseguita sulla base delle capacità dei modelli di individuare gli episodi acuti quindi in particolare gli eventi UP.

In termini di numero di eventi UP correttamente individuati sul campione di validazione, non vi è dubbio che i modelli ottenuti con le tecniche K-nn e CHAID (con le prestazioni migliori, cioè M1, M3 e M9 fra i K-nn, A1 e B1 fra i CHAID), si siano rivelati superiori rispetto ai modelli a regressione (multilineare o logistica). Infatti i primi hanno individuato un numero di eventi UP oscillante fra i 10 ed i 13 (su 13 presenti nel campione), mentre i secondi ne hanno individuati fra i 6 e gli 8.

In termini complessivi di prestazioni previsionali, considerando quindi anche gli allarmi mancati ed i falsi allarmi, un confronto può essere effettuato adattando a tutti i modelli l'indice di prestazione I_p formulato per quelli K-nn nel paragrafo 4.2. Si osserva in tal caso che i risultati migliori sono ottenuti proprio dai modelli K-nn, mentre i CHAID e quelli a regressione sostanzialmente si equivalgono.

Ad esempio il modello B a regressione multilineare produce un valore dell'indice I_p pari a 17 (o a 19 se si inserisce la classe di incertezza); il modello a regressione logistica UP ottiene un indice I_p pari a 22 (oppure pari a 18 se si utilizza la classe di incertezza); il modello A1 ottenuto con la tecnica CHAID ottiene un indice I_p di 15 (oppure pari a 18 inserendo gli eventi della classe "nd"), mentre i migliori modelli K-nn hanno fornito valori I_p pari a 10. Pur se il campione di validazione di tutti i modelli è lo stesso, a causa della diversità delle variabili impiegate e delle diverse modalità di gestione dei dati assenti, i campioni effettivi di giorni sui quali sono valutate le prestazioni differiscono da modello a modello (anche se per tutti il numero di eventi UP rimane inalterato). L'impiego dell'indice I_p può risentire di questo problema, che può essere invece superato se si considera un indice $I_{p_{N_{max}}}$ normalizzato rispetto al valore massimo che l'indice I_p può assumere con il campione di dati effettivo di ogni modello. In questo modo gli $I_{p_{N_{max}}}$ sono sicuramente confrontabili (variando fra 0 e 1) e si osserva che producono valori comunque concordi con quelli I_p sopra riportati. In particolare per il modello a regressione logistica con I_p pari a 18 si ottiene $I_{p_{N_{max}}}=0.102$, per il modello B a regressione multilineare con I_p pari a 17 si ha $I_{p_{N_{max}}}=0.102$, per il modello CHAID con $I_p=15$ si ha $I_{p_{N_{max}}}=0.079$ ed infine per i modelli K-nn con $I_p=10$ si ha $I_{p_{N_{max}}}=0.064$.

Occorre ricordare che i modelli creati con la tecnica CHAID prevedono automaticamente nella loro struttura la presenza di situazioni caratterizzate da incertezza. Queste sono invece state introdotte in modo empirico in tutti gli altri modelli.

Tutti i modelli presentati sono stati costruiti impiegando la stessa serie di dati di identificazione relativa ai periodi invernali 1993-94 e 1994-95, e sono fondati sull'assunzione che le condizioni peculiari che portano al verificarsi degli episodi acuti rimangano invariate. Di conseguenza l'individuazione delle relazioni (spesso empiriche) che legano i predittori alle concentrazioni misurate si traduce in modo quasi automatico in un'informazione utilizzabile per la previsione degli eventi futuri. L'assunzione di stazionarietà delle condizioni se continua ovviamente a mantenersi valida per quanto riguarda gli aspetti meteorologici del problema risulta invece accettabile solo in prima approssimazione per quanto riguarda il quadro emissivo. Se ancora nell'inverno 1995-96 l'effetto sulle concentrazioni della riduzione delle emissioni di ossidi di azoto legata al ricambio del parco circolante (con l'obbligatorietà dei dispositivi di abbattimento delle emissioni dei veicoli di nuova fabbricazione) può essere non pienamente rilevabile¹⁵, già durante l'inverno 1996-97 alcuni indizi fanno ritenere tale variazione del quadro emissivo maggiormente rilevante. Poiché nessuno dei modelli qui presentati si fonda su una diretta stima delle emissioni, per il futuro appare necessario provvedere a ricostruire questi modelli utilizzando soltanto i dati degli ultimi due periodi invernali.

15. Si veda quanto già discusso nel paragrafo 3.1.2.

Riferimenti bibliografici

- A Fabbris L., *Analisi esplorativa di dati multidimensionali*, CLEUP, Padova, 1994, 239-275.
- B Magidson J., *SPSS for Windows - CHAID release 6.0*, SPSS Inc., Chicago, 1993.
- C Bolognesi R., Buser O. e Good W., "La previsione locale delle valanghe in Svizzera: strategia e strumenti", *Neve e Valanghe*, 1995, 24, 18-21.
- D Tirabassi T. e Ferrari C., "Concentrazioni degli inquinanti: il giorno rappresentativo", *AER*, 3, 1995, 14-16.
- E Fabbris L., *Analisi esplorativa di dati multidimensionali*, CLEUP, Padova, 1994, 52-80.
- F Bolognesi R. e Buser O., "Merging data analysis and symbolic calculation into a diagnostic system for natural hazards", comunicazione presentata all'*International Emergency Management and Engineering Conference*, Nizza, 1995.
- G Cochran W.G., *Sampling Techniques*, John Wiley & Sons, Singapore, 1977, Capitoli 2 e 3.
- H Giovannini F., *Aggiornamento dei risultati della campagna di controllo delle emissioni dei veicoli 1995*, comunicazione ARPAT-Fisica Ambientale al Comune di Firenze, 13/1/97.
- I Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale, "Parere della CCTN riguardante la stima del rischio di tumore polmonare da idrocarburi policiclici aromatici da emissioni autoveicolari (1° dicembre 1995)", in *Raccolta dei pareri espressi dalla CCTN nel 1995*, Serie Relazioni, Istituto Superiore di Sanità, 96/3, Roma 1996, 54.
- J Autori Vari, *Sperimentazione di modelli numerici per la previsione delle valanghe in Provincia di Trento*, Rapporto della Provincia Autonoma di Trento - Dipartimento per la Protezione Civile e dell'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe, Trento 22 luglio 1994.
- K Autori Vari, *Modelli di previsione delle valanghe NXD e NXLOG*, Raccolta di articoli, Provincia Autonoma Trento, Trento 11 ottobre 1995.
- L Zar J.H., *Biostatistical Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (USA), 1984, Capitolo 20.
- M Fabbris L., *Analisi esplorativa di dati multidimensionali*, CLEUP, Padova, 1994, Capitolo 3.
- N Finzi G. e Brusasca G., *La qualità dell'aria: modelli previsionali e gestionali*, Masson Editore, Milano, 1994 Capitoli 6, 7, 9.
- O Sanchez Gomez M.L., Caballero Sahelices C. e Lucio Garcia J.H., "ARIMA Modelling of NO, NO₂ and O₃ Time Series", in *Proceedings of MMEP 97 (First International Conference on Measurement and Modelling in Environmental Pollution)*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), 1997, 251-260.
- P Finzi G., Giovannini I., Mazzetti D. e Santileni S., "Progetto AMES - Parte II: il modulo di previsione in tempo reale degli episodi critici di inquinamento da traffico", *Ingegneria Ambientale*, 1, 1994, 10-14.
- Q Raimondi F.M., Rando F., Vitale M.C. e Calcara A.M.V., "A short-term Air Pollution Predictor for Urban Areas with Complex Orography. Application to the town of Palermo", in *Proceedings of MMEP 97 (First International Conference on Measurement and Modelling in Environmental Pollution)*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), 1997, 261-272.

5 L'attività operativa di previsione

L'analisi dei dati rilevati effettuata nel capitolo 3 ed i modelli predittivi illustrati nel capitolo 4 hanno consentito di definire una procedura previsionale degli episodi di inquinamento acuto adatta a rispondere alle necessità operative imposte dalla normativa vigente.

Ogni mattina entro le ore 11 il Dipartimento ARPAT di Firenze emette un comunicato di previsione (allegato ai dati di qualità dell'aria) nel quale vengono descritte le condizioni meteorologiche su scala sinottica e su scala locale, previste nel giorno in corso e nei successivi, e viene di conseguenza valutata la loro influenza sulle concentrazioni degli inquinanti (in particolare NO_2 d'inverno ed O_3 nel periodo estivo). Il comunicato contiene l'indicazione della probabilità di raggiungere o superare i livelli di legge nel giorno in corso (previsione 0÷24 ore) e l'indicazione qualitativa del trend delle concentrazioni nei giorni successivi. Vengono quindi suggeriti i provvedimenti da adottare facendo riferimento a quanto contenuto nelle Ordinanze del Sindaco di Firenze.

5.1 Obiettivi della previsione

L'attività di previsione si pone quotidianamente due obiettivi complementari:

1. la determinazione della probabilità di raggiungere o superare i livelli di legge nel giorno in corso (previsione a 0÷24 ore);
2. la valutazione del trend delle concentrazioni nei giorni successivi (previsioni a 24÷48 ore, 48÷72 ore).

Per la previsione "short-term", cioè relativa al giorno in corso, vengono impiegati i modelli statistici CHAID e K-nn. Come detto precedentemente questi utilizzano i dati registrati entro le ore 10 della mattina e

non contengono quindi informazioni sulle condizioni meteorologiche oltre tale ora. Di conseguenza risulta necessario confermare o meno i risultati ottenuti dai modelli statistici sulla base delle condizioni meteo previste nelle ore successive. Questo viene fatto impiegando a) le previsioni numeriche dei parametri meteo sulla città, prodotte dai modelli meteorologici ad area limitata, b) le immagini Meteosat (aggiornate ogni ora) e le previsioni a breve termine del campo barico a mesoscala (in genere ottenibili nella mattina ma che si riferiscono ad elaborazioni del giorno precedente).

Attualmente l'ARPAT ottiene direttamente attraverso CINECA (Centro di Calcolo Interuniversitario dell'Italia Nord-Orientale) i risultati prodotti dal modello ad area limitata LAMBO^{A,B,C} del Servizio Meteorologico Regionale dell'Emilia Romagna (SMR-ER) e quelli del modello DALAM dell'UCEA, dopo post-elaborazioni del Servizio Agrometeorologico dell'Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel settore Agricolo-forestale (ARSIA). Questi dati sono in genere disponibili entro le ore 11 della mattina e coprono un intervallo temporale di previsione di 72 ore (quindi tre giorni, quello in corso e i due successivi).

Per quanto riguarda la previsione qualitativa sui giorni successivi essa viene effettuata impiegando a) i risultati numerici dei modelli meteorologici ad area limitata, b) valutando le previsioni meteorologiche su scala sinottica. Quest'ultima operazione prevede l'acquisizione di numerose informazioni presenti sulla rete Internet. In particolare per la loro affidabilità e regolarità di aggiornamento vengono impiegate le carte bariche prodotte dell'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, previsione del campo di pressione al suolo ed in quota da 1 a 6 giorni), la previsione del campo barico e delle precipitazioni prodotta dal modello MRF (Purdue University, U.S.A., da 1 a 3 giorni e da 2 a 10 giorni), le carte sinottiche MeteoFax della situazione barica e dei fronti di instabilità per il periodo da 0 a 5 giorni (ottenibili presso il sito Internet dell'Università di Karlsruhe).

Poiché gli eventi acuti d'inquinamento sono in genere associati a particolari quanto identificabili condizioni meteorologiche, caratterizzate da fenomeni locali di elevata e persistente stabilità atmosferica, ma derivanti dal campo termico e di pressione su scala sinottica, è necessario valutare le condizioni sinottiche previste a 48÷72 ore per individuare con necessario anticipo le situazioni che possano poi svilupparsi a livello locale in condizioni favorevoli al verificarsi del superamento dei limiti di legge.

Uno schema riassuntivo della procedura di previsione è riportato nella Figura 5.1.1.

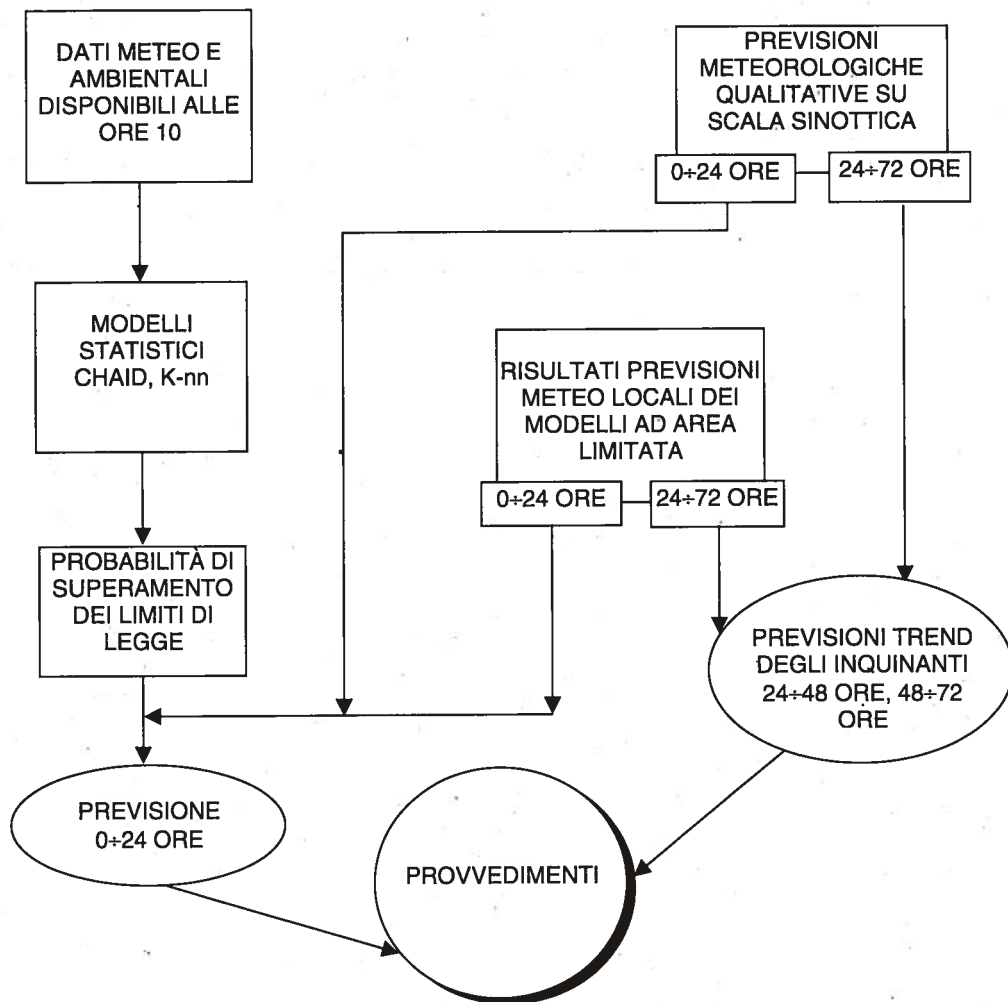


Figura 5.1.1: rappresentazione schematica della procedura di previsione degli eventi acuti d'inquinamento atmosferico.

5.2 Risultati ottenuti dalla previsione e confronto fra le diverse procedure d'intervento adottate dal Comune di Firenze nel corso degli anni

Considerando le incertezze ineliminabili di ogni procedura previsionale, ed il fatto che la previsione sui livelli d'inquinamento si basa in larga parte su dati a loro volta previsti, quindi caratterizzati di per sé da un certo grado di incertezza, i risultati ottenuti in fase di previsione sono da considerarsi molto buoni. A riprova di questo è sufficiente osservare i valori NO₂AB raggiunti nei giorni in cui in base alle previsioni effettuate sono stati adottati i provvedimenti di limitazione del traffico (gli ultimi 11 giorni riportati nella successiva Tabella 5.2.I). Fra questi soltanto uno (25/10/96) corrisponde ad un valore NO₂AB relativamente basso ($113 \mu\text{g}/\text{m}^3$)^{1,D}, mentre in sei di questi, nonostante il provvedimento in atto, è stata superata la soglia di attenzione (vedi oltre). Durante i periodi invernali 1995-96 e 1996-97 attraverso la procedura di previsione è stato quindi possibile intervenire direttamente con provvedimenti di limitazione delle emissioni nel momento in cui l'episodio acuto d'inquinamento si è verificato.

Nella Tabella 5.2.I sono elencati tutti i giorni nei quali sono state effettuate limitazioni alla circolazione veicolare legate in qualche modo agli eventi acuti di inquinamento atmosferico. L'esame dei dati riportati permette di seguire l'evoluzione dei provvedimenti e dei tentativi intrapresi dall'Amministrazione della città per far fronte al fenomeno.

Si distingue un primo periodo² dal febbraio 1992 a tutto dicembre 1993 nel quale i provvedimenti venivano decisi secondo quanto disposto inizialmente dalle Ordinanze del Ministro per l'Ambiente e da quello per le Aree Urbane, e successivamente dal D.M. 12/11/92 (vedi paragrafo 1.1): secondo tali norme le misure restrittive di fatto entravano in vigore circa due giorni dopo l'avvenuto superamento delle soglie di legge (Ordinanze del Sindaco nn° 392/92 e 4681/92). In effetti, come si può osservare dalla Ta-

1. Questo evento risulta particolare essendo al di fuori del periodo omogeneo (in termini di emissioni) novembre-marzo preso in considerazione nel presente studio. Infatti a Firenze il periodo di accensione a pieno a regime (12 ore) degli impianti di riscaldamento va dal 1° novembre al 15 aprile (riferimento bibliografico D).

2. Fino a marzo del 1993 era attiva la precedente rete provvisoria, sostituita nel giugno dello stesso anno dall'attuale rete provinciale nella quale è cambiata la maggior parte dei siti delle stazioni di monitoraggio.

bella 5.2.I, soltanto nel primo caso (10/1/93) a seguito di quattro giorni di superamento dei limiti di legge (fra i quali l'unico caso di allarme per l' NO_2 registrato a Firenze) il provvedimento di blocco parziale del traffico è risultato coincidente con un giorno particolarmente critico per la qualità dell'aria, cioè corrispondente al raggiungimento dello stato di attenzione. Questo caso indicò anche subito come i provvedimenti adottati per la limitazione delle emissioni non risultassero sufficienti a mantenere le concentrazioni al di sotto dei limiti di legge. In tutti i rimanenti tredici casi (più i successivi due del 12 e 14 marzo 1994) le concentrazioni misurate sono risultate decisamente inferiori ai limiti, e questo ovviamente non in virtù dei provvedimenti stessi.

Nel gennaio÷marzo 1994 sono stati adottati i cosiddetti "blocchi programmati", ovvero la limitazione alla circolazione dei veicoli non catalizzati ogni lunedì e giovedì di questo periodo, indipendentemente dai valori delle concentrazioni misurati e dalle condizioni meteorologiche (Ordinanze del Sindaco nn° 104/94 e 1024/94). Questa modalità di intervento offriva senz'altro dei vantaggi organizzativi (essendo fissata con largo anticipo) ma era scollegata completamente dalle condizioni di qualità dell'aria nella città, trascurando gli eventi acuti che si verificavano in giorni diversi da quelli fissati. L'adozione di questa strategia d'intervento era motivata anche da fini educativi, nella speranza (rivelatasi errata) che la rinuncia all'uso dei veicoli privati si estendesse anche a giorni diversi da quelli di divieto.

Inoltre, data la ripetitività del provvedimento ed il suo impatto socio-economico, l'Amministrazione comunale aveva dovuto bilanciarne la frequenza con numerose deroghe (oltre che per gli autoveicoli previsti dalla normativa: a trazione elettrica, con catalizzatore, alimentati a metano o gpl) a favore di diverse categorie di soggetti economici e sociali, pur non dotati di veicoli catalizzati. Ciò, insieme al fatto che l'area in cui era vietata la circolazione era costituita dal centro storico fino alla fascia di espansione ottocentesca limitrofa, e che gli orari di divieto consentivano l'ingresso in città fino alle ore 8:30 e l'uscita dalle 12:30 alle 14:30, rendeva il provvedimento anche poco efficace negli stessi giorni di vigenza, tant'è vero che durante uno dei giorni di blocco si è comunque verificato lo "stato di attenzione" (24/1/94).

Alla luce di questi risultati nel novembre 1994 è stata adottata una procedura d'intervento che includeva per la prima volta la presenza della

“previsione” nella fase decisionale di attuazione dei provvedimenti di limitazione delle emissioni (Ordinanza del Sindaco n° 6679/94). Veniva definito un algoritmo (e quindi un sistema automatico) che basandosi sulla combinazione dei tre aspetti significativi: concentrazioni misurate il giorno precedente, previsione per il giorno in corso e caratteristiche emissive del giorno successivo (in pratica se questo era feriale o festivo), opportunamente codificati con coefficienti numerici, portava meccanicamente alla definizione dei provvedimenti da attuare nel giorno successivo. Questo sistema (indicato in Tabella 5.2.I con “punteggio”) permetteva in teoria di adottare provvedimenti anche in base alla sola previsione ed in questo senso deve essere considerato l’esperienza pilota che ha portato all’attuale procedura d’intervento. Concettualmente il sistema era pensato ed efficiente nel caso di episodi perduranti diversi giorni, in quanto inglobava informazioni relative a tre giorni, uno dei quali appartenente al passato. Il breve periodo di applicazione (soltanto 31 giorni, fino all’1/12/94) non permette di valutare pienamente i limiti ed i vantaggi di questa procedura; di fatto nel mese di applicazione (risultato particolarmente denso di episodi critici per la qualità dell’aria con il raggiungimento dello stato di attenzione ben 4 volte: il 16, 21, 29 ed il 30 novembre, ed un ulteriore evento UP il 14 novembre con $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i provvedimenti di limitazione del traffico sono stati attuati sempre in ritardo rispetto agli eventi acuti (i giorni 18, 22, 23 e 1 dicembre). Tale ritardo è imputabile sia alle più limitate capacità di previsione e di strumenti allora disponibili, in particolare per le previsioni per i giorni successivi, sia al peso pregiudiziale assegnato dal coefficiente legato alle concentrazioni del giorno precedente. Le condizioni meteorologiche registrate in quei giorni indicano che i provvedimenti del 18 e del 23 novembre sono intervenuti in situazioni potenzialmente critiche, mentre nei giorni 22/11 e 1/12 la situazione non è risultata affatto favorevole all’accumulo delle sostanze inquinanti. I valori NO_2AB misurati in quei giorni risultano comunque tutti relativamente bassi (nessun caso UP).

Nel periodo dicembre 1994÷febbraio 1995 questa procedura d’intervento è stata temporaneamente sostituita con una nuova serie di blocchi programmati, ed ha successivamente ripreso e mantenuto validità fino all’ottobre del 1995, quindi in un periodo in cui generalmente non si presentano episodi acuti dovuti all’ NO_2 (Ordinanza del Sindaco n° 7548/94). In tale arco di tempo sono stati comunque attuati ancora due provvedimenti

di blocco del traffico (17 e 19 ottobre 1995) ai quali hanno corrisposto valori di NO₂AB piuttosto elevati ma non in classe UP; in questi due episodi l'orario di limitazione della circolazione era stato tuttavia esteso eliminando la "finestra" intermedia di libera circolazione.

Rispetto alla precedente attuazione la seconda serie di blocchi programmati presentava la variante costituita dalla possibile revoca nel caso che la previsione indicasse per il giorno prefissato la presenza di condizioni meteo particolarmente favorevoli alla dispersione degli inquinanti, cioè nel caso che con preavviso di 48 ore fosse "assicurato" dalle previsioni l'impossibilità di incorrere in un episodio acuto. Di conseguenza dei 25 interventi programmati ne sono stati effettuati 20: 4 sono stati revocati su previsione ed uno perché coincidente con un giorno festivo (26/12/94).

Per quanto riguarda i provvedimenti revocati occorre segnalare la correttezza delle previsioni a 48 ore che hanno portato alla loro revoca; in particolare il caso dei giorni 10, 11 e 12 gennaio 1995 nei quali a fronte del raggiungimento dello stato di attenzione il 10 (NO₂AB pari a 227 µg/m³) e l'11 (NO₂AB pari a 261 µg/m³) la previsione del giorno 10 per il giorno 12 indicava la presenza di condizioni favorevoli alla dispersione e quindi proponeva la revoca del provvedimento di limitazione delle emissioni: in effetti le condizioni meteorologiche nel giorno 12 risultarono sostanzialmente modificate come era stato previsto (NO₂AB pari a 110 µg/m³).

Durante la seconda serie di blocchi programmati in coincidenza con i provvedimenti si sono verificati due eventi di raggiungimento dello stato di attenzione (12/12/94 e 2/2/95) e due altri eventi UP (6/2 e 20/2/95), mentre si è raggiunto lo stato di attenzione in altri quattro giorni (17/12/94, 10/1, 11/1 e 17/2/95) e si sono verificati cinque eventi UP (18/12/94, 18/1, 10/2, 21/2 e 1/3/95) in giorni non coperti dal provvedimento.

Quindi come misura di intervento di emergenza la procedura dei blocchi programmati ha manifestato gli stessi limiti precedentemente discussi, anche se la possibilità di revoca su previsione (adottata in un numero molto limitato di casi poiché fondata su una previsione a 48 ore) ha perlomeno impedito che si attuasce il provvedimento in situazioni nelle quali si sarebbe rivelato palesemente inutile. Anche l'analisi delle concentrazioni medie rilevate nei giorni di blocco programmato rispetto a quelli di libera circo-

lazione ha evidenziato la scarsa efficacia del provvedimento: effetti significativi si sono riscontrati solo per il CO nelle stazioni immediatamente a ridosso degli assi stradali (tipo C)^E.

Dal novembre 1995 ad oggi l'Amministrazione comunale ha invece optato per una procedura di intervento limitata ai casi in cui si prospetti (in base alla previsione) il superamento dei livelli di legge ed il suo perdurare per più di un giorno (Ordinanze del Sindaco nn° 7644/95 e 53/97). Elemento importante ma non obbligatorio (anche se finora è sempre stato prodotto) è il preavviso di 48 ore prima dell'attuazione del blocco. Quando, attraverso la metodologia precedentemente descritta, viene individuata a $48 \div 72$ ore una situazione sinottica che può portare a condizioni di elevata e perdurante stabilità atmosferica viene emesso un preavviso di intervento con la necessaria conferma o revoca nel giorno successivo. In questo modo attraverso i diversi canali d'informazione la cittadinanza viene avvisata in tempo della possibile emergenza in atto e si crea la necessaria attenzione personale e dei mezzi di comunicazione riguardo alla previsione del giorno successivo. Secondo la propria Ordinanza l'Amministrazione comunale adotta i provvedimenti richiesti dalla gravità della situazione e suggeriti in sede di bollettino previsionale. Nel primo periodo di applicazione (1995-96) si sono verificati sette eventi con il raggiungimento dello stato di attenzione per l'NO₂ e sette ulteriori eventi UP. Soltanto il 18 ed il 19 gennaio 1996 si è avuto il superamento consecutivo dei limiti di legge, ed in questi giorni era stato attuato il blocco parziale della circolazione in base alle previsioni; tutti gli altri giorni di attenzione sono stati relativi a episodi singoli che pur essendo stati individuati in sede di previsione (il giorno stesso o i precedenti) non hanno dato luogo a provvedimenti in quanto era stata valutata e ben stimata l'episodicità dell'evento. Più incerto appare l'episodio del $22 \div 23/11/95$ nel quale è stato attuato un provvedimento per il giorno 22 (NO₂AB pari a $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e si è raggiunto lo stato di attenzione il giorno successivo. In questo caso già da alcuni giorni era senz'altro stata ben individuata la presenza di una situazione critica per la qualità dell'aria, ma rimane in dubbio se l'intervento abbia prodotto il non verificarsi di un evento acuto oppure se l'intervento sia risultato anticipato rispetto alla situazione realmente verificatasi.

In questo stesso periodo si sono verificate due coppie di eventi UP consecutivi ($6 \div 7/11/95$ e $11 \div 12/1/96$) che in sede di previsione non sono

state valutate corrispondenti ad eventi particolarmente critici e quindi non hanno dato luogo ad interventi di limitazione delle emissioni. Si è quindi riusciti anche a valutare correttamente in sede di previsione l'entità delle situazioni potenzialmente critiche per la qualità dell'aria.

Nel novembre 1996 non si sono registrati superamenti dei limiti di legge per l'NO₂ (un solo evento UP il 27/11 in coincidenza con il raggiungimento dello stato di attenzione per il CO) e neppure interventi d'emergenza, mentre nel dicembre si è verificato uno degli episodi maggiormente critici per la qualità dell'aria degli ultimi anni, con il superamento continuato per cinque giorni del livello di attenzione per l'NO₂. I provvedimenti di emergenza sono stati attuati in base alla previsione per quattro giorni consecutivi ed hanno coinciso con quattro eventi acuti (l'intervento è cioè iniziato al secondo giorno di superamento dei limiti).

Fino al dicembre del 1996 le modalità di intervento (blocco del traffico) pur avendo evidentemente prodotto una diminuzione delle emissioni e quindi una presumibile riduzione delle concentrazioni, non avevano permesso di mantenere quest'ultime entro il livello di attenzione. Le nuove modalità d'intervento (Ordinanza del Sindaco n° 53/97), caratterizzate da una decisa riduzione delle esenzioni, dall'estensione del divieto ad altre categorie di veicoli (metano e/gpl) e in particolare dall'eliminazione della "finestra" di libera circolazione fra le ore 12:30 e le 14:30, sono state sperimentate in tre casi durante il periodo gennaio÷marzo 1997 ed hanno invece portato a livelli di concentrazioni di NO₂ al di sotto dei limiti di legge. Anche se non è per ora possibile definire con certezza quanto questa variazione delle modalità di attuazione del blocco del traffico abbia contribuito alla sostanziale riduzione delle concentrazioni registrata in quei giorni, occorre sottolineare il successo della strategia d'intervento ottenuto in questi tre ultimi casi³.

3. Alla luce dei risultati ottenuti in questi ultimi interventi possono assumere nuovo significato anche gli episodi dell'ottobre 1995 nei quali si è intervenuti in base all'Ordinanza n° 6679/94 e che in comune con questi avevano l'estensione del divieto di circolazione nel periodo continuativo 8÷18.

Tabella 5.2.I: provvedimenti di limitazione del traffico adottati a Firenze (1993÷1997).

data	tipo	n° Ordinanza	note	NO2AB	n° ore superamenti nelle stazioni B
10/01/93-dom	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	270	25
11/01/93-lun	post-sup, all	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	98	0
12/01/93-mar	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	126	0
13/01/93-mer	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	134	0
09/02/93-mar	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	72	0
21/02/93-dom	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	139	0
22/02/93-lun	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	106	0
01/04/93-gio	post-sup, att	4681/92	r.p., area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	119	0
24/09/93-ven*	post-sup, att	4681/92	area ristretta, 8.30-12.30, revocato p.m.	84	0
06/12/93-lun	post-sup, att	4681/92	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	88	0
16/12/93-gio	post-sup, att	4681/92	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	73	0
19/12/93-dom	post-sup, att	4681/92	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	86	0
23/12/93-gio	post-sup, att	4681/92	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	86	0
31/12/93-ven	post-sup, att	4681/92	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	167	0
17/01/94-lun	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	83	0
20/01/94-gio	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	69	0
24/01/94-lun	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	243	6
27/01/94-gio	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	ND	ND

data	tipo	n° Ordinanza	note	NO2AB	n° ore superamenti nelle stazioni B
31/01/94-lun	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	112	0
03/02/94-gio	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	104	0
07/02/94-lun	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	80	0
10/02/94-gio	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	110	0
14/02/94-lun	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	42	0
17/02/94-gio	programmato	104/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	116	0
21/02/94-lun	programmato	1024/94	8.30-12.30, area ristretta	123	0
24/02/94-gio	programmato	1024/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	92	0
28/02/94-lun	programmato	1024/94	8.30-12.30, area ristretta	122	0
03/03/94-gio	programmato	1024/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	122	0
12/03/94-sab	post-sup, att	1335/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	122	2
14/03/94-lun	post-sup, att	1335/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	111	0
18/11/94-ven	punteggio	6679/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	166	0
22/11/94-mar	punteggio	6679/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	126	0
23/11/94-mer	punteggio	6679/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	144	0
01/12/94-gio	punteggio	6679/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	104	0
05/12/94-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	167	1
08/12/94-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	110	0
12/12/94-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	233	5
15/12/94-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	73	0

data	tipo	n° Ordinanza	note	NO2AB	n° ore superamenti nelle stazioni B
19/12/94-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	141	0
22/12/94-gio*	programmato	7548/94	revocato su previsione	43	0
26/12/94-lun*	programmato	7548/94	revocato	94	0
29/12/94-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	200	2
02/01/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	124	0
05/01/95-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	62	0
09/01/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	106	0
12/01/95-gio*	programmato	7548/94	revocato su previsione	110	0
16/01/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	108	0
19/01/95-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	91	0
23/01/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	121	0
26/01/95-gio*	programmato	7548/94	revocato su previsione	91	0
30/01/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	107	0
02/02/95-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	251	8
06/02/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	190	1
09/02/95-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	103	0
13/02/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	134	0
16/02/95-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	113	0
20/02/95-lun	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	191	2
23/02/95-gio	programmato	7548/94	area ristretta, 8.30-12.30 e 14.30-18.30	106	0
27/02/95-lun*	programmato	7548/94	revocato su previsione	72	0

data	tipo	n° Ordinanza	note	NO2AB	n° ore superamenti nelle stazioni B
17/10/95-mar	punteggio	6679/94	area ristretta, 8-18	163	0
19/10/95-gio	punteggio	6679/94	area ristretta, 8-18	176	0
23/11/95-gio	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	171	0
18/01/96-gio	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	218	5
19/01/96-ven	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	218	6
25/10/96-ven	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	113	0
4/12/96-mer	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	223	8
5/12/96-gio	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	231	16
6/12/96-ven	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	232	8
7/12/96-sab	preventivo	7644/95	area vasta, 8-12.30 e 14.30-18.30	221	7
16/1/97-gio	preventivo	53/97	area vasta, 8-18	183	2
17/1/97-ven	preventivo	53/97	area vasta, 8-18	143	0
31/1/97-ven	preventivo	53/97	area vasta, 8-18	170	0
legenda: post-sup,att = blocco adottato 48 ore dopo il superamento del livello di attenzione post-sup,all = blocco adottato 48 ore dopo il superamento del livello di allarme programmato = blocco prefissato ogni lunedì e giovedì della settimana * = provvedimento revocato punteggio = provvedimenti adottati in base a punteggi relativi allo stato rilevato il giorno precedente e previsto nel giorno corrente e nel successivo preventivo = blocco adottato su previsione r.p. = rete di monitoraggio precedente (provvisoria)					

Di fatto l'esperienza fin qui maturata nell'applicazione della normativa sulla gestione degli episodi acuti di inquinamento atmosferico suggerisce che essendo possibile prevedere con elevato successo il verificarsi degli episodi acuti risulta possibile ed anzi preferibile adottare provvedimenti "preventivi", cioè mirati e proporzionati all'entità del fenomeno, anziché affrontare le situazioni di emergenza ambientale con strumenti di più facile predisposizione ma di evidente scarsa efficacia.

5.3 Prospettive di sviluppo e miglioramento degli strumenti di previsione

La procedura operativa precedentemente illustrata rappresenta un'ipotesi concreta di "sistema" previsionale mirato all'individuazione degli episodi acuti, così come elaborato in questi anni di esperienza nella gestione della rete di rilevamento della Provincia di Firenze.

La procedura proposta non intende essere risolutiva del "problema previsione", ma costituisce comunque un esempio avanzato e soprattutto già sperimentato. Certamente sono possibili altri approcci, la cui adozione dipende dai dati disponibili e dalle condizioni in cui concretamente si deve operare (estensione della rete di monitoraggio, disponibilità in tempo reale di dati e informazioni meteo, conoscenza quantitativa e qualitativa delle emissioni, organizzazione del personale e della manutenzione della rete, ecc.).

In ogni caso l'esperienza suggerisce una considerazione preliminare. La complessità dei fenomeni e dei sottosistemi osservati (emissioni e atmosfera) fa ritenere impossibile allo stato attuale un approccio esclusivamente "automatico". Infatti le incertezze in gioco (parte dovute al numero finito e comunque insufficiente di parametri misurati e di dati conosciuti, parte proprio alla complessità dei processi che si svolgono nell'area urbana) e le informazioni spesso qualitative di cui ancora si dispone, impongono che i risultati forniti da un set di modelli matematici (statistici e/o deterministici) e le previsioni meteorologiche disponibili per l'area in esame siano valutate e sintetizzate da un pool di esperti, che utilizzi le informazioni disponibili come supporto alle decisioni. Il gruppo di esperti deve possibilmente essere caratterizzato da pludisciplinarietà e da una sperimentata conoscenza della rete di monitoraggio in termini di collocazione delle stazioni, qualità e funzionalità dei monitor, ecc.

Con i limiti sopra esposti, è comunque possibile ipotizzare alcune linee di sviluppo ed ulteriore miglioramento dell'attuale procedura previsionale.

Per quanto riguarda i modelli statistici descritti nei capitoli precedenti, è chiara la necessità di superare in qualche modo uno dei loro limiti principali, ovvero l'ipotesi/condizione che il quadro delle emissioni in atmosfera rimanga invariato di anno in anno. Ciò appare ancor più stringente in presenza di interventi strutturali di sicuro beneficio per la qualità dell'aria urbana (progressivo cambiamento del parco circolante verso veicoli a minor

impatto, riformulazione dei carburanti, trasformazione progressiva al metano degli impianti di riscaldamento) che dalla fine degli anni '80 hanno caratterizzato la politica ambientale nazionale ed europea. Perciò appare necessario "ricalcolare" i modelli statistici sui dati più recenti, eventualmente eliminando quelli più vecchi dalla serie storica di calibrazione.

Inoltre l'insieme delle variabili ambientali utilizzate nei modelli non è chiaramente esaustivo. E' quindi auspicabile in futuro disporre di ulteriori parametri che migliorino la descrizione del sistema urbano, quali ad esempio l'andamento dei consumi di metano, la componente verticale del vento, il profilo verticale della temperatura, l'altezza dello strato rimescolato, ecc..

Occorre ancora notare che la procedura attuale risulta notevolmente soggettiva per quanto riguarda la previsione del trend degli inquinanti nei giorni successivi. Per fornire elementi di maggiore oggettività all'operatore potrebbero essere messi a punto modelli statistici fondati sugli stessi principi di quelli adottati nelle previsioni per il giorno corrente che impieghino i dati numerici previsti dai modelli meteorologici ad area limitata.

Per quanto riguarda i modelli statistici, ulteriori strumenti potrebbero essere implementati utilizzando tecniche più innovative, particolarmente adatte al tipo di problema affrontato, quali i cosiddetti "sistemi esperti", le reti neurali^F e la fuzzy logic^G.

Infine è senz'altro da valutare con attenzione la possibilità di affiancare ai modelli statistici anche dei modelli di tipo deterministico, in cui cioè le concentrazioni degli inquinanti sono stimate, a partire dai dati di emissione e da quelli meteo, per mezzo di relazioni matematiche che descrivono le proprietà diffusive dell'atmosfera e i processi chimico-fisici che vi avvengono. A questo riguardo applicazioni utili potrebbero venire da due progetti distinti attualmente in corso di messa a punto: uno con l'Azienda fiorentina del trasporto pubblico ATAF, l'altro con il Dipartimento di Energetica dell'Università di Firenze^{H,I}.

Riferimenti bibliografici

- A Paccagnella T., Tibaldi S., Buizza R. e Scoccianti S., "High-Resolution Numerical Modelling of Convective Precipitation over Northern-Italy", *Meteorology and Atmospheric Physics*, **50**, 1992, 143-163.
- B Paccagnella T., "Operativo il modello ad area limitata presso il Servizio Meteorologico dell'Emilia-Romagna", *AER*, **7**, 1994, 4-7.
- C Paccagnella T., "Il modello numerico ad area limitata operativo al SMR", *AER*, **11**, 1995, 10-13.
- D Decreto del Presidente della Repubblica 26/8/93, n°412, "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n°10", *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale*, **96**, 14/10/93.
- E Grechi D., Agati L., Bini G., Bruni M. e Caselli F., "Limitazioni programmate di traffico nell'area urbana di Firenze: effetti sui livelli di inquinamento atmosferico", *Bollettino dei Chimici Igienisti*, **47**, 1996, 113-121.
- F Boznar M. e Mlakar P., "Neural networks - a new mathematical tool for air pollution modelling", in *AIR POLLUTION III - Volume 1: Air Pollution Theory and Simulation*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), 1995, 259-266.
- G Raimondi F.M., Rando F., Vitale M.C. e Calcara A.M.V., "Short-term fuzzy DAP predictor for air pollution due to vehicular traffic", in *Measurements and Modelling in Environmental Pollution*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), 1997, 189-199.
- H Chiamonti D. e Martelli F., "An urban air pollution problem: application of the PBM model to the Florentine area", in *AIR POLLUTION III - Volume 3: Urban Pollution*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), 1995, 17-24.
- I Chiamonti D., Taddei Pardelli P. e Barbaro A., "Modellazione dell'altezza di miscelamento e qualità dell'aria nell'area urbana di Firenze", *Acqua & Aria*, **1**, 1997, 57-61.

Appendice 1

L'inquinamento atmosferico da NO₂ a Prato

Nella rete di rilevamento della qualità dell'aria realizzata dalla Provincia di Firenze nel 1993 sono presenti anche 3 stazioni posizionate nell'area urbana della città di Prato¹. Fra queste la stazione di San Paolo può essere considerata tipologicamente affine a quelle di classe B di Firenze e quindi può permettere una prima parziale ma importante valutazione dei livelli d'inquinamento da NO₂ presenti in quell'area urbana ed un confronto preliminare con la situazione fiorentina.

In Figura A1.1 è mostrata la corrispondenza fra i valori del parametro NO₂AB e quelli di NO₂P che rappresenta la media oraria massima giornaliera registrata nella stazione San Paolo di Prato. Come si vede i superamenti della soglia di attenzione in questa stazione risultano rarissimi (2 soli casi, entrambi inferiori ai 210 µg/m³) indicando come il fenomeno appaia ridimensionato rispetto all'area urbana di Firenze, almeno per quanto riguarda la zona ovest della città di Prato dove è posizionata la stazione.

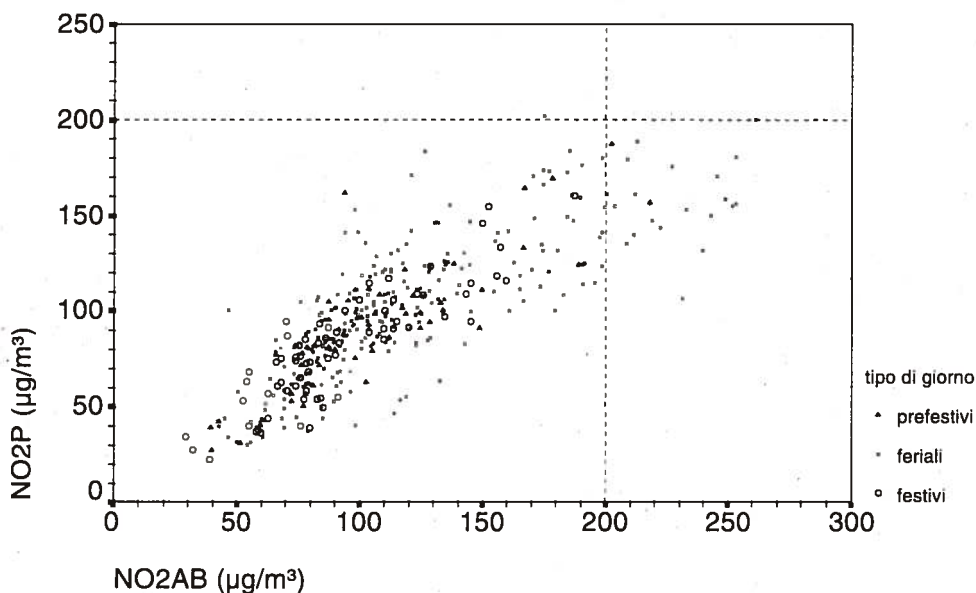


Figura A1.1: il grafico a dispersione mostra la relazione fra NO₂P e NO₂AB relativi allo stesso giorno, distinguendo le diverse classi tipologiche giornaliere (serie dei dati 1993÷1996).

1. Dal 6 maggio 1997, a seguito dell'istituzione della Provincia di Prato, le 3 stazioni pratesi sono interamente gestite dal Dipartimento Provinciale ARPAT di Prato.

2. Si veda la nota 7 al paragrafo 3.1.1 lettera e).

Esiste comunque un gruppo di valori vicini al livello di attenzione che possono indicare situazioni a rischio (considerando quanto detto precedentemente circa la precisione delle misure². Questi episodi (indicativamente si considerano i valori $\text{NO}_2\text{P} \geq 170 \mu\text{g}/\text{m}^3$) appaiono maggiormente addensati nella zona corrispondente ad elevati valori di NO_2AB , così come bassi valori di NO_2P corrispondono tendenzialmente a valori altrettanto modesti rilevati nelle stazioni di Firenze.

Risulta quindi ipotizzabile l'esistenza di un legame piuttosto forte ed approssimativamente lineare fra i due parametri (il coefficiente di correlazione lineare può essere letto nella successiva Tabella A1.2 oppure nella Tabella 3.2.XIII e risulta pari a 0.82).

Sono tuttavia presenti alcuni eventi $\text{NO}_2\text{P} \geq 170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in corrispondenza di valori modesti di NO_2AB e viceversa. Si può ipotizzare che questi episodi possano essere derivati da un'accentuata seppur rara diversità di condizioni fra il sito di San Paolo e la città di Firenze, distanti circa quindici chilometri (sull'asse NW-SE). In effetti occorre anche sottolineare che le condizioni topografiche delle stazioni urbane di Firenze, all'interno della conca che delimita la città, appaiono lievemente diverse rispetto alla posizione più aperta nella quale si trova la stazione di Prato.

In termini qualitativi le condizioni meteorologiche tipiche degli episodi di inquinamento atmosferico a Firenze sono caratterizzate da venti assenti o molto deboli, di direzione variabile, o talvolta a regime di brezza (W nel periodo diurno) o provenienti da SE. Il trasporto di inquinanti tra le due aree urbane appare quindi quanto meno poco rilevante, anche se nei casi di vento su Firenze proveniente da SE, o viceversa da W, risulta, almeno in linea di ipotesi possibile.

Dall'estate del 1994 non è più in funzione la stazione meteorologica di Baciacavallo nei sobborghi a SE della città di Prato, non sono perciò disponibili dati meteorologici che permettano di descrivere dettagliatamente questi episodi particolari né di verificare direttamente le relazioni qualitative e quantitative fra le condizioni meteo delle due città.

Per poter valutare con maggiore dettaglio i legami fra condizioni meteorologiche e livelli d'inquinamento occorre quindi far riferimento ai dati meteo registrati nelle altre stazioni della rete: ciò introduce ulteriori elementi di incertezza legati alle distanze fra le stazioni meteo dell'area fiorentina e la stazione di Prato.

Occorre comunque osservare che le condizioni di elevata stabilità atmo-

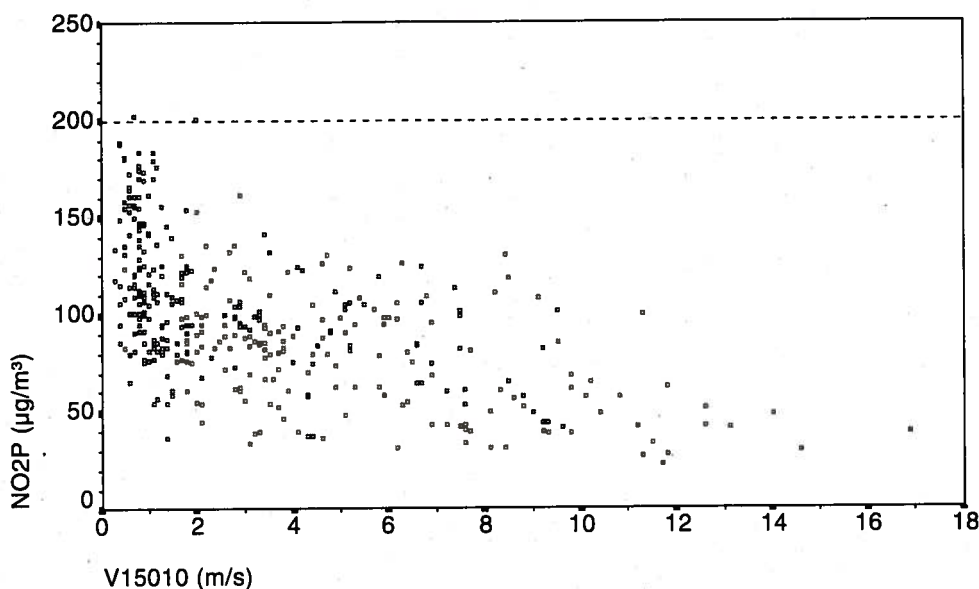


Figura A1.2: viene mostrata la relazione fra NO₂P e la velocità del vento registrata nelle prime 10 ore della mattina presso la stazione di Monte Morello (serie dei dati 1993÷1996). L'andamento risultante appare simile a quello riportato in Figura 3.1.6 per NO₂AB.

sferica che portano agli episodi acuti d'inquinamento da NO₂ devono avere carattere di persistenza nel tempo e di conseguenza anche una omogeneità spaziale su una scala di diversi chilometri.

Viene qui ripetuta sinteticamente sui valori dell'indicatore NO₂P l'analisi esplorativa rispetto ai valori delle variabili meteorologiche e ambientali risultate più significative.

In Figura A1.2 è mostrata la distribuzione di NO₂P rispetto ai valori di intensità del vento nella stazione di M. Morello (V15010, media della velocità vento nelle prime 10 ore).

Coerentemente si osserva come i valori più elevati di NO₂P corrispondano a velocità medie del vento (fra le ore 0 e le 10) molto ridotte, inferiori ai 2.5 m/s.

Analoghe considerazioni possono essere fatte a commento della Figura A1.3 che mostra invece la relazione con il parametro V14010 (Ximeniano).

In questo caso non si osservano valori superiori a 150 µg/m³ per velocità medie del vento (nelle prime dieci ore del giorno) maggiori di 2.5 m/s.

Nelle successive Figure A1.4 e A1.5 vengono invece mostrate le rela-

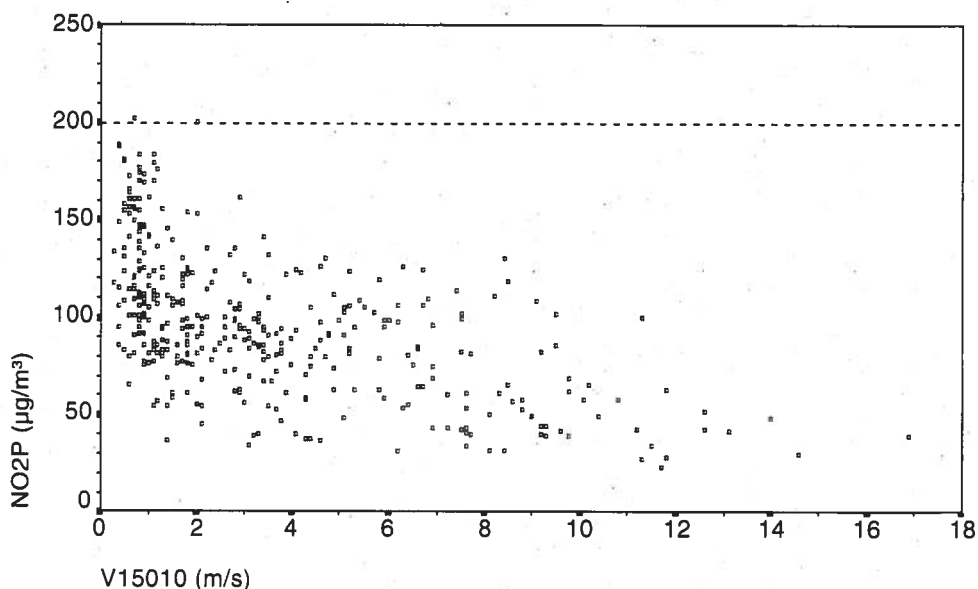


Figura A1.3: viene mostrata la relazione fra NO_2P e la velocità del vento registrata nelle prime 10 ore della mattina presso la stazione di Firenze-Ximeniano (serie dei dati 1993÷1996). Anche in questo caso si osserva un andamento simile a quello riportato in Figura 3.1.5 per NO_2AB . I giorni relativi alla concentrazioni più elevate corrispondono a giorni nei quali anche su Firenze il vento risultava piuttosto debole.

zioni con i parametri che quantificano l'esistenza di condizioni di inversione termica al suolo. Viene ovviamente confermata l'importanza della presenza e dell'intensità del fenomeno per individuare le situazioni più a rischio.

La densità dei punti corrispondenti a valori NO_2P elevati tende a crescere sia con i valori di INVPGP (media della differenza di temperatura fra le 13 e le 24 del giorno precedente fra le stazioni di M. Morello e Ximeniano) che in modo maggiormente apprezzabile con l'aumentare dei valori di INV010 , cioè in sostanza con il presentarsi di condizioni di inversione termica.

Nella Tabella A1.I sono mostrate le frequenze degli episodi più a rischio rispetto agli indicatori della durata del fenomeno di inversione termica: come già osservato per Firenze si evidenzia chiaramente la corrispondenza fra il prolungarsi nel tempo del fenomeno ed il presentarsi di questi episodi.

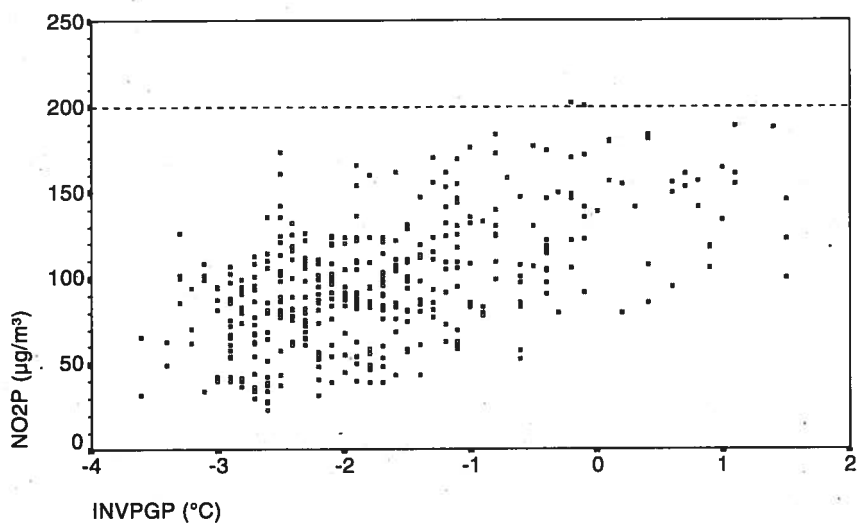


Figura A1.4: relazione fra NO₂P ed inversione termica (INVPGP) registrata a Firenze a partire dalle ore 13 fino alle 24 del giorno precedente a quello cui si riferiscono i valori NO₂P (serie dei dati 1993÷1996).

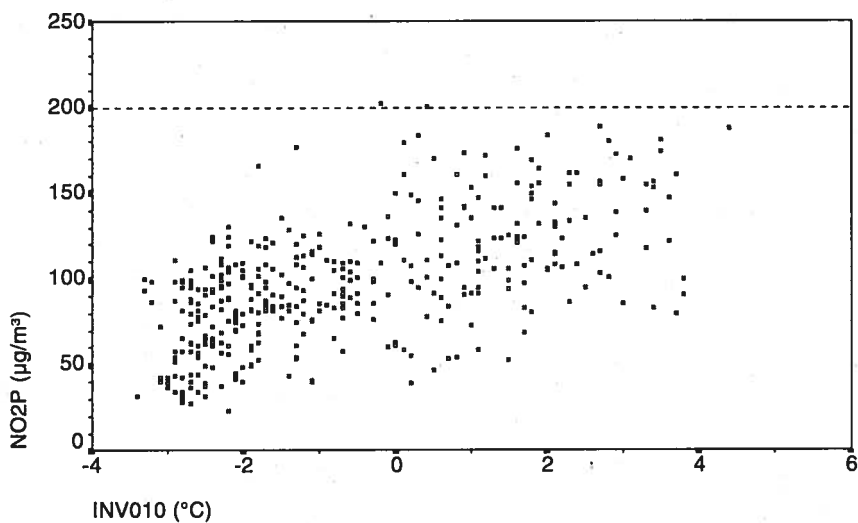


Figura A1.5: relazione fra NO₂P ed inversione termica (INV010) registrata a Firenze nella mattina (serie dei dati 1993÷1996).

Tabella A1.I: relazione fra episodi a rischio a Prato e numero di ore di inversione termica

	NOI010=0	1≤NOI010≤9	NOI010=10	dati assenti	totale
NO2P<170µg/m ³	187	124	64	4	379
NO2P≥170µg/m ³	1	5	11	0	17
dati assenti	29	17	12	0	58
totale	217	146	87	4	454
	NOIPGP=0	1≤NOIPGP≤5	NOIPGP>5	dati assenti	totale
NO2P<170µg/m ³	237	113	25	4	479
NO2P≥170µg/m ³	1	8	8	0	17
dati assenti	36	21	1	0	58
totale	274	142	34	4	454
	NOIT≤4	5≤NOIT≤12	NOIT>12	dati assenti	totale
NO2P<170µg/m ³	233	90	51	5	479
NO2P≥170µg/m ³	0	5	12	0	17
dati assenti	33	19	6	0	58
totale	266	114	69	5	454

Le frequenze di casi NO2P≥170 µg/m³ corrispondenti agli episodi di maggiore persistenza del fenomeno di inversione termica, si dimostrano però inferiori rispetto alle analoghe ottenute per Firenze, indicando una minore probabilità di raggiungere concentrazioni elevate di NO₂ anche in condizioni particolarmente favorevoli all'accumulo degli inquinanti.

In Figura A1.6 è mostrata la distribuzione statistica dei valori di NO2P ed il relativo fit con una distribuzione normale (con media pari a 98 µg/m³ e deviazione standard di 36). In questo caso il test di adattamento di Kolmogorov-Smirnov fornisce un livello di significato pari a 0.18, quindi un adattamento piuttosto modesto.

Nella Figura A1.7 sono mostrate mediante grafici tipo box-plot le distribuzioni dei valori NO2P nelle classi dei giorni feriali, festivi e prefestivi.

Il test statistico ANOVA ed il test Tukey-HSD (a livello di significato del 5%) indicano una differenziazione significativa fra i valori medi di NO2P nella classe dei giorni feriali rispetto a quelli dei giorni festivi e prefestivi.

In Figura A1.8 sono mostrati gli intervalli di confidenza per le medie

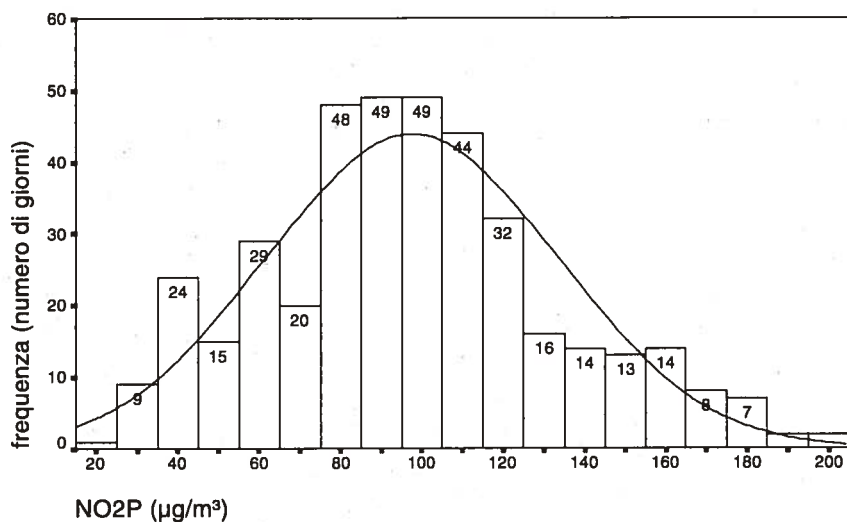


Figura A1.6: distribuzione di frequenza di NO₂P e relativa curva fit con una distribuzione normale avente la stessa media e deviazione standard (serie dei dati 1993÷1996).

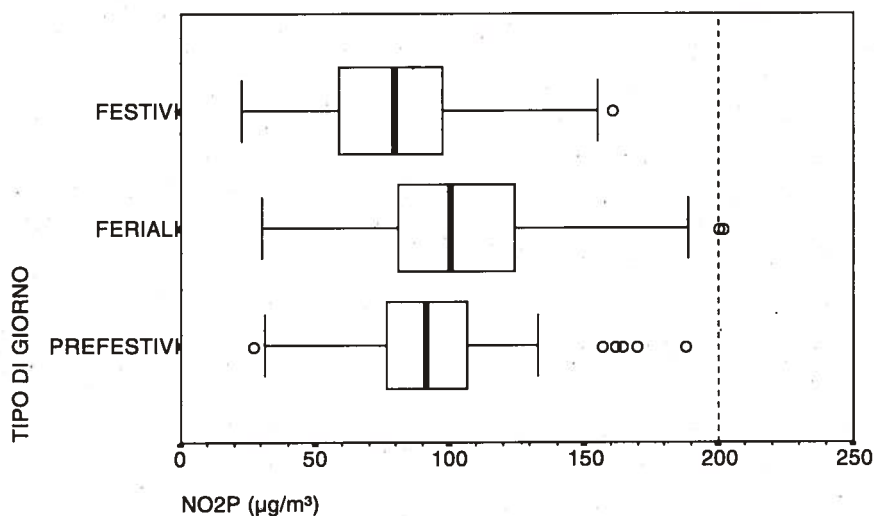


Figura A1.7: diagrammi box-plot per NO₂P rispetto alle diverse tipologie di giorno (serie dei dati 1993÷1996); soltanto per la classe dei feriali esistono valori (da considerarsi outliers) al di sopra dei 200 µg/m³.

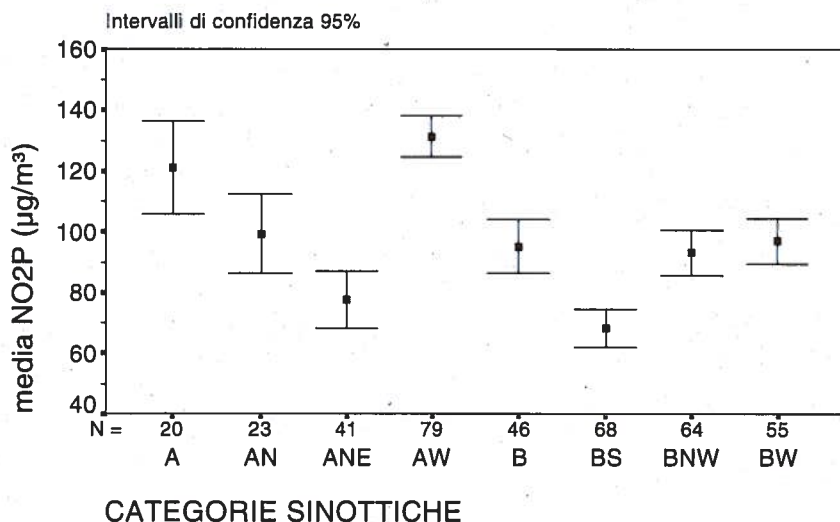


Figura A1.8: in figura sono mostrati gli intervalli di confidenza al 95% per i valori medi di NO2P suddivisi rispetto alla classificazione delle categorie sinottiche (serie dei dati 1993÷1996).

dei valori NO2P nelle classi corrispondenti alle diverse condizioni sinottiche³. Trattandosi queste ultime di indicazioni meteorologiche su grande scala ci si attende un comportamento qualitativamente molto simile a quello individuato per l'area urbana di Firenze.

In effetti anche se i valori medi corrispondenti alle diverse categorie risultano generalmente inferiori, si osserva una analogia sostanziale con la situazione di Firenze: le classi cui corrispondono medie più elevate si mantengono quelle relative a situazioni anticicloniche, escluse quelle nelle quali vengono convogliati sulla regione masse di aria provenienti da N-NE.

3. Per la descrizione delle diverse condizioni o categorie sinottiche si veda l'Appendice 3.

Tabella A1.2: coefficienti di correlazione.

variabili	NO2P		
	R_p	r_s	T
NO2AB	0.82	0.84	0.66
COAC	0.58	0.60	0.43
INVT	0.64	0.62	0.44
INV010	0.61	0.61	0.44
INV820	0.55	0.53	0.37
INV10H	0.50	0.49	0.33
INVPGP	0.55	0.50	0.35
NOP010	0.68	0.73	0.55
NOB010	0.62	0.65	0.46
NON010	0.57	0.63	0.45
V14820	-0.65	-0.62	-0.47
V14010	-0.50	-0.46	-0.32
V15820	-0.61	-0.63	-0.45
V15010	-0.57	-0.59	-0.43

In Tabella A1.2 sono riportate diverse misure di correlazione ad ulteriore conferma del legame presente fra NO2P, i dati di concentrazione e le condizioni meteo di Firenze. Particolarmente rilevanti appaiono le correlazioni (negative) con l'intensità del vento nel periodo diurno (V14820 e V15820) che risultano perfino superiori a quelle ottenute fra le stesse variabili ed NO2AB.

Infine nella Figura A1.9 sono mostrate le funzioni di autocorrelazione e di autocorrelazione parziale della serie temporale di NO2P. Anche in questo caso, come già osservato per NO2AB, si osserva un comportamento con un rapido decadimento dell'associazione fra le concentrazioni misurate in giorni consecutivi, e si intravede anche una debole periodicità di tipo settimanale.

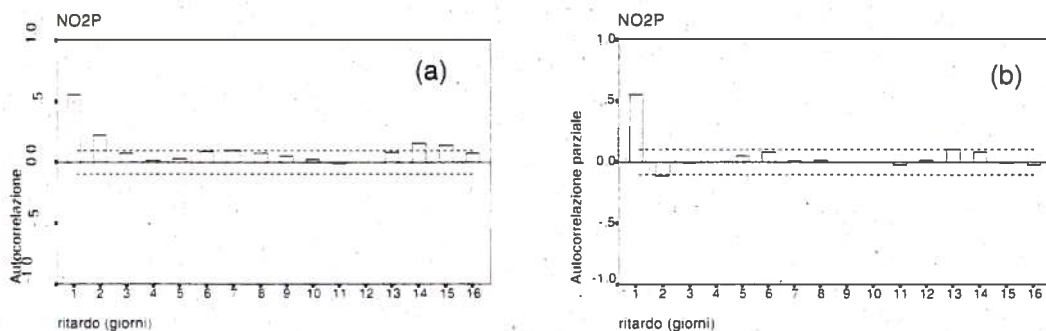


Figura A1.9: in figura sono mostrate le funzioni di autocorrelazione (a) e di autocorrelazione parziale (b) di NO₂P; la presenza di un unico valore veramente rilevante, a ritardo 1, indica un rapido decadimento e quindi un legame piuttosto limitato fra i valori di giorni successivi.

Appendice 2

Variabili ambientali e meteorologiche utilizzate e loro codifica in classi

- COAC:** seconda media massima oraria giornaliera più elevata di CO misurata fra le 4 stazioni di tipo A (1) e C (3).
- D14010:** direzione prevalente del vento nella stazione Ximeniano fra le ore 00 e le ore 10.
D14010 1=N; 2=NE; 3=E; 4=SE; 5=S; 6=SW; 7=W; 8=NW; 0=VAR; 9=CAL.
- D14024:** direzione prevalente del vento nella stazione Ximeniano fra le ore 00 e le ore 24.
D14024 1=N; 2=NE; 3=E; 4=SE; 5=S; 6=SW; 7=W; 8=NW; 0=VAR; 9=CAL.
- D14820:** direzione prevalente del vento nella stazione Ximeniano fra le ore 07 e le ore 20.
D14820 1=N; 2=NE; 3=E; 4=SE; 5=S; 6=SW; 7=W; 8=NW; 0=VAR; 9=CAL.
- D15010:** direzione prevalente del vento nella stazione M.Morello fra le ore 00 e le ore 10.
D15010 1=N; 2=NE; 3=E; 4=SE; 5=S; 6=SW; 7=W; 8=NW; 0=VAR; 9=CAL.
- D15024:** direzione prevalente del vento nella stazione M.Morello fra le ore 00 e le ore 24.
D15024 1=N; 2=NE; 3=E; 4=SE; 5=S; 6=SW; 7=W; 8=NW; 0=VAR; 9=CAL.
- D15820:** direzione prevalente del vento nella stazione M.Morello fra le ore 07 e le ore 20.
D15820 1=N; 2=NE; 3=E; 4=SE; 5=S; 6=SW; 7=W; 8=NW; 0=VAR; 9=CAL.

INV010: media della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M.Morello e Ximeniano dalle 00 alle ore 10.

INV010c 0 : $x \leq 0$; 1 : $0 < x \leq 2$; 2 : $x > 2$.

INV010 0 : $x < -2$; 1 : $-2 \leq x < -1$; 2 : $-1 \leq x < 0$; 3 : $0 \leq x < +1$; 4 : $+1 \leq x < +2$; 5 : $+2 \leq x < +3$; 6 : $x \geq +3$.

INV10H differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M.Morello e Ximeniano alle ore 10 (inversione termica).

INV10H 0 : $x \leq -1$; 1 : $-1 < x \leq +1$; 2 : $+1 < x \leq +3$; 3 : $x > +3$.

INV820 media della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M.Morello e Ximeniano dalle 8 alle ore 20.

INV820 0 : $x \leq -3$; 1 : $-3 < x \leq -1.5$; 2 : $-1.5 < x \leq 0$; 3 : $x > 0$.

INVPGP: media della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M.Morello e Ximeniano dalle 12 alle 24 del giorno prima.

INVPGP 0 : $x \leq -3$; 1 : $-3 < x \leq -2$; 2 : $-2 < x \leq -1$; 3 : $-1 < x \leq 0$; 4 : $x > 0$.

INVT: media della differenza di temperatura registrata fra le stazioni di M.Morello e Ximeniano dalle 12 del giorno prima alle ore 10.

INVT 0 : $x \leq -4$; 1 : $-4 < x \leq -1$; 2 : $-1 < x \leq 2$; 3 : $x > 2$.

NO2AB: seconda media massima oraria giornaliera più elevata misurata nelle 4 stazioni di tipo A (1) e B (3).

NO2AB 0 : $x < 100$; 1 : $100 \leq x < 180$; 2 : $180 \leq x < 220$; 3 : $x \geq 220$.

NO2P: media massima oraria giornaliera misurata nella stazione di Prato S.Paolo (B).

NO2P 0 : $x < 100$; 1 : $100 \leq x < 170$; 2 : $x \geq 170$.

NO2SUP: numero di superamenti orari della soglia di attenzione avvenuti nelle stazioni A e B.

NO2SUP 0 : $x = 0$; 1 : $1 \leq x < 3$; 2 : $x \geq 3$.

NOB010 concentrazione media di NO misurata fra le ore 00 e le ore 10 nella stazione Bassi.

NOB010 0 : $x < 80$; 1 : $80 \leq x < 180$; 2 : $x \geq 180$.

NOI010: numero di ore di inversione termica fra le ore 00 e le 10 odierne.

NOI010 0 : $x=0$; 1 : $0 < x \leq 4$; 2 : $4 < x \leq 9$; 3 : $x > 9$.

NOI820: numero di ore di inversione termica fra le ore 7 e le 20 odierne.

NOI820 0 : $x=0$; 1 : $0 < x \leq 3$; 2 : $3 < x \leq 5$; 3 : $x > 5$.

NOIT: numero di ore di inversione termica fra le ore 12 del giorno precedente e le 10 odierne.

NOIT 0 : $x=0$; 1 : $0 < x \leq 6$; 2 : $6 < x \leq 12$; 3 : $x > 12$.

NOIPGP: numero di ore di inversione termica fra le ore 12 e le 24 del giorno precedente.

NOIPGP 0 : $x=0$; 1 : $0 < x \leq 3$; 2 : $x > 3$.

NOMB5H media delle concentrazioni di NO_2 misurate alle ore 5 nelle stazioni di tipo B.

NOMB5H 0 : $x < 20$; 1 : $20 \leq x < 60$; 2 : $x \geq 60$.

NON010 concentrazione media di NO misurata fra le ore 00 e le ore 10 nella stazione Novoli.

NON010 0 : $x < 70$; 1 : $70 \leq x < 150$; 2 : $x \geq 150$.

NOP010 concentrazione media di NO misurata fra le ore 00 e le ore 10 nella stazione di Prato S.Paolo.

PIO024: quantità di precipitazione giornaliera (cumulata) rilevata a Ximeniano.

PIO024 0 : $x=0$; 1 : $0.2 \leq x \leq 1$; 2 : $x > 1$.

PIO010: quantità di precipitazione cumulata fra le ore 0 e le ore 10 a.m. presso Ximeniano.

PIO010 0 : $x=0$; 1 : $0.2 \leq x \leq 1$; 2 : $x > 1$.

RTN024 radiazione globale cumulata giornaliera normalizzata, misurata a Ximeniano.

RTN024 0 : $x < 0.37$; 1 : $0.37 \leq x < 0.75$; 2 : $x \geq 0.75$.

SIN: categorie sinottiche.

SIN 0=A; 1=AN; 2=ANE; 3=AW; 4=B; 5=BS; 6=BNW; 7=BW.

T14MIN temperatura minima giornaliera (media oraria) registrata nella stazione Ximeniano.

T14MIN 0 : $x \leq +2$; 1 : $+2 < x < +6$; 2 : $+6 \leq x < +10$; 3 : $x \geq +10$.

T14010 temperatura media registrata nella stazione Ximeniano dalle 00 alle ore 10.

T14010 0 : $x \leq +2$; 1 : $+2 < x < +6$; 2 : $+6 \leq x < +10$; 3 : $x \geq +10$.

TIPO: classificazione dei giorni in corrispondenza delle loro caratteristiche di traffico.

TIPO 0 : f=festivo; 1 : n=feriale; 2 : pf=prefestivo.

TRM024 media oraria giornaliera del numero di veicoli in transito contati dalla stazione contatraffico di Via Ponte alle Mosse.

TRM024 0 : $x < 850$; 1 : $850 \leq x < 1050$; 2 : $x \geq 1050$.

TRM10H numero di veicoli in transito contati dalla stazione contatraffico di Via Ponte alle Mosse fra le ore 9 e le ore 10.

TRM10H 0 : $x < 800$; 1 : $x \geq 800$.

TRM8H numero di veicoli in transito contati dalla stazione contatraffico di Via Ponte alle Mosse fra le ore 7 e le ore 8.

TRM8H 0 : $x < 500$; 1 : $500 \leq x < 1150$; 2 : $x \geq 1150$.

V15010 velocità media del vento misurata nella stazione M.Morello dalle 00 alle 10.

V15010 0 : $x < 1$; 1 : $1 \leq x < 2$; 2 : $2 \leq x < 3$; 3 : $x \geq 3$.

V14010 velocità media del vento misurata nella stazione Ximeniano dalle 00 alle 10.

V14010 0 : $x < 1$; 1 : $1 \leq x < 2$; 2 : $2 \leq x < 3$; 3 : $x \geq 3$.

V15820 velocità media del vento misurata nella stazione M.Morello dalle 07 alle 20.

V15820 0 : $x < 1$; 1 : $1 \leq x < 2$; 2 : $2 \leq x < 3$; 3 : $x \geq 3$.

V14820 velocità media del vento misurata nella stazione Ximeniano dalle 07 alle 20.

V14820 0 : $x < 1$; 1 : $1 \leq x < 2$; 2 : $2 \leq x < 3$; 3 : $x \geq 3$.

V15024 velocità media del vento misurata nella stazione Ximeniano dalle 00 alle 24.

V15024 0 : $x < 1$; 1 : $1 \leq x < 2$; 2 : $2 \leq x < 3$; 3 : $x \geq 3$.

V14024 velocità media del vento misurata nella stazione M.Morello dalle 00 alle 24.

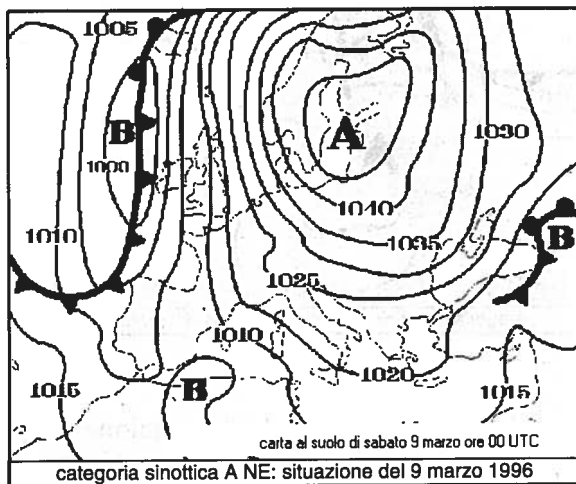
V14024 0 : $x < 1$; 1 : $1 \leq x < 2$; 2 : $2 \leq x < 3$; 3 : $x \geq 3$.

Appendice 3 Categorie sinottiche

Le condizioni meteorologiche da scala regionale a continentale (ordine di grandezza da 10^3 a 10^4 km) possono essere utilmente sintetizzate nelle cosiddette "carte sinottiche" che rappresentano lo stato del tempo, osservato o previsto, sull'area considerata. Vi sono generalmente riportate le isobare al suolo e in quota (a 500 hPa, equivalente a circa 5500 m s.l.m.) con i centri di alta indicati con A (H nella cartografia in inglese), e di bassa pressione indicati con B (o L), nonché i fronti perturbati distinti secondo una simbologia internazionale in freddi, caldi e occlusi. Le carte più complete riportano inoltre una serie di osservazioni meteorologiche al suolo rilevate in diverse stazioni presenti nell'area e riguardanti principalmente: temperature, vento (intensità e direzione di provenienza), stato del cielo, precipitazioni. Tali carte vengono redatte giornalmente dai servizi meteorologici nazionali sia per la situazione rilevata (riferita di solito alle ore 12:00 GMT) che per quella prevista ad intervalli di 12 ore (00:00, 12:00) per uno o più giorni successivi.

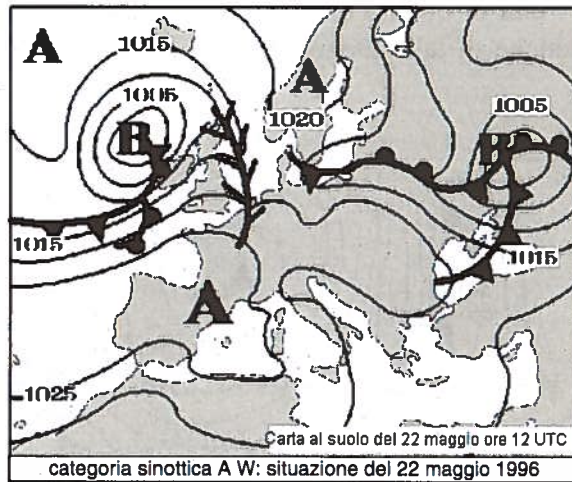
Nel presente studio la condizione meteorologica sinottica del giorno è stata ricavata dalla lettura del Cartello Meteorologico, pubblicazione quotidiana del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (SMAM-ITAV). In questa pubblicazione sono riportate le carte della situazione barica e le temperature, al suolo e a 500 hPa relative alle ore 13:00 nell'area mediterranea. È riportata, inoltre, la carta barica prevista e le previsioni meteorologiche generali per il giorno successivo. La lettura di questa carta è stata integrata nei casi più incerti dall'analisi delle condizioni al suolo rilevate dalla stazione Firenze-Ximeniano (urbana) e Sesto F.no- Morello (collinare extraurbana). Le diverse condizioni sinottiche giornaliere sono state prima divise in due grandi gruppi: anticicloniche e cicloniche, a seconda del tipo di circolazione presente sulla penisola italiana. Successivamente è stata operata un'ulteriore suddivisione riferendosi alle condizioni tipiche ricorrenti nella meteorologia italiana così come indicate in letteratura^{A,B}. Bisogna osservare che nel caso di situazioni rapidamente evolutive, come ad esempio il passaggio di veloci perturbazioni o l'irruzione di correnti fredde, la condizione sinottica può cambiare nell'arco di poche ore rendendo quindi più problematica sia l'attribuzione che il col-

legamento con i dati di qualità dell'aria. Vengono riportate di seguito le descrizioni sintetiche di tali categorie sinottiche con le relative sigle¹.

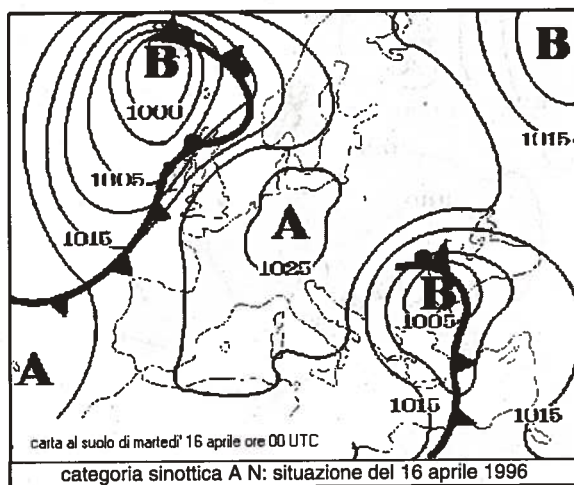


A NE Regime anticiclonico dominato dall'anticiclone russo-siberiano, anche in continuità con l'anticiclone atlantico attraverso l'Europa centrale. I venti sulla penisola sono prevalentemente da N e NE. A seconda della posizione del massimo barico, tali venti possono essere più intensi (da moderati a forti) se il massimo è spostato verso nord (golfo di Finlandia), oppure deboli-moderati, tendenti a provenire da Est, se il massimo barico è più meridionale (Ucraina) e più vicino all'Italia.

1. Le carte sinottiche di questa Appendice sono elaborazioni del CSVDI-Centro Sperimentale Valanghe e Difesa Idrogeologica (Arabba) della Regione Veneto.

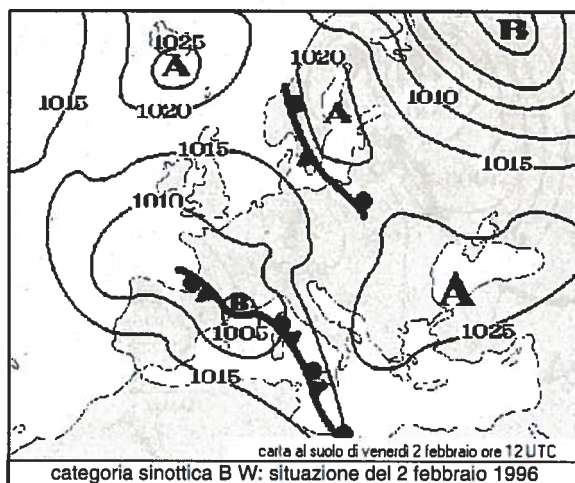


A W Regime anticiclonico dominato dall'anticiclone delle Azzorre che si estende sull'Europa sud-occidentale e mediterranea; caratteristico del semestre estivo. A volte può crearsi un massimo secondario sul nord Africa o sul Mediterraneo meridionale che fa affluire sulla penisola aria calda e secca di origine sahariana (avvezione calda). I venti sono deboli a regime di brezza, con componente occidentale nelle ore diurne (sul versante tirrenico). Si tratta di una condizione potenzialmente critica per la qualità dell'aria sia nel semestre estivo (O_3) che in quello invernale (NO_2 e CO).

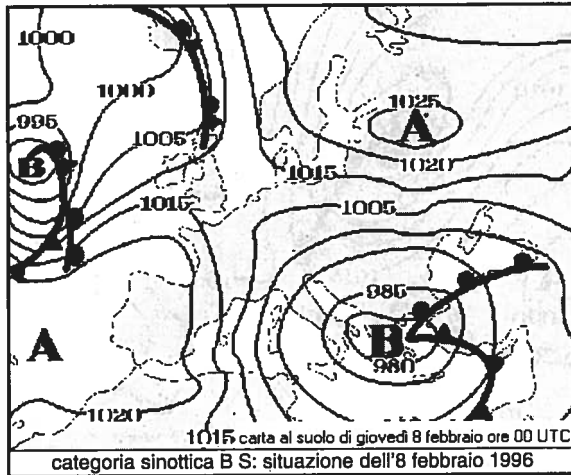


A N Anticiclone sull'Europa centrale a nord dell'arco alpino. Le regioni centro-settentrionali della penisola possono così trovarsi sotto il centro dell'anticiclone continentale. Gli alti valori di pressione, associati spesso a moti di subsidenza delle masse d'aria, portano a condizioni di forte stabilità atmosferica con venti deboli variabili, da NE sulle regioni meridionali. Nel semestre invernale sono frequenti i fenomeni di inversione termica nei bassi strati con foschia densa o nebbia nei fondovalle e nelle pianure. Condizione anche questa critica per la qualità dell'aria.

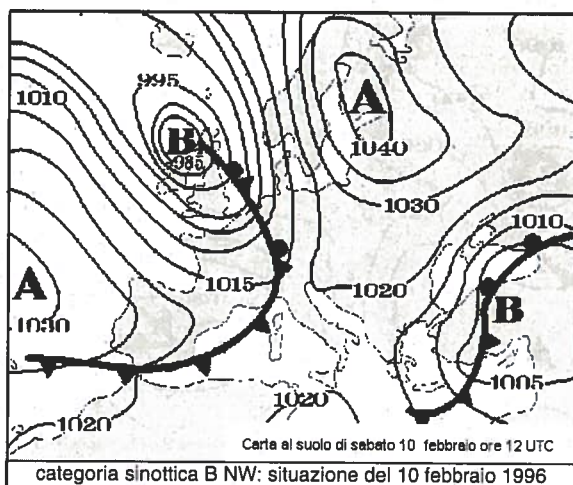
A Altre situazioni a carattere anticiclonico non identificabili con le precedenti: possono risultare critiche per la qualità dell'aria se caratterizzate da venti deboli.



B W Condizione ciclonica caratterizzata da una depressione sul Mediterraneo centro-occidentale. Perturbazioni di origine atlantica o nord-africana anche deboli, in lento spostamento, interessano la penisola da sud a nord. Situazione frequente nell'autunno-inverno, con venti deboli o moderati tipicamente da SE. Temperature sopra le medie stagionali.



B S Area ciclonica sul Mediterraneo centro-meridionale od orientale (che deriva quasi sempre come evoluzione della BW) associata alla presenza di un anticiclone sull'Europa settentrionale con il massimo, in genere, sulla Scandinavia. Questa condizione porta, sulle nostre regioni, un afflusso di aria polare che scontrandosi con l'aria più calda e umida del Mediterraneo provoca forte instabilità atmosferica con abbondanti precipitazioni, in inverno anche nevose. I venti associati risultano nord-orientali, moderati o forti.



B NW Regime ciclonico dominato dalla depressione islandese in posizione meridionale (isole britanniche) che convoglia sulla penisola perturbazioni di origine nord-atlantica. Situazione tipica del semestre invernale. Venti moderati o forti con componente occidentale. Nel periodo invernale può risultare una condizione critica per la qualità dell'aria nella sua fase iniziale quando, l'arrivo della perturbazione (e della nuvolosità ad essa associata) è preceduto da una lenta avvezione calda in quota da sud che sovrascorre gli strati al suolo più freddi (ciò tende a verificarsi anche nella condizione sinottica BW). Si tratta comunque di una situazione transitoria che si risolve di solito in 24÷48 ore con l'arrivo della perturbazione.

B Altre situazioni a carattere ciclonico non identificabili con le precedenti: possono risultare critiche per la qualità dell'aria, nel periodo invernale, solo se associate a venti deboli.

Riferimenti bibliografici

- A Bernacca E., *La previsione del tempo e i climi della Terra e d'Italia*, Editrice La Scuola, Brescia, 1973, Capitolo 15.
- B Pinna M., *L'atmosfera e il clima*, UTET, Torino, 1978, Capitoli 7 e 8.

Appendice 4

Distribuzioni di frequenza di NO₂AB rispetto al tipo di giorno

Vengono di seguito mostrate le distribuzioni di frequenza di NO₂AB rispetto al tipo di giorno festivo, feriale e prefestivo.

In Figura A4.1 è riportato l'istogramma delle frequenze dei 79 giorni festivi che costituiscono la popolazione studiata, insieme al relativo fit con una distribuzione normale (con media pari a 92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e deviazione standard di 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Il test di adattamento di Kolmogorov-Smirnov fornisce un livello di significato di 0.12 ed indica quindi un adattamento piuttosto modesto ed incerto alla distribuzione normale.

Si nota come nessun evento acuto e soltanto un evento in classe UP si sia verificato fra i giorni festivi.

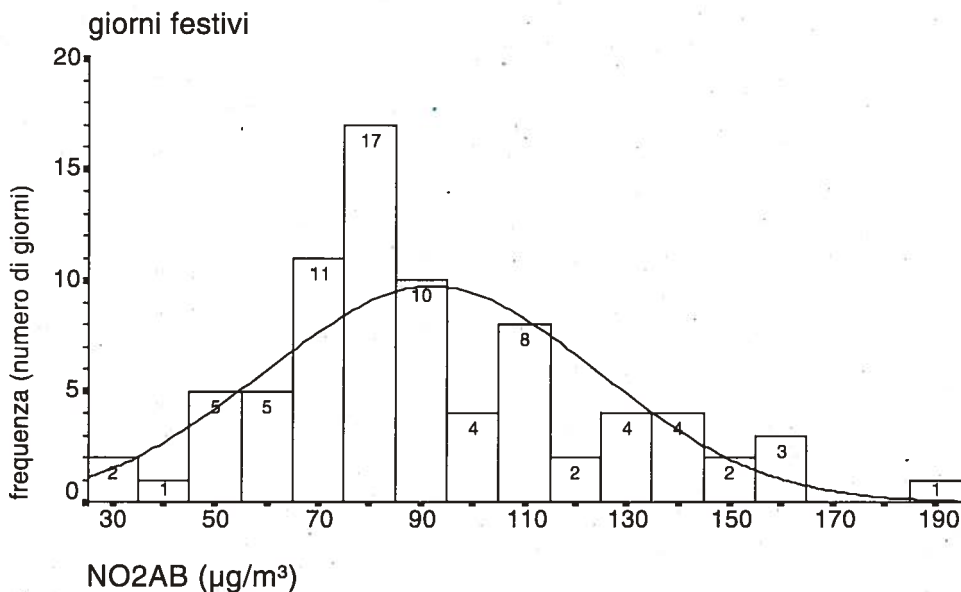


Figura A4.1: distribuzione di frequenza per la classe dei giorni festivi e relativo fit con distribuzione normale (serie dei dati 1993 ÷ 1996).

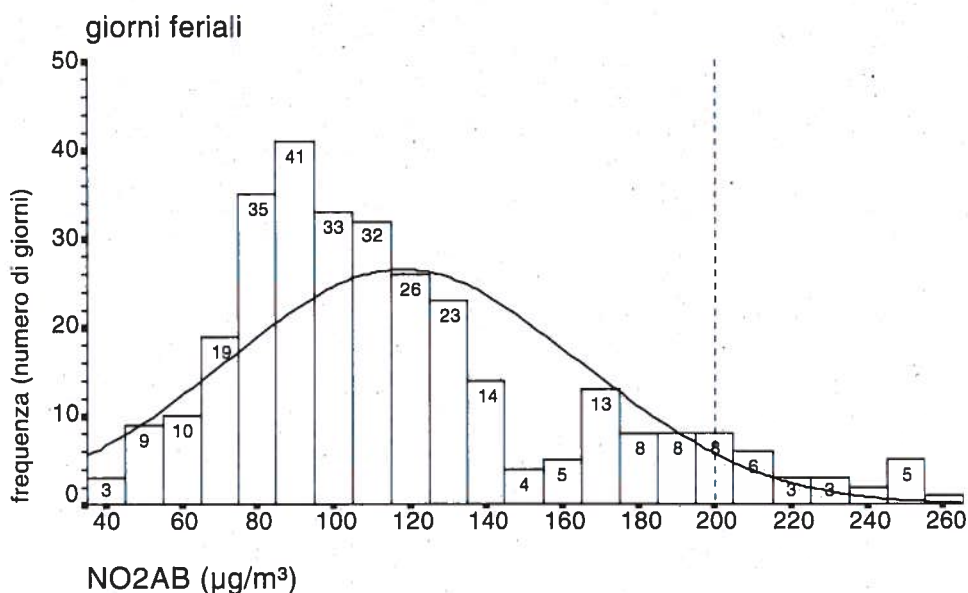


Figura A4.2: distribuzione di frequenza per la classe dei giorni feriali e relativo fit con distribuzione normale (serie dei dati 1993÷1996).

Nella Figura A4.2 è invece riportata la distribuzione delle frequenze per i giorni feriali. Come si osserva immediatamente, il fit con la corrispondente distribuzione normale (con media pari a $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e deviazione standard di $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$) risulta non adeguato, ed infatti il test di Kolmogorov-Smirnov fornisce un livello di significato ampiamente inferiore all'1%.

In questa distribuzione si evidenzia in modo particolare l'aspetto bimodale, come se l'insieme di valori NO2AB dei giorni feriali provenisse da due distinte popolazioni statistiche, una più numerosa centrata su valori intorno ai $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ed un'altra meno numerosa, corrispondente agli episodi acuti.

Infine in Figura A4.3 sono mostrati istogramma e relativa distribuzione normale per la classe dei giorni prefestivi (in genere sabato).

Il test di Kolmogorov-Smirnov per la distribuzione normale (con media $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e deviazione standard $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 62 casi) produce un livello di significato di 0.25 e quindi adattamento accettabile.

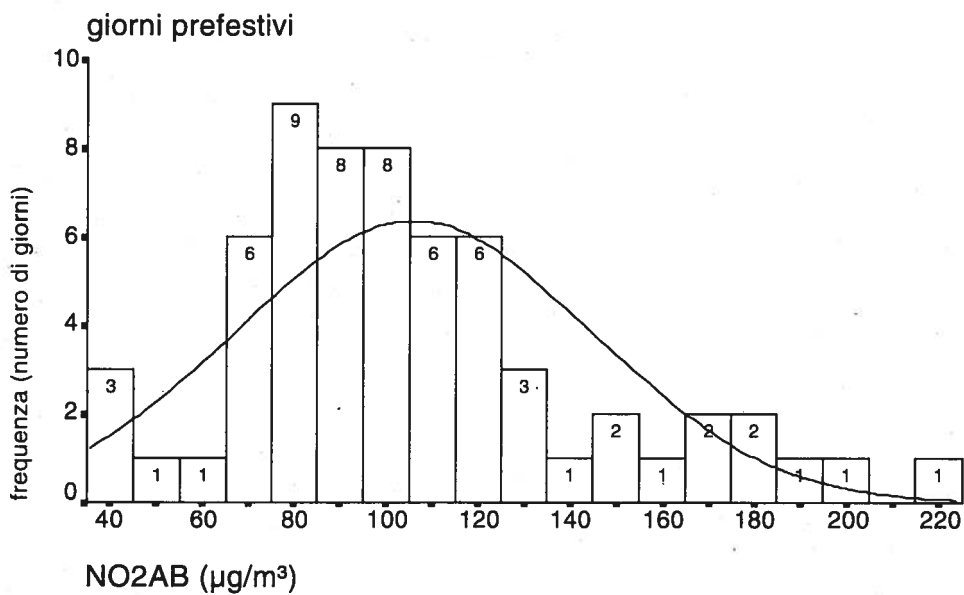


Figura A4.3: distribuzione di frequenza per la classe dei giorni prefestivi e relativo fit con distribuzione normale (serie dei dati 1993÷1996).

Appendice 5

Matrice di correlazione lineare (1993-94, 1994-95, 1995-96)

	NO2AB	COAC	NO2P	V14010	V14024	V14820
NO2AB	1.0000 (452) P=.	.5666 (452) P=.000	.8173 (394) P=.000	-.4643 (442) P=.000	-.5703 (441) P=.000	-.5932 (441) P=.000
COAC	.5666 (452) P=.000	1.0000 (454) P=.	.5790 (396) P=.000	-.5026 (444) P=.000	-.5862 (443) P=.000	-.5906 (443) P=.000
NO2P	.8173 (394) P=.000	.5790 (396) P=.000	1.0000 (396) P=.	-.4992 (386) P=.000	-.6371 (385) P=.000	-.6509 (385) P=.000
V14010	-.4643 (442) P=.000	-.5026 (444) P=.000	-.4992 (386) P=.000	1.0000 (444) P=.	.8570 (443) P=.000	.7680 (443) P=.000
V14024	-.5703 (441) P=.000	-.5862 (443) P=.000	-.6371 (385) P=.000	.8570 (443) P=.000	1.0000 (443) P=.	.9741 (443) P=.000
V14820	-.5932 (441) P=.000	-.5906 (443) P=.000	-.6509 (385) P=.000	.7680 (443) P=.000	.9741 (443) P=.000	1.0000 (443) P=.
V15010	-.5280 (432) P=.000	-.4255 (434) P=.000	-.5703 (378) P=.000	.7195 (433) P=.000	.7337 (432) P=.000	.7059 (432) P=.000
V15820	-.5487 (427) P=.000	-.4508 (429) P=.000	-.6079 (374) P=.000	.6270 (428) P=.000	.7646 (428) P=.000	.7764 (428) P=.000

● Per ogni variabile sotto al coefficiente è riportata l'entità del campione sul quale è stato calcolato, e ancora sotto il livello di significato P a due code del test di coefficiente nullo.

	NO2AB	COAC	NO2P	V14010	V14024	V14820
TRM024	.1123 (444) P=.018	.0956 (446) P=.044	.0218 (389) P=.668	.0352 (436) P=.464	.0809 (435) P=.092	.0851 (435) P=.076
TRM10H.	.1865 (443) P=.000	.2178 (445) P=.000	.1374 (388) P=.007	.0391 (435) P=.416	.0799 (434) P=.096	.0906 (434) P=.059
TRM8H	.2360 (443) P=.000	.2274 (445) P=.000	.2408 (388) P=.000	.0261 (435) P=.588	.0591 (434) P=.219	.0727 (434) P=.131
T14010	-.3215 (451) P=.000	-.0658 (453) P=.162	-.2180 (395) P=.000	-.0747 (444) P=.116	-.0139 (443) P=.771	.0434 (443) P=.363
T14MAX	.1218 (451) P=.010	.1051 (453) P=.025	.1513 (395) P=.003	-.3037 (444) P=.000	-.2360 (443) P=.000	-.1869 (443) P=.000
T14MIN	-.2706 (451) P=.000	-.0273 (453) P=.562	-.1772 (395) P=.000	-.1631 (444) P=.001	-.0966 (443) P=.042	-.0402 (443) P=.399
RTN024	.1138 (441) P=.017	-.1426 (443) P=.003	-.0161 (385) P=.753	.1997 (443) P=.000	.2319 (443) P=.000	.2288 (443) P=.000
PIO010	-.1662 (451) P=.000	-.0525 (453) P=.265	-.1197 (395) P=.017	.0655 (444) P=.168	.0359 (443) P=.451	.0387 (443) P=.417
PIO024	-.1969 (451) P=.000	-.0737 (453) P=.117	-.1465 (395) P=.004	.0375 (444) P=.430	.0066 (443) P=.890	.0120 (443) P=.801
INV010	.6715 (448) P=.000	.4363 (450) P=.000	.6091 (392) P=.000	-.4490 (441) P=.000	-.5008 (440) P=.000	-.5203 (440) P=.000

	NO2AB	COAC	NO2P	V14010	V14024	V14820
INV10H	.5725 (443) P=.000	.3429 (445) P=.000	.5019 (390) P=.000	-.2757 (436) P=.000	-.3779 (435) P=.000	-.4209 (435) P=.000
INV820	.6336 (444) P=.000	.4308 (446) P=.000	.5528 (389) P=.000	-.3021 (438) P=.000	-.4302 (437) P=.000	-.4688 (437) P=.000
INVPGP	.5495 (448) P=.000	.4480 (450) P=.000	.5548 (392) P=.000	-.3599 (440) P=.000	-.4054 (439) P=.000	-.4058 (439) P=.000
INVT	.6801 (447) P=.000	.4807 (449) P=.000	.6414 (391) P=.000	-.4509 (440) P=.000	-.5047 (439) P=.000	-.5179 (439) P=.000
NOB010	.6255 (443) P=.000	.5441 (445) P=.000	.6199 (389) P=.000	-.5432 (435) P=.000	-.5462 (434) P=.000	-.5372 (434) P=.000
NON010	.5910 (436) P=.000	.5424 (437) P=.000	.5729 (379) P=.000	-.5606 (427) P=.000	-.5426 (426) P=.000	-.5212 (426) P=.000
NOMB5H	.4415 (450) P=.000	.3949 (452) P=.000	.4731 (396) P=.000	-.4620 (442) P=.000	-.4423 (441) P=.000	-.4163 (441) P=.000
NOP010	.6432 (395) P=.000	.5576 (397) P=.000	.6833 (396) P=.000	-.4783 (387) P=.000	-.5483 (386) P=.000	-.5498 (386) P=.000

	V15010	V15820	.TRM024	TRM10H	TRM8H	T14010
NO2AB	-.5280 (432) P=.000	-.5487 (427) P=.000	.1123 (444) P=.018	.1865 (443) P=.000	.2360 (443) P=.000	-.3215 (451) P=.000
COAC	-.4255 (434) P=.000	-.4508 (429) P=.000	.0956 (446) P=.044	.2178 (445) P=.000	.2274 (445) P=.000	-.0658 (453) P=.162
NO2P	-.5703 (378) P=.000	-.6079 (374) P=.000	.0218 (389) P=.668	.1374 (388) P=.007	.2408 (388) P=.000	-.2180 (395) P=.000
V14010	.7195 (433) P=.000	.6270 (428) P=.000	.0352 (436) P=.464	.0391 (435) P=.416	.0261 (435) P=.588	-.0747 (444) P=.116
V14024	.7337 (432) P=.000	.7646 (428) P=.000	.0809 (435) P=.092	.0799 (434) P=.096	.0591 (434) P=.219	-.0139 (443) P=.771
V14820	.7059 (432) P=.000	.7764 (428) P=.000	.0851 (435) P=.076	.0906 (434) P=.059	.0727 (434) P=.131	.0434 (443) P=.363
V15010	1.0000 (434) P=.	.7958 (429) P=.000	.0348 (426) P=.474	.0470 (425) P=.334	.0220 (425) P=.652	.0114 (433) P=.813
V15820	.7958 (429) P=.000	1.0000 (429) P=.	.0541 (421) P=.268	.0426 (420) P=.384	.0211 (420) P=.666	.0016 (428) P=.974
TRM024	.0348 (426) P=.474	.0541 (421) P=.268	1.0000 (446) P=.	.8347 (445) P=.000	.5648 (445) P=.000	.0604 (445) P=.203
TRM10H	.0470 (425) P=.334	.0426 (420) P=.384	.8347 (445) P=.000	1.0000 (445) P=.	.8187 (444) P=.000	.0489 (444) P=.304

	V15010	V15820	TRM024	TRM10H	TRM8H	T14010
TRM8H	.0220 (425) P=.652	.0211 (420) P=.666	.5648 (445) P=.000	.8187 (444) P=.000	1.0000 (445) P=.	.0446 (444) P=.349
T14010	.0114 (433) P=.813	.0016 (428) P=.974	.0604 (445) P=.203	.0489 (444) P=.304	.0446 (444) P=.349	1.0000 (453) P=.
T14MAX	-.2844 (433) P=.000	-.2715 (428) P=.000	.1969 (445) P=.000	.1428 (444) P=.003	.1277 (444) P=.007	.6757 (453) P=.000
T14MIN	-.0427 (433) P=.376	-.0401 (428) P=.408	.0482 (445) P=.310	.0461 (444) P=.332	.0539 (444) P=.257	.9492 (453) P=.000
RTN024	.1276 (432) P=.008	.0951 (428) P=.049	.2094 (435) P=.000	.1507 (434) P=.002	.1083 (434) P=.024	-.3241 (443) P=.000
PIO010	.0467 (433) P=.333	.0488 (428) P=.314	-.1687 (445) P=.000	-.1480 (444) P=.002	-.0970 (444) P=.041	.2313 (453) P=.000
PIO024	.0109 (433) P=.821	.0117 (428) P=.809	-.2125 (445) P=.000	-.1973 (444) P=.000	-.1268 (444) P=.007	.2111 (453) P=.000
INV010	-.4739 (433) P=.000	-.4128 (428) P=.000	.0508 (442) P=.287	.0042 (441) P=.929	-.0373 (441) P=.435	-.4198 (450) P=.000
INV10H	-.3237 (428) P=.000	-.3440 (425) P=.000	-.0001 (437) P=.999	-.0513 (436) P=.285	-.0850 (436) P=.076	-.4949 (445) P=.000
INV820	-.3653 (430) P=.000	-.3891 (428) P=.000	-.0063 (438) P=.895	-.0303 (437) P=.528	-.0753 (437) P=.116	-.5042 (446) P=.000

	V15010	V15820	TRM024	TRM10H	TRM8H	T14010
INVPGP	-.3401 (433) P=.000	-.2999 (428) P=.000	-.0849 (442) P=.075	-.0803 (441) P=.092	-.0514 (441) P=.282	-.2340 (449) P=.000
INVT	-.4580 (432) P=.000	-.4025 (427) P=.000	-.0033 (441) P=.946	-.0304 (440) P=.525	-.0450 (440) P=.347	-.3773 (449) P=.000
NOB010	-.4798 (425) P=.000	-.4184 (420) P=.000	-.0659 (437) P=.169	.0105 (436) P=.827	.0387 (436) P=.421	-.1778 (444) P=.000
NON010	-.4481 (419) P=.000	-.3934 (414) P=.000	.1010 (429) P=.036	.1289 (428) P=.008	.1305 (428) P=.007	-.1343 (436) P=.005
NOMB5H	-.3459 (432) P=.000	-.2927 (427) P=.000	-.0303 (444) P=.524	-.0292 (443) P=.540	-.0398 (443) P=.403	-.0603 (451) P=.201
NOP010	-.4450 (379) P=.000	-.4021 (375) P=.000	-.0524 (389) P=.303	.0456 (388) P=.370	.1071 (388) P=.035	-.1520 (396) P=.002

	T14MAX	T14MIN	RTN024	PIO010	PIO024	INV010
NO2AB	.1218 (451) P=.010	-.2706 (451) P=.000	.1138 (441) P=.017	-.1662 (451) P=.000	-.1969 (451) P=.000	.6715 (448) P=.000
COAC	.1051 (453) P=.025	-.0273 (453) P=.562	-.1426 (443) P=.003	-.0525 (453) P=.265	-.0737 (453) P=.117	.4363 (450) P=.000
NO2P	.1513 (395) P=.003	-.1772 (395) P=.000	-.0161 (385) P=.753	-.1197 (395) P=.017	-.1465 (395) P=.004	.6091 (392) P=.000

	T14MAX	T14MIN	RTN024	PIO010	PIO024	INV010
V14010	-.3037 (444) P=.000	-.1631 (444) P=.001	.1997 (443) P=.000	.0655 (444) P=.168	.0375 (444) P=.430	-.4490 (441) P=.000
V14024	-.2360 (443) P=.000	-.0966 (443) P=.042	.2319 (443) P=.000	.0359 (443) P=.451	.0066 (443) P=.890	-.5008 (440) P=.000
V14820	-.1869 (443) P=.000	-.0402 (443) P=.399	.2288 (443) P=.000	.0387 (443) P=.417	.0120 (443) P=.801	-.5203 (440) P=.000
V15010	-.2844 (433) P=.000	-.0427 (433) P=.376	.1276 (432) P=.008	.0467 (433) P=.333	.0109 (433) P=.821	-.4739 (433) P=.000
V15820	-.2715 (428) P=.000	-.0401 (428) P=.408	.0951 (428) P=.049	.0488 (428) P=.314	.0117 (428) P=.809	-.4128 (428) P=.000
TRM024	.1969 (445) P=.000	.0482 (445) P=.310	.2094 (435) P=.000	-.1687 (445) P=.000	-.2125 (445) P=.000	.0508 (442) P=.287
TRM10H	.1428 (444) P=.003	.0461 (444) P=.332	.1507 (434) P=.002	-.1480 (444) P=.002	-.1973 (444) P=.000	.0042 (441) P=.929
TRM8H	.1277 (444) P=.007	.0539 (444) P=.257	.1083 (434) P=.024	-.0970 (444) P=.041	-.1268 (444) P=.007	-.0373 (441) P=.435
T14010	.6757 (453) P=.000	.9492 (453) P=.000	-.3241 (443) P=.000	.2313 (453) P=.000	.2111 (453) P=.000	-.4198 (450) P=.000
T14MAX	1.0000 (453) P=.	.6447 (453) P=.000	.1439 (443) P=.002	-.0127 (453) P=.788	-.0391 (453) P=.406	.1152 (450) P=.014

	T14MAX	T14MIN	RTN024	PIO010	PIO024	INV010
T14MIN	.6447 (453) P=.000	1.0000 (453) P=.	-.3779 (443) P=.000	.1766 (453) P=.000	.1690 (453) P=.000	-.3613 (450) P=.000
RTN024	.1439 (443) P=.002	-.3779 (443) P=.000	1.0000 (443) P=.	-.2937 (443) P=.000	-.3862 (443) P=.000	.1835 (440) P=.000
PIO010	-.0127 (453) P=.788	.1766 (453) P=.000	-.2937 (443) P=.000	1.0000 (453) P=.	.7430 (453) P=.000	-.2141 (450) P=.000
PIO024	-.0391 (453) P=.406	.1690 (453) P=.000	-.3862 (443) P=.000	.7430 (453) P=.000	1.0000 (453) P=.	-.1837 (450) P=.000
INV010	.1152 (450) P=.014	-.3613 (450) P=.000	.1835 (440) P=.000	-.2141 (450) P=.000	-.1837 (450) P=.000	1.0000 (450) P=.
INV10H	.0298 (445) P=.530	-.4706 (445) P=.000	.4069 (435) P=.000	-.2385 (445) P=.000	-.2083 (445) P=.000	.8433 (445) P=.000
INV820	-.0463 (446) P=.329	-.4636 (446) P=.000	.3197 (437) P=.000	-.2307 (446) P=.000	-.1901 (446) P=.000	.8268 (446) P=.000
INVPGP	-.0441 (449) P=.351	-.1649 (449) P=.000	-.0935 (439) P=.050	-.0321 (449) P=.498	-.0627 (449) P=.185	.6653 (449) P=.000
INVT	.0586 (449) P=.215	-.3091 (449) P=.000	.0836 (439) P=.080	-.1563 (449) P=.001	-.1493 (449) P=.002	.9476 (449) P=.000
NOB010	.0530 (444) P=.265	-.0974 (444) P=.040	-.1175 (434) P=.014	-.1905 (444) P=.000	-.1646 (444) P=.000	.6600 (441) P=.000

	T14MAX	T14MIN	RTN024	PIO010	PIO024	INV010
NON010	.0409	-.0586	-.1417	-.1790	-.1572	.5842
	(436)	(436)	(426)	(436)	(436)	(433)
	P=.394	P=.222	P=.003	P=.000	P=.001	P=.000
NOMB5H	.0114	.0077	-.1919	-.1517	-.1310	.4381
	(451)	(451)	(441)	(451)	(451)	(448)
	P=.808	P=.871	P=.000	P=.001	P=.005	P=.000
NOP010	-.0002	-.0622	-.1931	-.1376	-.1473	.6011
	(396)	(396)	(386)	(396)	(396)	(393)
	P=.997	P=.217	P=.000	P=.006	P=.003	P=.000

	INV10H	INV820	INVPGP	INVT	NOB010	NON010	NOMB5H	NOP010
NO2AB	.5725	.6336	.5495	.6801	.6255	.5910	.4415	.6432
	(443)	(444)	(448)	(447)	(443)	(436)	(450)	(395)
	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000
COAC	.3429	.4308	.4480	.4807	.5441	.5424	.3949	.5576
	(445)	(446)	(450)	(449)	(445)	(437)	(452)	(397)
	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000
NO2P	.5019	.5528	.5548	.6414	.6199	.5729	.4731	.6833
	(390)	(389)	(392)	(391)	(389)	(379)	(396)	(396)
	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000
V14010	-.2757	-.3021	-.3599	-.4509	-.5432	-.5606	-.4620	-.4783
	(436)	(438)	(440)	(440)	(435)	(427)	(442)	(387)
	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000
V14024	-.3779	-.4302	-.4054	-.5047	-.5462	-.5426	-.4423	-.5483
	(435)	(437)	(439)	(439)	(434)	(426)	(441)	(386)
	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000
V14820	-.4209	-.4688	-.4058	-.5179	-.5372	-.5212	-.4163	-.5498
	(435)	(437)	(439)	(439)	(434)	(426)	(441)	(386)
	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000	P=.000

	INV10H	INV820	INVPGP	INVT	NOB010	NON010	NOMB5H	NOP010
V15010	-.3237 (428) P=.000	-.3653 (430) P=.000	-.3401 (433) P=.000	-.4580 (432) P=.000	-.4798 (425) P=.000	-.4481 (419) P=.000	-.3459 (432) P=.000	-.4450 (379) P=.000
V15820	-.3440 (425) P=.000	-.3891 (428) P=.000	-.2999 (428) P=.000	-.4025 (427) P=.000	-.4184 (420) P=.000	-.3934 (414) P=.000	-.2927 (427) P=.000	-.4021 (375) P=.000
TRM024	-.0001 (437) P=.999	-.0063 (438) P=.895	-.0849 (442) P=.075	-.0033 (441) P=.946	-.0659 (437) P=.169	.1010 (429) P=.036	-.0303 (444) P=.524	-.0524 (389) P=.303
TRM10H	-.0513 (436) P=.285	-.0303 (437) P=.528	-.0803 (441) P=.092	-.0304 (440) P=.525	.0105 (436) P=.827	.1289 (428) P=.008	-.0292 (443) P=.540	.0456 (388) P=.370
TRM8H	-.0850 (436) P=.076	-.0753 (437) P=.116	-.0514 (441) P=.282	-.0450 (440) P=.347	.0387 (436) P=.421	.1305 (428) P=.007	-.0398 (443) P=.403	.1071 (388) P=.035
T14010	-.4949 (445) P=.000	-.5042 (446) P=.000	-.2340 (449) P=.000	-.3773 (449) P=.000	-.1778 (444) P=.000	-.1343 (436) P=.005	-.0603 (451) P=.201	-.1520 (396) P=.002
T14MAX	.0298 (445) P=.530	-.0463 (446) P=.329	-.0441 (449) P=.351	.0586 (449) P=.215	.0530 (444) P=.265	.0409 (436) P=.394	.0114 (451) P=.808	-.0002 (396) P=.997
T14MIN	-.4706 (445) P=.000	-.4636 (446) P=.000	-.1649 (449) P=.000	-.3091 (449) P=.000	-.0974 (444) P=.040	-.0586 (436) P=.222	.0077 (451) P=.871	-.0622 (396) P=.217
RTN024	.4069 (435) P=.000	.3197 (437) P=.000	-.0935 (439) P=.050	.0836 (439) P=.080	-.1175 (434) P=.014	-.1417 (426) P=.003	-.1919 (441) P=.000	-.1931 (386) P=.000
PIO010	-.2385 (445) P=.000	-.2307 (446) P=.000	-.0321 (449) P=.498	-.1563 (449) P=.001	-.1905 (444) P=.000	-.1790 (436) P=.000	-.1517 (451) P=.001	-.1376 (396) P=.006

	INV10H	INV820	INVPGP	INVT	NOB010	NON010	NOMB5H	NOP010
PIO024	-.2083 (445) P=.000	-.1901 (446) P=.000	-.0627 (449) P=.185	-.1493 (449) P=.002	-.1646 (444) P=.000	-.1572 (436) P=.001	-.1310 (451) P=.005	-.1473 (396) P=.003
INV010	.8433 (445) P=.000	.8268 (446) P=.000	.6653 (449) P=.000	.9476 (449) P=.000	.6600 (441) P=.000	.5842 (433) P=.000	.4381 (448) P=.000	.6011 (393) P=.000
INV10H	1.0000 (445) P=.	.9004 (443) P=.000	.4738 (444) P=.000	.7608 (444) P=.000	.5011 (436) P=.000	.4190 (428) P=.000	.2900 (443) P=.000	.4412 (391) P=.000
INV820	.9004 (443) P=.000	1.0000 (446) P=.	.5727 (445) P=.000	.7916 (445) P=.000	.5501 (437) P=.000	.4895 (429) P=.000	.3835 (444) P=.000	.5190 (390) P=.000
INVPGP	.4738 (444) P=.000	.5727 (445) P=.000	1.0000 (450) P=.	.8690 (449) P=.000	.6554 (441) P=.000	.6480 (433) P=.000	.5723 (448) P=.000	.7039 (393) P=.000
INVT	.7608 (444) P=.000	.7916 (445) P=.000	.8690 (449) P=.000	1.0000 (449) P=.	.7164 (440) P=.000	.6635 (432) P=.000	.5345 (447) P=.000	.6982 (392) P=.000
NOB010	.5011 (436) P=.000	.5501 (437) P=.000	.6554 (441) P=.000	.7164 (440) P=.000	1.0000 (445) P=.	.7953 (428) P=.000	.8267 (443) P=.000	.8217 (390) P=.000
NON010	.4190 (428) P=.000	.4895 (429) P=.000	.6480 (433) P=.000	.6635 (432) P=.000	.7953 (428) P=.000	1.0000 (437) P=.	.8543 (435) P=.000	.7819 (380) P=.000
NOMB5H	.2900 (443) P=.000	.3835 (444) P=.000	.5723 (448) P=.000	.5345 (447) P=.000	.8267 (443) P=.000	.8543 (435) P=.000	1.0000 (452) P=.	.7081 (397) P=.000
NOP010	.4412 (391) P=.000	.5190 (390) P=.000	.7039 (393) P=.000	.6982 (392) P=.000	.8217 (390) P=.000	.7819 (380) P=.000	.7081 (397) P=.000	1.0000 (397) P=.

Appendice 6

Persistenza fra i valori della velocità del vento nella mattina e nel periodo diurno

Nei modelli e nelle analisi presentate in questo lavoro le necessità operative hanno indirizzato verso l'impiego di variabili meteorologiche che risultassero disponibili entro le ore 10 del mattino, anche se il superamento dei livelli di legge avviene solitamente diverse ore dopo ed è quindi influenzato dalle condizioni meteorologiche presenti nelle ore successive alle 10.

Gli incoraggianti risultati ottenuti dai modelli predittivi indicano indirettamente che deve sussistere un legame statistico piuttosto stretto fra i valori delle diverse grandezze meteorologiche entro le ore 10 e quelle nelle ore successive, ed in particolare questa relazione deve essere ben definita nei casi che portano ad elevate concentrazioni degli inquinanti.

In questa Appendice viene confrontato il comportamento della velocità del vento, in intensità e direzione, nei valori relativi alle prime 10 ore del giorno ed al periodo diurno ($8 \div 20$) per entrambe le stazioni della rete di monitoraggio (Ximeniano e Monte Morello).

Nella Tabella A6.I viene riportata la distribuzione degli eventi dell'intero campione ($1993 \div 96$) rispetto alle direzioni prevalenti del vento nella stazione di Monte Morello. I valori marginali (riga e colonna relative ai totali) mostrano come per quanto riguarda le prime ore del giorno (D15010) risultino preponderanti le condizioni di variabilità (VAR) con ben il 50% del numero complessivo di eventi, mentre nelle ore successive (D15820) questa situazione, che risulta comunque maggioritaria (129 eventi pari al 30% dell'intero campione), viene in parte ridimensionata con l'apparire di direzioni ben definite. Fra queste si evidenzia quella meridionale (dei 214 eventi corrispondenti a VAR nelle prime 10 ore del giorno 93, pari al 43%, si mantengono in questa classe anche nelle successive ore diurne, mentre 64, pari al 30%, si mutano in venti provenienti da S) che corrisponde sia ad una circolazione sinottica di tipo ciclonico, sia a situazioni di stabilità cui sono associati venti di brezza, che per la particolare posizione della stazione si manifestano con direzioni meridionali (brezza di valle). Nel complesso oltre all'assenza sostanziale di certi quadranti (W, NW) si osserva che per più del 50% dei casi le direzioni prevalenti nelle prime ore del giorno risultano tali anche nel periodo

diurno; si ha così una persistenza nella direzione del vento in almeno un caso su due. Altro elemento importante che può essere osservato è costituito dalla persistenza mostrata dai venti di provenienza settentrionale (N e NE) in presenza dei quali generalmente vengono garantiti valori modesti di concentrazione degli inquinanti¹: nel 63% dei giorni con direzione prevalente diurna appartenente a questi due settori, tale direzione risultava già prevalente nelle ore precedenti.

Tabella A6.I: distribuzione di frequenze di eventi per la direzione prevalente del vento (stazione Monte Morello).

	D15820									
D15010	VAR	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totale
VAR	93	12	24	1	7	64	12		1	214
N	6	19	3		1	2				31
NE	6	5	47	1			3			62
E	2			2	2		1			7
SE	3		1		15	4	1			24
S	13	2	1		1	46	7			70
SW	5		3			2	5			15
W			1					1		2
NW	1								1	2
Totale	129	38	80	4	26	118	29	1	2	427

In Tabella A6.II la precedente analisi viene ripetuta per le direzioni del vento registrate nella stazione di Firenze-Ximeniano posta al centro della città.

In questo caso si osserva una minore corrispondenza fra le direzioni prevalenti registrate nei due intervalli temporali. Diversamente da quanto visto nel caso precedente, qui nelle prime ore del giorno sono presenti due situazioni con frequenze marginali più elevate e allineate: ancora la situazione di variabilità cioè assenza di prevalenza (VAR con 148 eventi pari al

1. Per la distribuzione degli episodi acuti rispetto alle diverse direzioni del vento si veda il paragrafo 3.1.1 lettera c).

33%) e inoltre la direzione SE con ben 160 eventi (pari al 36%). Nelle ore diurne le situazioni non definite (VAR) si mantengono maggioritarie (131 casi pari al 30%) mentre la direzione SE risulta ridimensionata ed appare come ben più rilevante la direzione NE con 110 casi pari al 25% dell'intero campione.

Questo porta sostanzialmente ad una minore persistenza, con una corrispondenza del 37% tra le direzioni dei due periodi.

Tabella A6.II: distribuzione di frequenze di eventi per la direzione prevalente del vento (stazione Ximeniano).

	D14820									
D14010	VAR	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totale
VAR	52	10	29	9	10	3	12	22	1	148
N	1	2	10					1		14
NE	3	10	49	1				2		65
E	6		9	13		1		1		30
SE	65	1	13	11	38	1	2	29		160
S	2				1	4	2	2		10
SW	1		3			2	4	1		8
W	1			2			1	4		8
NW										0
Totale	131	23	110	36	48	11	21	62	1	443

Nella Tabella A6.III sono confrontate le frequenze degli eventi per classi di velocità del vento² registrate nella stazione di Monte Morello. Sia per i valori relativi nelle prime ore del giorno che per quelli rilevati nel periodo diurno la classe di maggiore frequenza relativa risulta quella associata alle velocità del vento più elevate (3) con valori marginali rispettivamente del 43% e del 44%. Nel complesso la persistenza fra le classi di velocità nei due intervalli temporali risulta del 56%. In dettaglio si osserva che il 78% dei casi con velocità in classe 3 nella mattina si mantengono nella stessa classe anche nel periodo diurno, mentre per la classe a velocità più bassa

2. Per la definizione delle classi di velocità si veda l'Appendice 2.

(0) questo avviene in una percentuale del 43%, anche se ben il 49% di questi eventi si sposta nella classe 1 adiacente, e soltanto l'8% corrisponde alle classi di velocità più elevate.

Tabella A6.III: numero di eventi per classi di velocità del vento (Monte Morello).

	V15820				
V15010	0	1	2	3	Totale
0	47	53	4	5	109
1	6	42	28	15	91
2	0	12	9	25	46
3	0	13	27	143	183
Totale	53	120	68	188	429

Tabella A6.IV: numero di eventi per classi di velocità del vento (Ximeniano).

	V14820				
V14010	0	1	2	3	Totale
0	18	26	6	1	51
1	15	109	59	30	213
2	1	24	32	43	100
3	0	2	7	70	79
Totale	34	161	104	144	443

Infine in Tabella A6.IV sono riportate le frequenze degli eventi nelle classi di velocità del vento per la stazione Ximeniano.

Nelle prime ore del giorno in questo caso è la classe 1 che presenta la maggior frequenza relativa con una percentuale del 48% degli eventi, mentre nel periodo diurno ad essa (con il 36%) si affianca la classe 3 con il 33%.

Per circa il 52% dei giorni si ha persistenza della classe di velocità fra il mattino ed il periodo diurno, con percentuali del 53% per la classe 0, del 68% per la 1, 31% per la 2 e 49% per la classe 3.