

Fondazione per la Meteorologia Applicata

INTERREG II - Misura 3.1.b1
Monitoraggio ambientale della
Provincia di Livorno

PROVINCIA DI LIVORNO

INTERREG II - Misura 3.1.b1
Monitoraggio ambientale della
Provincia di Livorno

Autori

Dott.sa Francesca Calastrini

Ing. Giovanni Gualtieri

Ing. Paolo Guarnieri

Direttore Scientifico

Dott. Gaetano Zipoli

30 giugno 2000

Indice

Premessa	3
Ringraziamenti	3
Introduzione	4
1. Descrizione delle attività	5
1.1 Metodologie statistiche	5
1.2 Elaborazioni modellistiche	5
1.3 Previsioni meteorologiche	6
2. Specifiche di riferimento	7
2.1 Aree di studio	7
2.2 Stazioni meteorologiche	8
3. Analisi statistica preliminare	10
3.1 Livorno	11
3.1.1 <i>Elaborazione delle variabili meteorologiche</i>	11
3.1.2 <i>Elaborazione dei valori di concentrazione degli inquinanti</i>	16
SO ₂	22
NO - NO ₂	25
CO	25
3.2 Piombino	29
3.2.1 <i>Elaborazione delle variabili meteorologiche</i>	29
3.2.2 <i>Elaborazione dei valori di concentrazione degli inquinanti</i>	33
SO ₂	39
NO - NO ₂	43
4. Analisi dei regimi anemologici	47
4.1 Analisi dei regimi anemologici nell'area di Livorno	48
4.1.1 <i>Andamento estivo</i>	48
4.1.2 <i>Andamento invernale</i>	51
4.1.3 <i>Considerazioni sugli andamenti</i>	53
4.2 Analisi dei regimi anemologici nell'area di Piombino	54
4.2.1 <i>Andamento estivo - Massa Marittima</i>	54
4.2.2 <i>Andamento invernale - Massa Marittima</i>	58
4.2.3 <i>Considerazioni sugli andamenti</i>	60
4.2.4 <i>Andamento invernale - Torre del Sale</i>	61
4.2.5 <i>Considerazioni sugli andamenti</i>	64
5. Modellistica meteorologica	65
5.1 Metodologia generale	65
5.2 Dati territoriali	65
5.3 Definizione degli scenari meteorologici	69
5.4 Applicazione della modellistica meteorologica (MINERVE)	80
6. Modellistica diffusionale	100
6.1 Schema funzionale	100
6.2 Dati di emissione	101



6.3 Applicazione del modello SPRAY	105
6.3.1 Concentrazioni di SO_x nell'area di Livorno	105
6.3.2 Concentrazioni di SO_x nell'area di Piombino	113
6.4 Applicazione del modello HERMES	121
6.4.1 Concentrazioni di SO_x nell'area di Livorno	121
6.4.2 Concentrazioni di SO_x nell'area di Piombino	129
7. Previsioni meteorologiche	137
Conclusioni	146

Premessa

Nell'ambito del progetto **INTERREG II, Misura 3.1.b1 - Monitoraggio ambientale**, è stato affidato a *Fondazione per la Meteorologia Applicata* (soggetto attuatore del progetto *LaMMA* della *Regione Toscana*) l'incarico di studiare e realizzare un sistema integrato per il monitoraggio della qualità dell'aria nella provincia di Livorno. In tal senso è stata sviluppata una collaborazione tra *Provincia di Livorno - ARPAT* da una parte, e il laboratorio *LaMMA* della *Regione Toscana* dall'altra. Il presente lavoro si propone di fornire un'esauriente descrizione delle attività svolte dal laboratorio *LaMMA*, finalizzate allo studio della climatologia, nonché delle dinamiche di diffusione degli inquinanti nel territorio della provincia di Livorno.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato reso possibile grazie all'apporto ed alla collaborazione del personale di vari Enti, che qui intendiamo ringraziare.

Per la fornitura dei dati:

il Dott. F. Forni della *Regione Toscana*;

il Dott. L. Fibbi del CNR-IATA.

Per l'apporto scientifico:

la Dott.sa A. Capanni.



Introduzione

Il presente lavoro si propone di fornire un'adeguata caratterizzazione del regime meteorologico e delle dinamiche di dispersione degli inquinanti nelle aree geografiche comprendenti i comuni di Livorno, Collesalveti, Rosignano Marittimo e Piombino.

Per lo studio climatologico sono state prese in esame le serie storiche di alcune variabili meteorologiche rilevate da stazioni a terra nelle aree in esame. Tali dati sono stati elaborati sia con tecniche di analisi statistica convenzionali, sia utilizzati come *input* per elaborazioni modellistiche. In particolare, è stato ricostruito il regime di vento e di temperatura caratteristico dei siti con il modello meteorologico MINERVE, in due condizioni climatologiche tipiche.

Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico, lo studio si articola in due parti: un primo approccio di tipo statistico, in cui si evidenziano correlazioni con condizioni meteo-climatiche ricorrenti, propedeutico alla seconda parte di elaborato, relativa alla ricostruzione di scenari tipici di diffusione degli inquinanti. Nel dettaglio, sono stati utilizzati due modelli diffusionali, uno di tipo lagrangiano, SPRAY, l'altro di tipo euleriano, HERMES.

Come ultimo punto è descritta la procedura automatica con cui vengono effettuate quotidianamente le previsioni dei campi di vento e di temperatura nelle due aree di Livorno e di Piombino.

1. Descrizione delle attività

In quanto segue sono esposte le attività svolte nell'ambito della collaborazione tra *LaMMA* e *Provincia di Livorno - ARPAT* in merito al monitoraggio ambientale della provincia di Livorno.

In particolare, tali attività si articolano in tre sezioni principali.

La prima sezione, relativa all'approccio statistico, riguarda sia lo studio climatologico basato su dati rilevati da stazioni meteorologiche al suolo, sia l'analisi dei valori di inquinanti atmosferici misurati da centraline di monitoraggio ambientale (capitoli 3 e 4).

La seconda sezione riguarda le elaborazioni modellistiche: lo studio dei campi di vento e di temperatura con il modello meteorologico MINERVE è stato svolto per condizioni climatologiche caratteristiche delle aree di interesse e si basa anch'esso sui dati rilevati da stazioni al suolo. La parte relativa alla diffusione degli inquinanti è stata effettuata utilizzando due diversi approcci modellistici, uno lagrangiano (SPRAY), l'altro euleriano (HERMES), entrambi basati sui risultati ottenuti dallo studio dei campi di vento realizzati con il modello meteorologico; i dati di *input* per la valutazione dell'impatto ambientale di alcuni inquinanti atmosferici derivano dall'inventario delle emissioni fornito dalla *Regione Toscana* (capitoli 5 e 6).

L'ultima sezione riguarda la descrizione della procedura automatica messa a punto per realizzare previsioni dei campi di vento e di temperatura nei siti di interesse: il servizio, in via sperimentale, verrà attivato nei prossimi mesi (capitolo 7).

Di seguito si riporta la descrizione dettagliata delle singole attività svolte.

1.1 Metodologie statistiche

In riferimento a quanto concordato nella proposta di collaborazione tra *LaMMA* e *Provincia di Livorno - ARPAT*, ed in particolare al punto 3. *Studio statistico sugli episodi acuti di inquinamento*, è stato effettuato un lavoro di analisi, facendo ricorso sia a metodologie statistiche convenzionali che innovative, mirato ad elaborare le serie storiche di dati relativi a variabili meteorologiche ed a valori di concentrazione di inquinanti atmosferici.

In prima istanza è stato effettuato uno *screening* dei dati relativi ai parametri meteorologici, in modo da scegliere le stazioni con le caratteristiche ottimali (posizione geografica, caratteristiche dei sensori, etc.) per i successivi elaborati.

Sono poi state analizzate le serie storiche dei dati meteorologici e di concentrazione degli inquinanti per individuare gli intervalli temporali su cui effettuare le successive analisi. Con tecniche di tipo tradizionale (elaborazione del "giorno medio") è stata data una prima valutazione sulle caratteristiche peculiari di alcuni inquinanti (capitolo 3).

Correlazioni tra i dati acquisiti dalle stazioni meteorologiche e i dati rilevati dalle centraline di monitoraggio ambientale sono state evidenziate per mezzo della "*cluster analysis*": un breve cenno a questa tecnica statistica e ai risultati ottenuti elaborando i dati di stazioni rappresentative per la città di Livorno e la città di Piombino sono esposti nel capitolo 4.

1.2 Elaborazioni modellistiche

Riferendosi al punto 1.A *Osservazioni* della proposta di collaborazione precedentemente citata, attraverso l'applicazione del modello meteorologico MINERVE è stata effettuata la simulazione dell'andamento delle principali variabili atmosferiche, tenendo conto dell'orografia e dell'uso del suolo. Il modello opera infatti a partire da informazioni territoriali (DTM e matrice di rugosità) e da dati meteorologici acquisiti da sensori di vario genere (in questo caso, stazioni a terra appositamente selezionate), ed è in grado di ricostruire tridimensionalmente il campo di vento e di temperatura. Il suo impiego appare quindi fondamentale per applicazioni mirate ad individuare il regime anemologico ad una data quota ed i profili verticali di temperatura.

In particolare, lo studio dei campi di vento e di temperatura è stato svolto per due casi, il "giorno tipico" e il "giorno peggiore", con cui si intende evidenziare l'andamento del regime anemologico nella condizione più ricorrente e nel caso in cui si presentano condizioni meno favorevoli alla diffusione degli inquinanti. I due giorni sono stati ricostruiti attraverso un procedimento statistico, illustrato dettagliatamente nel capitolo 5, che fa ricorso alla *cluster analysis*.

I campi di vento così determinati sono poi stati utilizzati come *input* per inizializzare i modelli diffusionali SPRAY ed HERMES, con i quali è stata svolta la caratterizzazione dello stato della qualità dell'aria conseguente all'immissione in atmosfera di inquinanti derivanti dalle principali sorgenti presenti nelle due aree di studio. Come già segnalato, i dati relativi alle concentrazioni di sostanze inquinanti derivano dall'inventario delle emissioni dell'anno 1995, fornito dalla *Regione Toscana*. Attraverso l'utilizzo di tali modelli è stato possibile individuare l'evoluzione temporale dei pennacchi inquinanti e visualizzare le relative mappe di isoconcentrazione, come stabilito al punto 2. *Qualità dell'aria: diffusione di gas inquinanti* del documento più volte citato.

I risultati di questa sezione del lavoro sono ampiamente illustrati nei capitoli 5 e 6.

1.3 Previsioni meteorologiche

Come previsto al punto *1.B Previsioni*, il Laboratorio ha sviluppato la procedura necessaria alla realizzazione quotidiana di previsioni meteorologiche nelle due aree di interesse. In particolare, vengono elaborati i campi di vento e di temperatura previsti fino a 72 ore (cioè per il giorno corrente, per il giorno successivo e per due giorni successivi), con cadenza trioraria. Tali campi sono visualizzati come immagini GIF e consultabili sul sito internet del *LaMMA*: il servizio, in via sperimentale, sarà operativo nel prossimo futuro.

A titolo di esempio, nel capitolo 7, dopo una breve descrizione delle funzioni espletate dalla procedura automatica, sono riportate le immagini GIF di alcuni campi previsti nelle due aree centrate su Livorno e su Piombino.

2. Specifiche di riferimento

2.1 Aree di studio

Il presente lavoro è incentrato sulle aree geografiche comprendenti i comuni di Livorno, Collesalveti, Rosignano Marittimo e Piombino. Per le particolari scale spaziali necessarie per lo sviluppo delle problematiche in esame, tuttavia, non si potrà prescindere dal considerare come riferimento un dominio spaziale più ampio, comprendente anche aree interne alle province di Pisa e Grosseto, ed interessando allo stesso tempo l'interazione terra-mare. In particolare, l'intero studio è stato suddiviso in due sezioni, facenti capo ad altrettanti domini spaziali di riferimento, il primo centrato sull'area di Livorno, il secondo sull'area di Piombino.

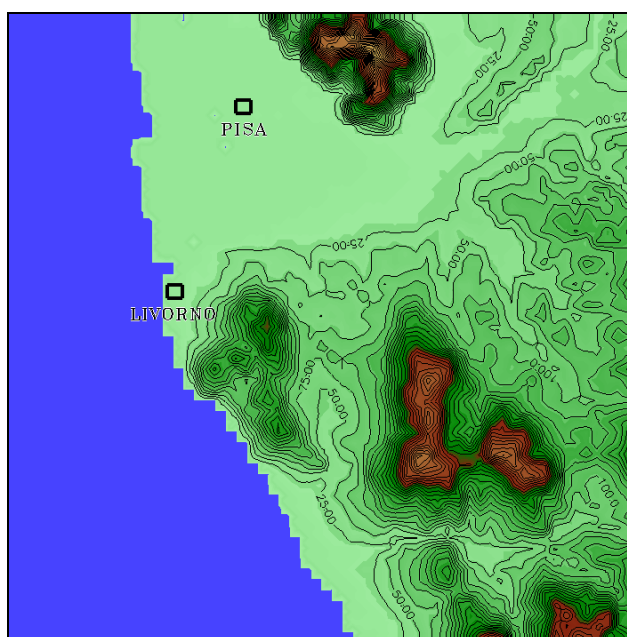


Fig. 1 – Rappresentazione del dominio di calcolo relativo all'area geografica centrata sulla città di Livorno.

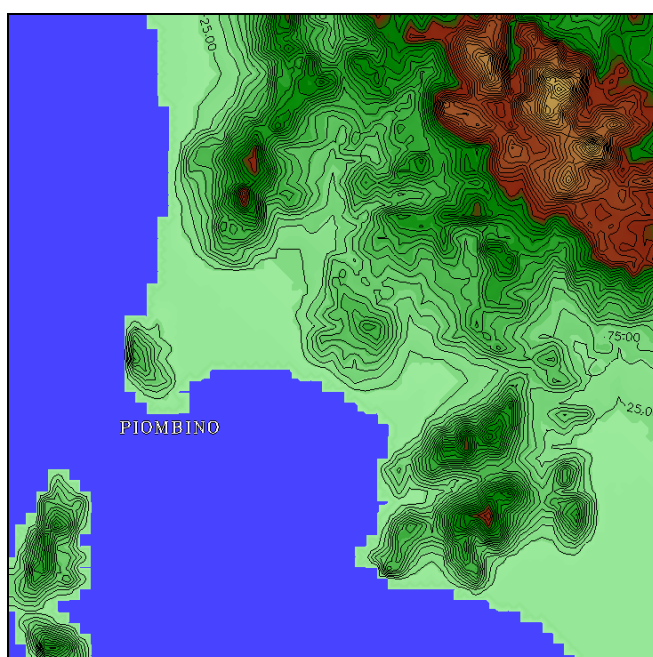


Fig. 2 – Rappresentazione del dominio di calcolo relativo all'area geografica centrata sulla città di Piombino.

Ognuno dei due domini spaziali presenta un'estensione complessiva di 60x60 Km².

In Fig. 1 e Fig. 2 sono presentati, rispettivamente, i domini di calcolo relativi all'area di Livorno e a quella di Piombino. Nelle stesse figure è inoltre raffigurata l'orografia del terreno attraverso delle curve di livello di passo pari a 25 m.

2.2 Stazioni meteorologiche

In Fig. 3 è mostrata la mappa delle reti meteorologiche operanti sul territorio dell'area di Livorno. Da essa appare evidente la molteplicità delle reti coinvolte, molteplicità che si traduce tuttavia in una notevole frammentarietà, che si riflette poi sulle metodologie di acquisizione e campionamento dei dati. Un primo *screening* dei dati a disposizione ha infatti posto in luce come solo per alcune di tali stazioni si avesse disponibilità di dati affidabili, oltretutto con cadenza oraria, per un congruo periodo di tempo. Per le modalità stesse delle elaborazioni necessarie sia nell'approccio statistico che in quello modellistico, inoltre, requisito fondamentale dei dati a disposizione è la loro sovrapposibilità temporale, il che ha costituito un ulteriore elemento di scrematura delle stazioni da considerare nell'analisi.

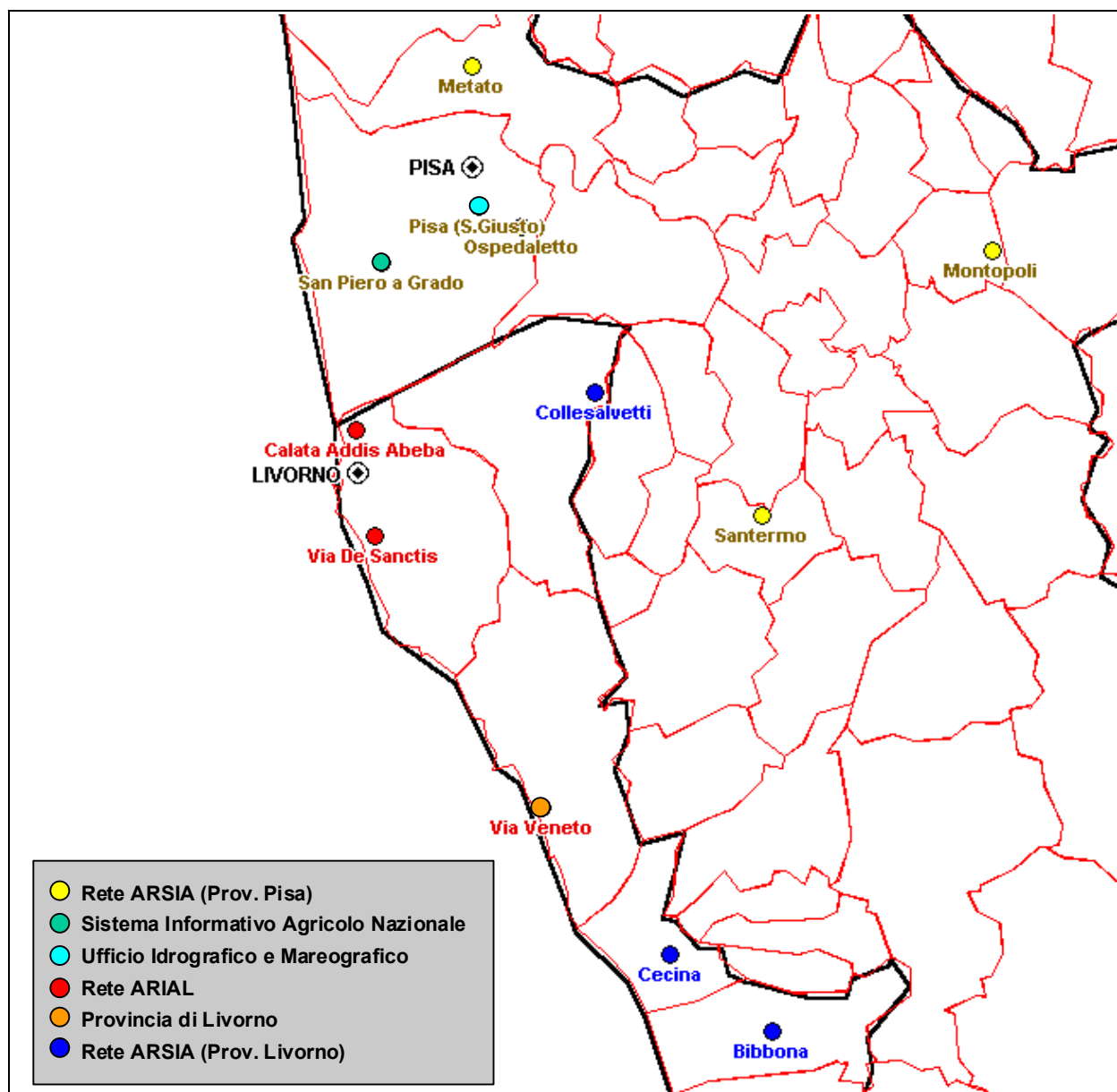


Fig. 3 – Mappa delle diverse reti meteorologiche operanti sul territorio dell'area di Livorno.

Meno frammentario è il quadro delle stazioni meteorologiche operanti nell'area di Piombino (Fig. 4), dove tuttavia si presenta il problema opposto, cioè la sostanziale scarsità di postazioni utili per il monitoraggio meteorologico.

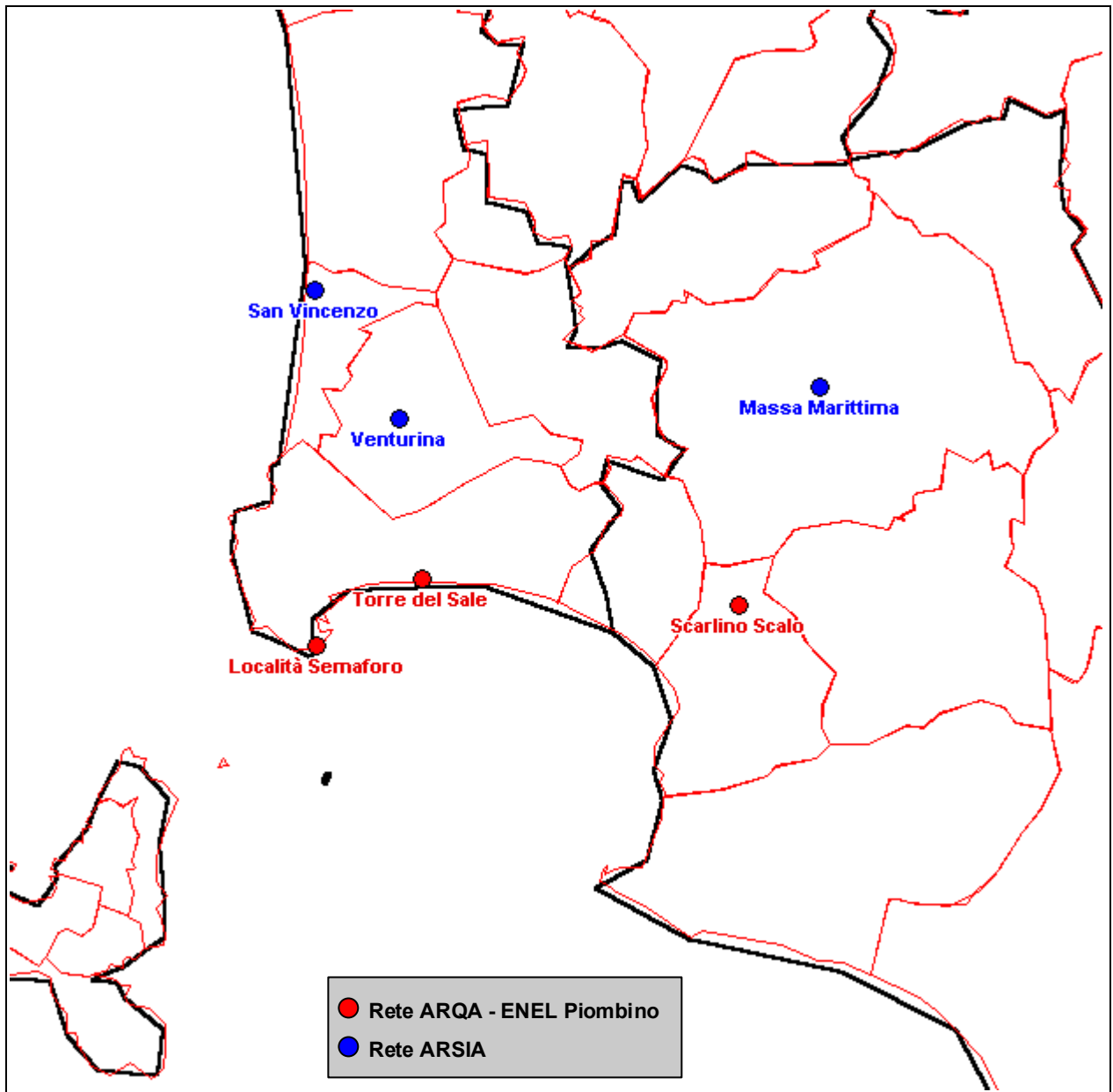


Fig. 4 – Mappa delle diverse reti meteorologiche operanti sul territorio dell'area di Piombino.

3. Analisi statistica preliminare

Nella presente sezione del lavoro viene illustrata l'analisi preliminare effettuata sui dati relativi sia alle stazioni meteorologiche che alle stazioni chimiche.

In primo luogo sono stati reperiti i dati relativi ad un intervallo temporale sufficiente per effettuare le analisi statistiche: l'operazione si è rivelata particolarmente difficoltosa, dato che la struttura delle reti di rilevamento degli inquinanti è molto articolata nel territorio preso in esame. Anche per quanto riguarda i dati relativi ai parametri meteorologici (§ 2.2) la situazione non è migliore: le numerose stazioni presenti nell'area non sono in molti casi conformi alle caratteristiche necessarie per fornire dati utili ai fini di studi statistici e modellistici. Le reti di stazioni appartengono, come abbiamo visto, a svariati enti, e quindi il metodo di campionamento, di archiviazione, il formato dei dati differiscono in modo evidente da stazione a stazione, aggiungendo ulteriori difficoltà ad una già problematica situazione.

In questo contesto, elaborazioni preliminari anche semplici si sono rese necessarie per una sorta di verifica sulla qualità dei dati acquisiti. Ad esempio, in alcuni casi, anche la semplice visualizzazione grafica delle serie storiche può dare delle indicazioni circa la qualità dei dati e consentire di effettuare le successive elaborazioni solo su intervalli temporali in cui questi siano affidabili.

Sui dati selezionati sono poi state eseguite elaborazioni statistiche di tipo classico, per evidenziare sia le correlazioni tra i valori dei parametri meteorologici (ad esempio, la velocità del vento) e le concentrazioni misurate dalle centraline chimiche, sia per segnalare eventuali andamenti simili nei valori degli inquinanti registrati nei diversi siti.

Un utile metodo per osservare l'andamento delle concentrazioni degli inquinanti o della velocità del vento è quello di calcolare, per ogni ora del giorno, la media delle rilevazioni nel corso dell'intervallo temporale preso in esame, ottenendo così il "giorno medio". Per mettere in evidenza il comportamento periodico stagionale, sono stati calcolati il "giorno medio" invernale (dal 1° dicembre al 28 febbraio), primaverile (dal 1° marzo al 31 maggio), estivo (dal 1° giugno al 31 agosto), autunnale (dal 1° settembre al 30 novembre).

Data la notevole quantità di dati elaborati, sono state realizzate, per il sito di Livorno e per quello di Piombino, delle tabelle riassuntive che indicano le stazioni prese in esame, i parametri analizzati, le elaborazioni effettuate e i relativi intervalli temporali. Sono infine riportati gli istogrammi relativi alle serie storiche dei vari inquinanti e i grafici relativi al giorno medio stagionale, sia per alcuni parametri meteorologici (velocità del vento), che per i valori di concentrazione degli inquinanti.

3.1 Livorno

3.1.1 Elaborazione delle variabili meteorologiche

Le stazioni meteorologiche utilizzate per questo lavoro sono la stazione Labromare della rete *ARIAL*, localizzata presso il porto industriale di Livorno, la stazione di *ARSIA* collocata a Cecina, la stazione di San Piero a Grado (Provincia di Pisa) di *UCEA*.

Di seguito sono riportate due tabelle in cui sono riassunte le principali caratteristiche delle tre stazioni: le coordinate geografiche e la quota sul livello del mare, i parametri meteorologici misurati, l'altezza dell'anemometro dal suolo, l'intervallo temporale preso in esame.

Tab. 1 – Riassunto delle caratteristiche delle stazioni meteorologiche utilizzate.

<i>Stazione</i>	<i>Ente di appartenenza</i>	<i>Località</i>	<i>Latitudine</i>	<i>Longitudine</i>	<i>Altezza s.l.m. (m)</i>
Labromare	ARIAL	Livorno	4.825.888	606.023	0
Cecina	ARSIA	Cecina	4.802.485	625.589	58
San Piero	UCEA	San Piero a Grado	4.835.499	607.499	3

Tab. 2 – Riassunto delle variabili meteorologiche utilizzate.

<i>Stazione</i>	<i>Periodo coperto</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Velocità vento</i>	<i>Direzione vento</i>	<i>Altezza sensore (m)</i>
Labromare	01/01/96-31/12/97	NO	SI	SI	8
Cecina	01/01/96-22/12/97	SI	SI	SI	3
San Piero	01/01/96-28/02/96 01/12/96-28/02/97 01/12/97-31/12/97	SI	SI	SI	10

Due degli anemometri non sono a 10 m sul livello del suolo: ciò rappresenterebbe un problema per le elaborazioni statistiche, in quanto per ottenere risultati significativi e confrontabili si dovrebbero utilizzare dati omogenei. Per questo motivo, per quanto riguarda ai dati della velocità del vento misurati nella stazione Labromare e Cecina, sono stati stimati i corrispondenti valori orari ad una quota di 10 m dal suolo in base alla seguente equazione:

$$V_{10m} = V_h \frac{\ln(10/z_0)}{\ln(h/z_0)} \quad (1)$$

dove:

- V_{10m} : velocità del vento a 10 m dal suolo;
- V_h : velocità del vento a 8 m dal suolo per Labromare e 3 m per Cecina;
- z_0 : rugosità del terreno.

I valori così ottenuti sono stati utilizzati nelle seguenti elaborazioni.

Di seguito sono riportati i grafici relativi ai giorni medi stagionali della velocità del vento, per ciascuna delle tre stazioni (Figg. 5, 6 e 7). Per Labromare e Cecina sono stati presi in esame due

anni (1996, 1997), mentre per la stazione di San Piero a Grado sono stati reperiti solo i dati relativi ai mesi invernali 1996 e 1997.

Si può notare che nei mesi invernali la velocità del vento è mediamente più alta rispetto agli altri mesi (soprattutto per Labromare), mentre nei mesi primaverili ed estivi c'è una escursione più marcata nella velocità del vento misurata nelle ore centrali del giorno rispetto ai valori rilevati nella tarda serata, nella notte e nelle prime ore del mattino.

Nelle figure 8, 9, 10 ed 11 sono invece confrontati gli andamenti del giorno medio invernale, primaverile, estivo, autunnale per le varie stazioni: la velocità del vento rilevata nella stazione Labromare è sempre maggiore rispetto ai valori misurati nelle altre due stazioni; si può osservare inoltre che gli andamenti di Cecina e Labromare sono molto simili, mentre un po' diverso è l'andamento della velocità del vento registrata a San Piero a Grado.

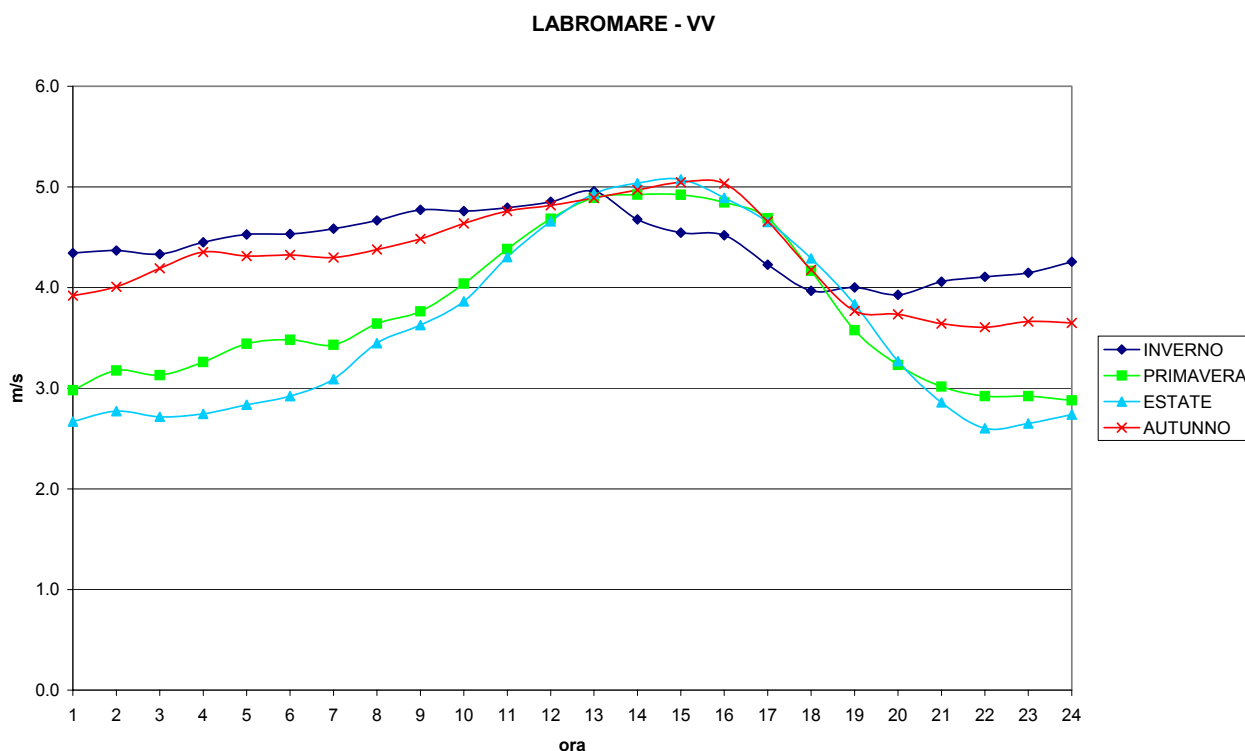


Fig. 5 – Giorno medio stagionale della velocità del vento rilevata nella stazione Labromare.

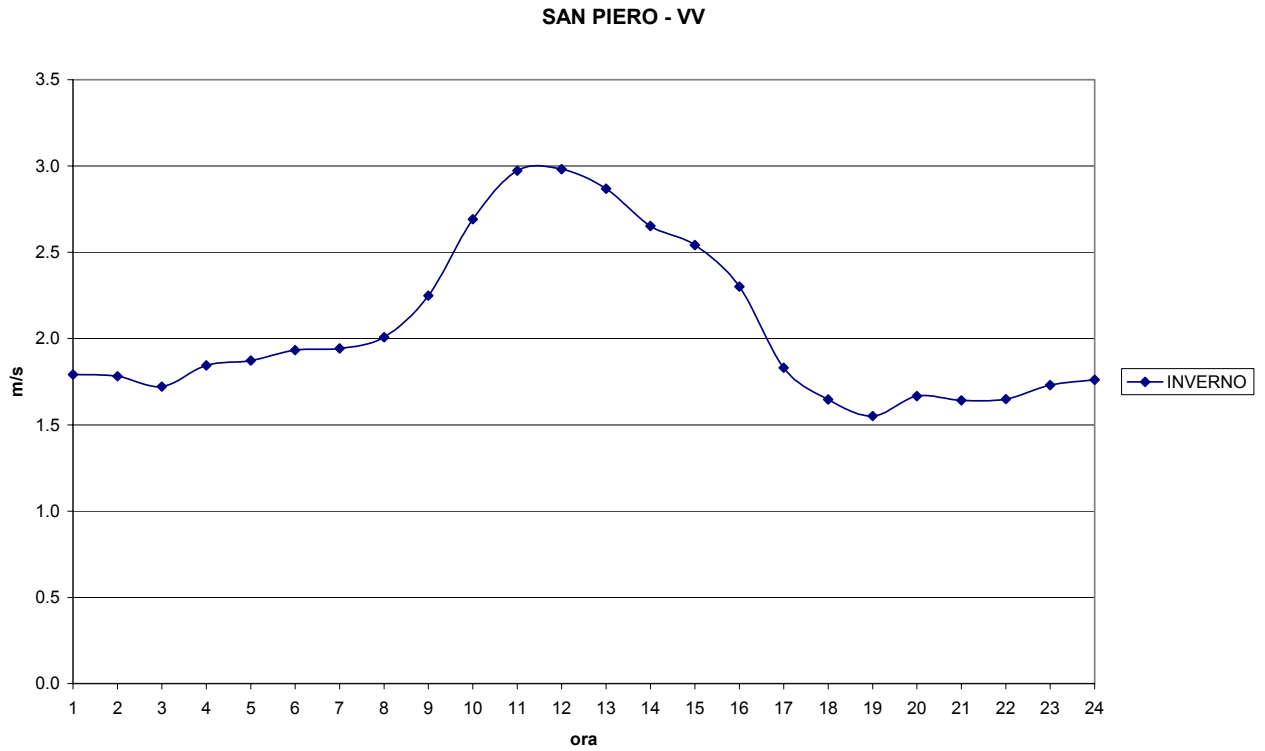


Fig. 6 – Giorno medio stagionale della velocità del vento rilevata nella stazione di Cecina.

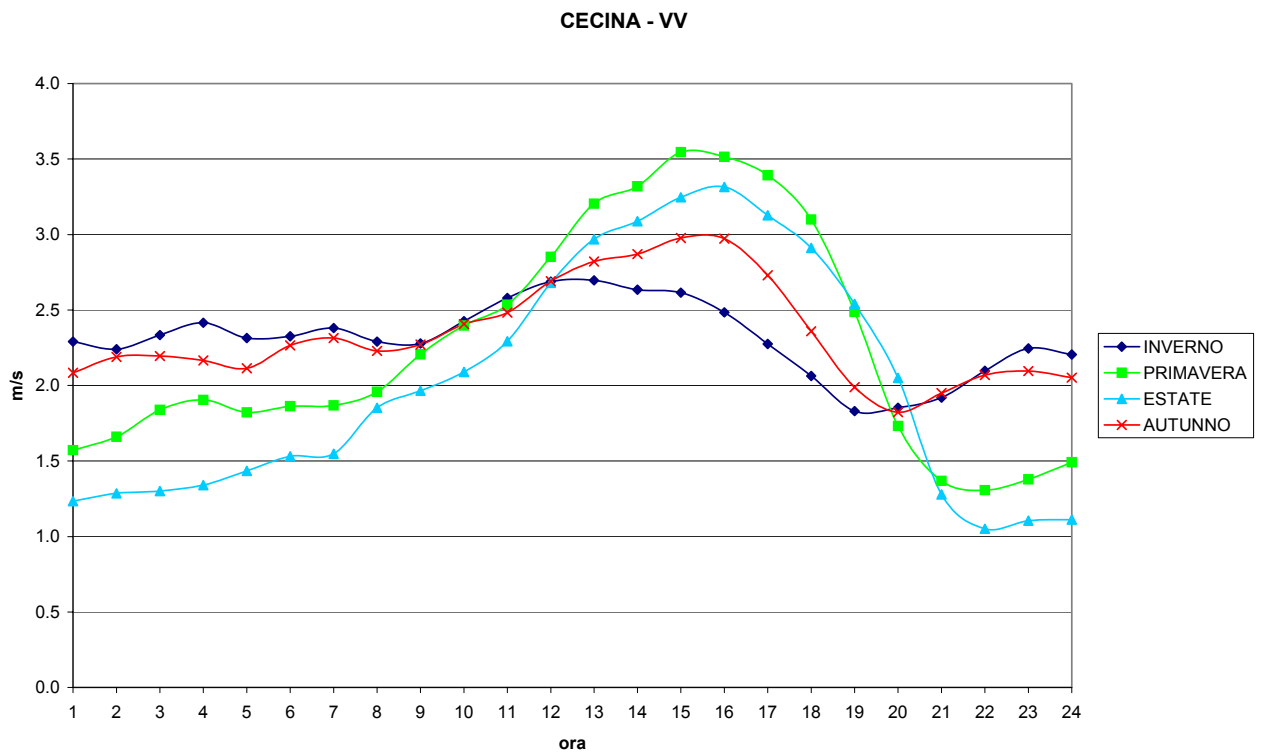


Fig. 7 – Giorno medio stagionale della velocità del vento rilevata nella stazione di San Piero a Grado.

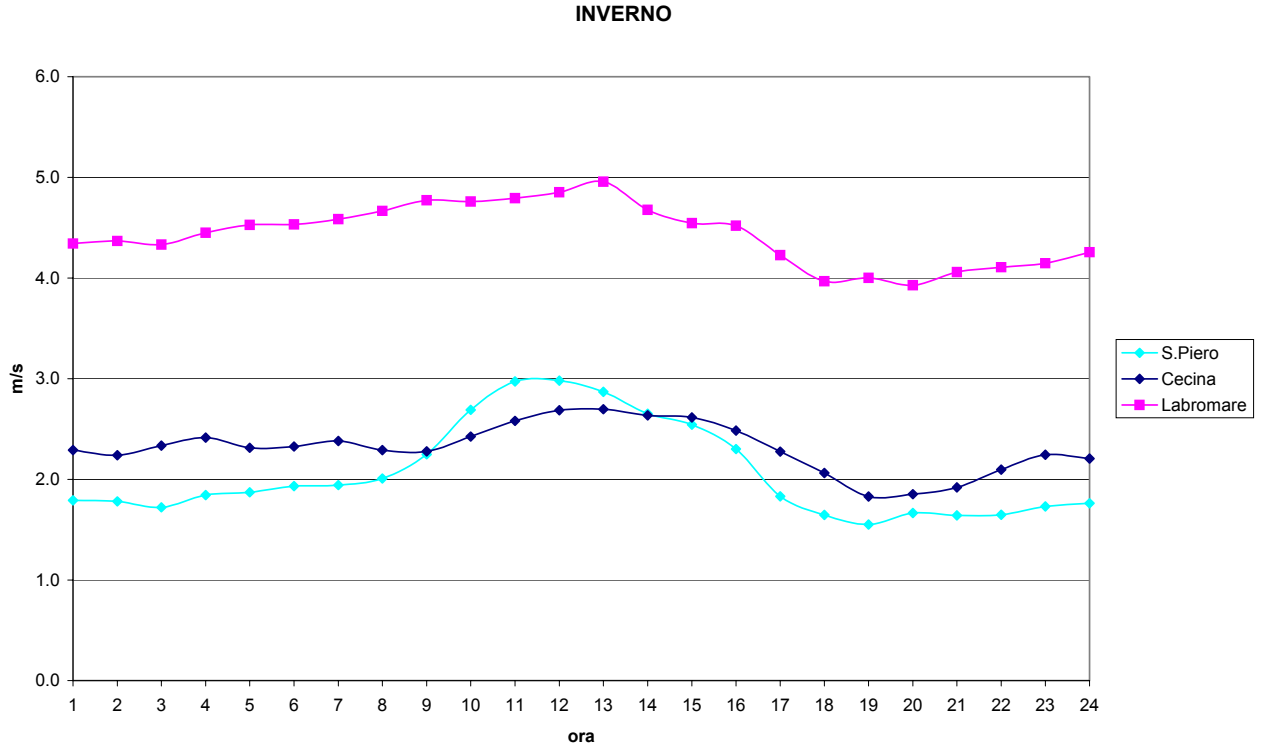


Fig. 8 – Giorno medio invernale della velocità del vento rilevata nelle tre stazioni.

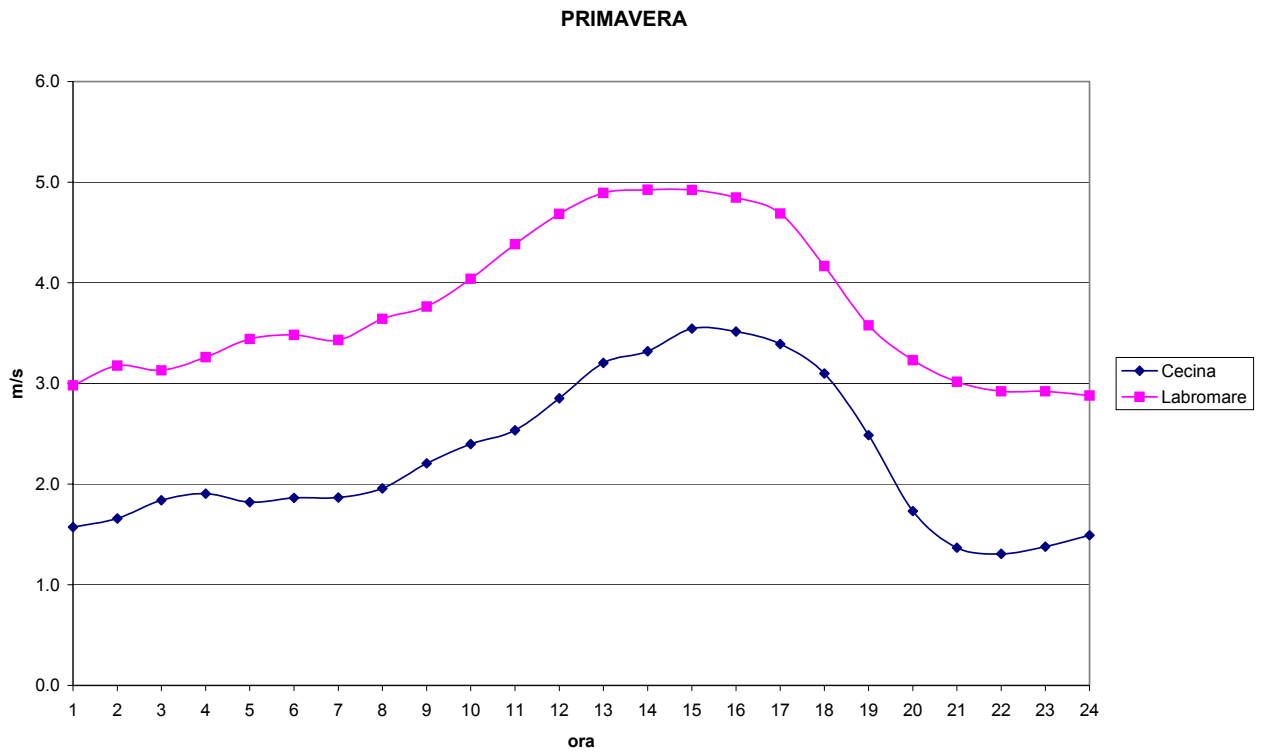


Fig. 9 – Giorno medio primaverile della velocità del vento rilevata nelle stazioni Labromare e Cecina.

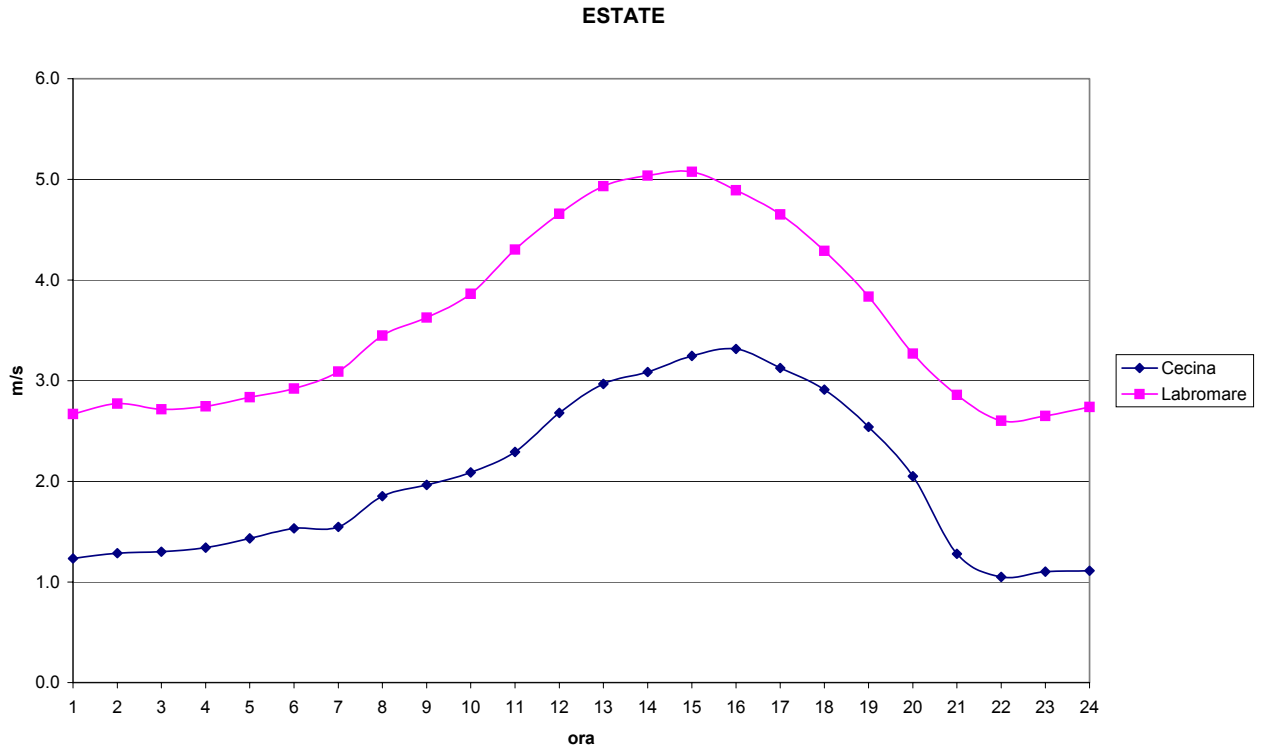


Fig. 10 – Giorno medio estivo della velocità del vento rilevata nelle stazioni Labromare e Cecina.

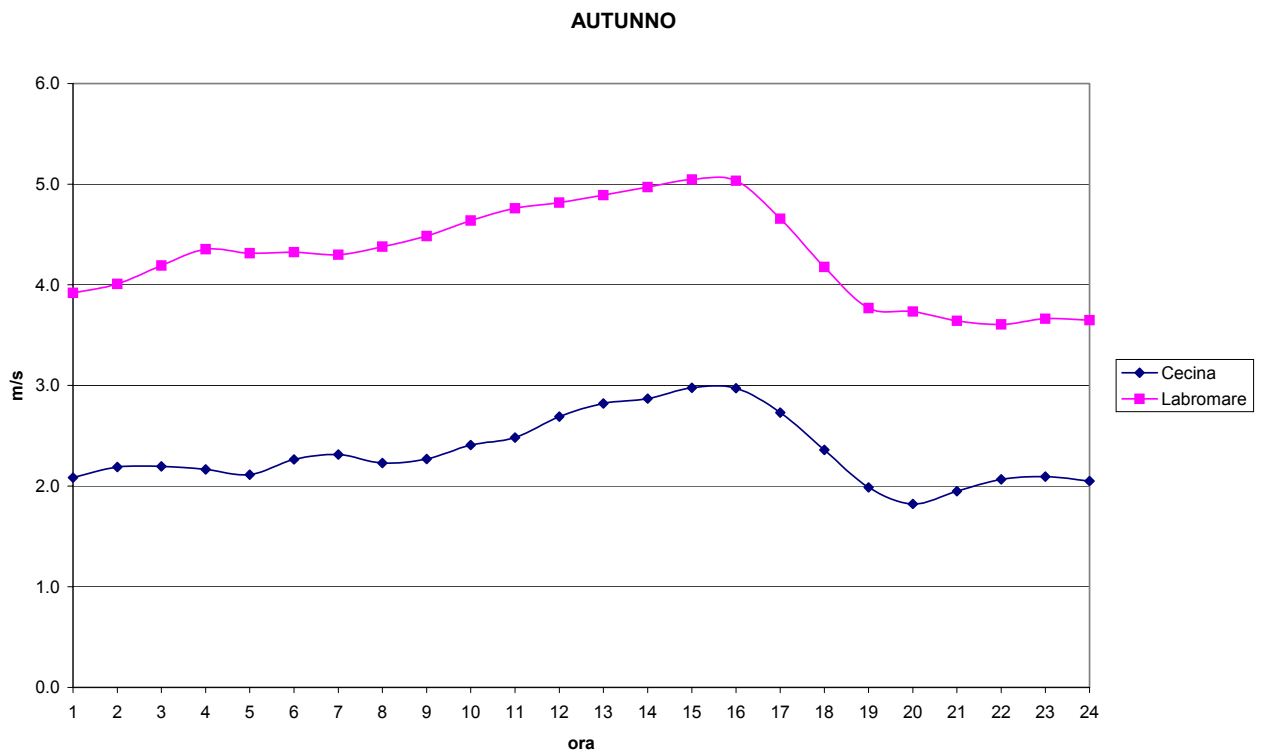


Fig. 11 – Giorno medio autunnale della velocità del vento rilevata nelle stazioni Labromare e Cecina.

3.1.2 Elaborazione dei valori di concentrazione degli inquinanti

Sono stati presi in esame i valori di concentrazione di alcuni inquinanti misurati nelle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria della rete *ARIAL*. Anche in questo caso, nella seguente tabella sono riportate le coordinate geografiche e la località, per ciascuna stazione.

Tab. 3 – Riassunto delle caratteristiche delle stazioni chimiche utilizzate.

<i>Stazione</i>	<i>Ente di appartenenza</i>	<i>Località</i>	<i>Latitudine</i>	<i>Longitudine</i>
Rossi	ARIAL	Livorno	4.822.612	606.167
Vinci	ARIAL	Livorno	4.826.443	607.018
XI Maggio	ARIAL	Livorno	4.823.960	606.312
Marx	ARIAL	Collesalveti	4.827.450	609.307

Sono stati reperiti i dati di quattro delle sei stazioni della rete *ARIAL*, relativi all'anno 1997; non è stato comunque possibile analizzare i dati di tutti gli inquinanti misurati nelle stazioni, come ad esempio nel caso dei valori di concentrazione delle Polveri Totali in Sospensione (PTS), rilevati presso la centralina in via Da Vinci, che non sono stati recuperati.

Tab. 4 – Riassunto degli inquinanti analizzati.

<i>Stazione</i>	<i>Periodo coperto</i>	<i>SO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>CO</i>	<i>O₃</i>
Rossi	01/01/97-31/12/97	SI	SI	NO	SI
Vinci	01/01/97-31/12/97	SI	SI	NO	NO
XI Maggio	01/01/97-31/12/97	SI	NO	SI	NO
Marx	01/01/97-31/12/97	SI	NO	NO	NO

Tab. 5 – Riassunto delle elaborazioni effettuate.

<i>Stazione</i>	<i>Inquinante</i>	<i>Serie storica</i>	<i>Giorno medio</i>			
			<i>inverno</i>	<i>primavera</i>	<i>estate</i>	<i>autunno</i>
Rossi	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
	NO _x	SI	SI	SI	SI	SI
	O ₃	SI	NO	NO	NO	NO
Vinci	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
	NO _x	SI	NO	NO	NO	NO
XI Maggio	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
	CO	SI	SI	SI	NO	SI
Marx	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI

In alcuni casi non è stato possibile effettuare elaborazioni statistiche sui valori di concentrazione di alcuni inquinanti (NO, NO₂ nella stazione di via Da Vinci, O₃ nella stazione di via Rossi, CO nella stazione di via XI Maggio nel periodo estivo) dato che, osservando gli istogrammi relativi alle serie storiche, si nota che la qualità dei dati non è buona. Ad esempio, nel

caso di NO, NO₂ della stazione Da Vinci (Figg. 20 e 21) mancano le misure per un lungo periodo; inoltre le brusche variazioni dei valori di concentrazione fanno pensare a ricalibrage degli analizzatori automatici: ciò è particolarmente evidente nel caso di O₃ della stazione Rossi.

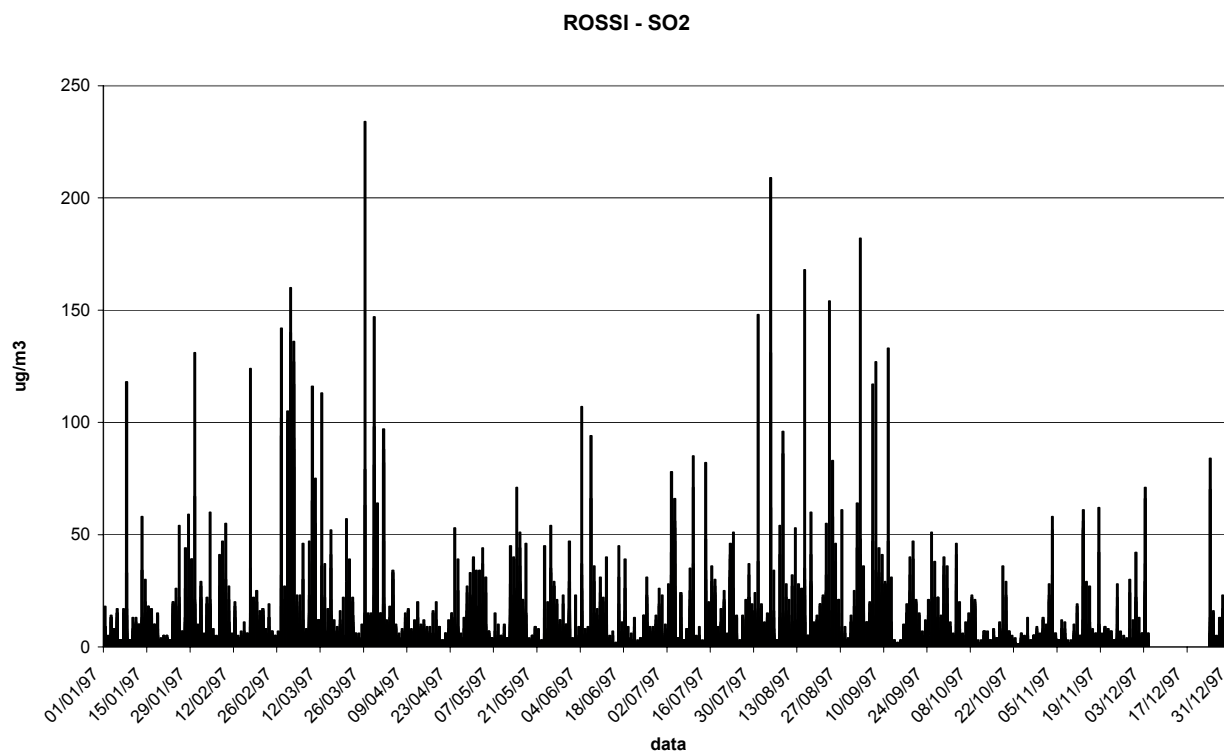


Fig. 12 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Rossi.

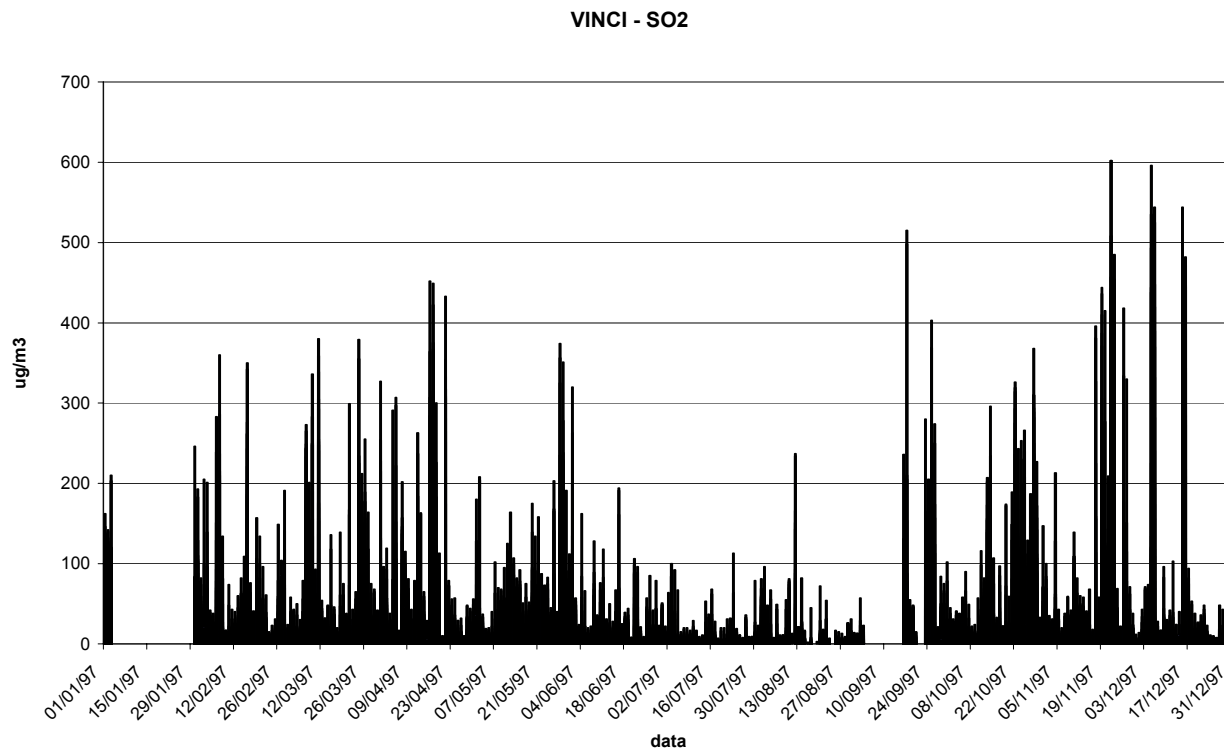


Fig. 13 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Vinci.

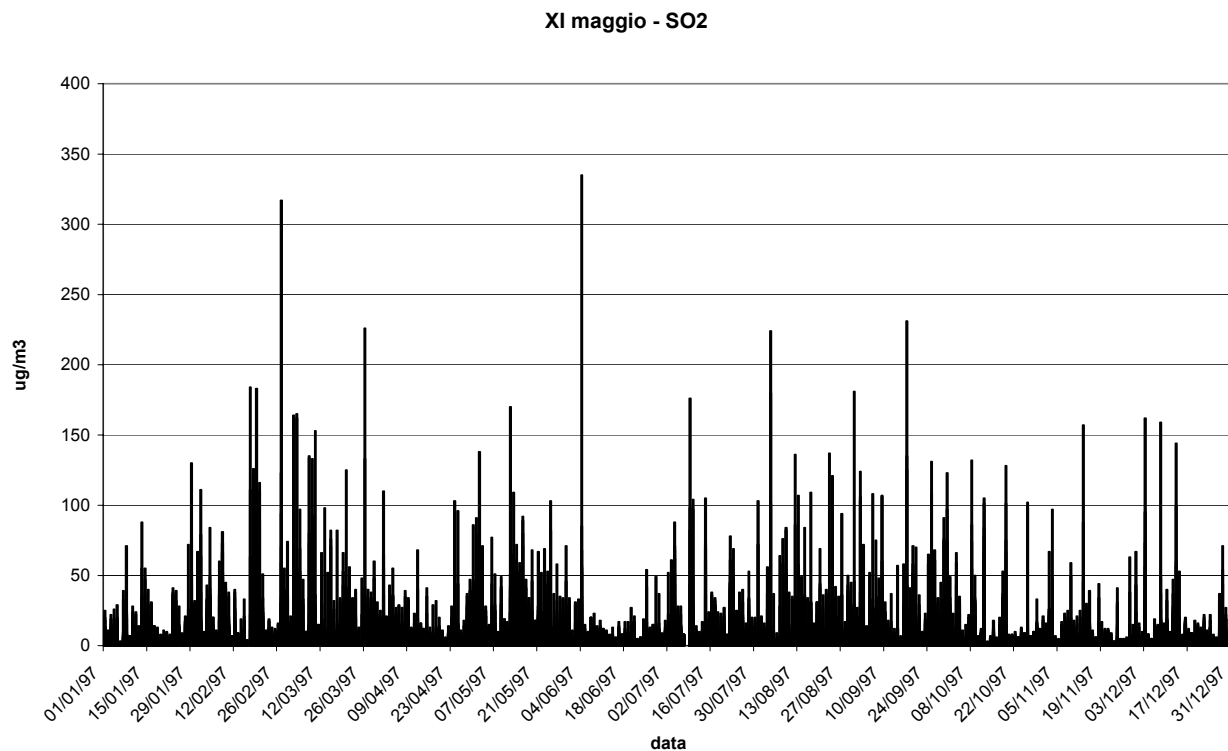


Fig. 14 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione XI Maggio.

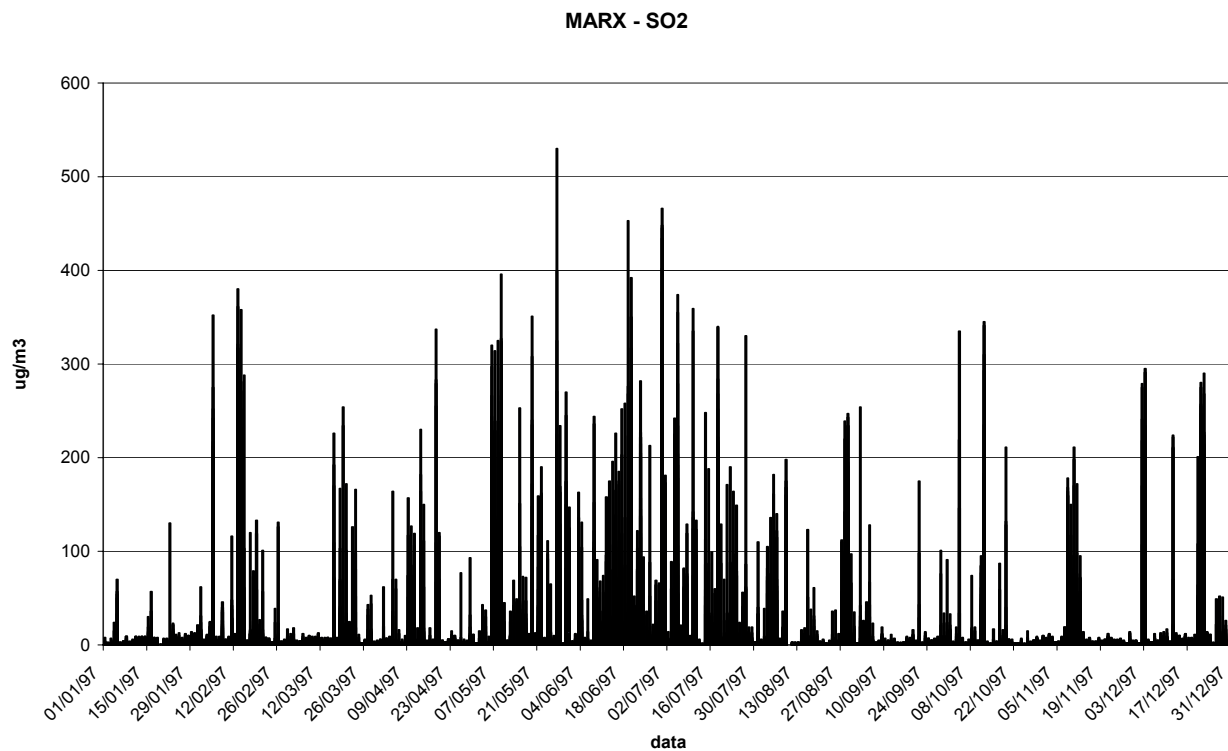


Fig. 15 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Marx.

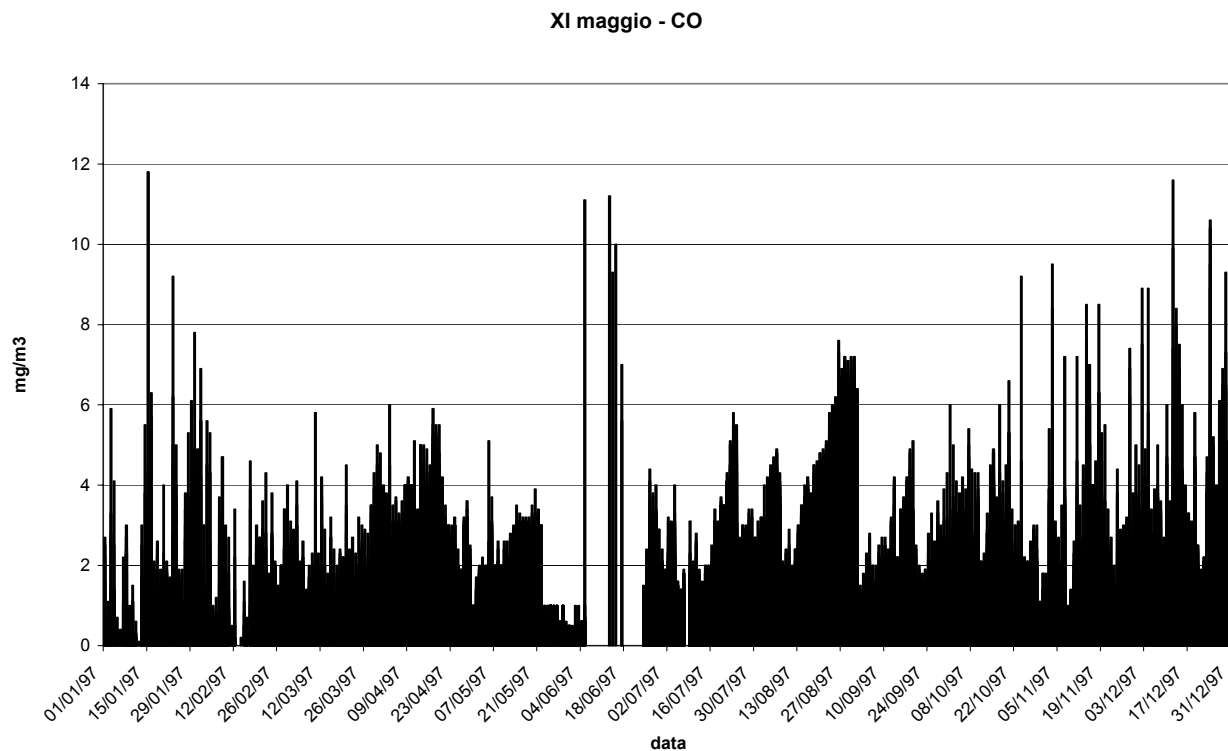


Fig. 16 – Istogramma relativo alla concentrazione di CO registrata nella stazione XI Maggio.

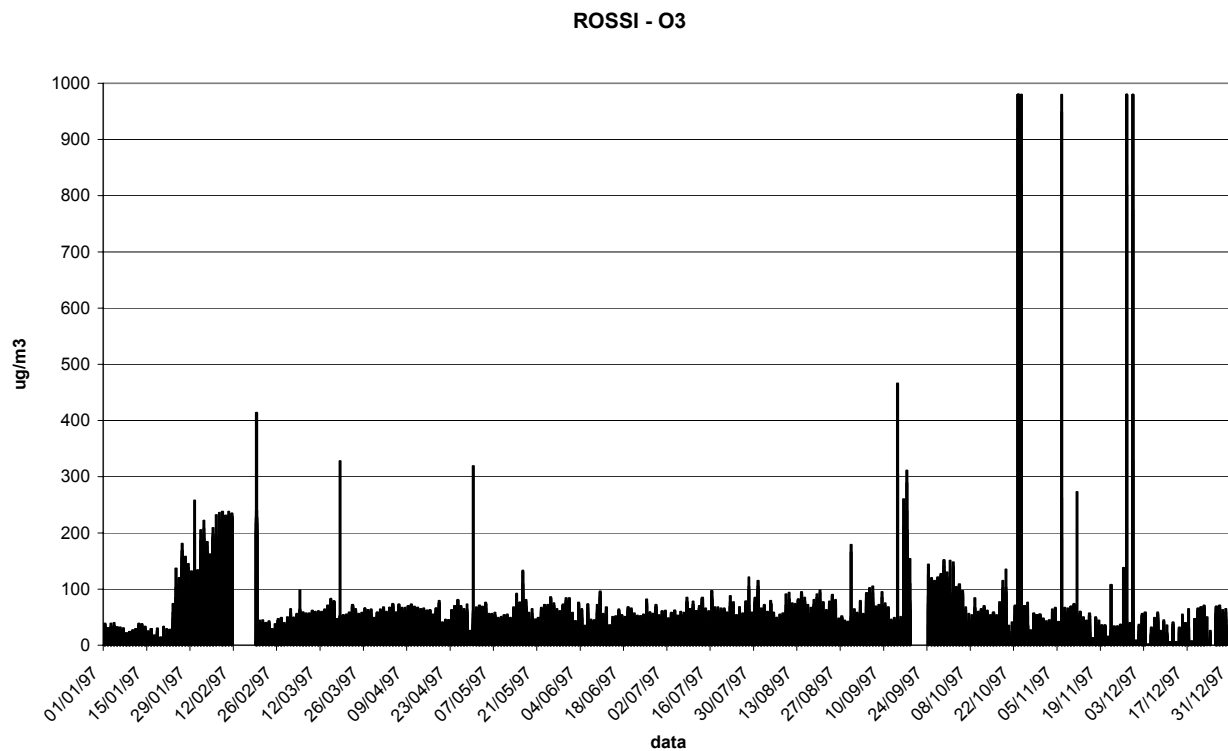


Fig. 17 – Istogramma relativo alla concentrazione di O₃ registrata nella stazione Rossi.

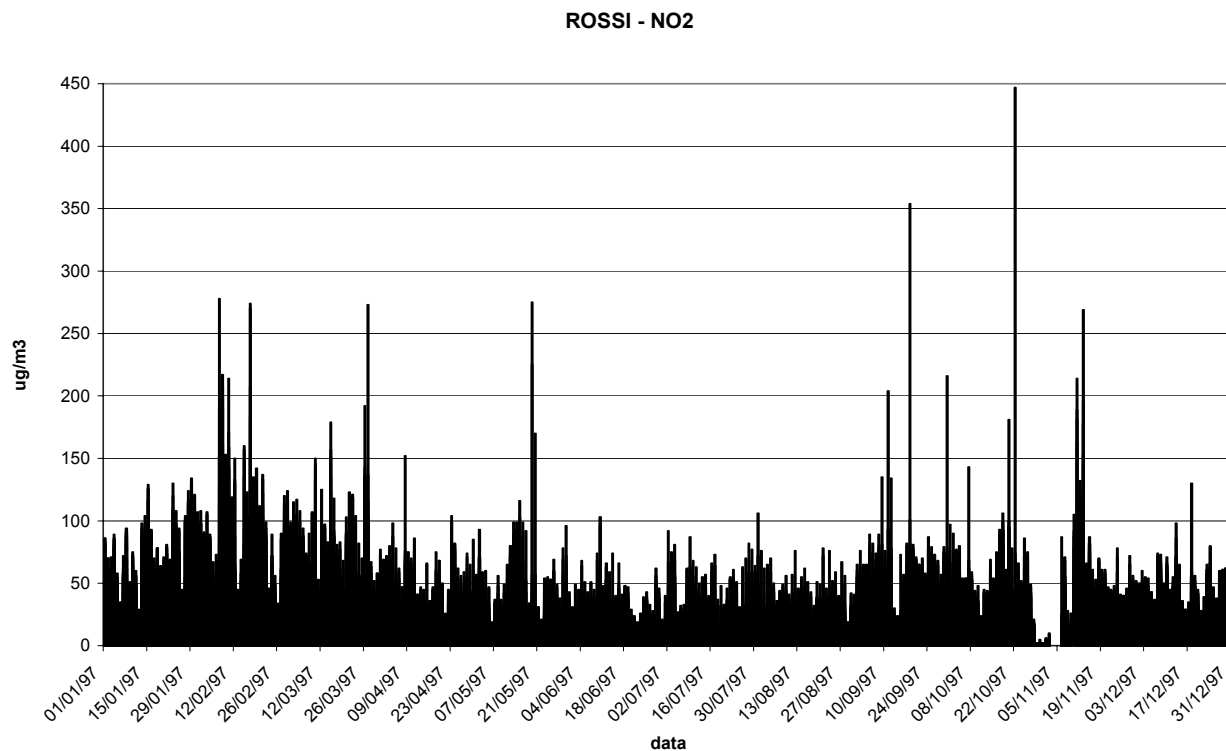


Fig. 18 – Istogramma relativo alla concentrazione di NO₂ registrata nella stazione Rossi.

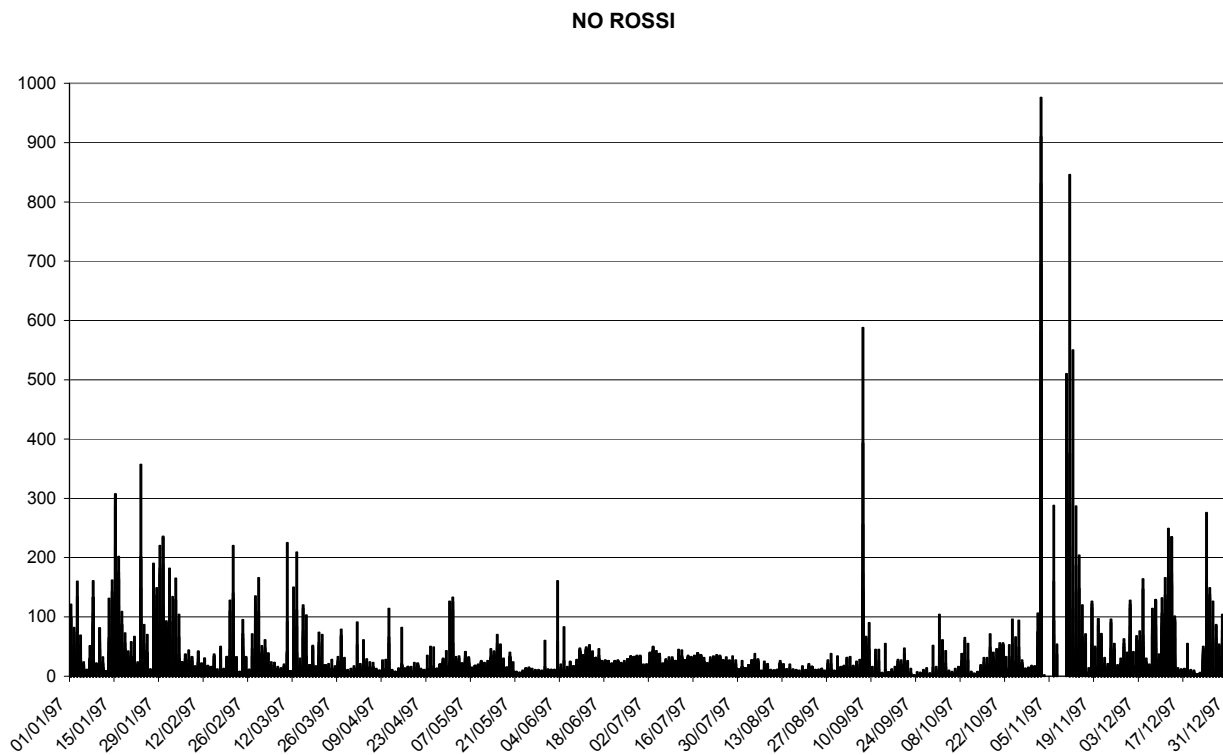


Fig. 19 – Istogramma relativo alla concentrazione di NO registrata nella stazione Rossi.

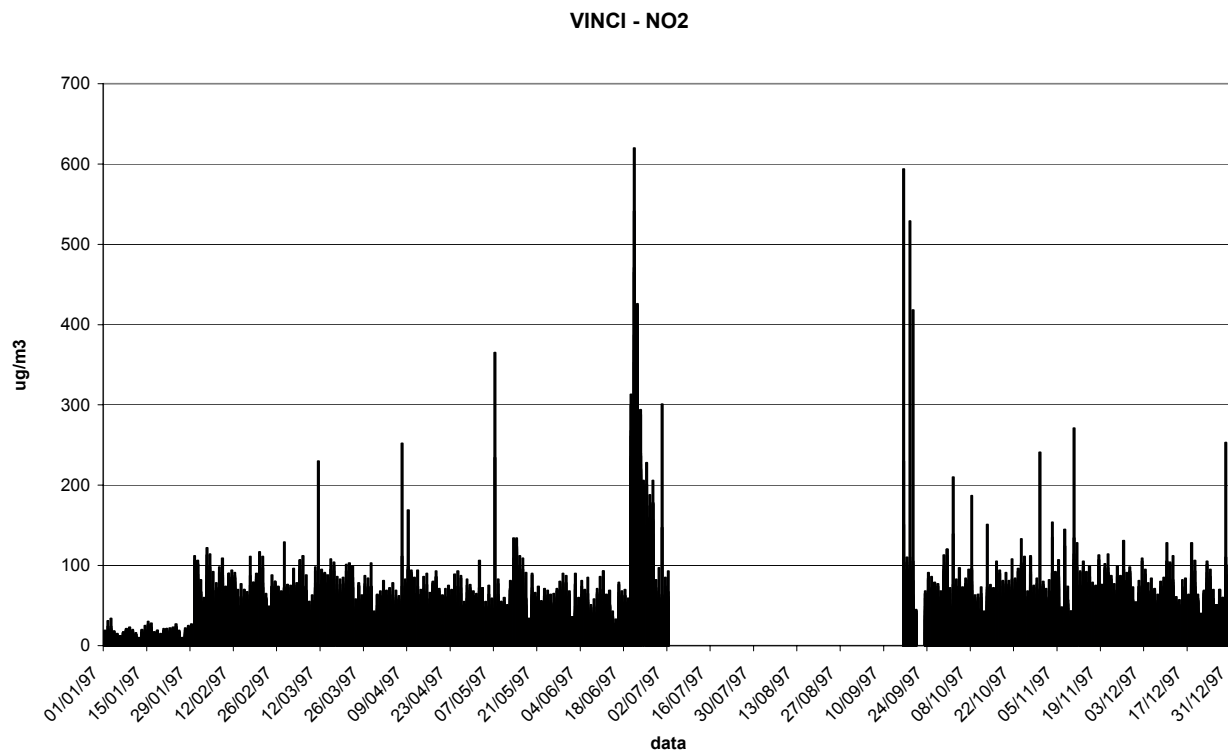


Fig. 20 – Istogramma relativo alla concentrazione di NO₂ registrata nella stazione Vinci.

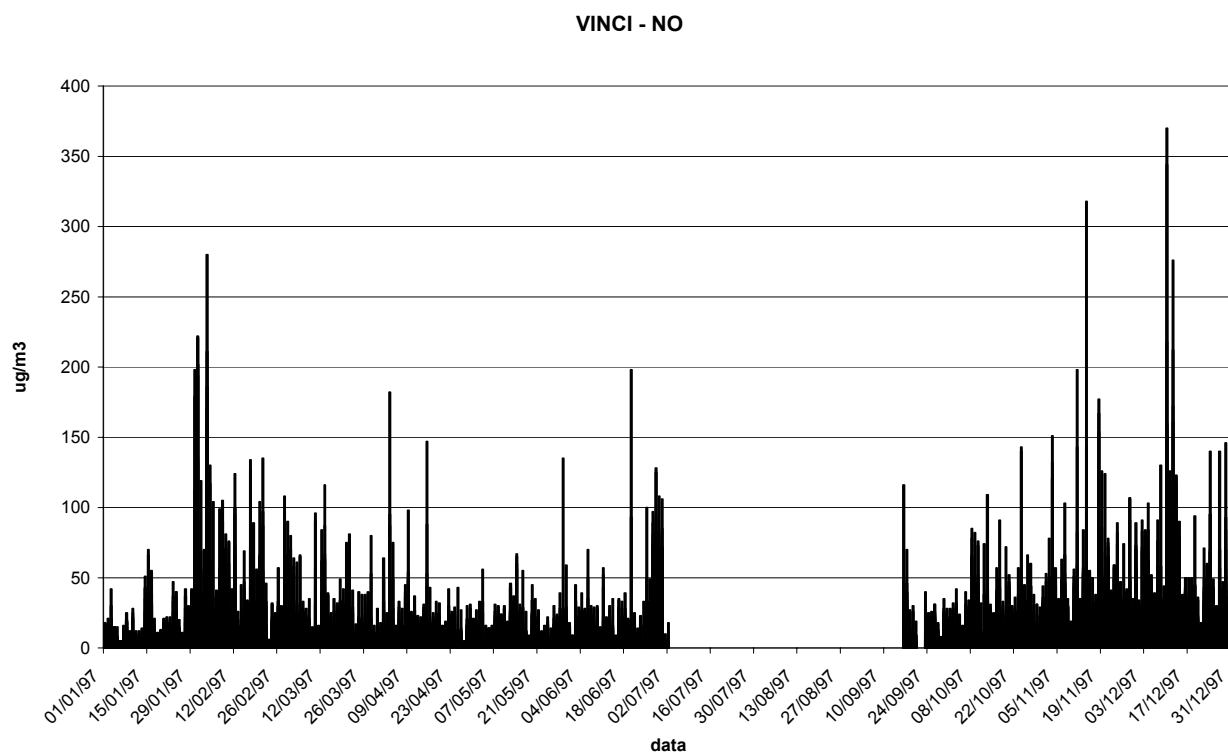


Fig. 21 – Istogramma relativo alla concentrazione di NO registrata nella stazione Vinci

Le medie stagionali di concentrazione degli inquinanti presi in esame (tabella 6), insieme ai grafici relativi al giorno medio riportati di seguito (Figg. 22-32), possono essere di aiuto per individuare eventuali correlazioni tra i valori rilevati nelle diverse centraline e le elaborazioni relative alla velocità del vento, commentate precedentemente.

Tab. 6 – Medie stagionali di concentrazione.

Stazione	Inquinante	Media stagionale			
		<i>inverno</i>	<i>primavera</i>	<i>estate</i>	<i>autunno</i>
Rossi	SO ₂ µg/m ³	6	7	6	4
	NO ₂ µg/m ³	47	38	23	34
	NO µg/m ³	25	12	18	13
XI Maggio	SO ₂ µg/m ³	10	12	10	9
	CO mg/m ³	1.5	1.8	–	1.8
Vinci	SO ₂ µg/m ³	38	35	13	40
Marx	SO ₂ µg/m ³	13	16	24	8

SO₂

Questo inquinante è misurato in tutte le centraline; in due di queste, XI Maggio e Rossi, gli andamenti delle concentrazioni nel giorno medio stagionale sono molto simili, anche se i valori medi sono decisamente più alti, circa il doppio, nella prima stazione. In estate, in primavera e, anche se in misura minore, in autunno, sono presenti due picchi nelle ore della mattina e della tarda serata, con una marcata diminuzione nelle ore centrali del giorno; in inverno invece il primo e il secondo picco sono più vicini, nella tarda mattinata e nel pomeriggio.

Situazione completamente diversa si presenta nelle stazioni Da Vinci e Marx, dove il picco di concentrazione si verifica nelle ore centrali del giorno, rispettivamente in primavera, estate, autunno nella prima centralina e in estate e primavera nella seconda; i valori più alti sono registrati nella stazione di Da Vinci.

Nell'ipotesi che gli analizzatori automatici presenti nelle quattro stazioni siano calibrati, da questa analisi si dovrebbe dedurre che c'è una forte dipendenza dei valori di concentrazione di questo inquinante dalla posizione delle centraline che, pur essendo abbastanza vicine, mostrano situazioni diverse e negli andamenti e nei valori rilevati: non risulta quindi facile fare considerazioni che riguardino l'intera area di Livorno, data la forte dipendenza spaziale dei valori misurati.

ROSSI - SO₂

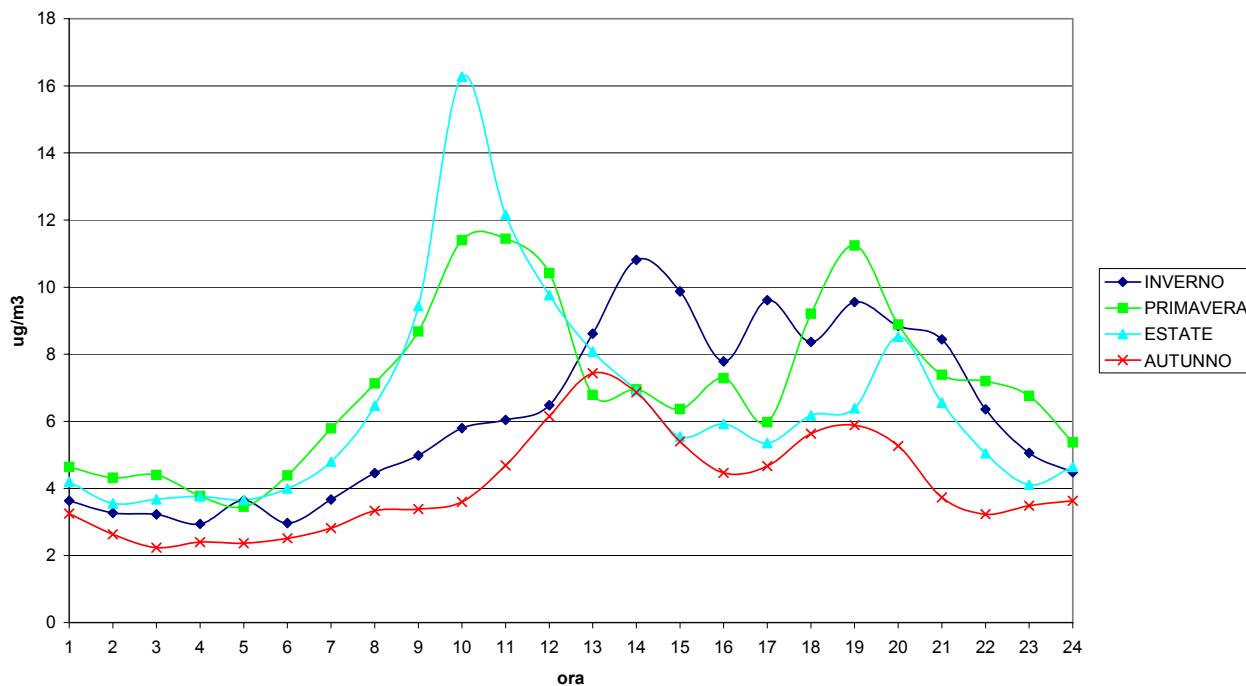


Fig. 22 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Rossi.

DA VINCI - SO₂

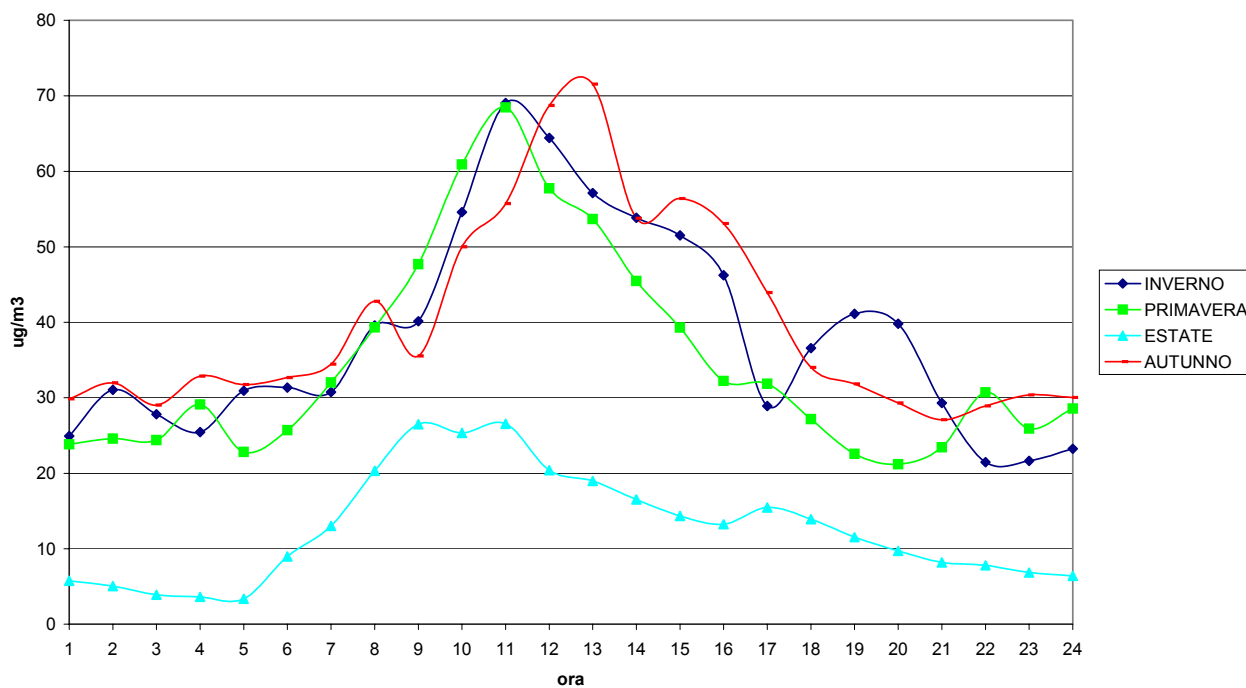


Fig. 23 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Da Vinci.

XI MAGGIO - SO₂

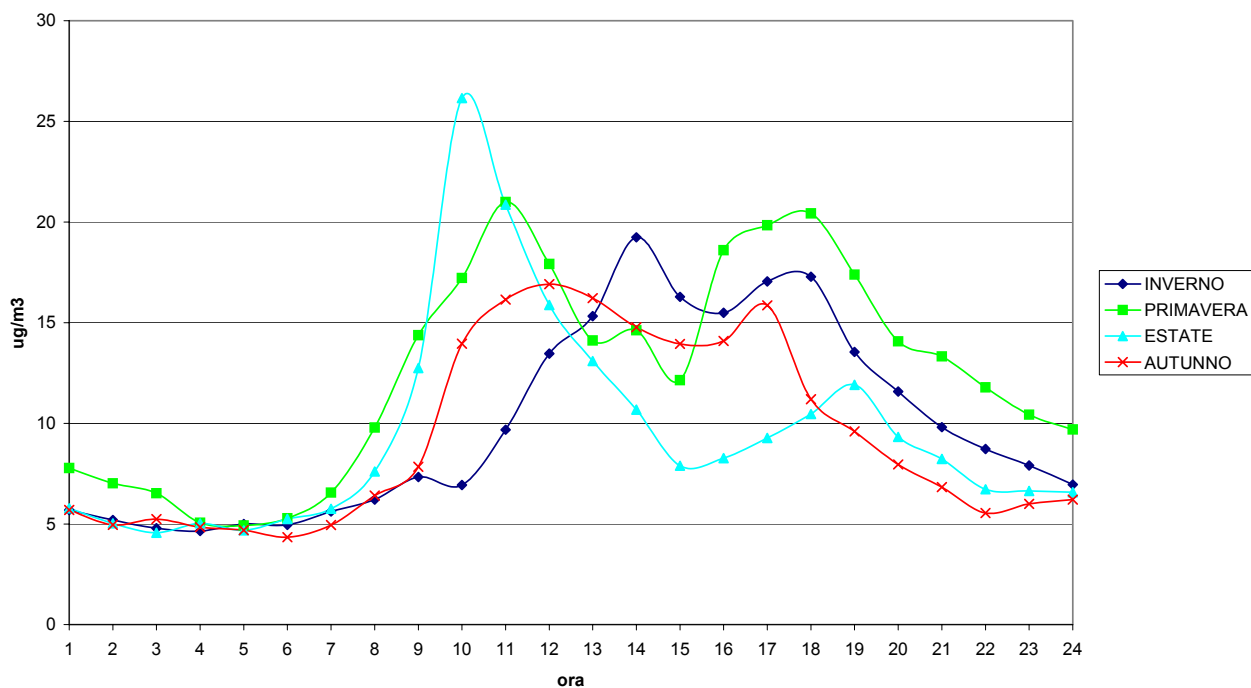


Fig. 24 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione XI Maggio.

MARX - SO₂

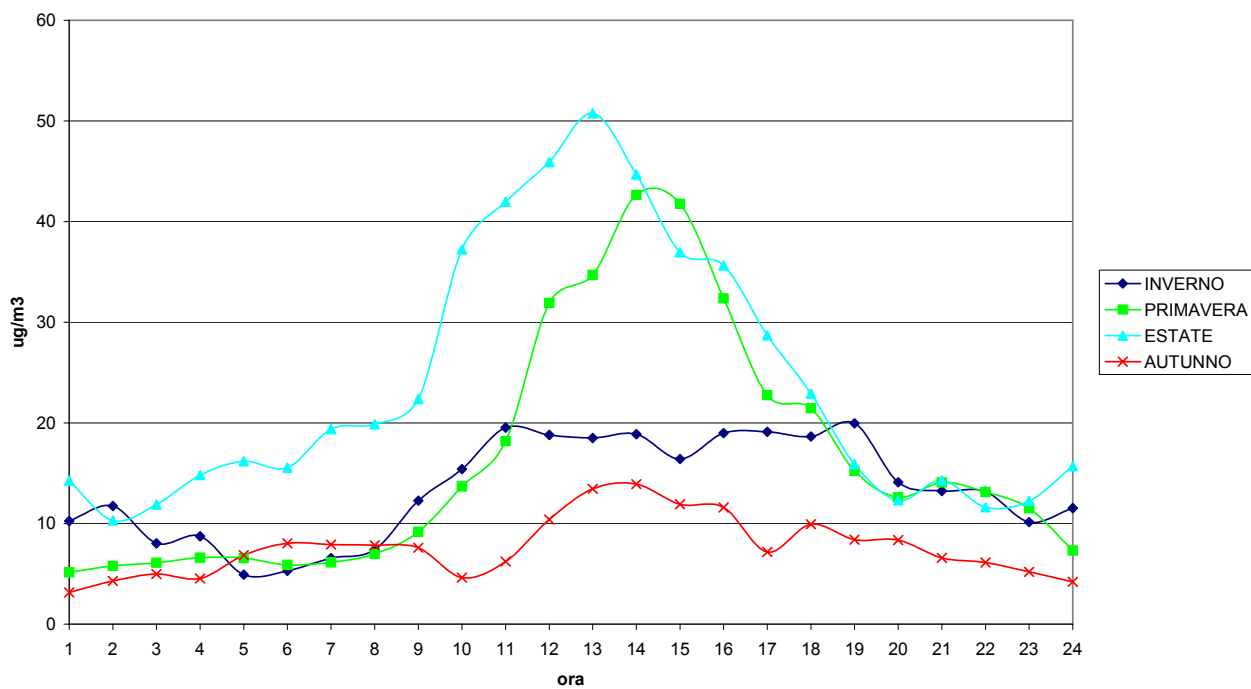


Fig. 25 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Marx.

NO - NO₂

Per quanto riguarda gli ossidi di azoto, è stato possibile elaborare soltanto i dati rilevati nella stazione Rossi: i valori più alti di NO₂ sono rilevati in inverno, i più bassi in estate; gli andamenti delle concentrazioni sono simili, presentano due picchi nelle prime ore della mattina e della tarda serata e una diminuzione nelle ore centrali del giorno.

Confrontando gli andamenti relativi a NO₂ e NO, si può notare che i relativi “giorni medi”, sia invernali che primaverili, sono molto simili: questo fa ipotizzare che non si realizzino le condizioni di accumulo di NO e la conseguente trasformazione in NO₂ a seguito di reazioni fotochimiche, perché in questo caso il picco di NO₂ si dovrebbe riscontrare in ore successive rispetto a quelle in cui si hanno le massime concentrazioni di NO. E' probabile che il forte vento, caratteristico del sito, contribuisca in modo determinante a ripulire l'aria.

CO

L'ossido di carbonio è misurato soltanto nella stazione XI Maggio: i dati relativi al periodo estivo non sono stati elaborati perché, osservando la serie storica, si notano brusche variazioni dei valori di concentrazione, pertanto questi dati sono stati scartati. Il giorno medio invernale e autunnale (Fig. 26) mostrano due picchi molto marcati in corrispondenza delle ore 8, 9 e delle 19, 20, in corrispondenza delle ore di punta del traffico veicolare, mentre in primavera il picco serale è meno marcato e intorno alle 22.

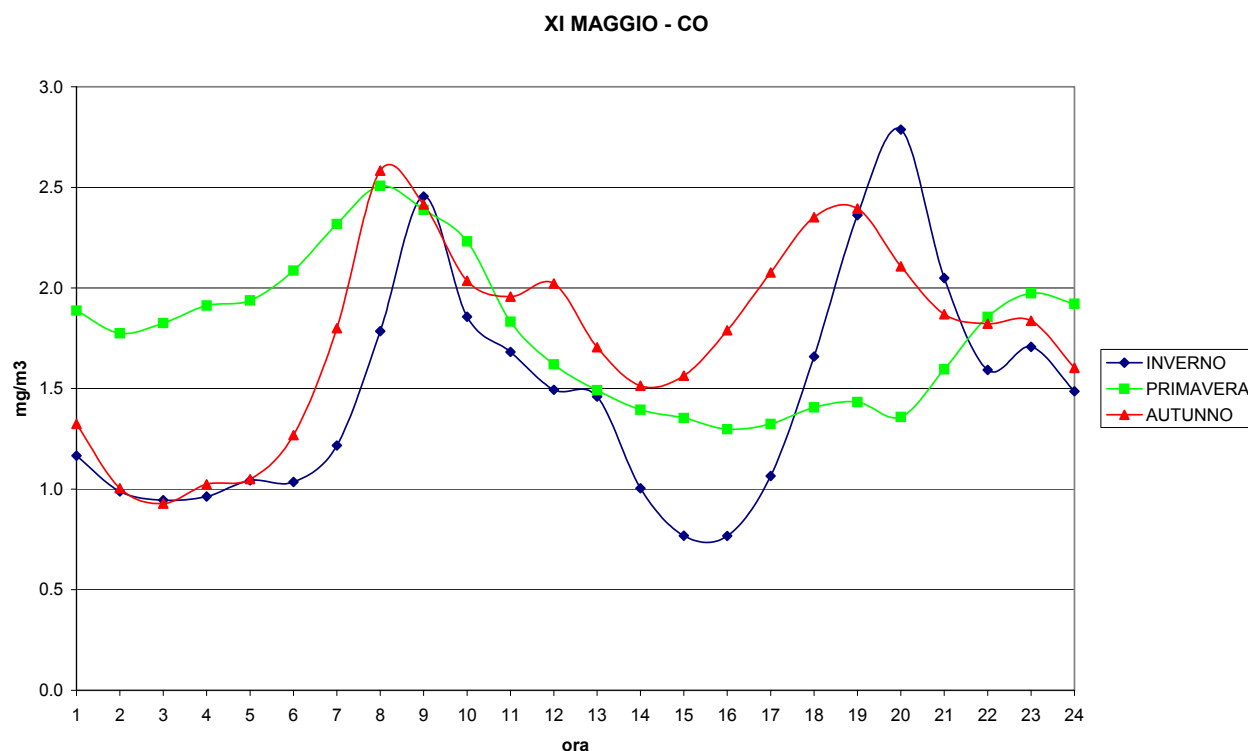


Fig. 26 – Giorno medio della concentrazione di CO rilevata nella stazione XI Maggio.

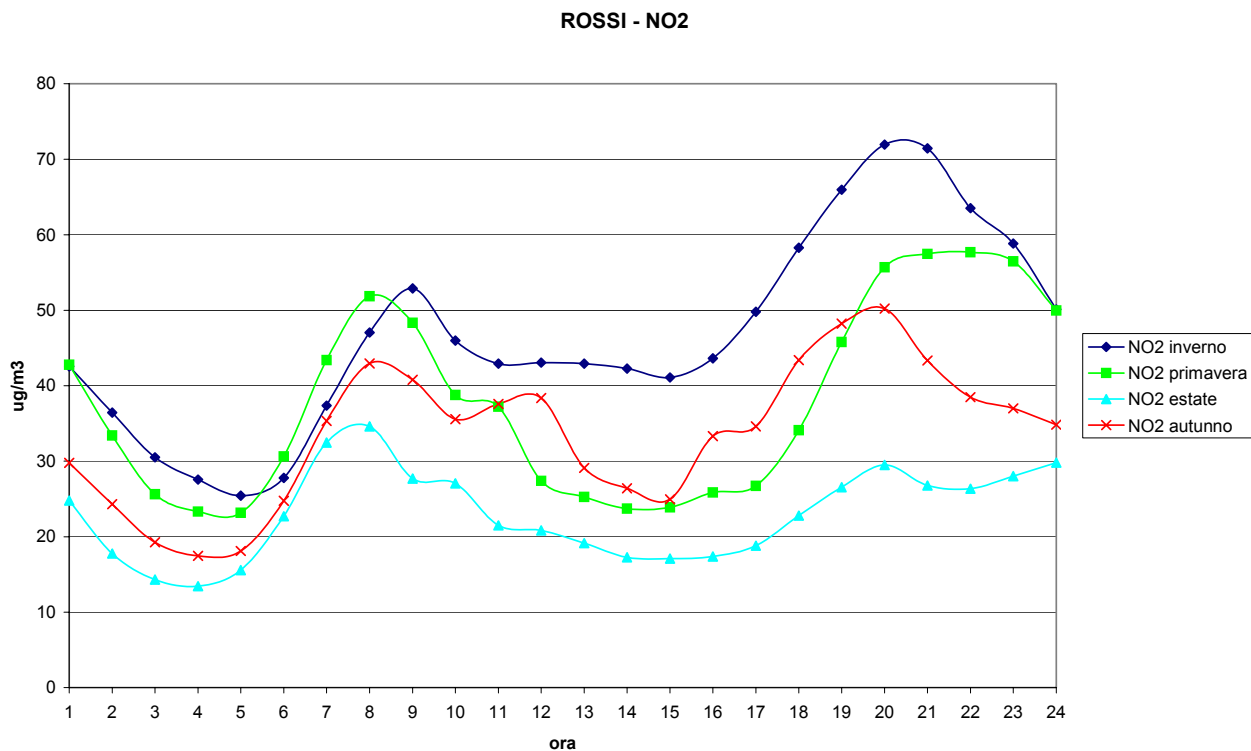


Fig. 27 – Giorno medio della concentrazione di NO₂ rilevata nella stazione Rossi

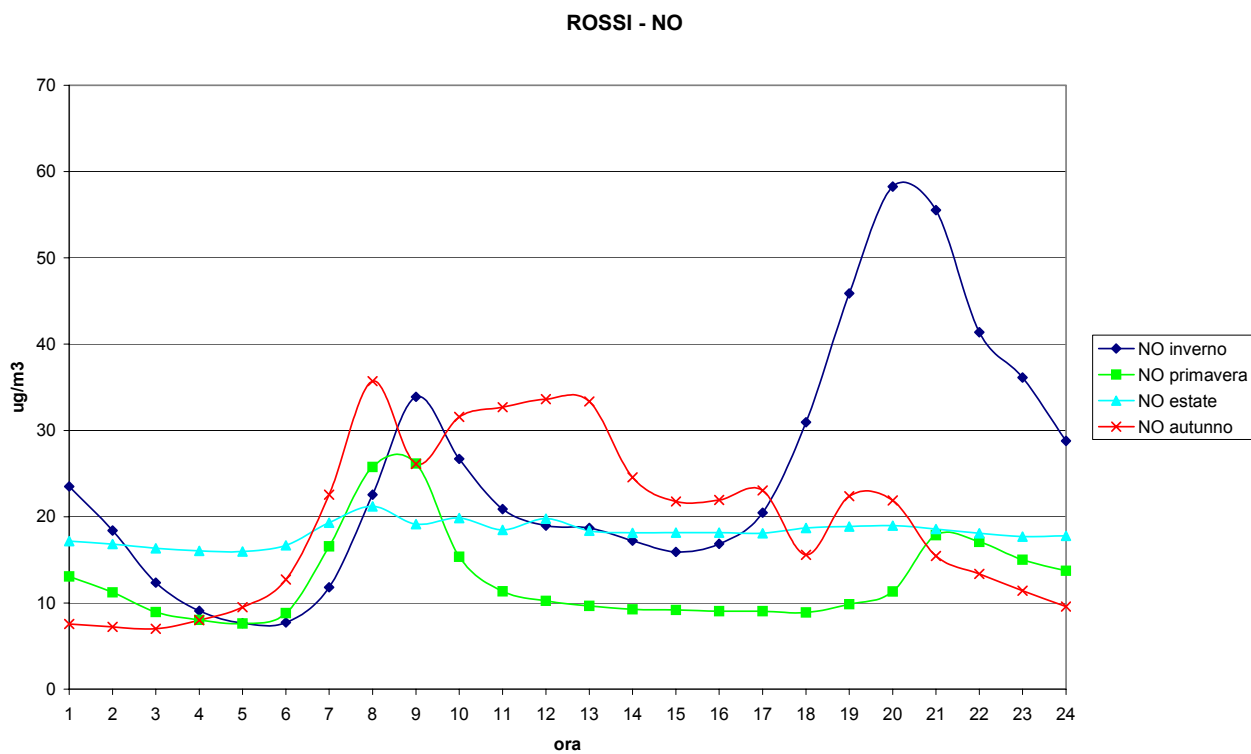


Fig. 28 – Giorno medio della concentrazione di NO₂ rilevata nella stazione Rossi

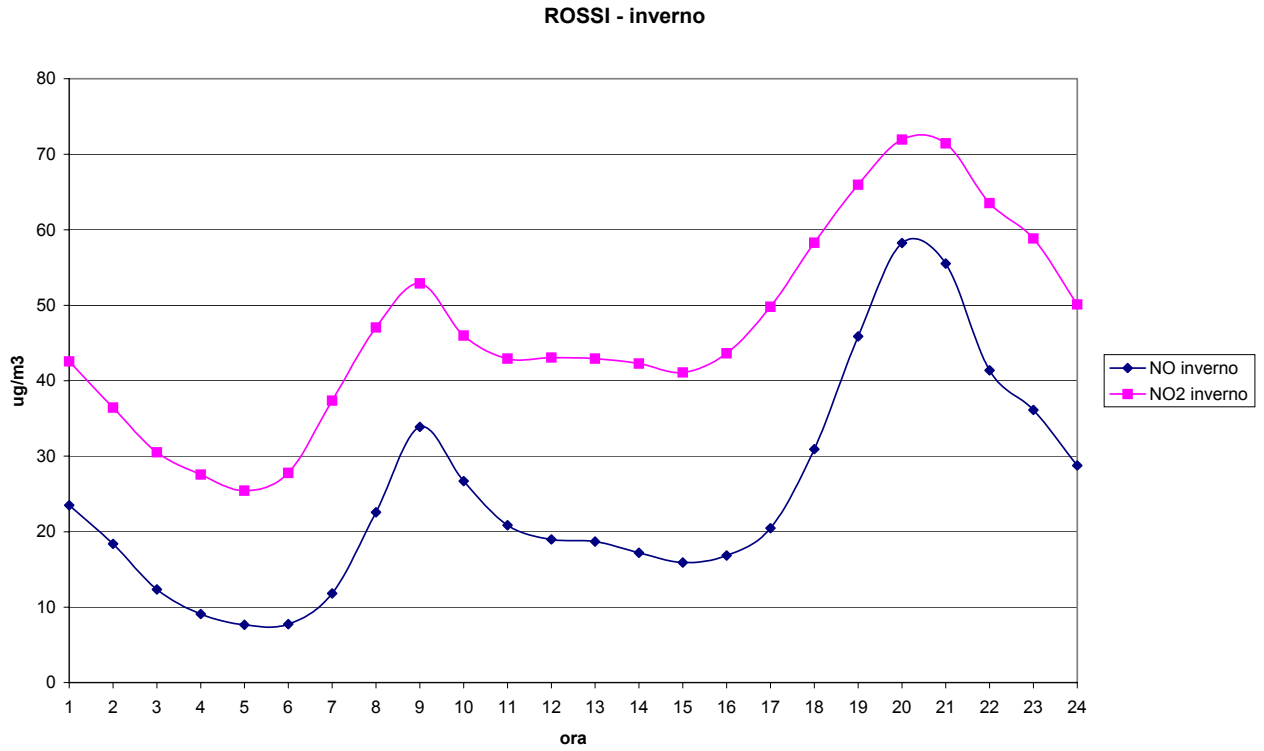


Fig. 29 – Giorno medio invernale della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Rossi.

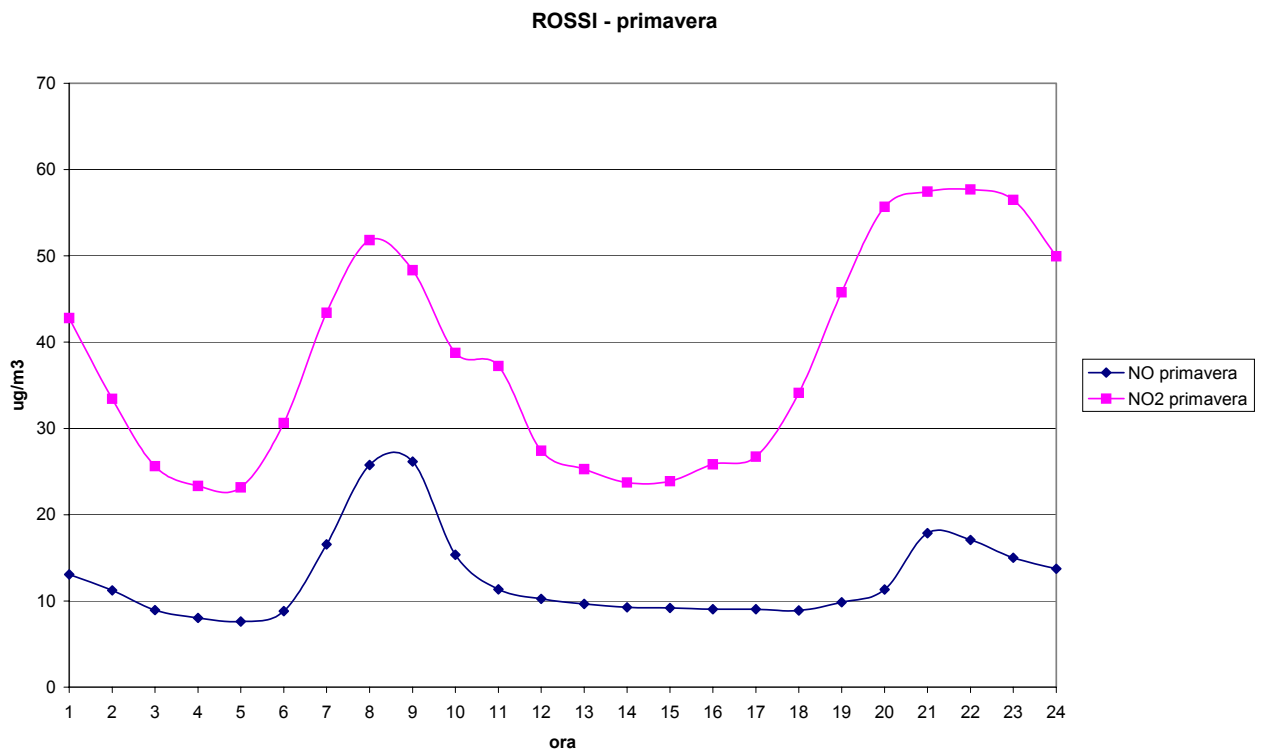


Fig. 30 – Giorno medio primaverile della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Rossi.

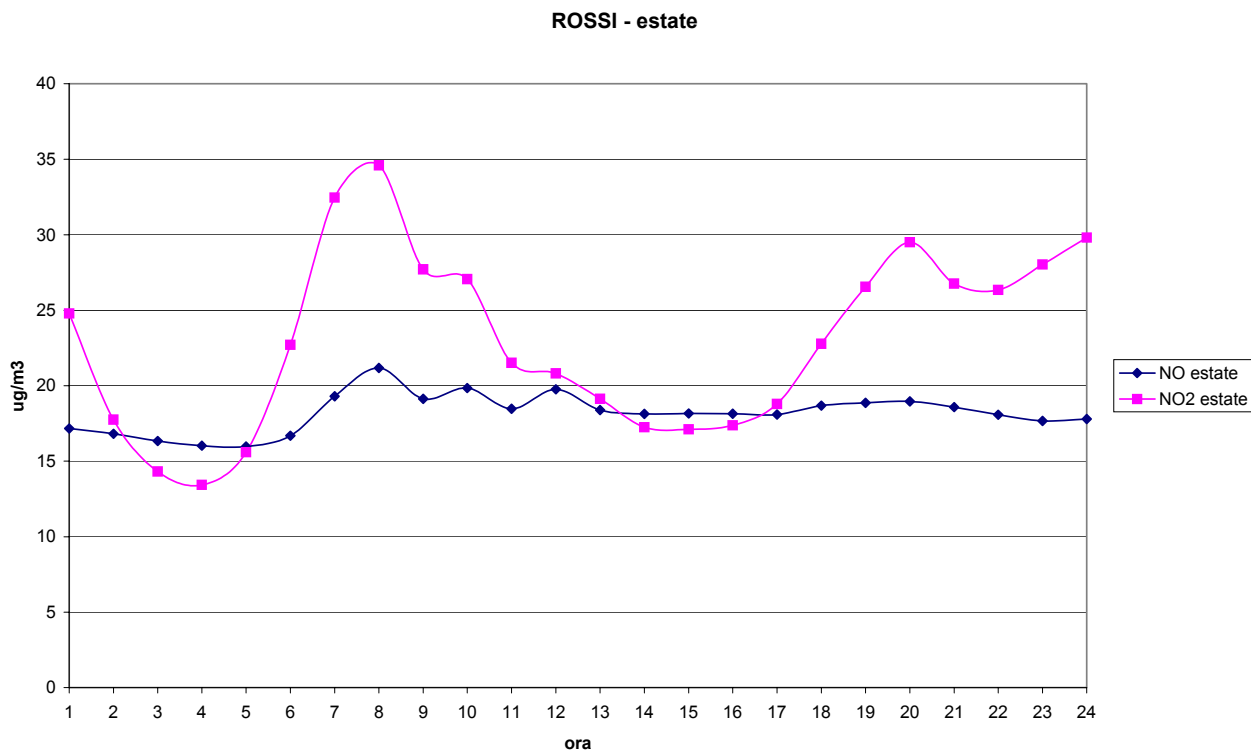


Fig. 31 – Giorno medio estivo della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Rossi.

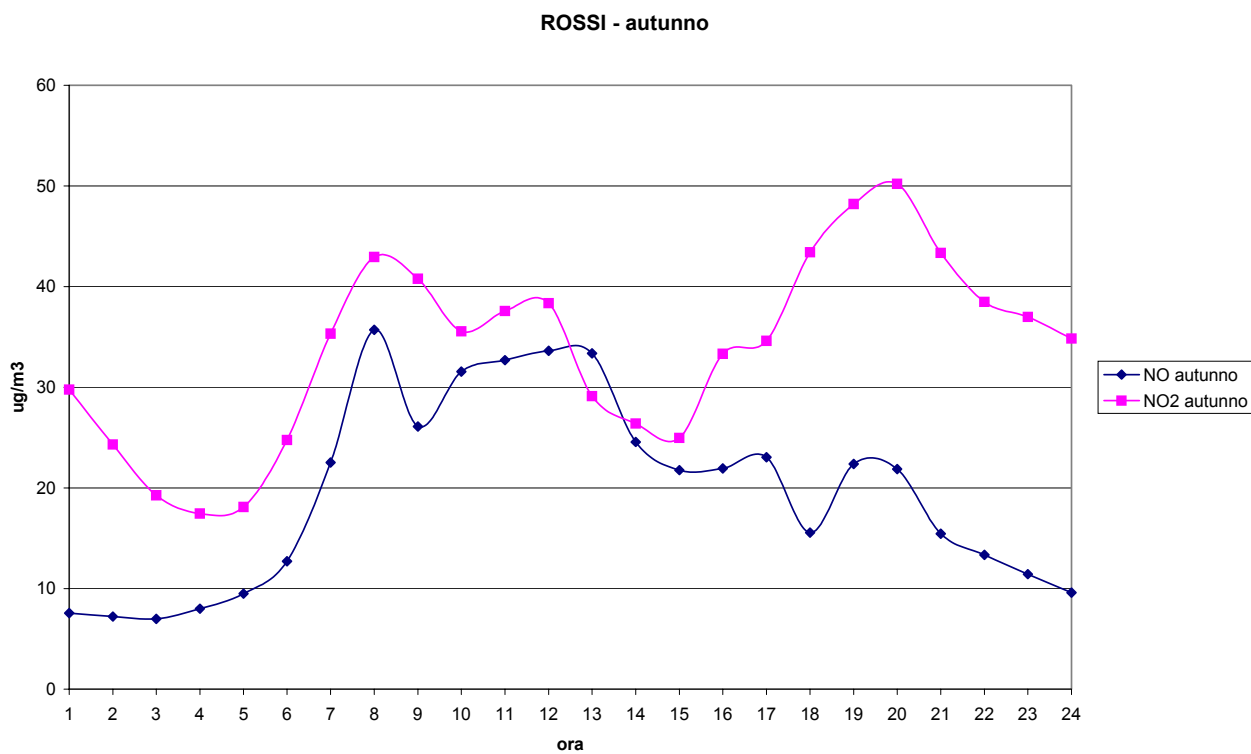


Fig. 32 – Giorno medio autunnale della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Rossi.

3.2 Piombino

3.2.1 Elaborazione delle variabili meteorologiche

Per lo studio dell'area di Piombino sono state utilizzate due stazioni meteorologiche, la stazione di Torre del Sale della rete *ARQA*, localizzata presso Piombino, e la stazione di *ARSIA* presso Massa Marittima.

Anche in questo caso, nelle seguenti tabelle sono riportate le principali caratteristiche delle due stazioni: le coordinate geografiche e la quota sul livello del mare, i parametri meteorologici misurati, l'altezza dell'anemometro dal suolo, l'intervallo temporale preso in esame.

Tab. 7 – Riassunto delle caratteristiche delle stazioni meteorologiche utilizzate.

<i>Stazione</i>	<i>Ente di appartenenza</i>	<i>Località</i>	<i>Latitudine</i>	<i>Longitudine</i>	<i>Altezza s.l.m. (m)</i>
Torre del Sale	<i>ARQA</i>	Piombino	4.757.315	631.692	0
Massa Marittima	<i>ARSIA</i>	Massa Marittima	4.760.531	656.273	180

Tab. 8 – Riassunto delle variabili meteorologiche utilizzate.

<i>Stazione</i>	<i>Periodo coperto</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Velocità vento</i>	<i>Direzione vento</i>	<i>Altezza sensore (m)</i>
Torre del Sale	01/01/96-10/05/96 10/12/96-31/07/97	SI	SI	SI	10
Massa Marittima	01/01/96-22/12/97	SI	SI	SI	3

Per quanto riguarda i dati della velocità del vento misurati nella stazione Massa Marittima, in cui l'anemometro si trova a 3 m dal suolo, sono stati stimati i corrispondenti valori orari ad una quota di 10 m in base all'equazione (1) (§ 3.1.1).

Di seguito sono riportati i grafici relativi al giorno medio stagionale della velocità del vento per le due stazioni. Manca l'elaborazione relativa al periodo autunnale per Torre del Sale perché sono assenti i dati sia nel 1996 che nel 1997.

L'andamento della velocità del vento è molto simile nelle due stazioni (Figg. 33, 34, 35, 36 e 37): in inverno la velocità è mediamente più alta, quasi costante, mentre in primavera ed in estate c'è una forte variazione, con velocità più elevate nelle ore centrali del giorno.

TORRE DEL SALE - VV

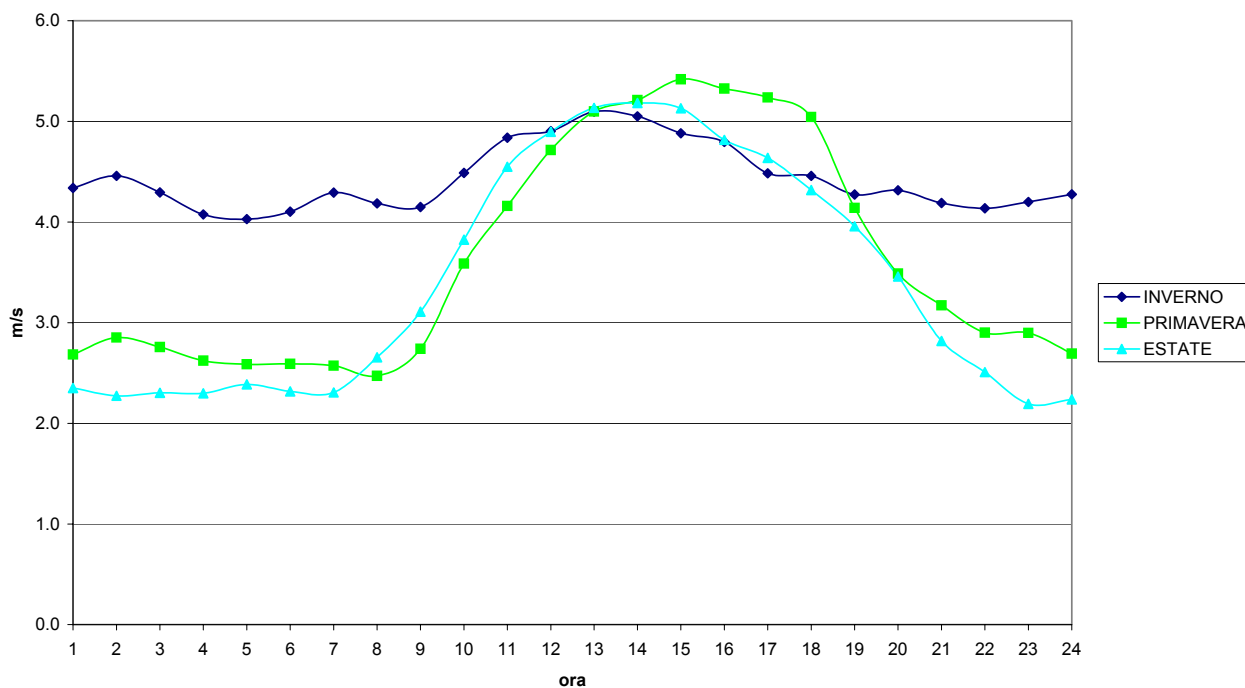


Fig. 33 – Giorno medio stagionale della velocità del vento rilevata nella stazione Torre del Sale.

MASSA MARITTIMA - VV

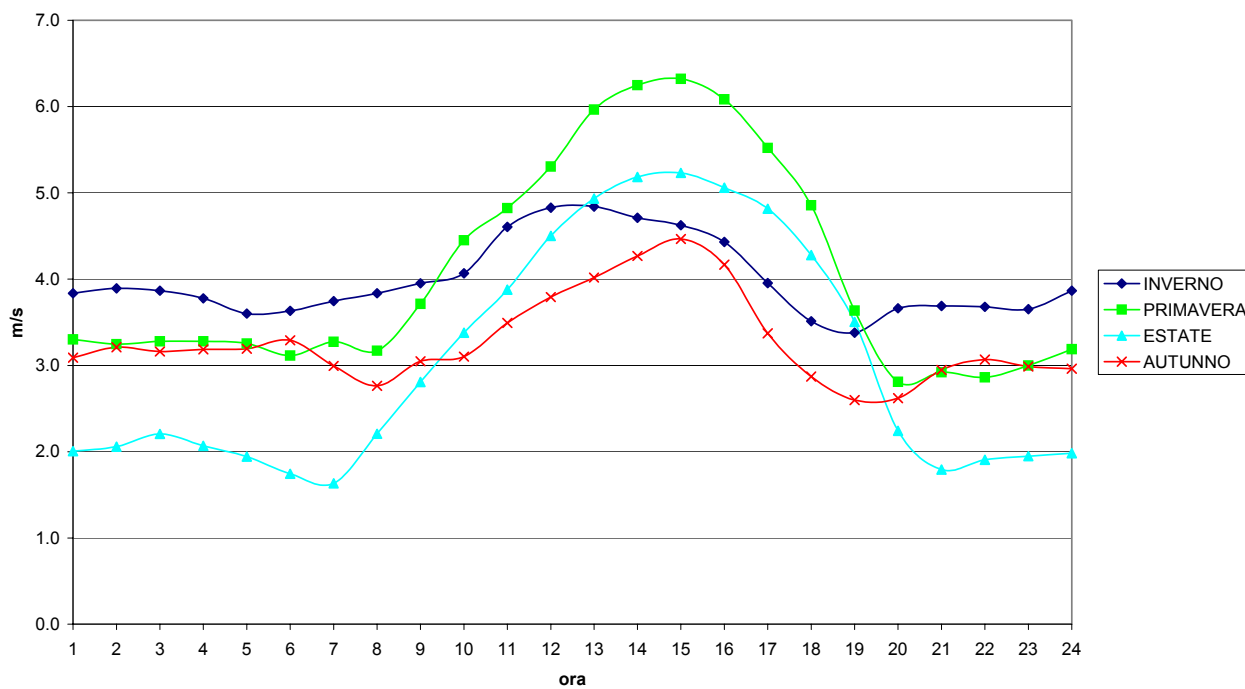


Fig. 34 – Giorno medio stagionale della velocità del vento rilevata nella stazione Massa Marittima.

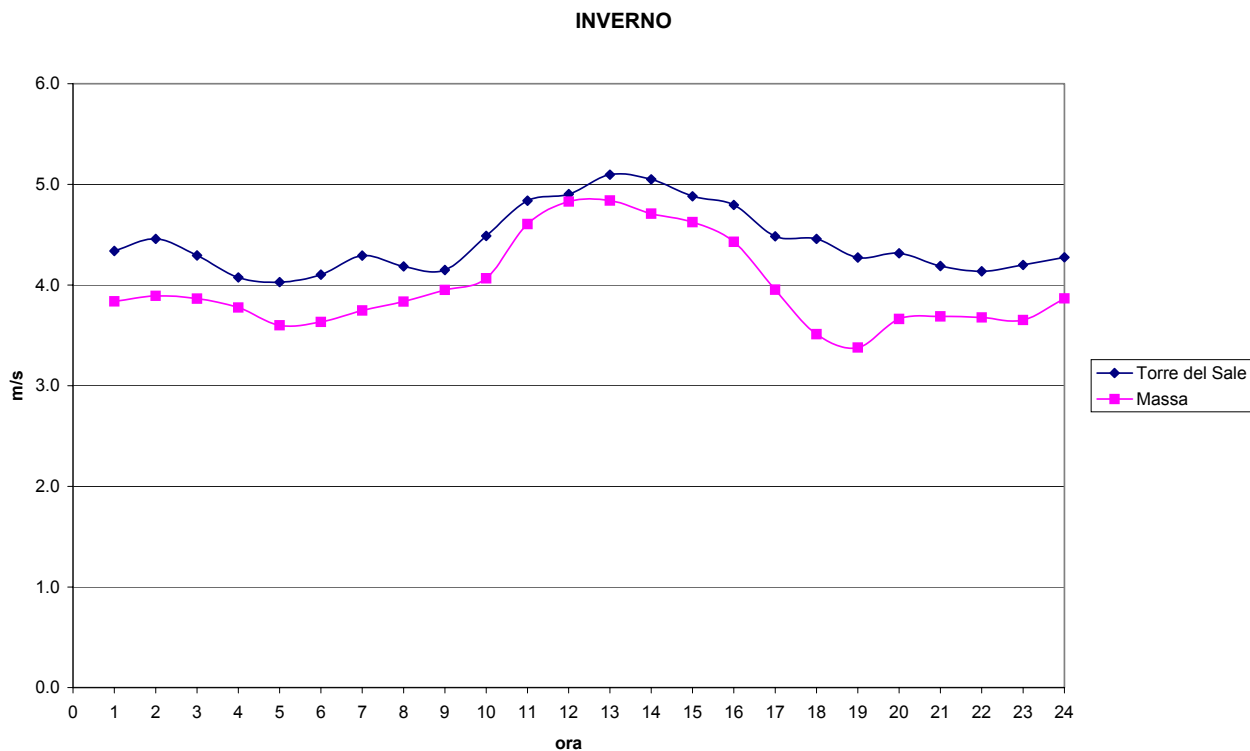


Fig. 35 – Giorno medio invernale della velocità del vento rilevata nelle stazioni Torre del Sale e Massa Marittima.

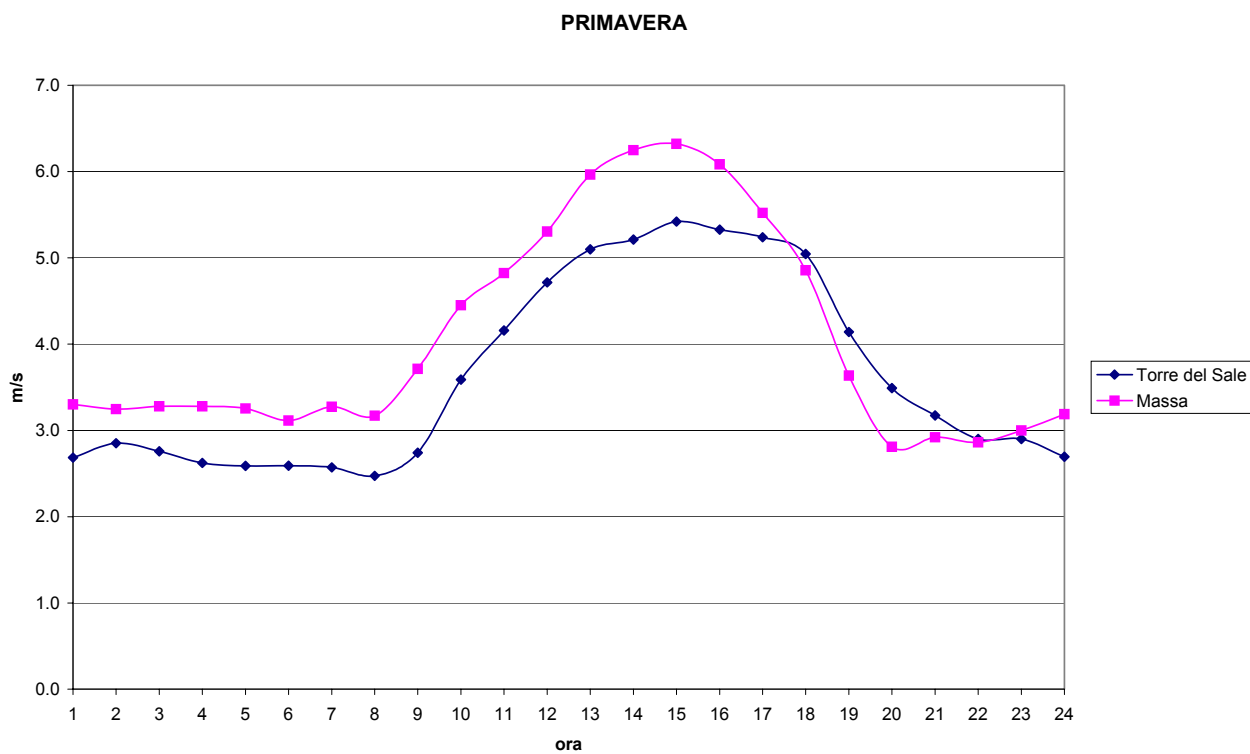


Fig. 36 – Giorno medio primaverile della velocità del vento rilevata nelle stazioni Torre del Sale e Massa Marittima.

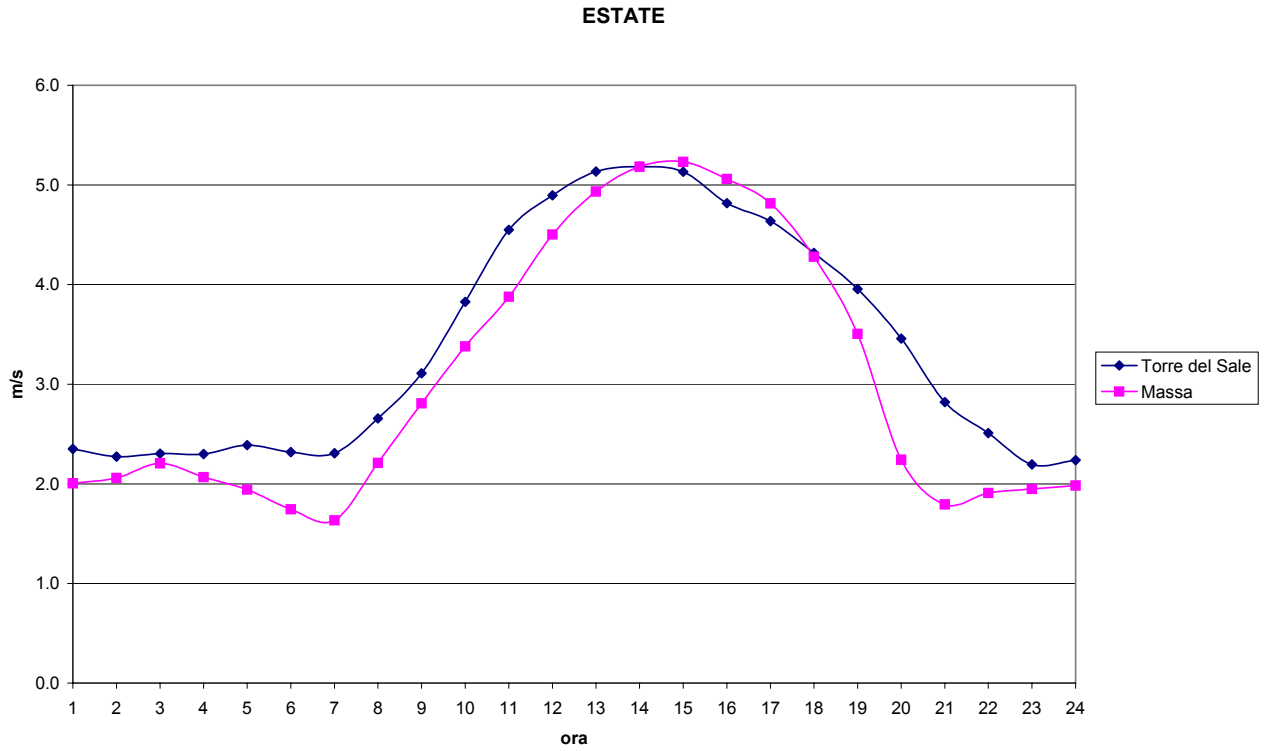


Fig. 37 – Giorno medio estivo della velocità del vento rilevata nelle stazioni Torre del Sale e Massa Marittima.

3.2.2 Elaborazione dei valori di concentrazione degli inquinanti

Sono stati elaborati i valori di concentrazione di alcuni inquinanti misurati nelle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria della rete *ARQA*. Anche in questo caso nella seguente tabella sono riportate le coordinate geografiche e la località, per ciascuna stazione.

Tab. 9 – Riassunto delle caratteristiche delle stazioni chimiche utilizzate.

<i>Stazione</i>	<i>Ente di appartenenza</i>	<i>Località</i>	<i>Latitudine</i>	<i>Longitudine</i>
Modigliani	<i>ARQA</i>	Piombino	4.754.832	623.485
Torino	<i>ARQA</i>	Piombino	4.754.192	624.655
Riotorto	<i>ARQA</i>	Piombino	4.760.125	637.664
Venturina	<i>ARQA</i>	Campiglia	4.765.498	630.833
Scalo	<i>ARQA</i>	Scarlino	4.755.802	649.290
Fontino	<i>ARQA</i>	Scarlino	4.752.703	650.445

Sono stati presi in esame i dati misurati nelle stazioni della rete *ARQA*, con l'esclusione delle stazioni gestite da ENEL, in quanto i dati nel periodo di interesse non coprono un intervallo temporale sufficientemente lungo.

Tab. 10 – Riassunto degli inquinanti analizzati.

<i>Stazione</i>	<i>Periodo coperto</i>	<i>SO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>PTS</i>
Modigliani	01/01/96-31/07/97	SI	NO	NO
Torino	01/01/96-31/07/97	SI	SI	SI
Riotorto	01/01/96-31/07/97	SI	NO	NO
Venturina	01/01/96-31/07/97	SI	NO	NO
Scalo	01/01/96-31/07/97	SI	NO	SI
Fontino	01/01/96-31/07/97	SI	NO	NO

Tab. 11 – Riassunto delle elaborazioni effettuate.

<i>Stazione</i>	<i>Inquinante</i>	<i>Serie storica</i>	<i>Giorno medio</i>			
			<i>inverno</i>	<i>primavera</i>	<i>estate</i>	<i>autunno</i>
Torino	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
	NO _x	SI	NO	SI	SI	SI
	PTS	SI	NO	NO	NO	NO
Scalo	SO ₂	SI	SI	NO	SI	SI
	PTS	SI	NO	NO	NO	NO
Modigliani	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
Riotorto	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
Venturina	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI
Fontino	SO ₂	SI	SI	SI	SI	SI

I dati più completi sono quelli relativi alla concentrazione di SO₂, mentre la concentrazione di NO-NO₂ viene rilevata esclusivamente nella stazione Torino: il periodo su cui sono state effettuate le elaborazioni, però, è limitato all'intervallo compreso tra il 01/04/96 e il 31/12/96. I dati relativi alle polveri, campionati con cadenza trioraria, non sono stati elaborati, in quanto giudicati non affidabili (Figg. 46 e 47).

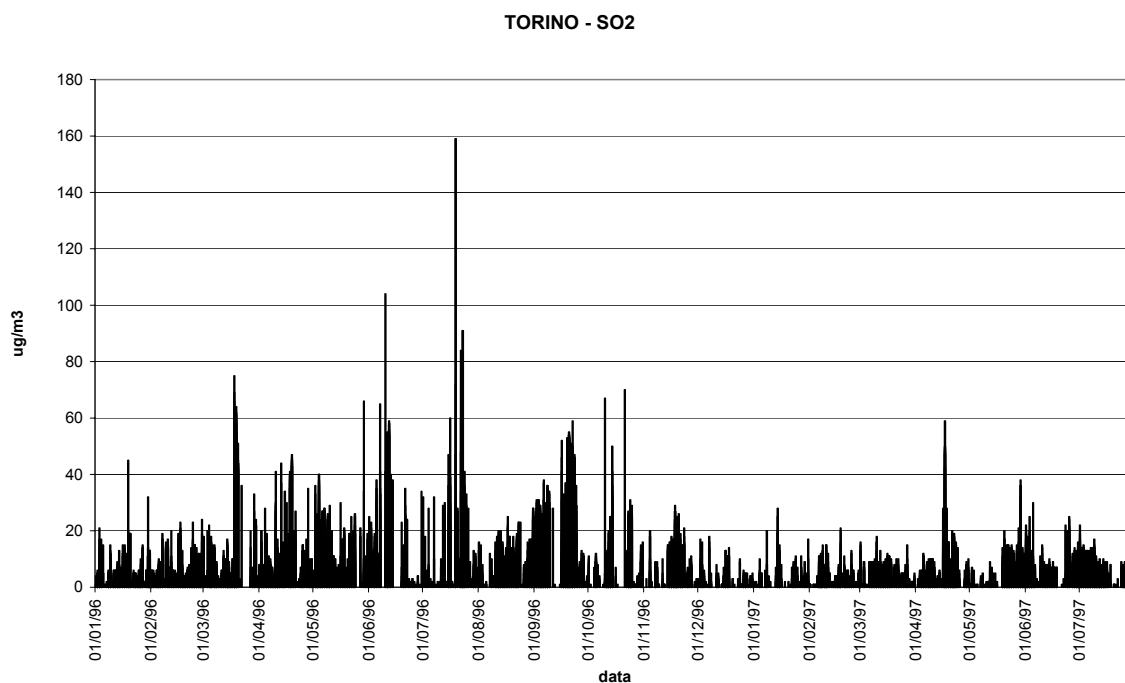


Fig. 38 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Torino.

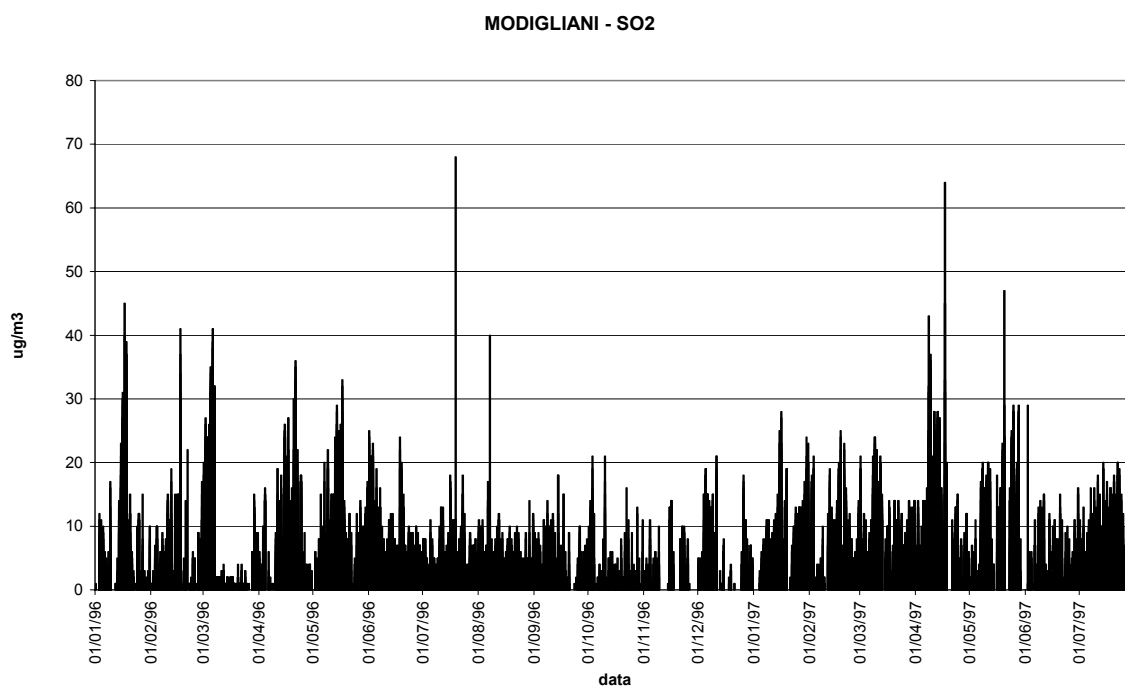


Fig. 39 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Modigliani.

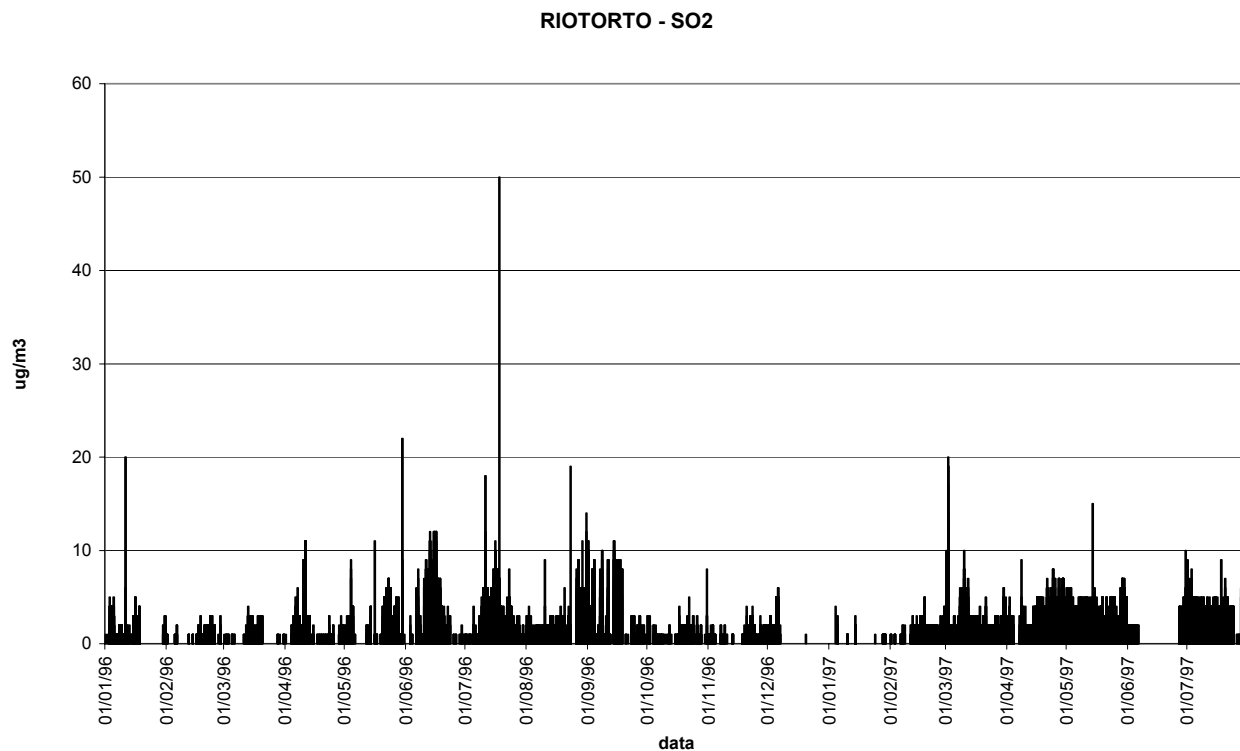


Fig. 40 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Riotorto.

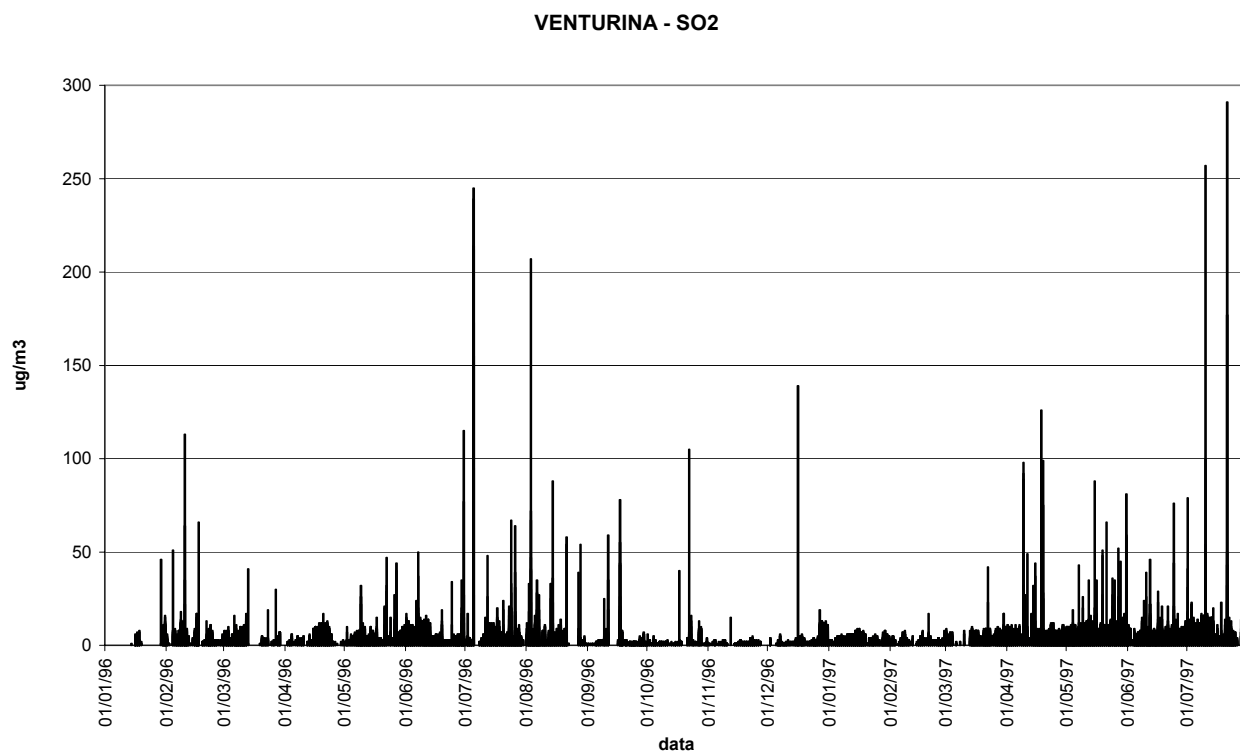


Fig. 41 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Venturina.

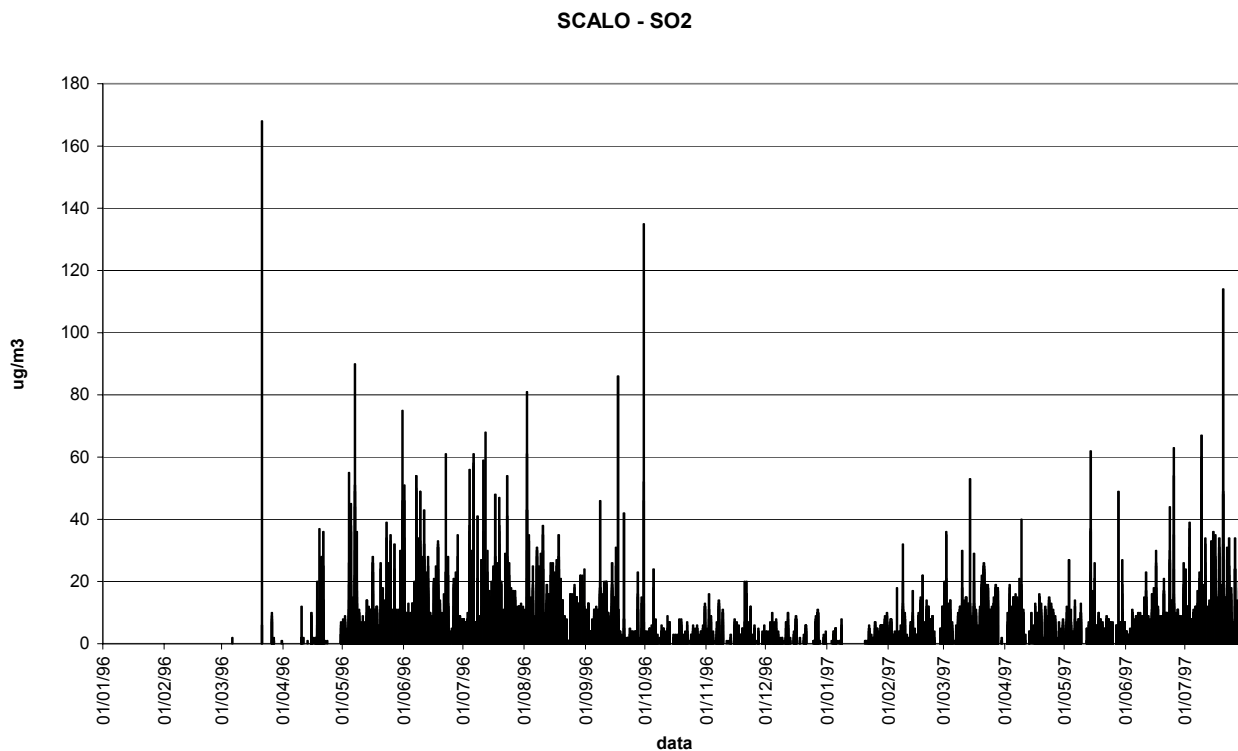


Fig. 42 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Scalo.

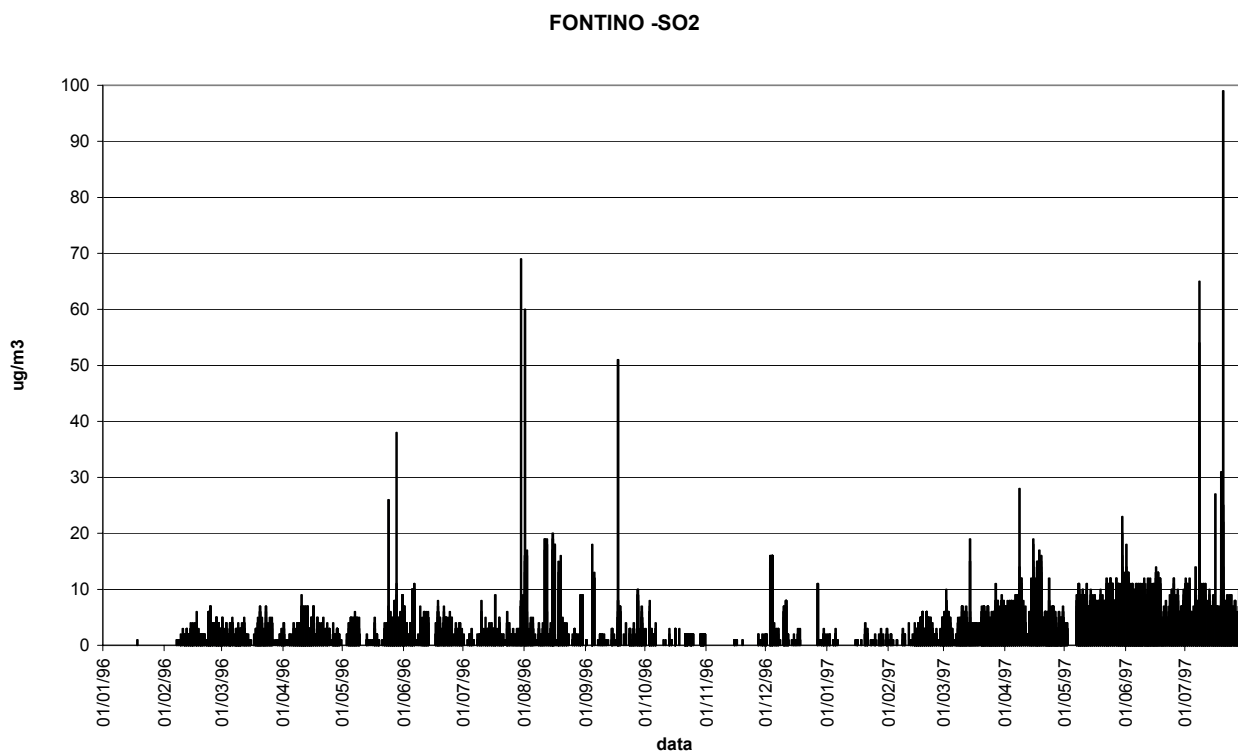


Fig. 43 – Istogramma relativo alla concentrazione di SO₂ registrata nella stazione Fontino.

TORINO - NO₂

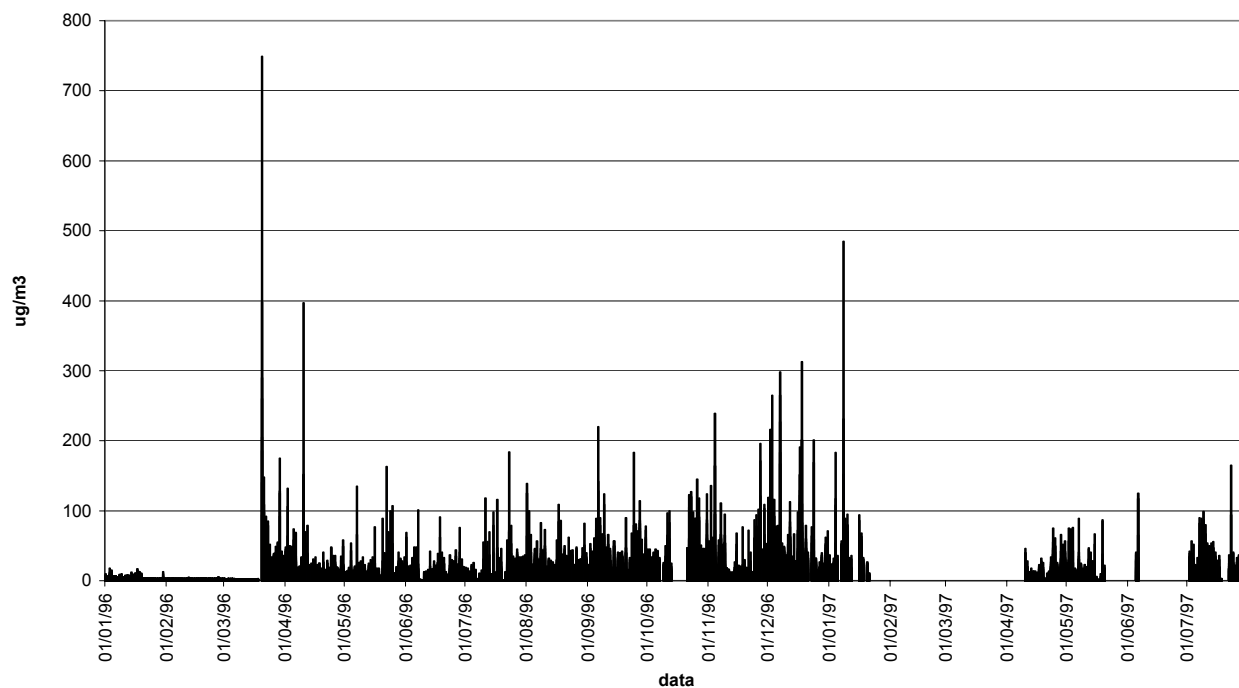


Fig. 44 – Istogramma relativo alla concentrazione di NO₂ registrata nella stazione Torino.

TORINO - NO

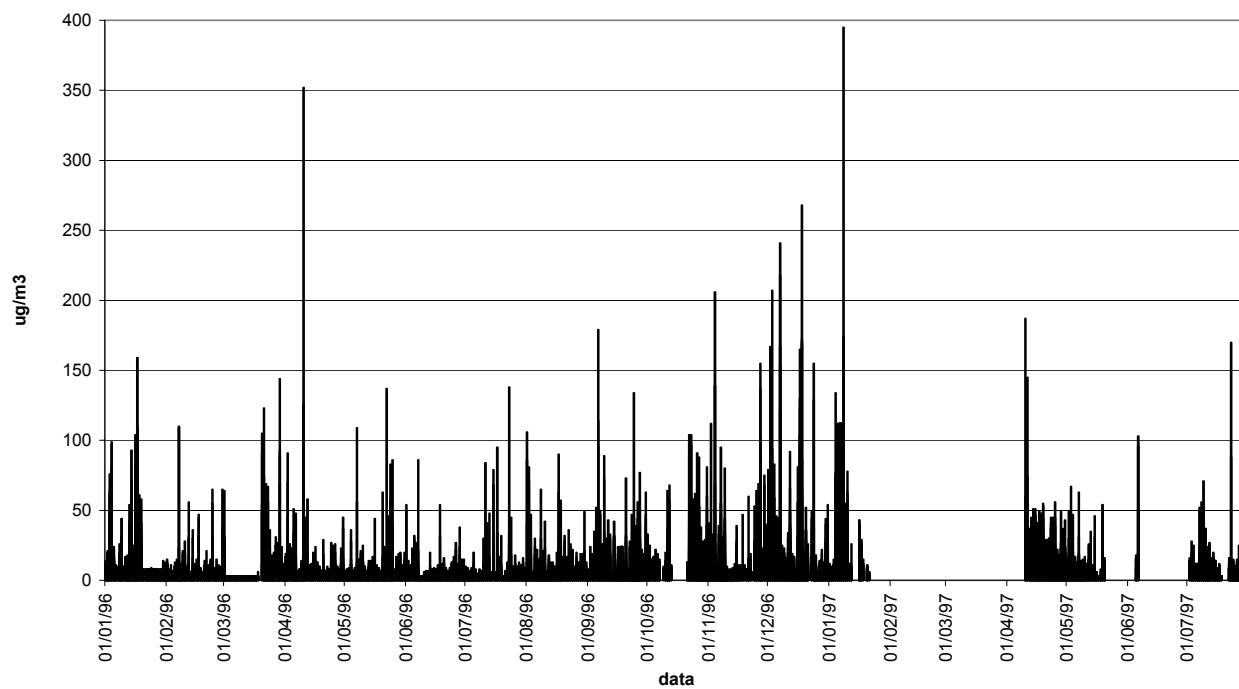


Fig. 45 – Istogramma relativo alla concentrazione di NO registrata nella stazione Torino.

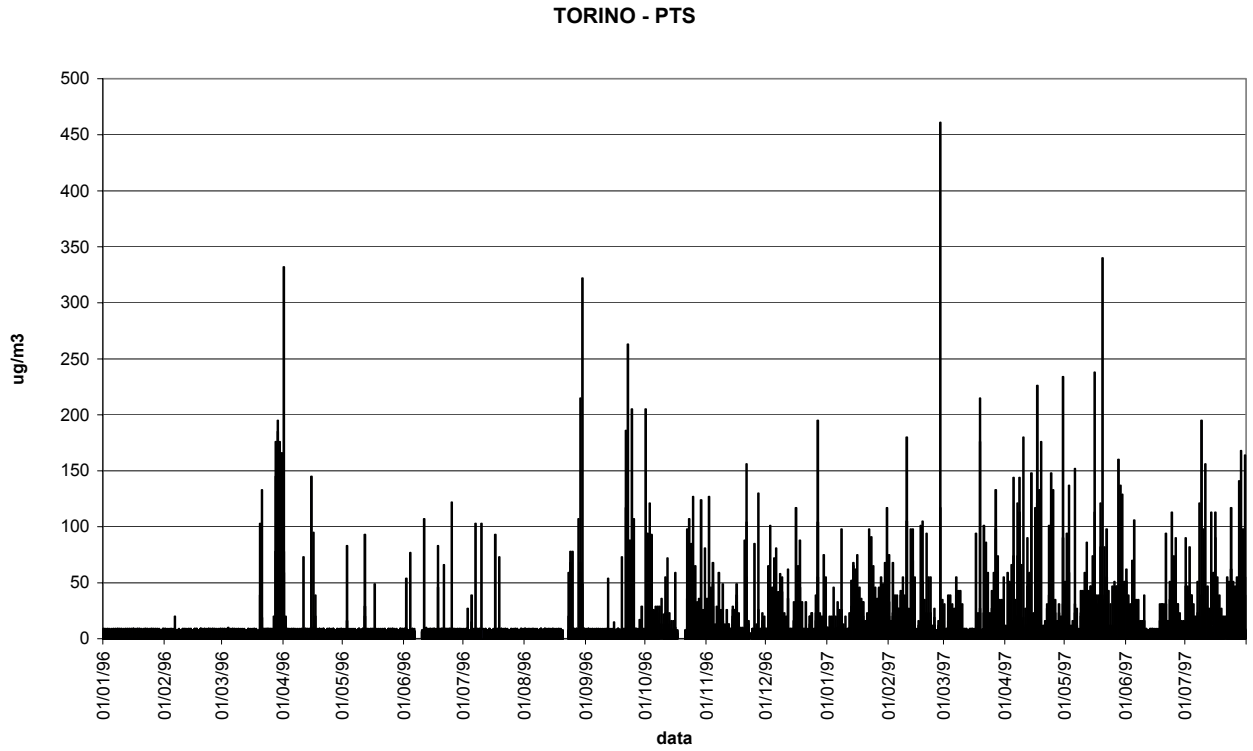


Fig. 46 – Istogramma relativo alla concentrazione di polveri registrata nella stazione Torino.

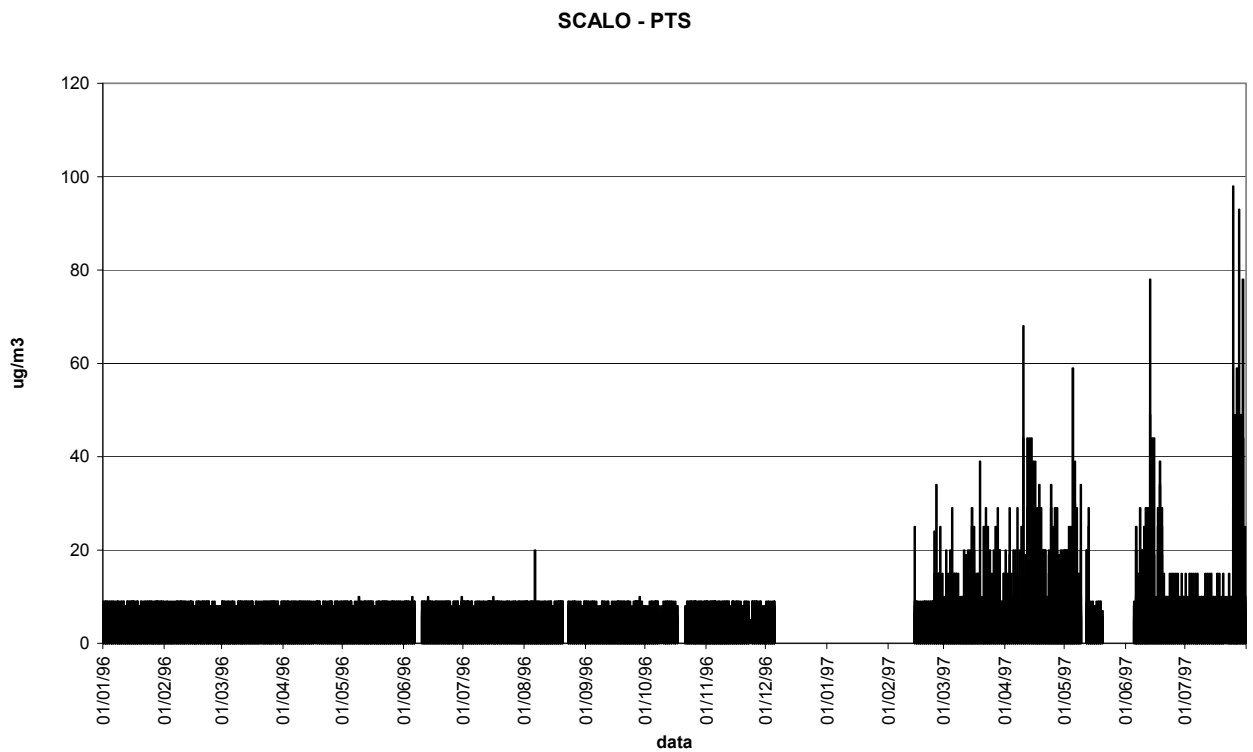


Fig. 47 – Istogramma relativo alla concentrazione di polveri registrata nella stazione Scalo.

Le medie stagionali di concentrazione degli inquinanti presi in esame (Tab. 12), insieme ai grafici relativi al giorno medio riportati di seguito, possono essere di aiuto per individuare eventuali correlazioni tra i valori rilevati nelle diverse centraline e le elaborazioni relative alla velocità del vento.

Tab. 12 – Riassunto delle elaborazioni effettuate.

Stazione	Inquinante	Giorno medio			
		<i>inverno</i>	<i>primavera</i>	<i>estate</i>	<i>autunno</i>
Torino	SO ₂ µg/m ³	2	5	5	9
	NO ₂ µg/m ³	-	14	13	23
	NO µg/m ³	-	8	6	12
Scalo	SO ₂ µg/m ³	1	-	9	3
Modigliani	SO ₂ µg/m ³	4	5	4	1
Riotorto	SO ₂ µg/m ³	1	2	2	1
Venturina	SO ₂ µg/m ³	2	5	6	1
Fontino	SO ₂ µg/m ³	1	3	3	1

SO₂

I valori di concentrazione di SO₂ variano molto da stazione a stazione: osservando le serie storiche si può notare che in alcuni casi (Venturina, Fig. 41, Fontino, Fig. 43) si presentano dei picchi di concentrazione molto alti rispetto ad un andamento medio marcatamente più basso, mentre in altre stazioni (Torino, Fig. 38, Modigliani, Fig. 39, Scalo, Fig. 42) l'andamento è più uniforme.

Un discorso a parte vale per la stazione Riotorto (Fig. 40), in cui sono rilevati i valori più bassi: dall'osservazione della serie storica, si potrebbe ipotizzare che siano state effettuate ricalibrature dell'analizzatore automatico, nell'arco di tempo preso in esame; i dati sono stati comunque elaborati.

L'andamento del giorno medio stagionale è sostanzialmente differente in ciascuna stazione, anche se si può riscontrare che in alcune di queste, Modigliani, Torino, Riotorto, Fontino¹ (Figg. 48, 49, 50 e 52), si ha una marcata diminuzione della concentrazione nelle ore centrali del giorno.

Situazione completamente diversa si presenta nelle stazioni Venturina e Scalo, in cui la concentrazione di SO₂ relativa al giorno medio estivo è decisamente più alta; è inoltre presente un picco proprio nelle ore centrali del giorno. Come nel caso di Livorno, da questa analisi si deduce che c'è una marcata dipendenza dei valori di concentrazione di SO₂ dalla posizione delle stazioni: ciò rende particolarmente difficile estendere ad un'area più vasta le considerazioni che si possono ottenere dalle misure puntuali effettuate dalle centraline di monitoraggio.

¹ fatta eccezione, in quest'ultima, per il giorno medio estivo.

MODIGLIANI - SO₂

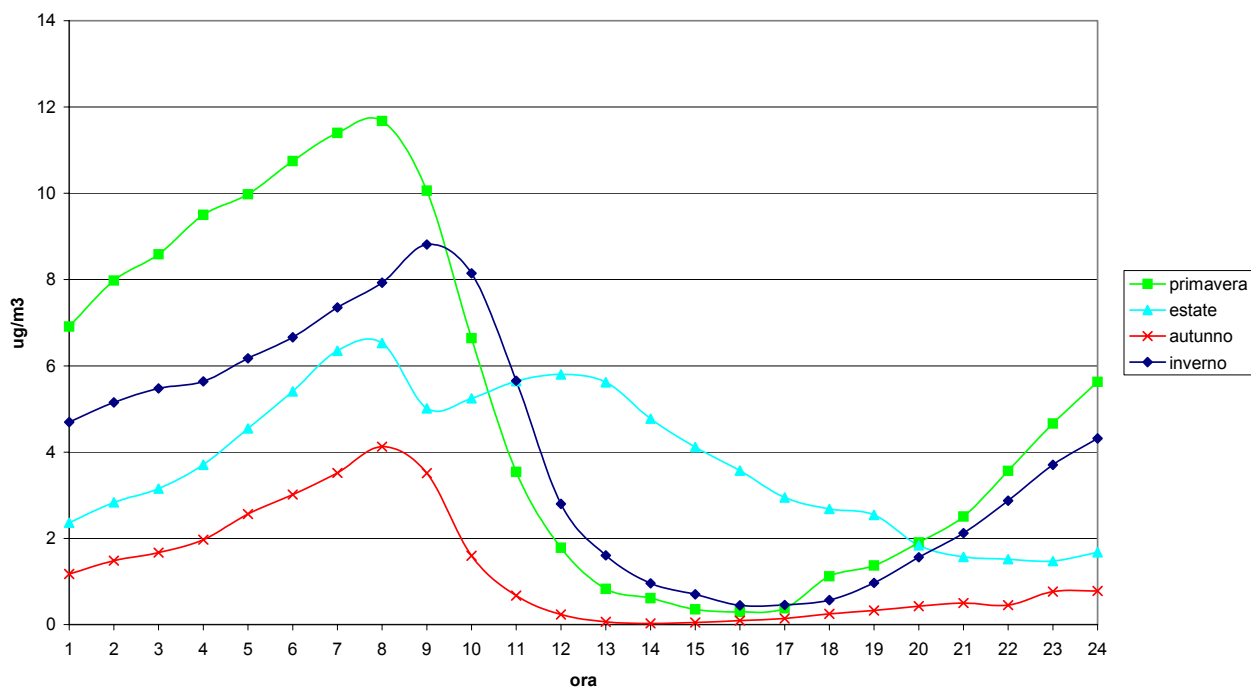


Fig. 48 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Modigliani.

TORINO - SO₂

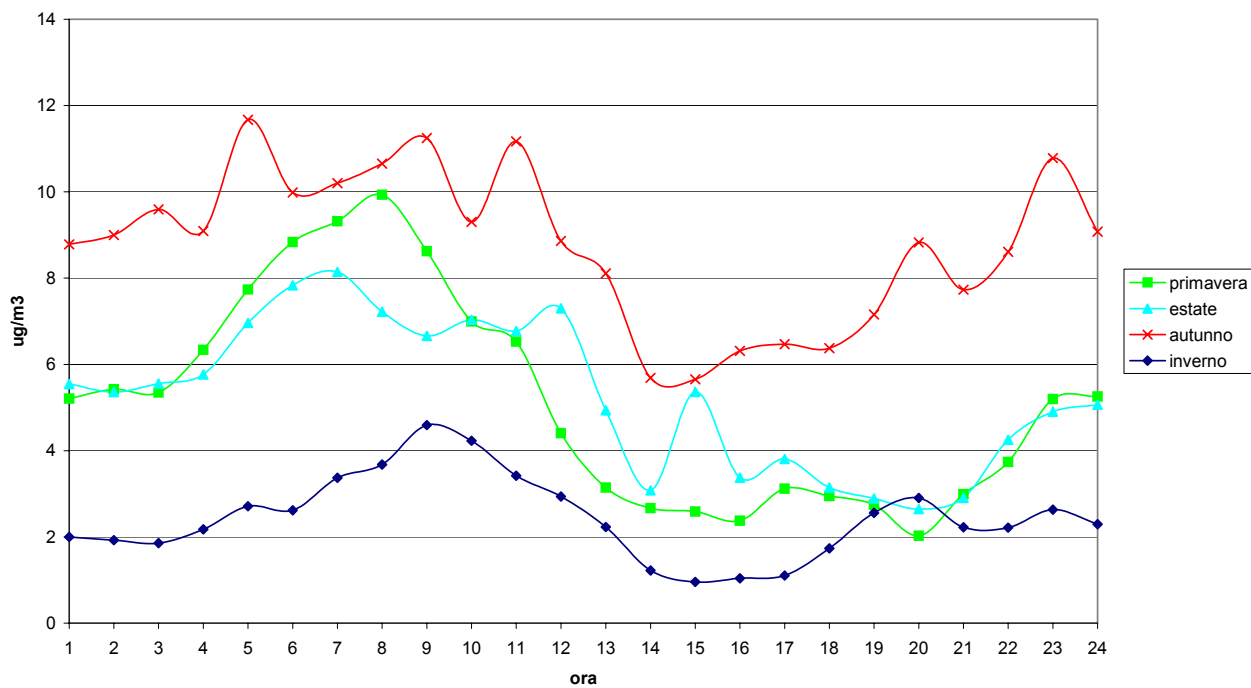


Fig. 49 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Torino.

RIOTORTO - SO2

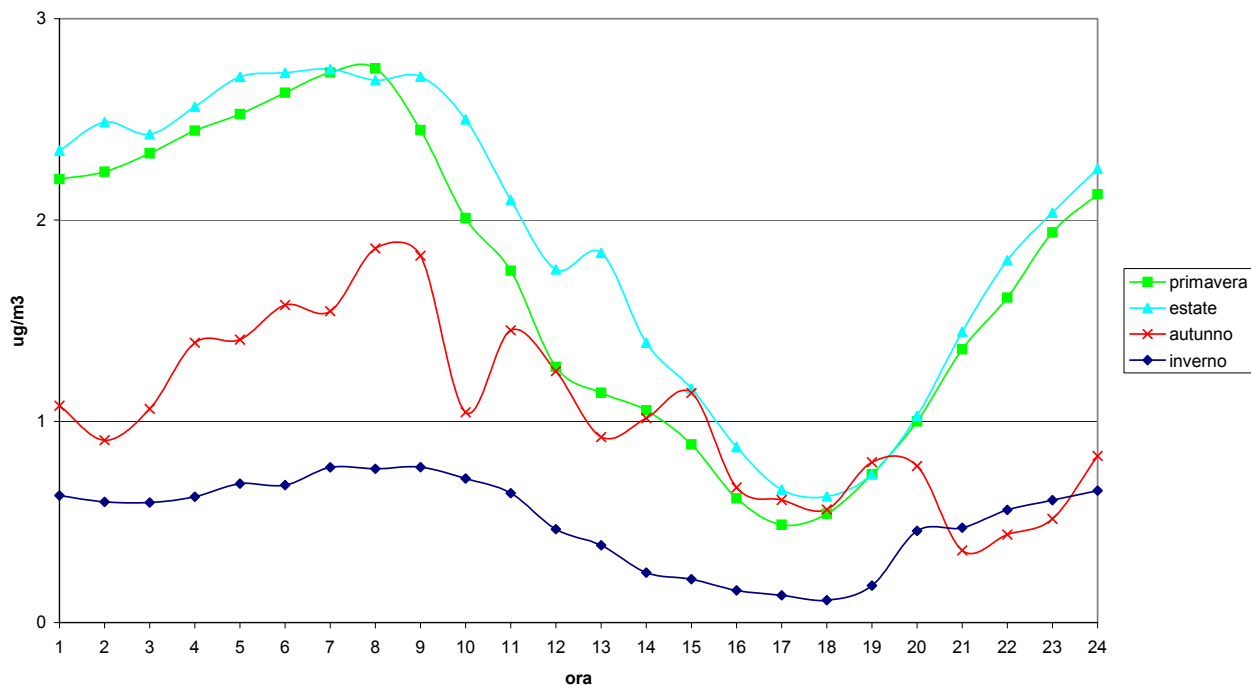


Fig. 50 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Riortorto.

VENTURINA - SO2

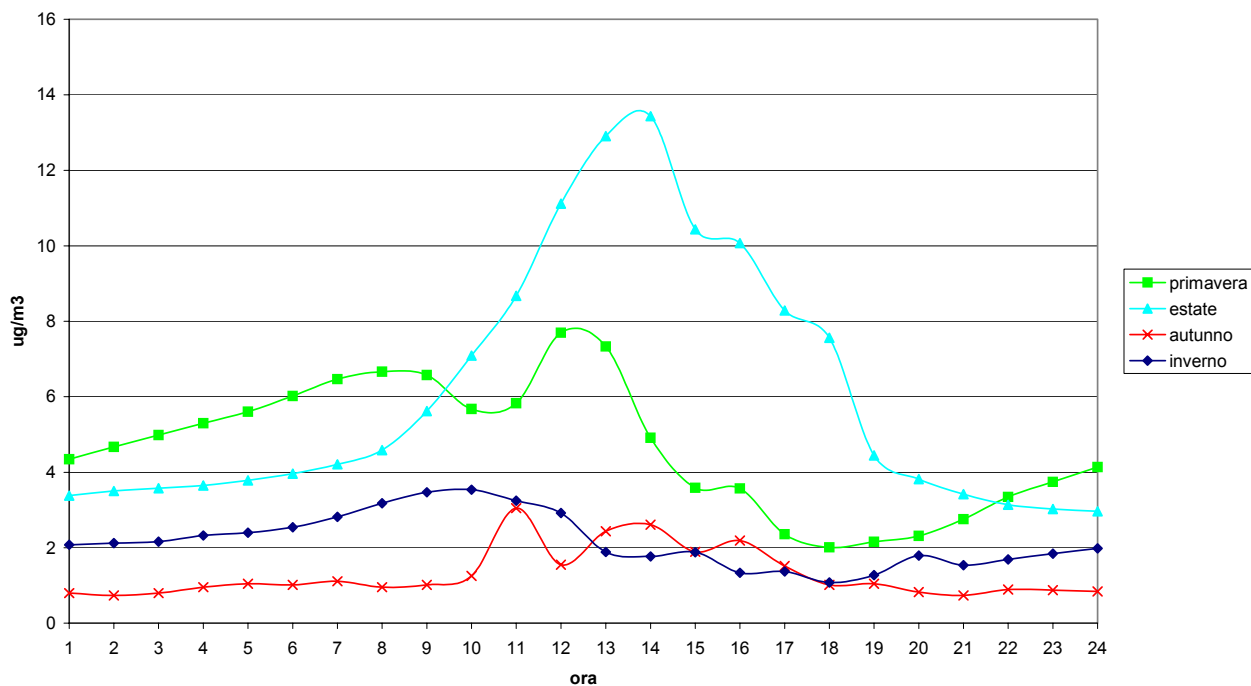


Fig. 51 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Venturina.

FONTINO - SO₂

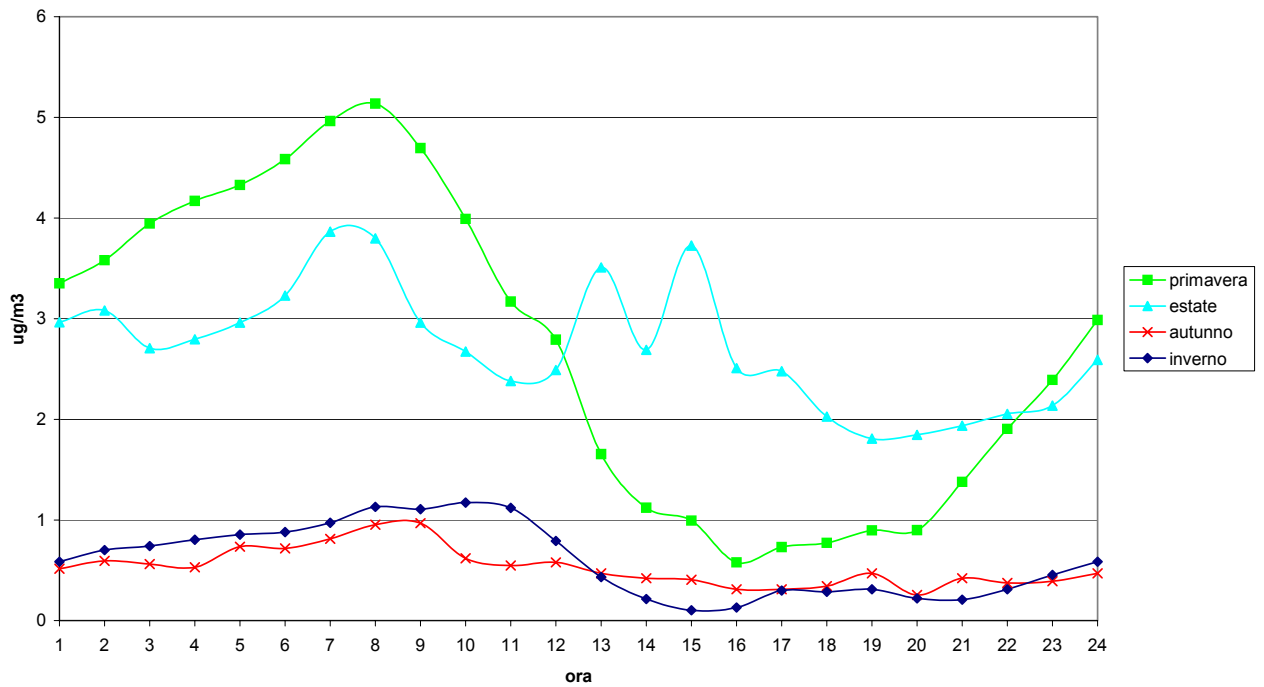


Fig. 52 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Fontino.

SCALO - SO₂

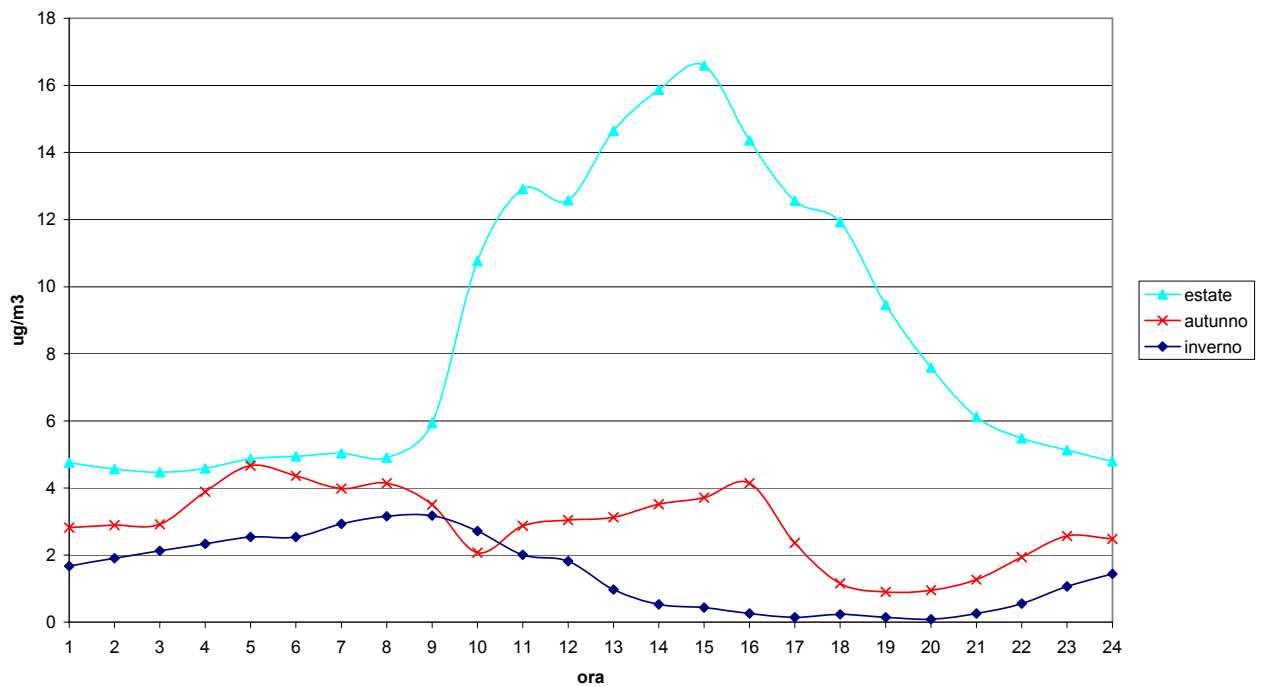


Fig. 53 – Giorno medio della concentrazione di SO₂ rilevata nella stazione Scalo.

NO - NO₂

Gli ossidi di azoto sono misurati esclusivamente nella stazione Torino. I giorni medi primaverile ed estivo mostrano andamenti simili, presentando un picco nelle prime ore della mattina, intorno alle ore 6, mentre in autunno si evidenziano tre massimi: intorno alle 8, alle 19 e, in misura minore, alle 22.

Confrontando gli andamenti relativi a NO₂ e NO, si può notare che i giorni medi stagionali sono molto simili: come nel caso di Livorno, si può ipotizzare che non si realizzino le condizioni di accumulo di NO e la conseguente trasformazione in NO₂ a seguito di reazioni fotochimiche, e che il forte vento, caratteristico del sito, contribuisca in modo determinante a disperdere gli inquinanti nell'aria.

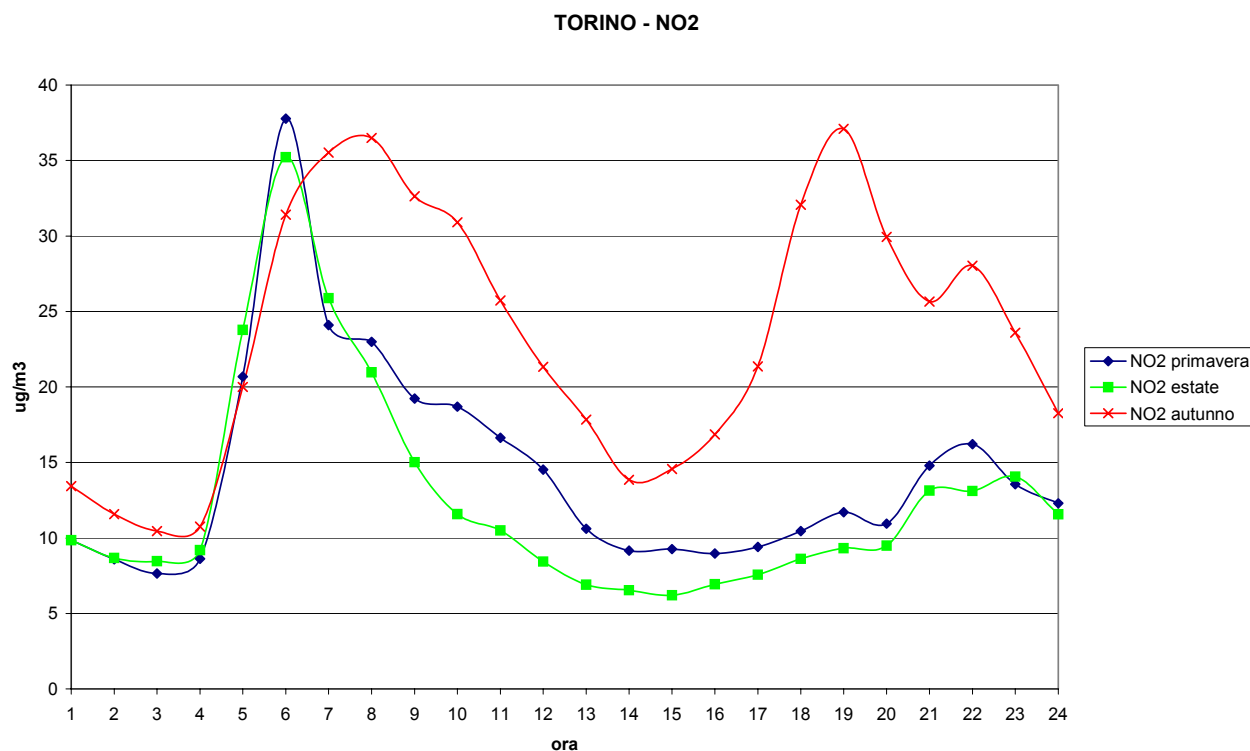


Fig. 54 – Giorno medio della concentrazione di NO₂ rilevata nella stazione Torino.

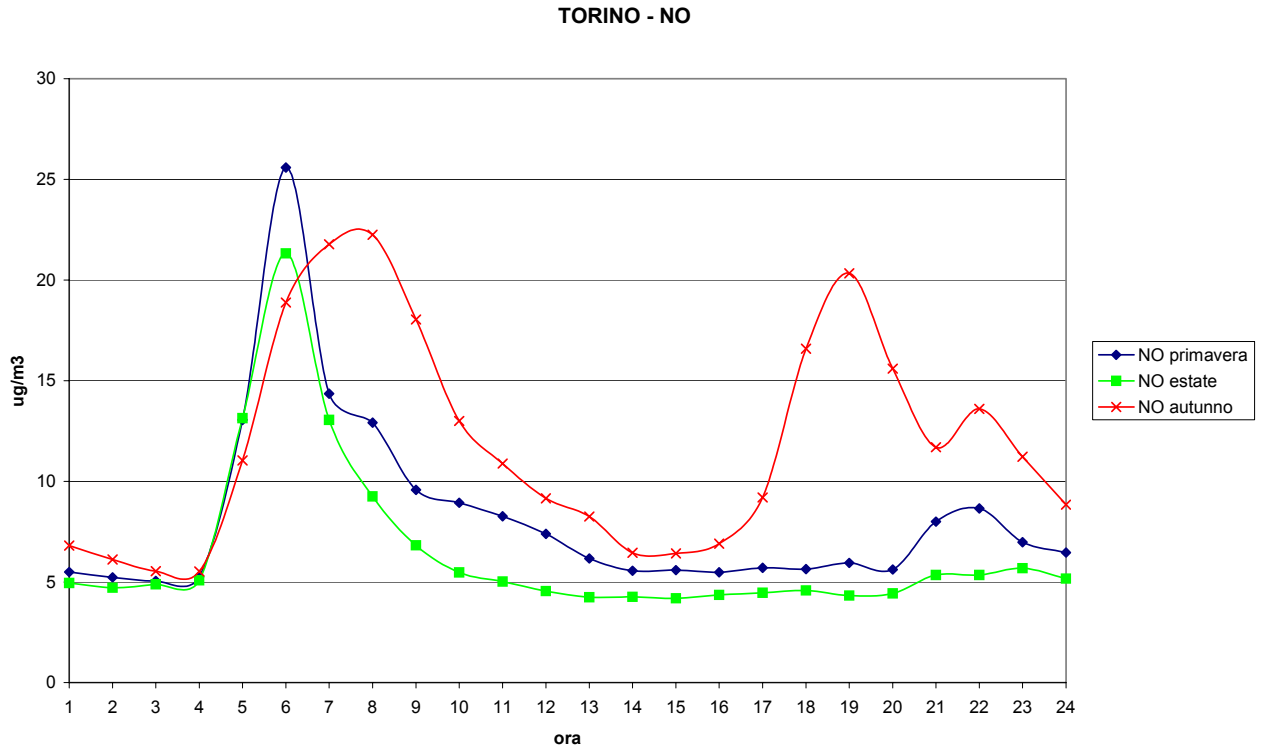


Fig. 55 – Giorno medio della concentrazione di NO rilevata nella stazione Torino.

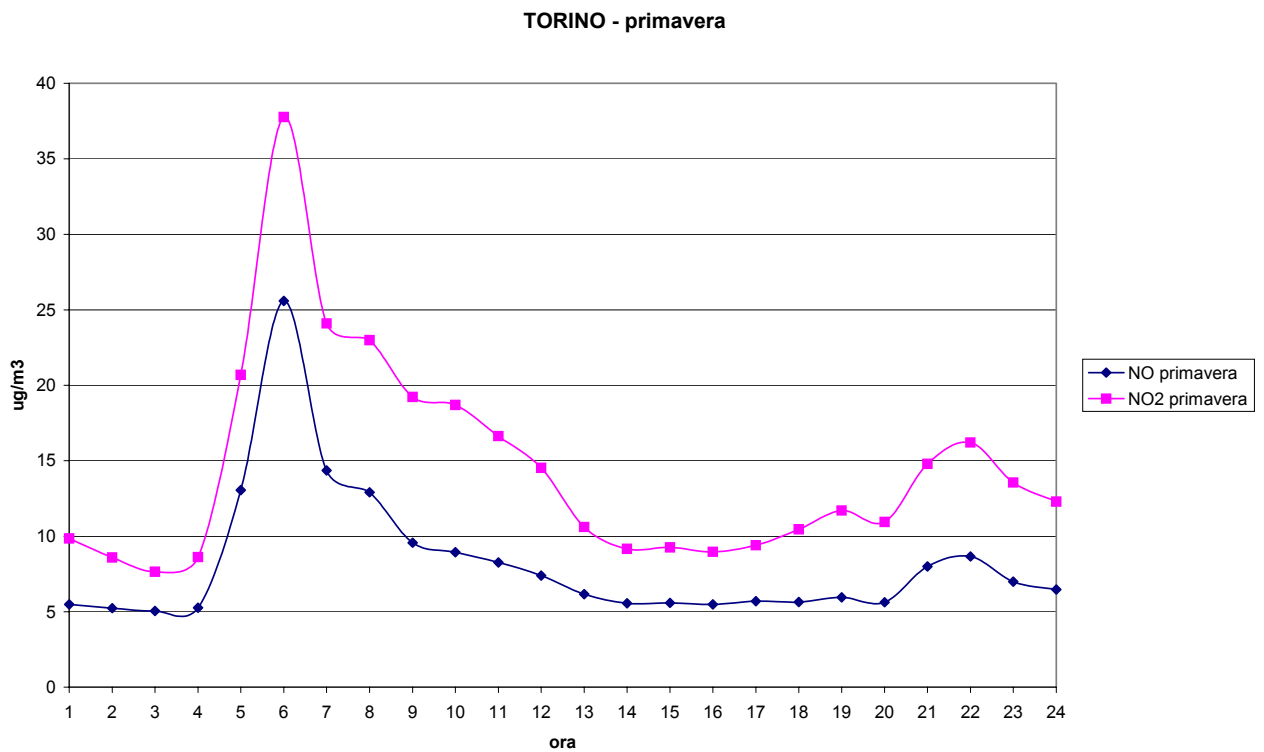


Fig. 56 – Giorno medio primaverile della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Torino.

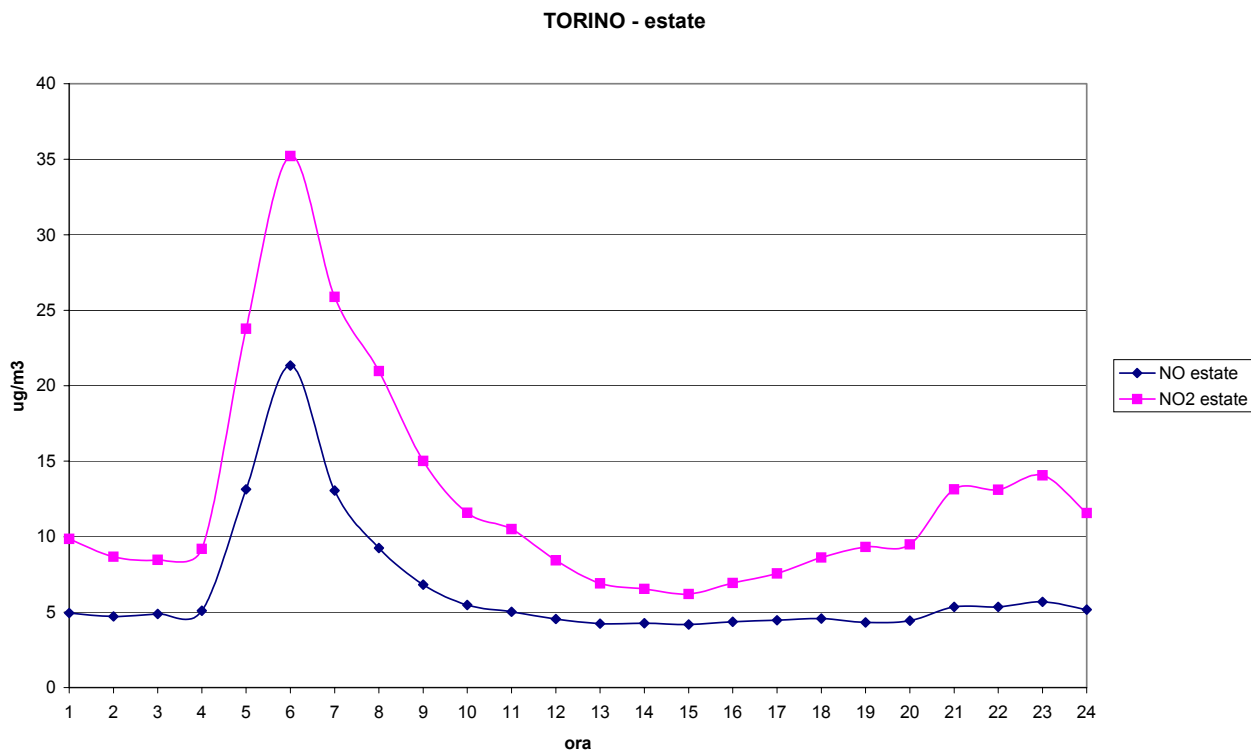


Fig. 57 – Giorno medio estivo della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Torino.

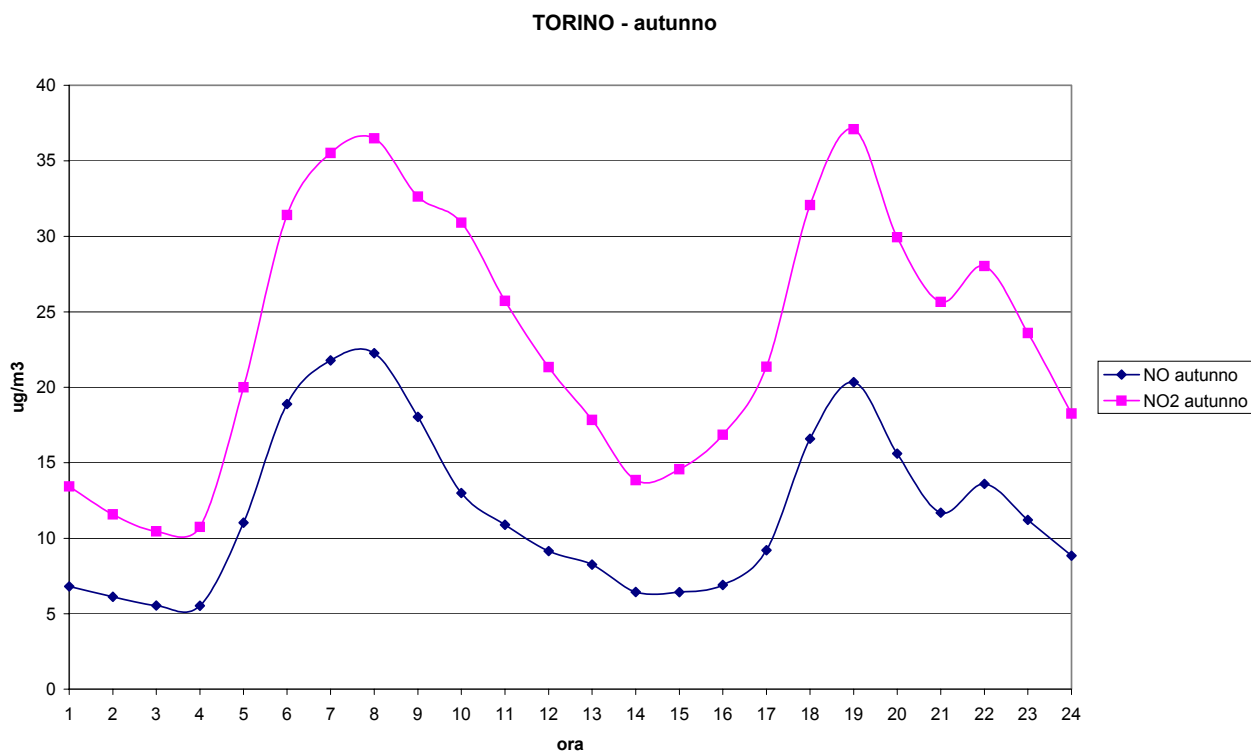


Fig. 58 – Giorno medio autunnale della concentrazione di NO₂ e NO rilevata nella stazione Torino.

In sintesi, da questa prima analisi dei dati si possono fare alcune considerazioni:

- in primo luogo, per quanto riguarda le variabili meteorologiche, dall'analisi del giorno medio si osserva che i valori di velocità del vento rilevati nelle varie stazioni presentano degli andamenti simili: questo è particolarmente importante nei casi in cui l'anemometro non si trova a 10 m dal suolo ed i valori corrispondenti sono stati determinati tramite l'equazione (1).

Relativamente ai valori di concentrazione degli inquinanti, per i entrambi i siti valgono le seguenti considerazioni:

- si deduce che c'è una forte dipendenza dei valori di concentrazione di SO₂ dalla posizione delle centraline, che presentano situazioni diverse sia negli andamenti, che nei valori rilevati. Non risulta quindi facile fare considerazioni che si possano estendere alle intere aree di Livorno e di Piombino, data la forte dipendenza spaziale dei valori misurati, ed è quindi indispensabile un approccio di tipo modellistico;
- per quanto riguarda i valori relativi ad NO ed NO₂, si può notare che gli andamenti del giorno medio sono molto simili: questo fa ipotizzare che non si realizzino le condizioni di accumulo di NO e la conseguente trasformazione in NO₂ a seguito di reazioni fotochimiche. E' probabile che il forte vento, caratteristico dei siti, contribuisca in modo determinante a ripulire l'aria. Un discorso analogo vale per il caso del CO.

4. Analisi dei regimi anemologici

Per lo studio dell'inquinamento atmosferico è indispensabile conoscere le caratteristiche e l'occorrenza dei regimi anemologici prevalenti in una data area. La definizione di tali regimi permette di valutare l'importanza e la rappresentatività di casi studio particolari, così come consente di individuare le situazioni maggiormente critiche o ricorrenti. In pratica si parla di regime anemologico quando si è in grado di individuare una coppia di valori (vv, dv) – intensità e direzione del vento – significativamente ricorrente e caratterizzata da una *range* ristretto e specifico delle due variabili registrate. L'individuazione dei regimi anemologici permette di comprendere meglio i fenomeni che sono alla base della generazione dei venti in una data area.

In passato, l'individuazione dei regimi anemologici veniva fatta manualmente sulla base della conoscenza ed esperienza dell'operatore. Recentemente, la tendenza è quella di utilizzare procedure automatiche che hanno il vantaggio di non risentire dell'influenza del singolo operatore. L'usuale metodologia prevede la classificazione delle grandezze registrate in un periodo limitato e tuttavia rappresentativo (stagionale, annuale, etc.), concentrando l'attenzione su intervalli temporali di specifico interesse. I dati utilizzati per la classificazione del vento sono solitamente orari.

L'analisi che segue ha preso in considerazione i casi estivo ed invernale nelle località di Livorno e Piombino. Sono stati utilizzati i dati orari nell'arco delle 24 ore registrati dalle stazioni meteo e dalle centraline della qualità dell'aria negli anni 1996 e 1997.

Lo scopo è quello, da una parte, di caratterizzare i regimi anemologici nelle due zone, definendone le peculiarità e differenze, dall'altra, di individuare la relazione fra i regimi ed i livelli dei principali inquinanti registrati in queste stesse località.

La metodologia utilizzata per la classificazione dei regimi di vento è quella della *cluster analysis*. Essa fa uso di un algoritmo automatico di tipo gerarchico (*seedless clustering*), in cui, ricorsivamente, le coppie di valori più prossime vengono riunite e classificate come appartenenti allo stesso *cluster* o classe corrispondente ad un regime anemologico. Si tratta di una procedura non-supervisionata in cui la definizione delle classi di appartenenza viene determinata dai dati stessi, senza nessun tipo di considerazione aprioristica legata alla climatologia, orografia, etc., dell'area di studio. Questo comporta il vantaggio di un'indubbia oggettività dell'analisi così come la possibilità di verificare a posteriori la bontà del *fitting* delle classi alle caratteristiche reali dell'area geografica considerata.

Sebbene la descrizione dei dettagli della *cluster analysis* esuli dal contesto del presente studio, può essere interessante menzionare che alcuni parametri dell'algoritmo possono essere scelti a discrezione dell'operatore. Fra questi i più importanti sono il tipo di distanza *inter-cluster* utilizzato ed il criterio di arresto della procedura di classificazione. A proposito di quest'ultimo punto, un metodo empirico per individuare il numero ottimale di classi o *cluster* (sconosciuto a priori) è individuare variazioni anomale del valore della distanza *inter-cluster*, e fermare l'algoritmo al passo precedente la fusione o *merging* di *cluster* relativamente distanti.

Nella pratica si è fatto uso di una procedura di *cluster analysis* di tipo standard (metodo di Ward con distanza euclidea) arrestando la classificazione alla decima classe. Poiché le classi sono state ordinate in ordine di ricorrenza, le prime classi sono statisticamente più significative delle successive. Come si vedrà, le prime tre classi rendono conto da sole di più del 50% dei casi.

Come già menzionato, i dati utilizzati per l'individuazione dei regimi di vento sono misure orarie di direzione e intensità di vento, le quali presentano una certa ricorrenza a causa della forte influenza dell'orografia. Sono stati considerati intervalli di studio trimestrali che coprono le stagioni estiva (giugno-agosto) e invernale (dicembre-febbraio). L'effettiva consistenza dei *data-set* utilizzati per la *cluster analysis* è dipesa comunque dalla disponibilità di misure nel periodo preso in esame. In ogni caso, si è ritenuto statisticamente rappresentativa la quantità di misure analizzata.

4.1 Analisi dei regimi anemologici nell'area di Livorno

Per l'analisi dei regimi anemologici nella zona di Livorno sono stati presi in considerazione i dati di due stazioni situate in zona urbana: la stazione di Labromare per i dati meteorologici e la stazione Rossi per i dati chimici. I dati utilizzati sono quelli del 1997.

4.1.1 Andamento estivo

Per il periodo estivo (giugno-agosto) è stato utilizzato un *data-set* di 2159 dati orari di direzione ed intensità del vento. Applicando l'analisi dei *cluster* sono stati individuati 10 regimi di vento riportati in ordine di ricorrenza, come in tabella.

Tab. 13 – Frequenza dei regimi anemologici estivi di Labromare.

Regime	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequenza relativa (percentuale)	18	17	15	11	11	10	7	4	4	2
Frequenza assoluta	386	360	321	243	239	215	153	97	97	48

Ciascun regime di vento è caratterizzato da un *range* di valori di intensità e direzione del vento (dv,vv). Questi regimi sono riportati nei due seguenti grafici.

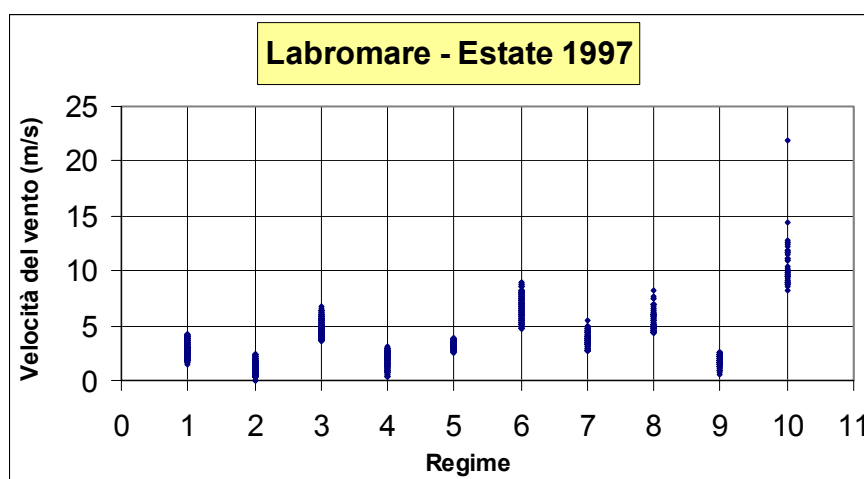


Fig. 59 – Intervalli di intensità del vento dei regimi anemologici estivi a Labromare.

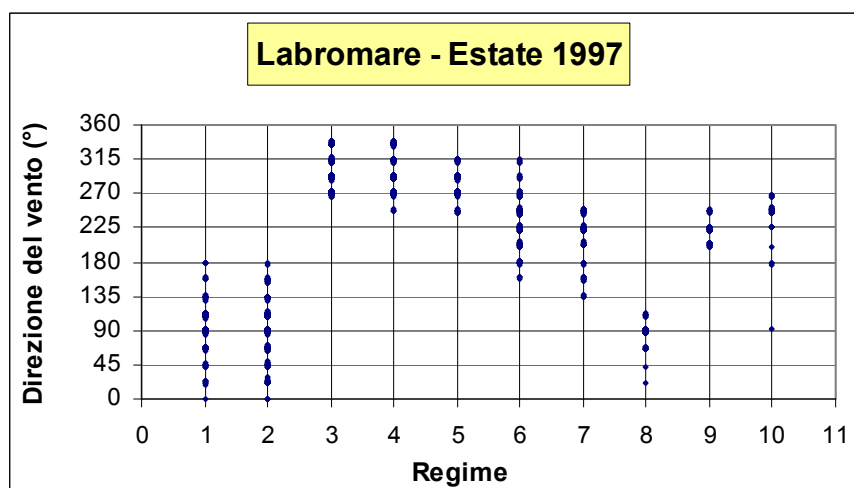


Fig. 60 – Intervalli di direzione del vento dei regimi anemologici estivi a Labromare.

Sinteticamente, nel seguente grafico viene riportata la posizione dei 10 regimi sul piano (vv,dv). Questo permette di leggere direttamente le caratteristiche anemologiche dei regimi di vento.

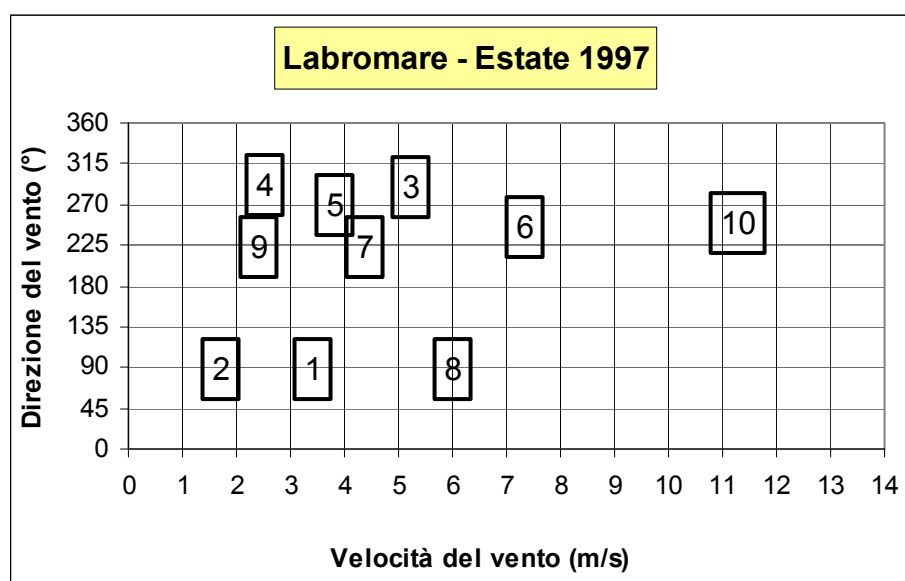


Fig. 61 – Caratterizzazione dei regimi anemologici estivi a Labromare.

Poiché i valori anemologici figurano tra le principali variabili che determinano le modalità di dispersione degli inquinanti, è interessante valutare la relazione esistente tra i regimi anemologici individuati ed i valori medi delle concentrazioni inquinanti principali presenti nella zona. Nella tabella che segue i valori medi degli inquinanti misurati dalla stazione di Via Rossi sono messi in relazione con le grandezze meteorologiche rilevate nella stazione di Labromare.

Per DVP si intende la direzione prevalente del vento.

Tab. 14 – Valori medi degli inquinanti misurati dalla stazione di Via Rossi per i diversi regimi anemologici estivi a Labromare.

Regime	Frequenza Percentuale	VV (m/s)	DVP (°N)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)
1	18	2.8	89	6	26
2	17	1.1	89	8	28
3	15	4.6	290	7	20
4	11	1.9	291	8	29
5	11	3.2	270	8	21
6	10	6.7	246	3	16
7	7	3.8	224	4	17
8	4	5.4	89	2	19
9	4	1.8	224	7	25
10	2	10.5	250	2	13

Nelle due figure che seguono sono riportati gli andamenti delle concentrazioni di SO₂ ed NO₂ misurate dalla stazione chimica di Via Rossi in relazione ai valori di velocità del vento dei 10 regimi anemologici rilevati dalla stazione meteo di Labromare.

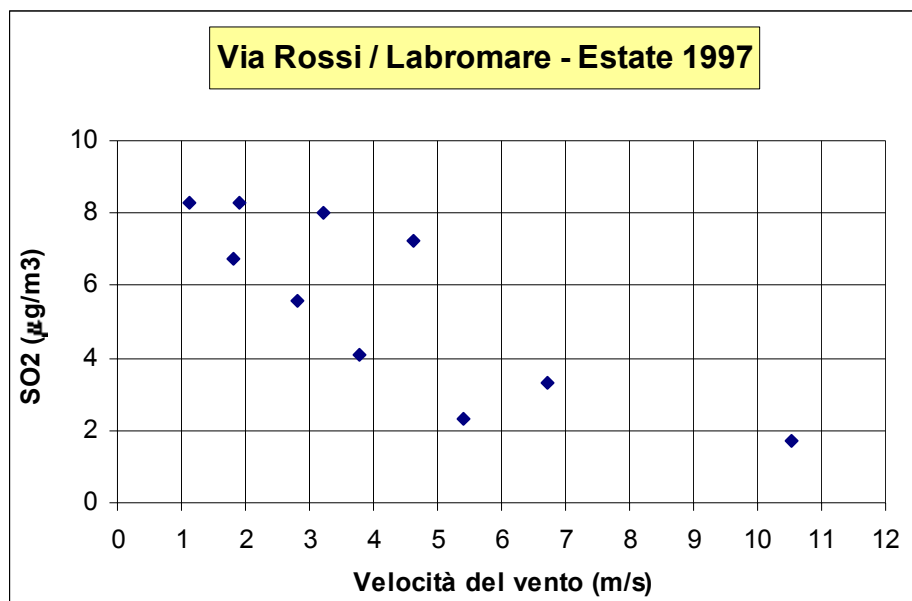


Fig. 62 – Andamento estivo della concentrazione di SO₂ nella stazione di Via Rossi in funzione della velocità del vento in quella di Labromare a Livorno.

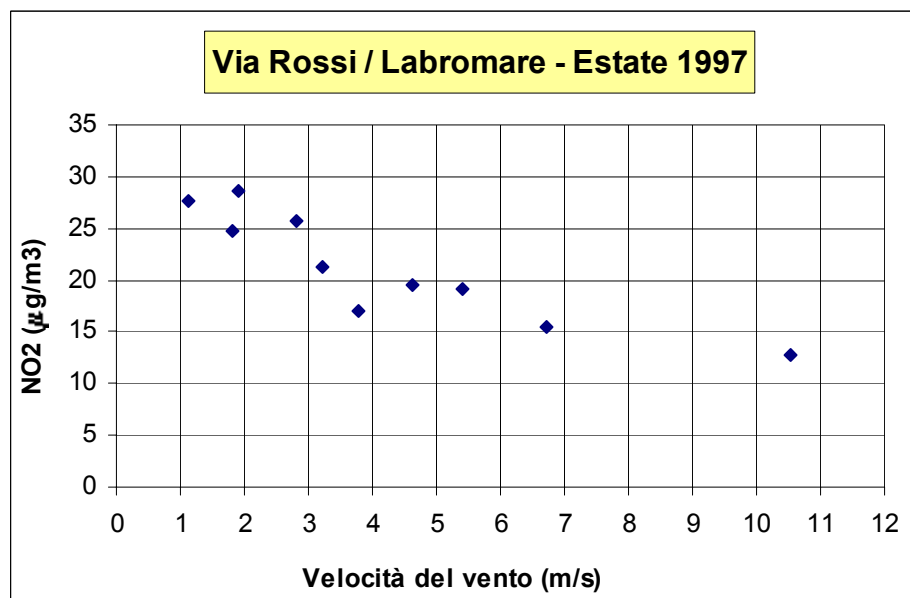


Fig. 63 – Andamento estivo della concentrazione di NO₂ nella stazione di Via Rossi in funzione della velocità del vento in quella di Labromare a Livorno.

4.1.2 Andamento invernale

Per la stagione invernale (dicembre-febbraio) si sono utilizzati i dati del 1997. Il *data-set* disponibile è costituito da 1231 dati orari di direzione ed intensità del vento. Applicando l'analisi dei *cluster* sono stati individuati 10 regimi di vento riportati in ordine di ricorrenza nella seguente tabella.

Tab. 15 – Frequenza dei regimi anemologici invernali di Labromare.

Regime	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequenza relativa (percentuale)	27	19	16	11	7	5	5	5	3	1
Frequenza assoluta	337	234	197	140	83	65	65	58	40	12

I seguenti grafici riportano il *range* di intensità e direzione del vento dei regimi anemologici:

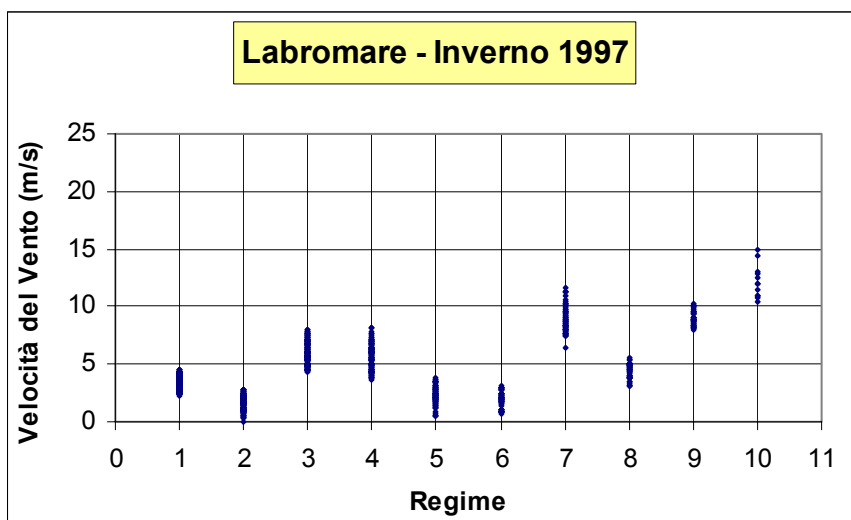


Fig. 64 – Intervalli di intensità del vento dei regimi anemologici invernali a Labromare.

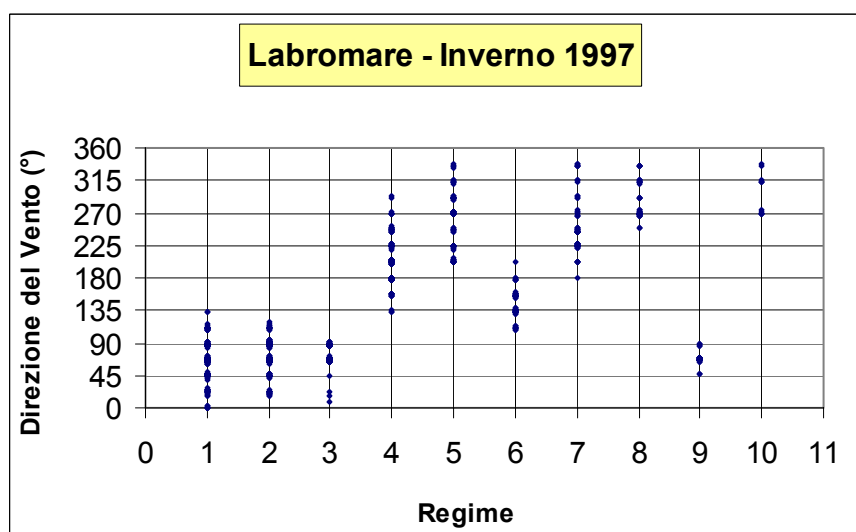


Fig. 65 – Intervalli di direzione del vento dei regimi anemologici invernali a Labromare.

Il seguente grafico illustra sinteticamente la posizione dei regimi anemologici sul piano (vv,dv).

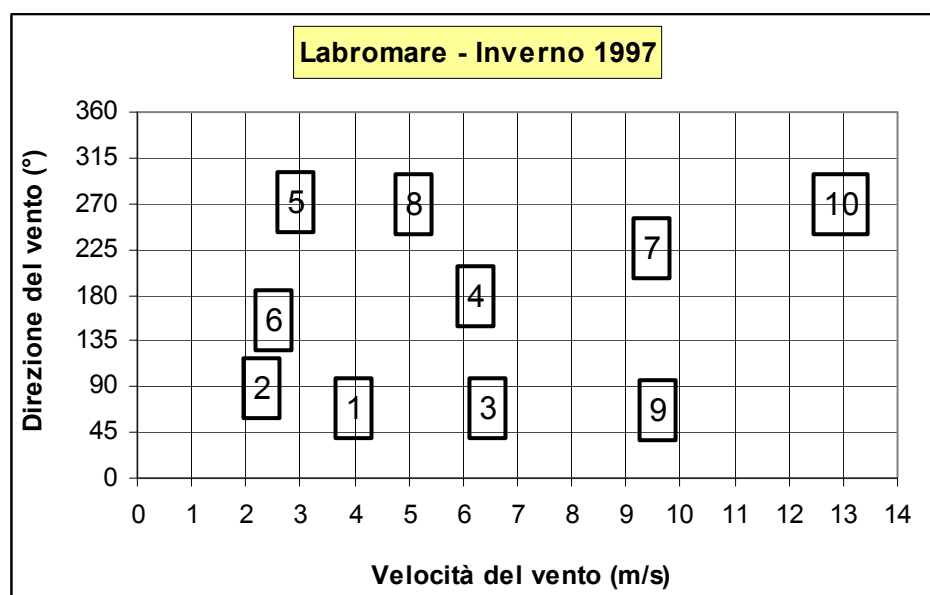


Fig. 66 – Caratterizzazione dei regimi anemologici invernali a Labromare.

La seguente tabella riporta, per ciascun regime, i valori di velocità e direzione del vento misurati dalla stazione meteo di Labromare, ed il valor medio degli inquinanti principali misurati dalla stazione chimica di Via Rossi.

Tab. 16 – Valori medi degli inquinanti misurati dalla stazione di Via Rossi per i diversi regimi anemologici invernali a Labromare.

Regime	Frequenza Percentuale	VV (m/s)	DVP (°N)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)
1	27	3.4	68	7	44
2	19	1.7	89	7	72
3	16	5.9	68	4	33
4	11	5.6	179	3	27
5	7	2.3	272	10	49
6	5	1.9	155	6	65
7	5	8.9	226	3	24
8	5	4.5	270	6	34
9	3	9.0	67	3	22
10	1	12.2	269	2	22

Nelle figure che seguono sono riportati gli andamenti delle concentrazioni di SO₂ (Fig. 67) ed NO₂ (Fig. 68) misurate dalla stazione chimica di Via Rossi in relazione ai valori di velocità del vento rilevati dalla stazione meteo di Labromare.

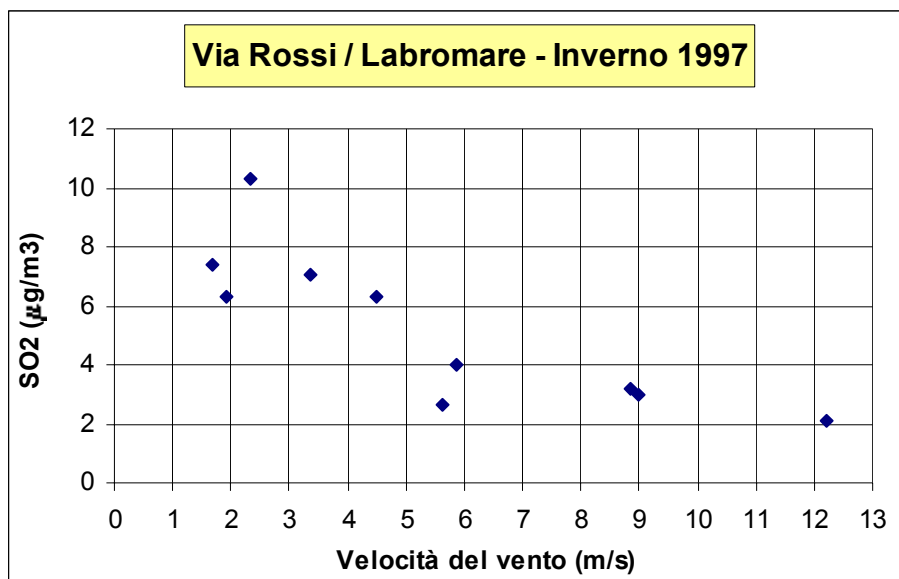


Fig. 67 – Andamento invernale della concentrazione di SO₂ nella stazione di Via Rossi in funzione della velocità del vento in quella di Labromare a Livorno.

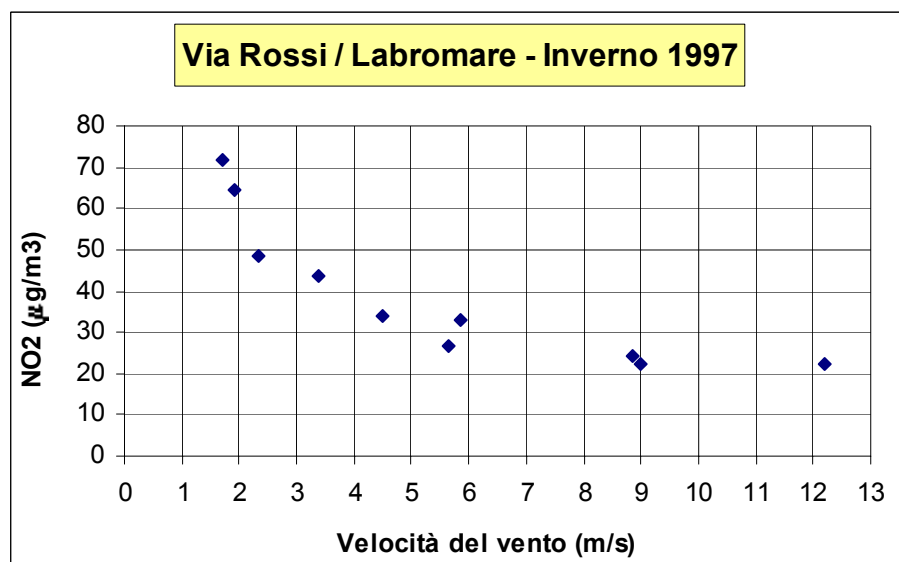


Fig. 68 – Andamento invernale della concentrazione di NO₂ nella stazione di Via Rossi in funzione della velocità del vento in quella di Labromare a Livorno.

4.1.3 Considerazioni sugli andamenti

Prendendo in considerazione i risultati dell'analisi dei *cluster* relativa ai periodi estivo, si può osservare che oltre il 50% dei casi ricade nei primi tre regimi. I primi due regimi sono caratterizzati da venti non particolarmente intensi provenienti da Est – e quindi dall'entroterra -, mentre il terzo regime si differenzia sia per la maggiore velocità del vento che per la direzione di provenienza, che è praticamente opposta – da Ovest, e quindi dal mare.

L'esame della distribuzione delle ore di occorrenza dei regimi anemologici rivela che i primi due regimi sono prevalentemente notturni e pressoché assenti durante il giorno dalle ore 10:00 alle 17:00. Il regime 1 presenta frequenze crescenti nel corso della notte a partire dalle ore 18:00 fino ad un picco alle ore 7:00 del mattino, dopodiché svanisce velocemente entro le ore 12:00. Il regime 2 presenta una distribuzione a campana simmetrica fra le 18:00 e le 9:00 con un picco alle ore 2:00. Il

regime 3, al contrario, si instaura prevalentemente di giorno, con una distribuzione a campana simmetrica fra le ore 10:00 e le 18:00 ed un picco alle ore 14:00. Prevale, dunque, il ciclo della brezza legato al riscaldamento differenziale delle superfici di terra e di mare, in particolare all'intenso riscaldamento terrestre nel periodo diurno, cui corrisponde il raffreddamento nel periodo notturno.

Dall'osservazione delle Figg. 62 e 63, in cui è riportato l'andamento dei valori di concentrazione media di SO₂ ed NO₂ a fronte della velocità del vento, si rileva che esiste una correlazione pressoché lineare inversa fra le due grandezze, come d'altra parte era lecito attendersi.

Per quanto riguarda l'inverno (Tab. 16), anche in questo caso i primi tre regimi rendono conto di più del 50% dei casi. Questi sono caratterizzati da venti provenienti sostanzialmente dall'entroterra (Est-Nordest), anche se con intensità differenti: il primo regime presenta un valore pari a circa 3.50 m/s, il secondo a 1.75 ed il terzo ad oltre 6 m/s.

A differenza dei regimi estivi, quelli invernali presentano distribuzioni più ampie. Il regime 1 presenta un picco alle ore 8:00 del mattino, ma è presente nell'arco dell'intera giornata. Analogamente il regime 3, che presenta una distribuzione pressoché uniforme. Solo il regime 2 si configura come prevalentemente notturno con un picco alle ore 22:00.

Anche nel caso invernale, le concentrazioni di SO₂ ed NO₂ diminuiscono linearmente con l'intensità del vento, come riscontrabile esaminando le Figg. 67 e 68.

Confrontando gli andamenti stagionali, si può osservare che nel periodo invernale i venti presentano un'intensità mediamente maggiore. Esiste inoltre una marcata differenza dei livelli di concentrazione dell'NO₂, di cui si registrano valori mediamente più alti nel periodo invernale.

4.2 Analisi dei regimi anemologici nell'area di Piombino

Nell'area di Piombino sono presenti due stazioni meteorologiche, una in località Torre del Sale, sul mare, l'altra nel comune di Massa Marittima, nell'interno. Per questo tipo di studio sono stati analizzati i dati di entrambe le stazioni meteo, mentre per i dati di concentrazione degli inquinanti, in particolare SO₂ e NO₂, sono stati presi in esame quelli registrati presso la stazione chimica di via Torino, nell'area urbana di Piombino.

Analogamente al caso di Livorno, i dati meteorologici sono stati confrontati con i valori di concentrazione degli inquinanti. A rigore, l'analisi delle correlazioni ha una maggiore validità considerando la stazione di Torre del Sale, in quanto più rappresentativa della climatologia di Piombino; tuttavia, ciò è stato possibile solo per il periodo invernale, dato che per quello estivo mancava la necessaria sovrapposizione temporale dei dati meteorologici e chimici. Si è allora proceduto all'elaborazione dei dati della stazione meteo di Massa Marittima, che pur rappresentando più specificatamente la climatologia dell'entroterra, può comunque fornire informazioni per un'area più vasta.

I dati utilizzati si riferiscono al biennio 1996-97; in particolare, quelli di Massa Marittima sono relativi all'anno 1996, mentre quelli di Torre del Sale si riferiscono all'inverno 1996-97.

4.2.1 Andamento estivo - Massa Marittima

Per il periodo estivo (giugno-agosto) è stato utilizzato un *data-set* di 2018 dati orari di direzione ed intensità del vento. Applicando l'analisi dei *cluster* sono stati individuati 10 regimi di vento ordinati in ordine di ricorrenza, come riportato nella seguente tabella.

Tab. 17 – Frequenza dei regimi anemologici estivi di Massa Marittima.

Regime	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequenza relativa (percentuale)	26	17	16	12	9	6	6	5	2	1
Frequenza assoluta	530	349	322	238	174	128	118	99	48	12

I regimi di vento individuati sono caratterizzati dai valori di intensità e direzione del vento riportati nei due grafici che seguono.

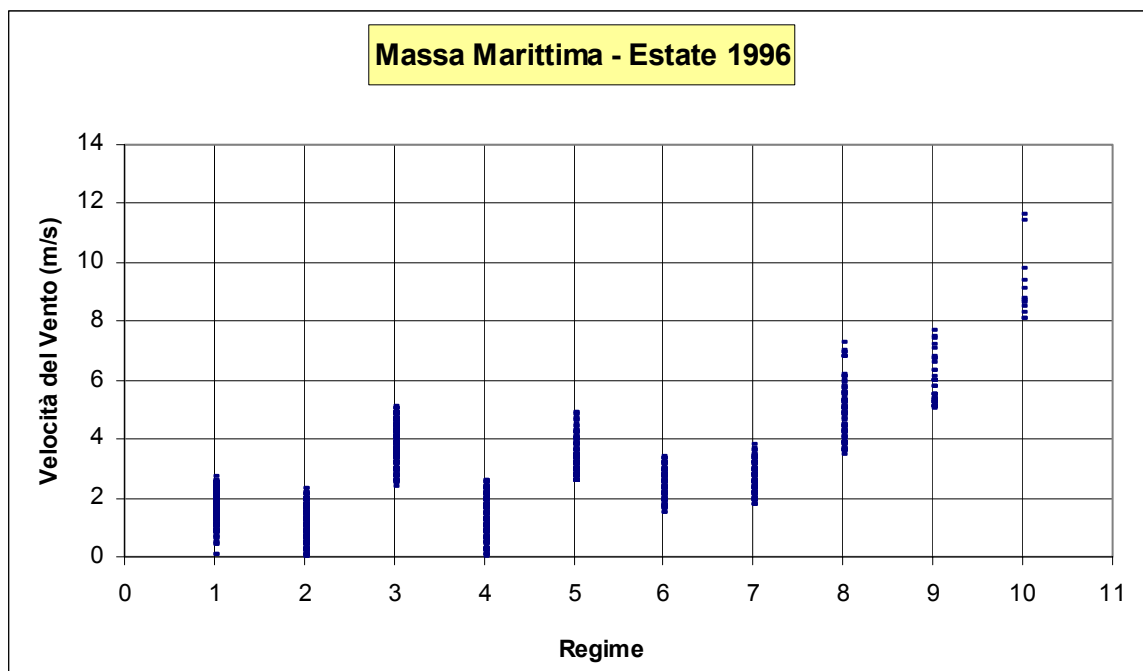


Fig. 69 – Intervalli di intensità del vento dei regimi anemologici estivi a Massa Marittima.

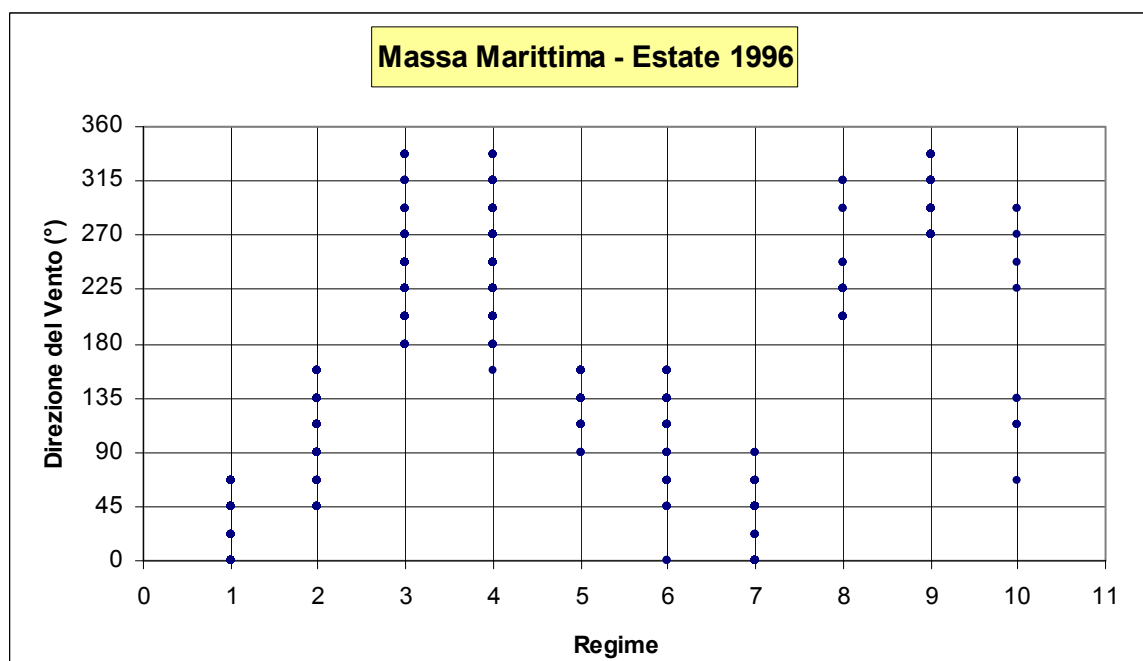


Fig. 70 – Intervalli di direzione del vento dei regimi anemologici estivi a Massa Marittima.

Il seguente grafico riporta sinteticamente i 10 regimi anemologici sul piano cartesiano (vv,dv).

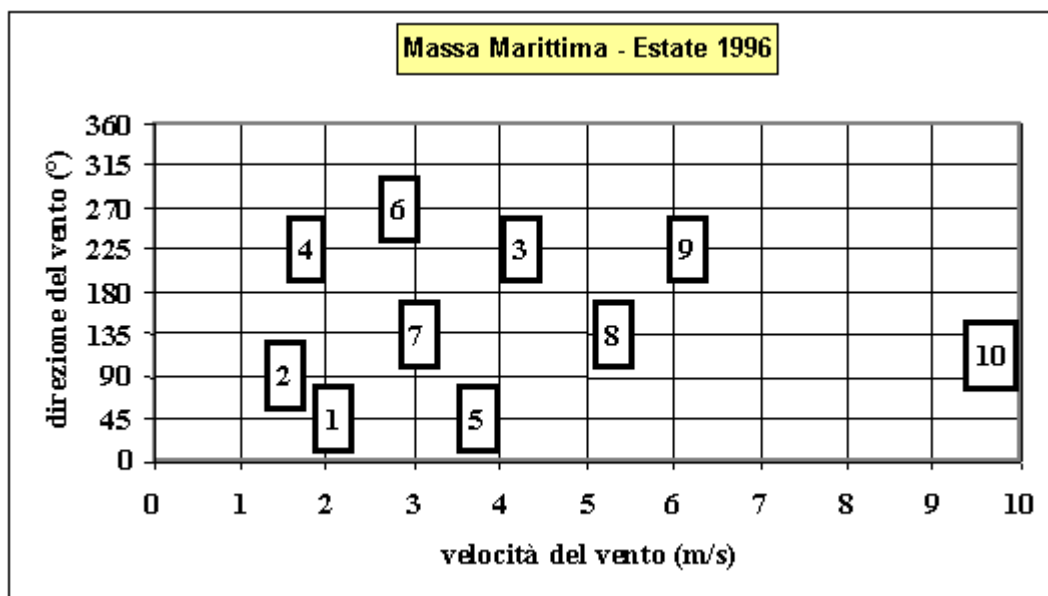


Fig. 71 – Caratterizzazione dei regimi anemologici estivi a Massa Marittima.

Per ciascun regime sono stati calcolati i valori medi degli inquinanti principali misurati dalla stazione di monitoraggio chimico di Via Torino. La seguente tabella riporta tali valori a fronte dei valori anemologici misurati a Massa Marittima.

Tab. 18 – Valori medi degli inquinanti misurati dalla stazione di Via Torino per i diversi regimi anemologici estivi a Massa Marittima.

Regime	Frequenza Percentuale	VV (m/s)	DVP (°N)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)
1	26	1.70	45	5	16
2	17	1.14	90	5	16
3	16	3.84	225	3	8
4	12	1.37	225	5	12
5	9	3.36	45	6	14
6	6	2.45	270	7	10
7	6	2.65	135	4	12
8	5	4.91	135	5	10
9	2	5.79	225	1	7
10	1	9.20	112	4	3

Nelle figure che seguono sono posti a confronto gli andamenti delle concentrazioni di SO₂ (Fig. 72) ed NO₂ (Fig. 73) misurate dalla stazione chimica di Via Torino a Piombino con i valori di velocità del vento rilevati dalla stazione meteo di Massa Marittima.

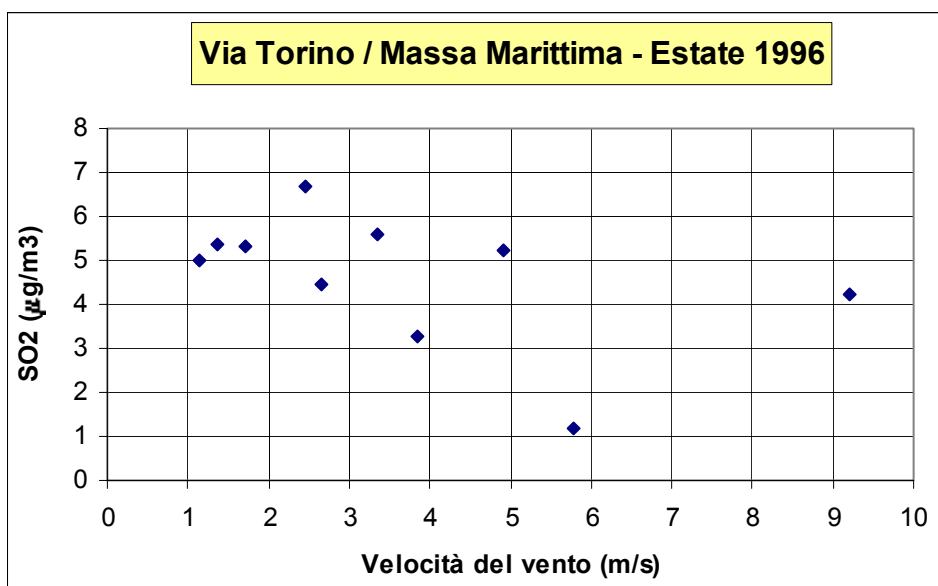


Fig. 72 – Andamento estivo della concentrazione di SO₂ nella stazione di Via Torino a Piombino in funzione della velocità del vento in quella di Massa Marittima.

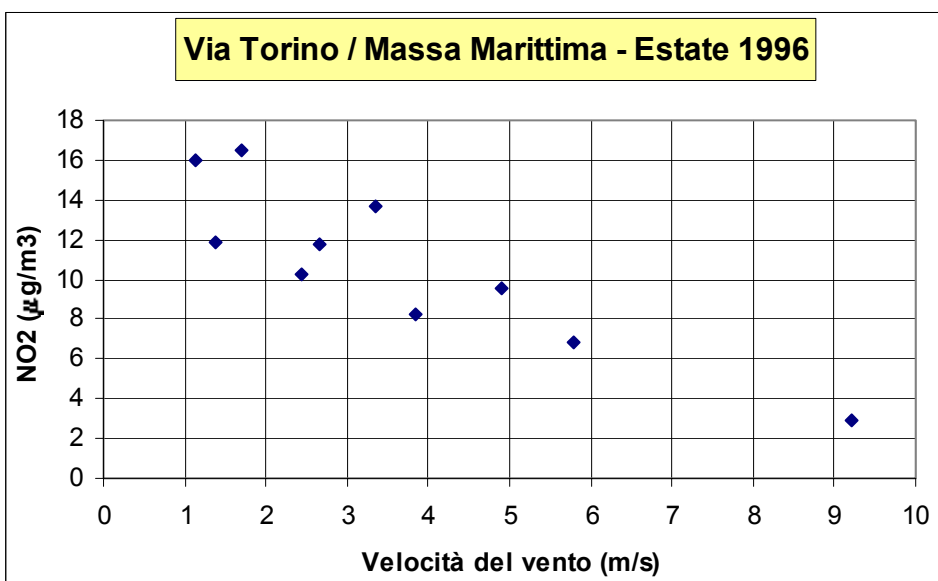


Fig. 73 – Andamento estivo della concentrazione di NO₂ nella stazione di Via Torino a Piombino in funzione della velocità del vento in quella di Massa Marittima.

4.2.2 Andamento invernale - Massa Marittima

Per la stagione invernale sono stati considerati tre mesi di dati (dicembre-febbraio) per un totale di 2066 misure. L'analisi dei cluster ha individuato 10 regimi di vento, la cui frequenza è riportata nella seguente tabella.

Tab. 19 – Frequenza dei regimi anemologici invernali di Massa Marittima.

Regime	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequenza relativa (percentuale)	31	19	11	7	7	7	6	6	4	2
Frequenza assoluta	636	402	225	151	144	135	120	114	92	47

I seguenti grafici riportano il range di intensità e direzione del vento dei regimi anemologici.

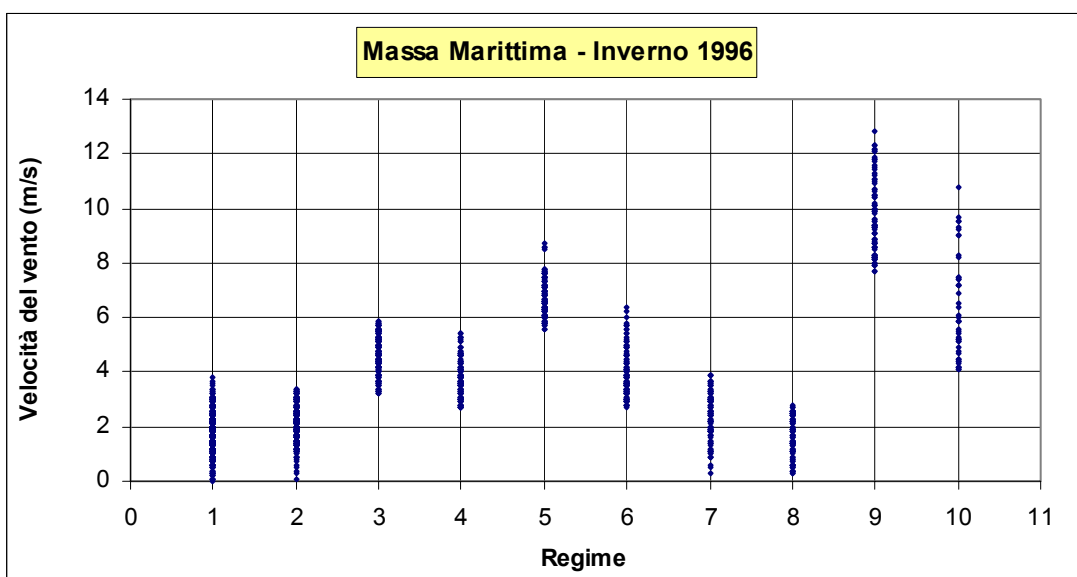


Fig. 74 – Intervalli di intensità del vento dei regimi anemologici invernali a Massa Marittima.

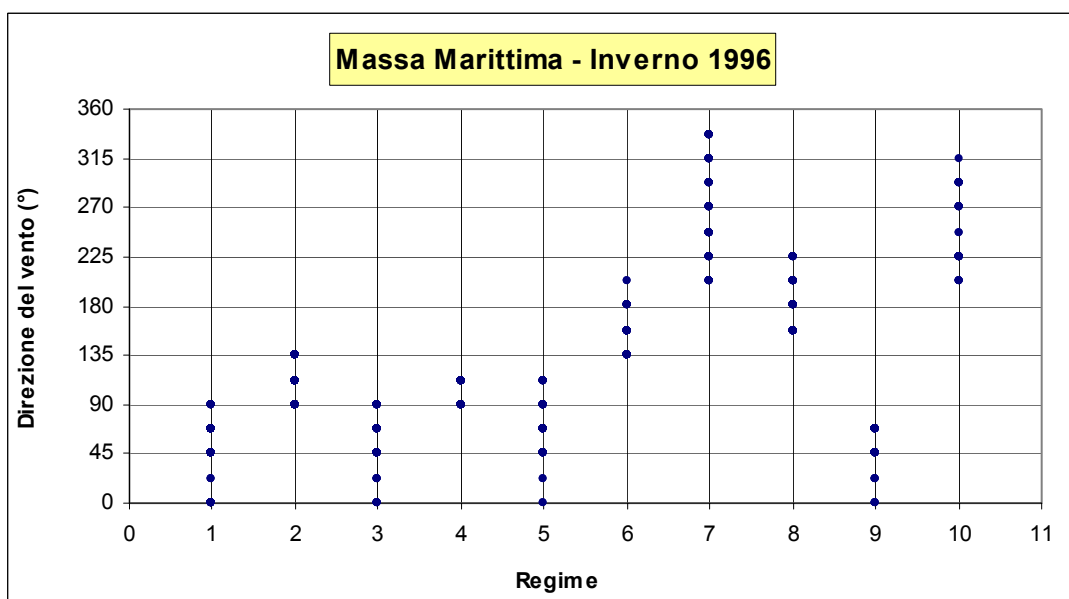


Fig. 75 – Intervalli di direzione del vento dei regimi anemologici invernali a Massa Marittima.

Il seguente grafico mostra la collocazione dei regimi anemologici sul piano (vv,dv).

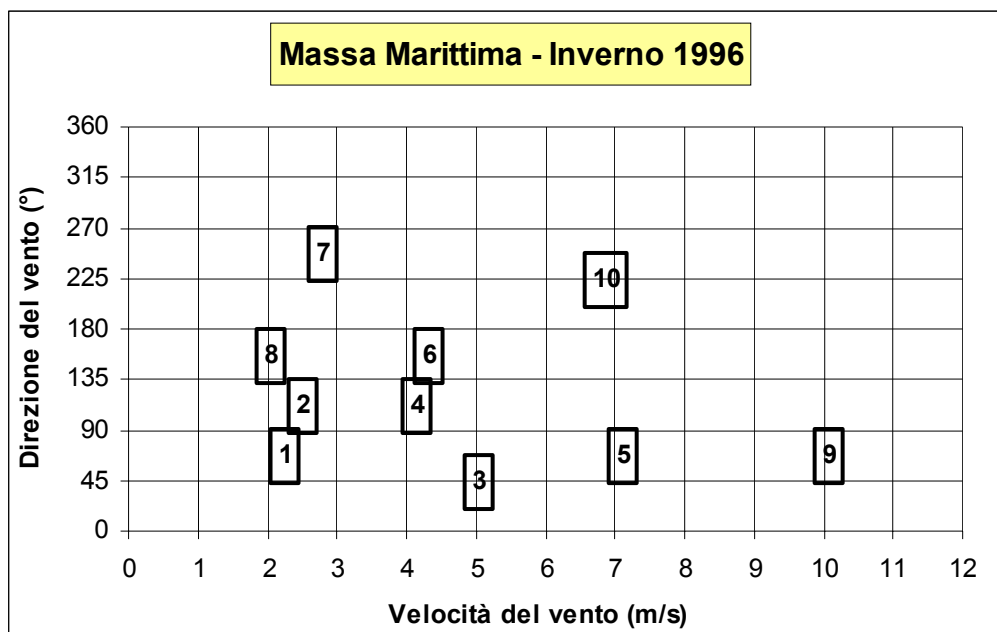


Fig. 76 – Caratterizzazione dei regimi anemologici invernali a Massa Marittima.

La seguente tabella riporta, per ciascun regime invernale, i valori di velocità e direzione del vento misurati dalla stazione meteo di Massa Marittima, ed il valor medio degli inquinanti principali misurati dalla stazione chimica di Via Torino.

Tab. 20 – Valori medi degli inquinanti misurati dalla stazione di Via Torino per i diversi regimi anemologici invernali a Massa Marittima.

Regime	Frequenza Percentuale	VV (m/s)	DVP (°N)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)
1	31	1.8	67	4	16
2	19	2.1	112	3	17
3	11	4.6	45	3	9
4	7	3.8	112	2	12
5	7	6.7	67	2	10
6	7	3.9	157	1	6
7	6	2.4	247	2	13
8	6	1.7	157	3	14
9	4	9.7	67	4	8
10	2	6.4	225	3	5

Nelle figure che seguono sono posti a confronto gli andamenti delle concentrazioni di SO₂ (Fig. 77) ed NO₂ (Fig. 78) misurate dalla stazione chimica di Via Torino a Piombino con i valori di velocità del vento rilevati dalla stazione meteo di Massa Marittima.

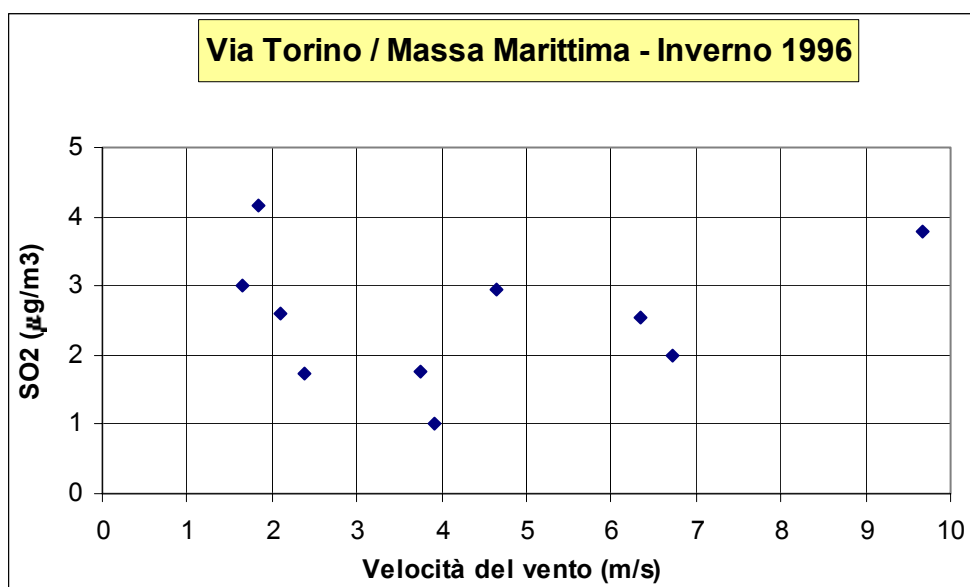


Fig. 77 – Andamento invernale della concentrazione di SO₂ nella stazione di Via Torino a Piombino in funzione della velocità del vento in quella di Massa Marittima.

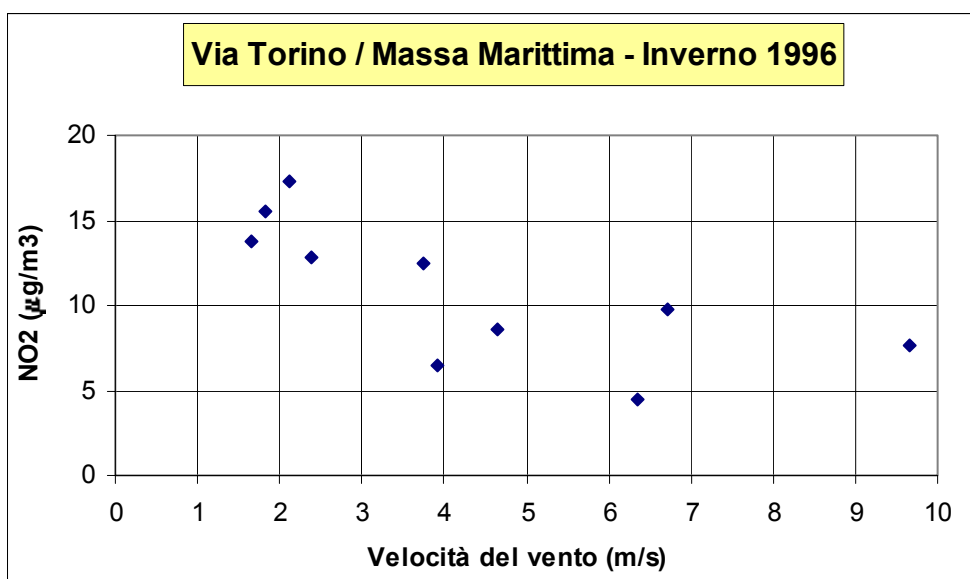


Fig. 78 – Andamento invernale della concentrazione di NO₂ nella stazione di Via Torino a Piombino in funzione della velocità del vento in quella di Massa Marittima.

4.2.3 Considerazioni sugli andamenti

Dai risultati dell'analisi dei *cluster* si vede che, sia nel periodo estivo che in quello invernale, oltre il 50% dei casi ricade nei primi tre regimi individuati.

In estate (Tab. 18) si rilevano intensità del vento non troppo elevate provenienti da Est-Nordest - l'entroterra – per i primi due regimi, mentre il terzo regime si caratterizza per una maggiore intensità del vento e per una direzione di provenienza diametralmente opposta – da Ovest,

ossia dal mare. La distribuzione delle ore di questi regimi rivela una occorrenza prevalentemente notturna dei primi due regimi con un picco verso le 1:00-2:00 ed una occorrenza esclusivamente diurna per il terzo regime con un picco verso le ore 16:00. Anche per Piombino, così come già visto nel caso di Livorno si tratta di regimi di brezza generati durante la stagione estiva in base alle diverse condizioni termiche delle superfici terrestre e marina.

Le Figg. 72 e 73 indicano una correlazione inversa fra le concentrazioni medie di SO₂ ed NO₂ ed i valori di velocità del vento.

Per l'inverno (Tab. 20), i tre regimi principali sono caratterizzati da venti provenienti sostanzialmente dall'entroterra (Est), con intensità variabile; più bassa per i primi due ed abbastanza elevata per il terzo. I regimi invernali presentano distribuzioni orarie sostanzialmente uniformi nell'arco della giornata, con il solo primo regime che si caratterizza come tendenzialmente notturno.

Anche nel caso invernale, una maggiore intensità di vento corrisponde a valori medi delle concentrazioni di SO₂ ed NO₂ più bassi (Figg. 77 e 78).

Confrontando i due andamenti estivo ed invernale, si nota una tendenziale maggiore intensità di vento in inverno con valori medi di concentrazione degli inquinanti pressoché assimilabili nei due periodi.

4.2.4 Andamento invernale – Torre del Sale

Per il periodo invernale (dicembre-febbraio) è stato utilizzato un *data-set* di 1678 dati orari di direzione ed intensità del vento. Applicando l'analisi dei *cluster*, sono stati individuati 10 regimi di vento che sono stati riordinati in ordine di ricorrenza, come riportato nella seguente tabella.

Tab. 21 – Frequenza dei regimi anemologici invernali di Torre del Sale.

Regime	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequenza relativa (percentuale)	34	15	13	8	8	7	5	5	3	1
Frequenza assoluta	573	258	218	139	137	119	84	78	54	18

I *range* di intensità e direzione del vento sono riportati nei seguenti grafici.

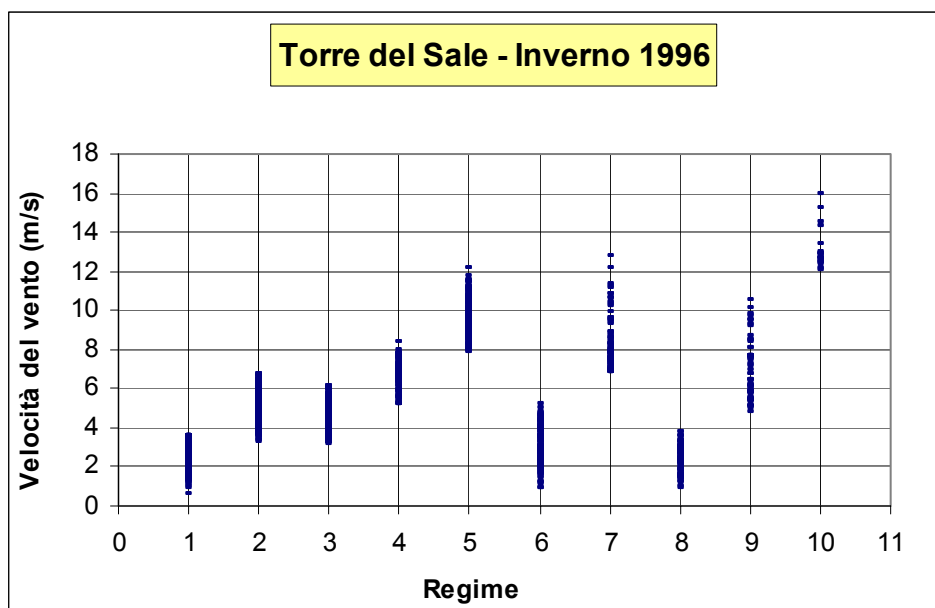


Fig. 79 – Intervalli di intensità del vento dei regimi anemologici invernali a Torre del Sale.

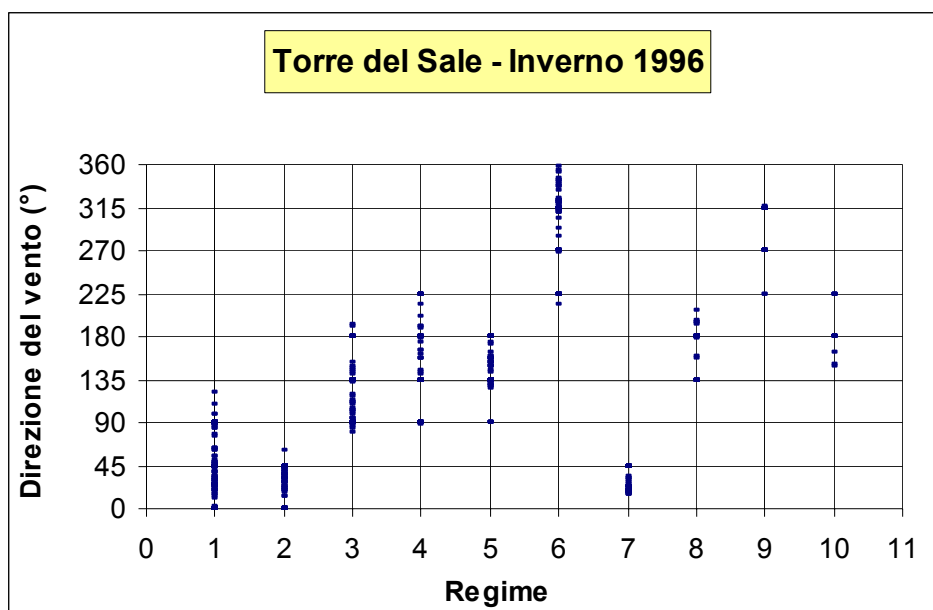


Fig. 80 – Intervalli di direzione del vento dei regimi anemologici invernali a Torre del Sale.

Nel seguente grafico vengono caratterizzati sinteticamente i regimi individuati:

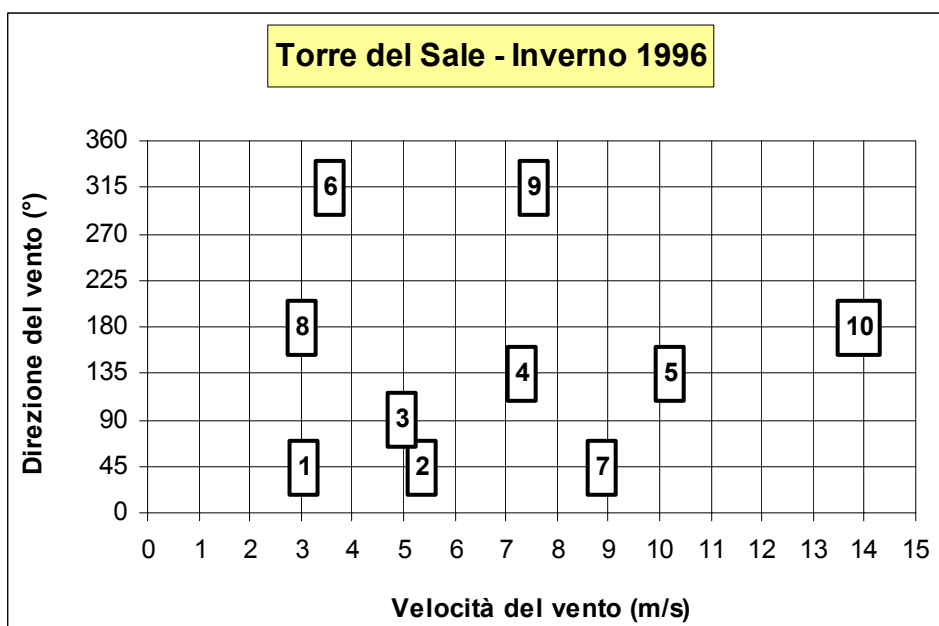


Fig. 81 – Caratterizzazione dei regimi anemologici invernali a Torre del Sale.

La seguente tabella riporta, per ciascun regime invernale, i valori di velocità e direzione del vento misurati dalla stazione meteo di Torre de Sale, ed il valor medio degli inquinanti principali misurati dalla stazione chimica di Via Torino.

Tab. 22 – Valori medi degli inquinanti misurati dalla stazione di Via Torino per i diversi regimi anemologici invernali a Torre del Sale.

Regime	Frequenza Percentuale	VV (m/s)	DVP (°N)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)
1	34	2.5	45	5	8
2	15	4.8	45	3	5
3	13	4.4	90	2	7
4	8	6.8	135	2	6
5	8	9.6	135	1	6
6	7	3.0	315	2	12
7	5	8.3	45	4	7
8	5	2.5	180	3	7
9	3	7.0	315	3	4
10	1	13.2	180	1	4

Nelle figure che seguono sono posti a confronto gli andamenti delle concentrazioni di SO₂ (Fig. 82) ed NO₂ (Fig. 83) misurate dalla stazione chimica di Via Torino a Piombino con i valori di velocità del vento rilevati dalla stazione meteo di Torre del Sale.

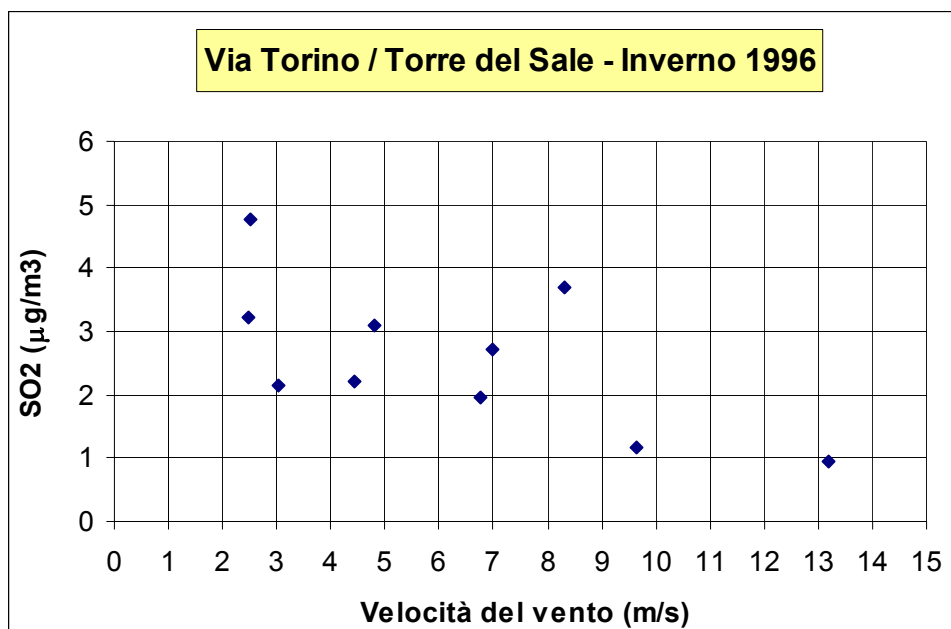


Fig. 82 – Andamento estivo della concentrazione di SO₂ nella stazione di Via Torino in funzione della velocità del vento in quella di Torre del Sale a Piombino.

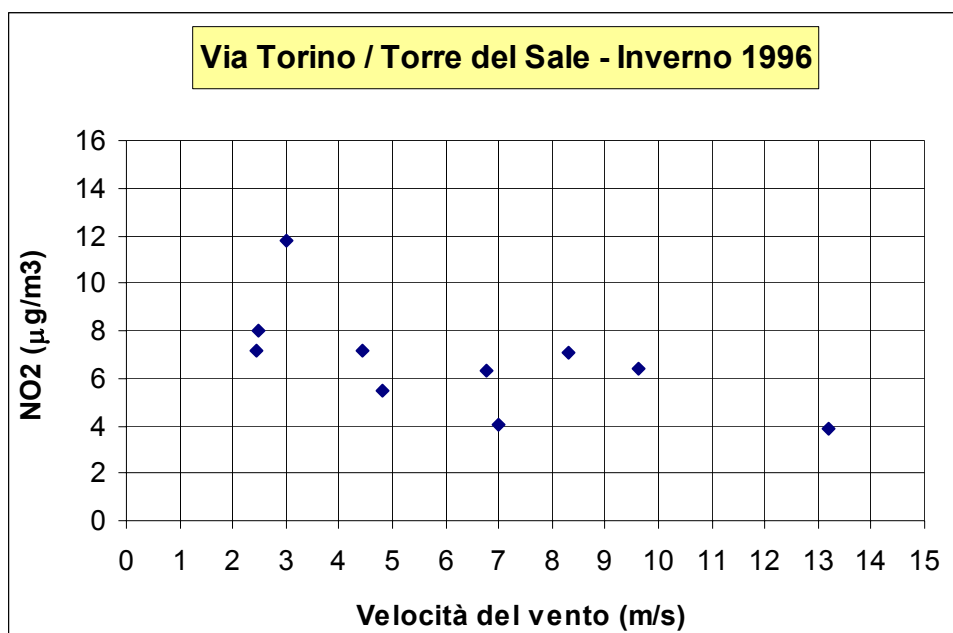


Fig. 83 – Andamento estivo della concentrazione di NO₂ nella stazione di Via Torino in funzione della velocità del vento in quella di Torre del Sale a Piombino.

4.2.5 Considerazioni sugli andamenti

L'analisi dei regimi invernali (Tab. 22) rivela una prevalenza di intensità medio-basse dei venti provenienti dall'entroterra (Est-Nordest). Si tratta di regimi di vento con occorrenza abbastanza distribuita nell'arco della giornata, con prevalenza diurna per i primi due regimi e maggiore occorrenza diurna per il terzo regime, che presenta un picco alle ore 15:00. Tranne che per una maggiore intensità, tali regimi sono assimilabili a quanto trovato analizzando i dati di Massa Marittima, in quanto le direzioni di provenienza sono confermate. Anche in questo caso le concentrazioni degli inquinanti presentano il consueto andamento decrescente al crescere dell'intensità del vento (Figg. 82 e 83).

5. Modellistica meteorologica

5.1 Metodologia generale

Questa sezione del lavoro ha per obiettivo la ricostruzione degli andamenti meteorologici maggiormente significativi nelle due aree di studio, centrate rispettivamente sulle città di Livorno e di Piombino.

E' parso utile procedere alla definizione di opportuni scenari meteo, in grado di descrivere al meglio il regime climatologico delle aree in esame. In primo luogo è stato individuato lo scenario meteo più frequente. Inoltre, dal momento che lo svolgimento dell'attività relativa alla dispersione degli inquinanti in atmosfera, basata sull'impiego di modellistica diffusionale, non può prescindere dall'innestarsi sulla modellistica meteorologica, è parso necessario prendere in esame un altro scenario; questo è stato definito come l'insieme delle condizioni atmosferiche in grado di ridurre al massimo la dispersione degli inquinanti, e cioè tali da favorire l'insorgere degli episodi acuti d'inquinamento. In definitiva, quindi, gli scenari meteo di riferimento sono stati due: il giorno "tipico" e quello "peggiore".

Lo schema di lavoro seguito si articola nelle due distinte sezioni di modellistica meteorologica e diffusionale (vedi capitolo 6). Ciascuna di tali sezioni è finalizzata al conseguimento di uscite grafiche, che nel caso della modellistica meteo sono i campi tridimensionali di vento e temperatura, mentre nel caso della modellistica diffusionale sono le isosuperfici di concentrazione degli inquinanti in atmosfera. Lo schema in questione verrà applicato alle due aree di studio.

Lo schema relativo alla modellistica meteorologica è presentato in Fig. 84. Essa è imperniata sull'impiego del modello MINERVE di *ARIA Technologies*, modello basato sull'equazione di conservazione della massa che, a partire da dati meteo di varia natura (stazioni a terra, profilatori verticali, etc.) e tenendo conto dell'orografia e della rugosità del terreno, è in grado di ricostruire su un grigliato tridimensionale il campo delle principali variabili atmosferiche, ed in particolare del vento e della temperatura. Un limite di MINERVE è invece rappresentato dal fatto di non fornire in uscita i campi di turbolenza atmosferica, che pure costituiscono un *input* fondamentale per qualsiasi modello di dispersione degli inquinanti atmosferici.

I dati da introdurre in ingresso a MINERVE sono pertanto riconducibili a due gruppi: le informazioni caratteristiche del dominio spaziale prescelto (DTM e rugosità) e l'insieme dei dati meteo acquisiti dai sensori o dalle stazioni disponibili. Per la specificità e la complessità delle problematiche coinvolte, di seguito verranno descritte in dettaglio le modalità di preparazione ed approntamento dei dati da introdurre in ingresso al modello MINERVE.

5.2 Dati territoriali

I dati territoriali da introdurre in ingresso al modello MINERVE sono essenzialmente il modello digitale del terreno (DTM) e la relativa matrice di rugosità del terreno.

Il DTM utilizzato è quello fornito dalla *Regione Toscana*, esteso all'intero territorio regionale e caratterizzato da una risoluzione orizzontale di 100 m. Per l'area di Livorno e per quella di Piombino si è proceduto con l'operare delle estrazioni a partire da tale DTM regionale, dal quale sono stati definiti i domini spaziali di studio (rappresentati nelle Figg. 1 e 2) caratterizzati da un'estensione globale di 60x60 Km².

Per i due siti considerati, il dominio di calcolo è costituito da un grigliato tridimensionale di passo orizzontale pari ad 1 Km (e quindi con 61x61 nodi orizzontali), e da 20 livelli verticali.

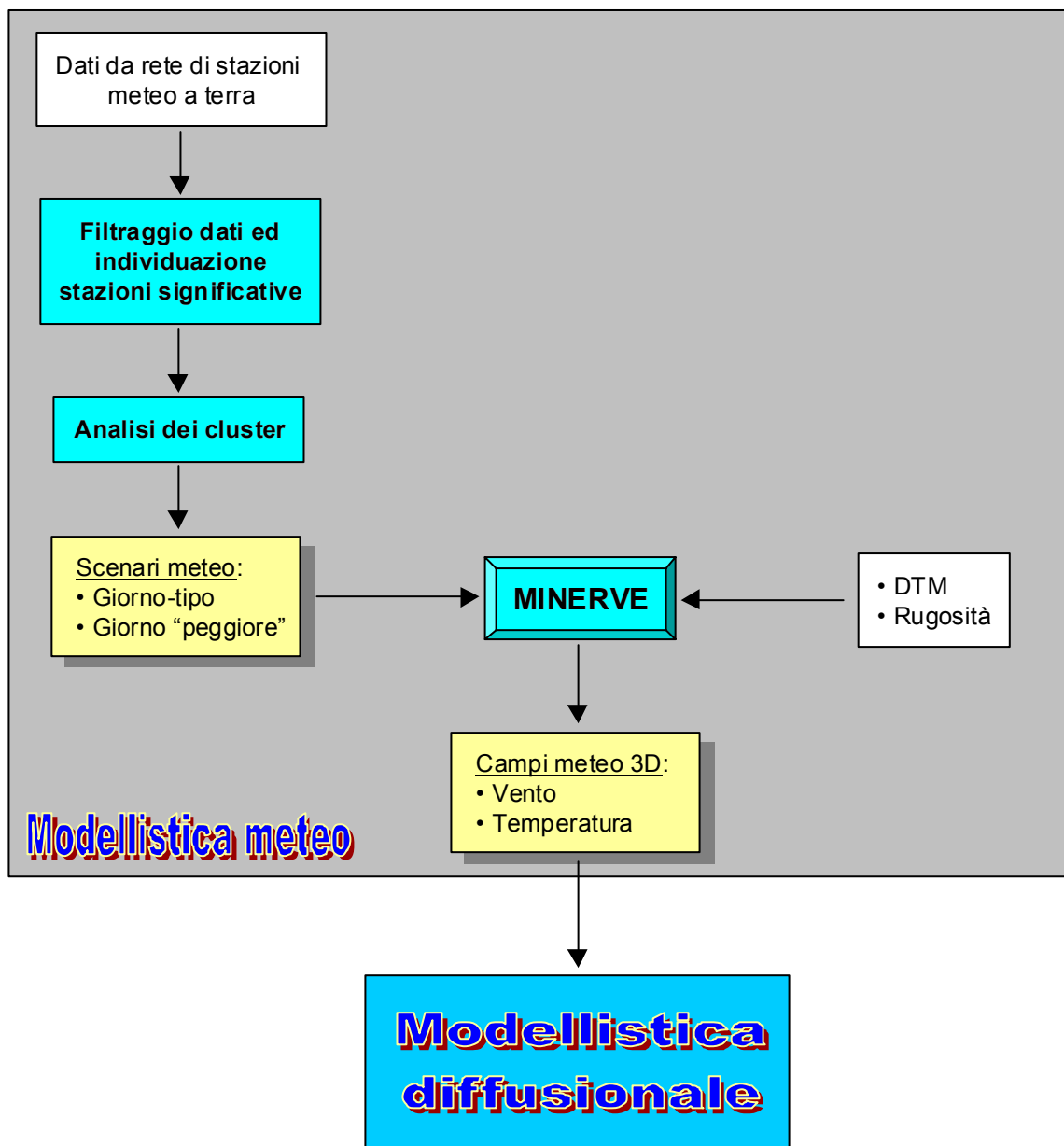


Fig. 84 – Schema operativo della modellistica meteorologica adoperata nello svolgimento dell’attività 1.A.

L’altro dato territoriale da introdurre in MINERVE è la matrice di rugosità del terreno, ossia l’insieme delle informazioni in grado di far corrispondere ad ogni maglia del dominio spaziale considerato il relativo valore della lunghezza di rugosità.

La lunghezza di rugosità z_0 rappresenta lo spessore della regione al di sopra del suolo in cui la turbolenza appare intermittente o non pienamente sviluppata, in cui prevalgono condizioni di moto di tipo meccanico. Il valore di z_0 può assunto in maniera semplificata come 1/30 dell’altezza media degli ostacoli della zona, anche se una stima più attendibile può essere ottenuta attraverso tabelle che ne forniscono i valori in funzione del tipo di terreno e della stagione dell’anno.

Nella tabella che segue è mostrata la codifica di uso del suolo utilizzata nel presente studio, basata sulla classificazione *CORINE Land Cover*, approssimata al secondo livello di disaggregazione.

Tab. 23 - Codifica dell'uso del suolo utilizzata.

Codice	Tipologia suolo
1	Coltivato
2	Prato
3	Frutteti, uliveti, vigneti
4	Conifere
5	Decidue
6	Paludi, canneti, lagune
7	Suolo nudo, rocce, ghiacciai
8	Urbanizzato
9	Acque interne
10	Mari

Sulla base della codifica di Tab. 23, per entrambe le aree di studio sono state ricavate le mappe di rugosità, albedo e rapporto di Bowen. Allo scopo sono stati utilizzati i parametri di conversione riassunti in Tab. 24.

Tab. 24 – Parametri di conversione tra uso del suolo e rugosità, albedo e rapporto di Bowen.

Codice	Tipologia suolo	Rugosità (m)	Albedo	Rapporto di Bowen
1	Coltivato	0.001	0.18	0.7
2	Prato	0.001	0.2	1
3	Frutteti, uliveti, vigneti	0.2	0.17	1
4	Conifere	1.6	0.12	0.8
5	Decidue	0.6	0.17	1
6	Paludi, canneti, lagune	0.01	0.16	0.1
7	Suolo nudo, rocce, ghiacciai	0.1	0.3	3
8	Urbanizzato	1.5	0.18	2
9	Acque interne	0.0001	0.08	0.1
10	Mari	0.0001	0.08	0.1

Come schematizzato in Fig. 84, la mappa di rugosità del terreno costituisce un *input* fondamentale per MINERVE.

Nelle Figg. 85 e 86 è fornita una visualizzazione grafica delle mappe di rugosità ottenute, rispettivamente, per le aree di Livorno e Piombino. Per una migliore leggibilità, in ciascuna di tali mappe è stato sovrapposto il *layer* relativo all'orografia, evidenziato dalle curve di livello del terreno, rappresentate ad una risoluzione verticale di 50 m.

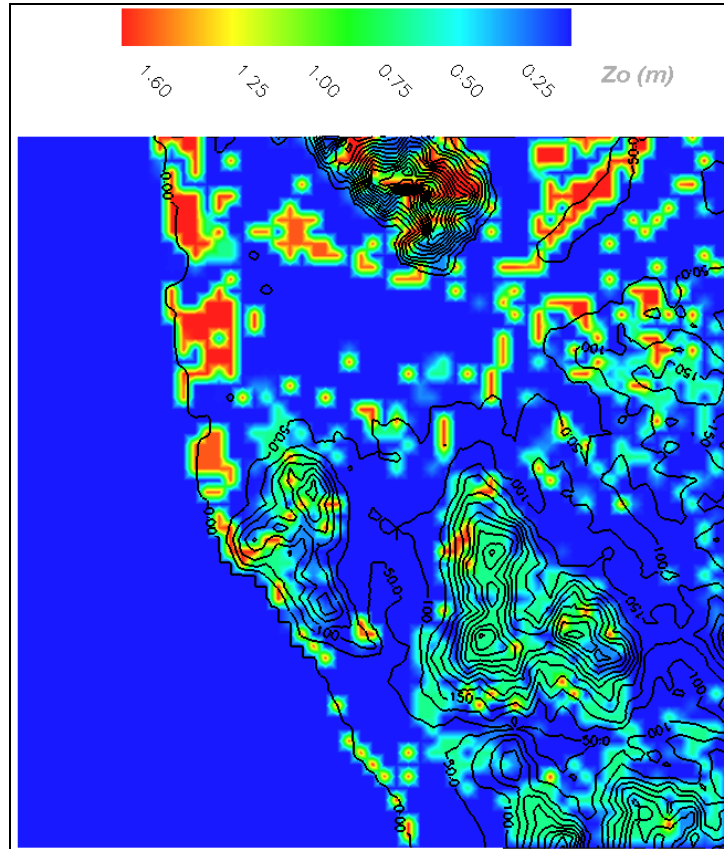


Fig. 85 – Mappa di rugosità elaborata per l'area di studio di Livorno.

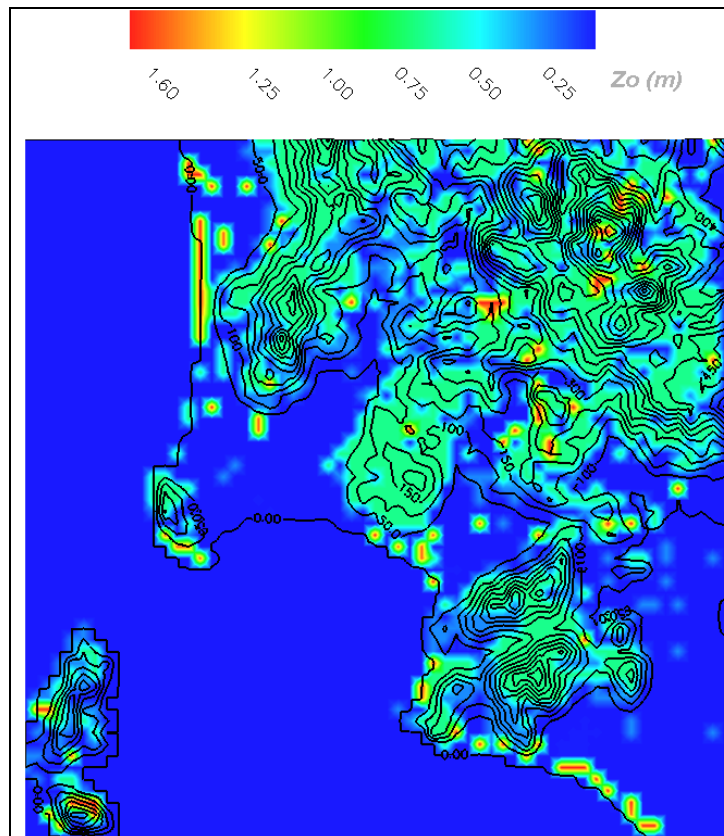


Fig. 86 – Mappa di rugosità elaborata per l'area di studio di Piombino.

5.3 Definizione degli scenari meteorologici

Il secondo gruppo di dati di *input* per MINERVE è costituito dalle informazioni meteorologiche. Come già evidenziato, al fine di individuare condizioni significative sia per la modellistica meteo che per quella diffusionale, si è proceduto col definire degli opportuni scenari meteo, con caratteristiche mirate ad inquadrare, rispettivamente, le condizioni atmosferiche più ricorrenti e quelle maggiormente favorevoli all'insorgere di episodi acuti d'inquinamento.

La definizione del giorno "tipico" e del giorno "peggiore", ottenuta attraverso la metodologia dell'analisi dei *cluster* (vedi cap. 4), ha richiesto innanzitutto di individuare le stazioni a terra significative per lo studio, nonché di operare una selezione delle misure acquisite da queste. Come già evidenziato nel cap. 3, per l'area di studio di Livorno le stazioni meteo prescelte per l'analisi sono state tre, e cioè quelle di S. Piero a Grado, Cecina e Labromare. Per l'area di Piombino le stazioni i cui dati rispondessero ai requisiti richiesti sono state due, quella di Massa Marittima e quella di Torre del Sale.

Le variabili atmosferiche considerate nell'analisi sono state la temperatura (nonostante che per la stazione Labromare non sia stato possibile disporre di questi dati), la velocità e la direzione prevalente del vento. Non è stato possibile lavorare su altre variabili, come ad esempio la stabilità atmosferica, in quanto assente il campionamento contemporaneo di variabili come la radiazione globale e la radiazione netta, necessari a definire la classe di stabilità attraverso la classica metodologia di Pasquill.

Al fine di costruire degli scenari meteo significativi per le problematiche affrontate, come arco temporale di riferimento è stato assunto il periodo invernale: in particolare il campione dei dati utilizzato nell'analisi, risultato del filtraggio imposto dalla necessità che gli stessi si sovrapponevano ora per ora nel corso dell'inverno, corrisponde ai mesi di dicembre, gennaio, febbraio degli anni 1996 e del 1997.

A partire da tale base-dati, per i due siti di riferimento si è proceduto col definire il giorno "tipico" e quello "peggiore", utilizzando la metodologia nota come "analisi dei *cluster*". Per ogni ora del giorno, nel periodo storico considerato, tale procedimento opera il raggruppamento degli accadimenti meteorologicamente più simili, tenendo conto di tutte le variabili messe a disposizione dalle stazioni meteo considerate. In particolare, tali variabili meteo risultano sei per l'area di Piombino ed otto per quella di Livorno². Il vantaggio di tale metodologia è che il raggruppamento degli accadimenti riguarda eventi storici realmente accaduti, e soprattutto contemporanei l'uno all'altro.

Il giorno tipico è stato definito scegliendo, per ogni ora del giorno, i *cluster* col maggior numero di accadimenti; successivamente, alle variabili meteo di ogni stazione sono stati attribuiti i valori corrispondenti a tali *cluster*.

Il giorno "peggiore" è invece stato definito scegliendo quei *cluster* ai quali corrispondessero, stazione per stazione, i valori maggiormente critici delle diverse variabili atmosferiche, e cioè venti e temperature più bassi.

In conclusione, ciò che è stato possibile ottenere è la fotografia – da un punto di vista meteorologico – del giorno maggiormente ricorrente durante l'inverno, e di quello a fronte del quale è più probabile che insorgano condizioni sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti atmosferici.

Le figure che seguono forniscono una sintesi grafica dell'andamento che le tre variabili meteo utilizzate nell'analisi dei *cluster* (temperatura, direzione e velocità del vento) assumono durante il giorno "tipico" e quello "peggiore" in corrispondenza delle stazioni utilizzate per i due siti di riferimento. Le Figg. 87 e 88 descrivono gli andamenti relativi all'area di Livorno, mentre le Figg. 89 e 90 fanno altrettanto per quella di Piombino.

² Per Piombino sono state considerate le variabili T, VV, DV rilevate nelle stazioni Massa Marittima e Torre del Sale, per Livorno le variabili T, VV, DV rilevate nelle stazioni S. Piero a Grado e Cecina, VV e DV nella stazione Labromare.

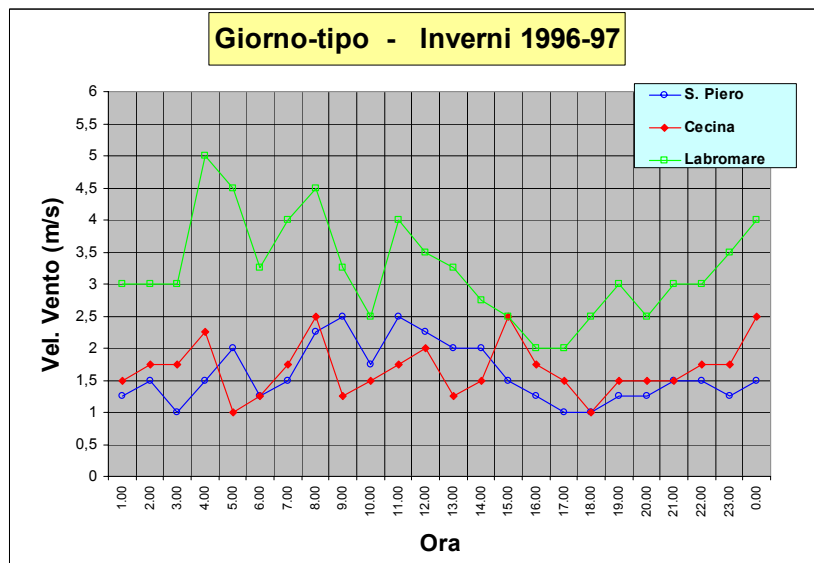
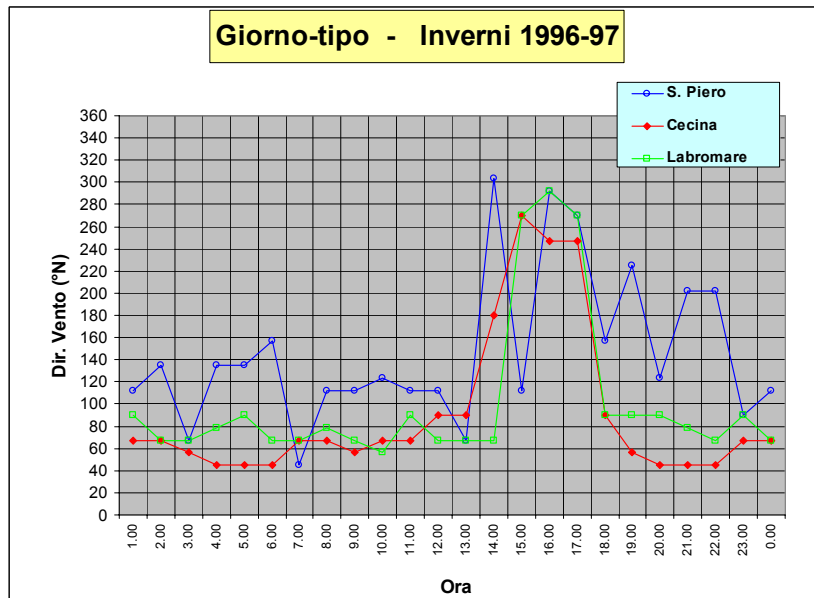
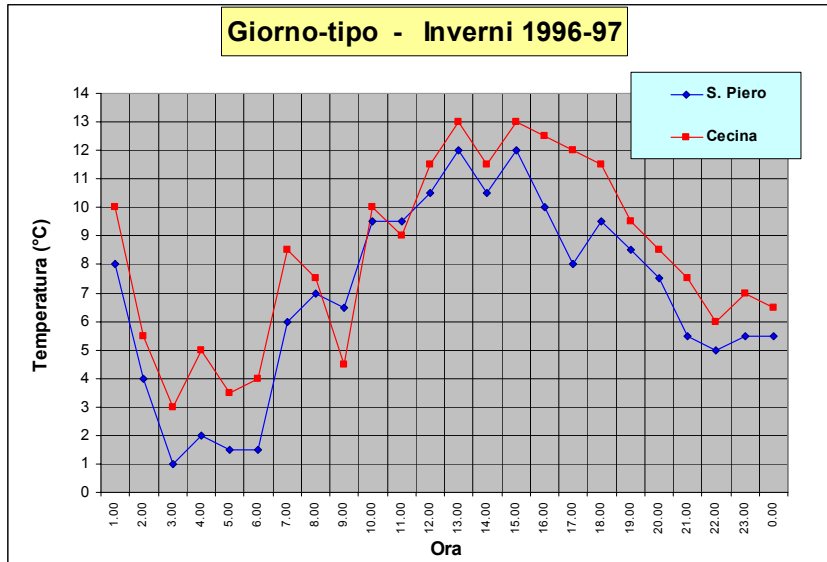


Fig. 87 – Andamento delle variabili meteo considerate nella definizione del giorno tipico nell’area di Livorno.

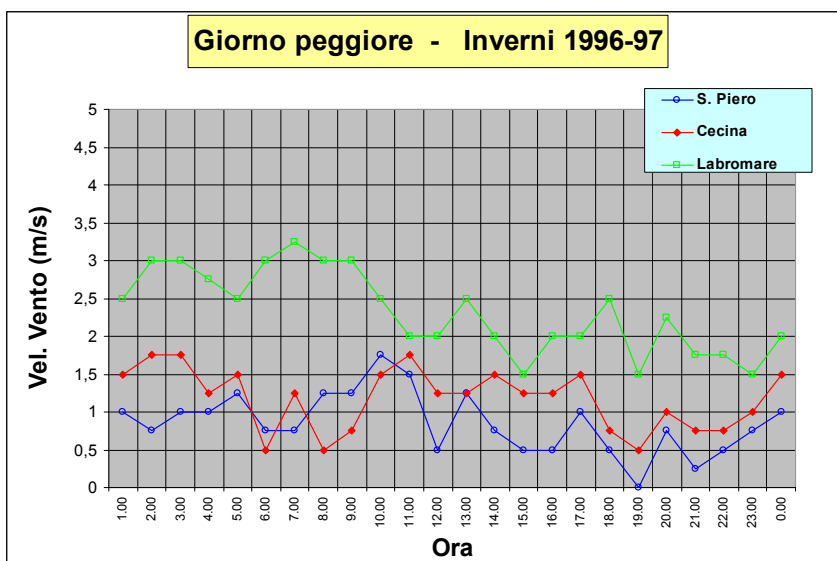
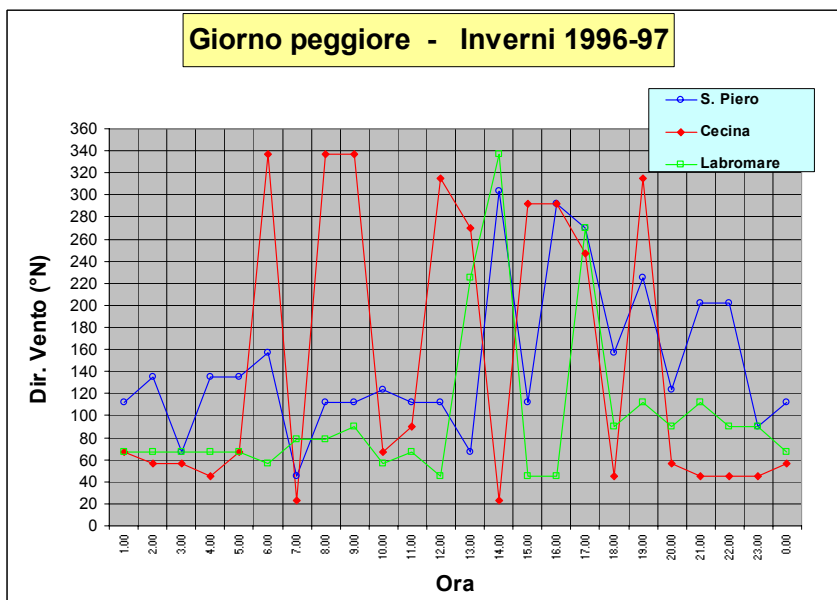
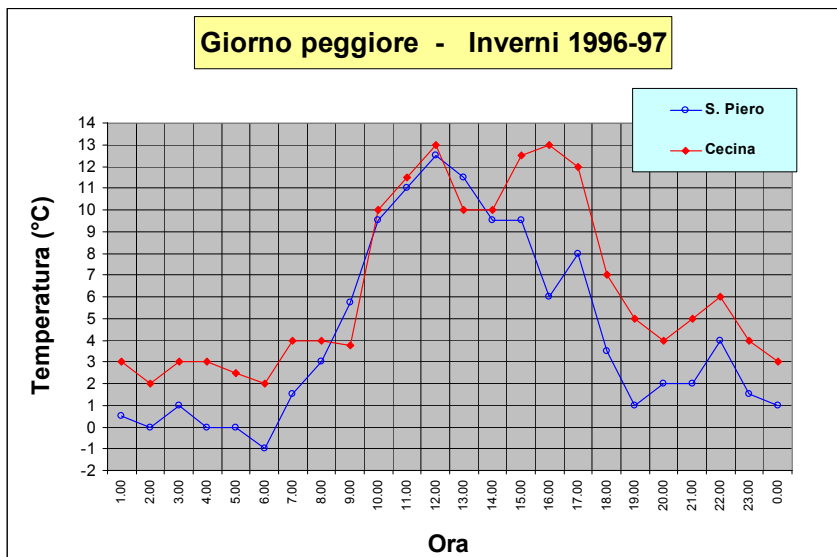


Fig. 88 – Andamento delle variabili meteo considerate nella definizione del giorno “peggiore” nell’area di Livorno.

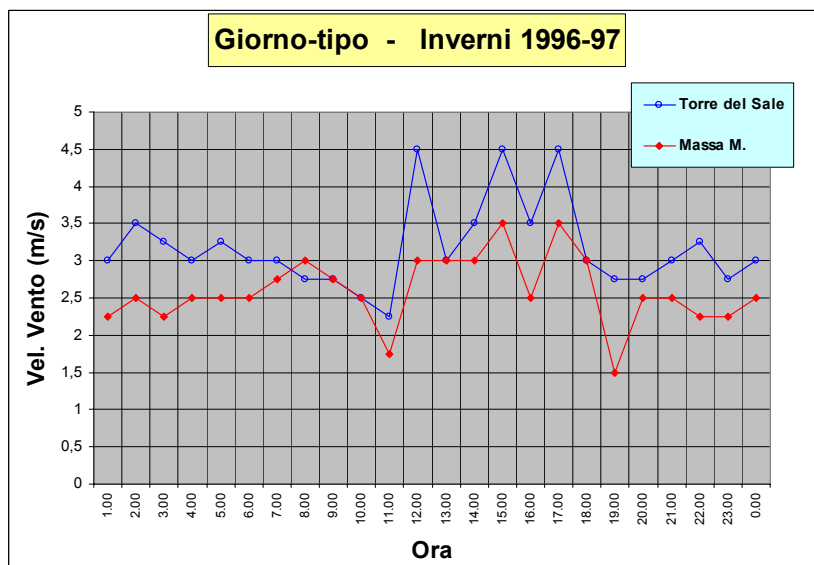
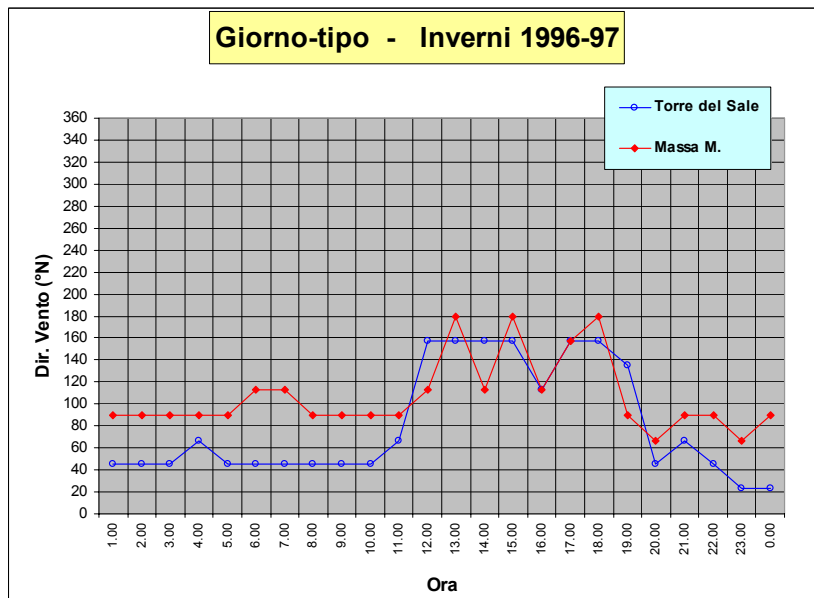
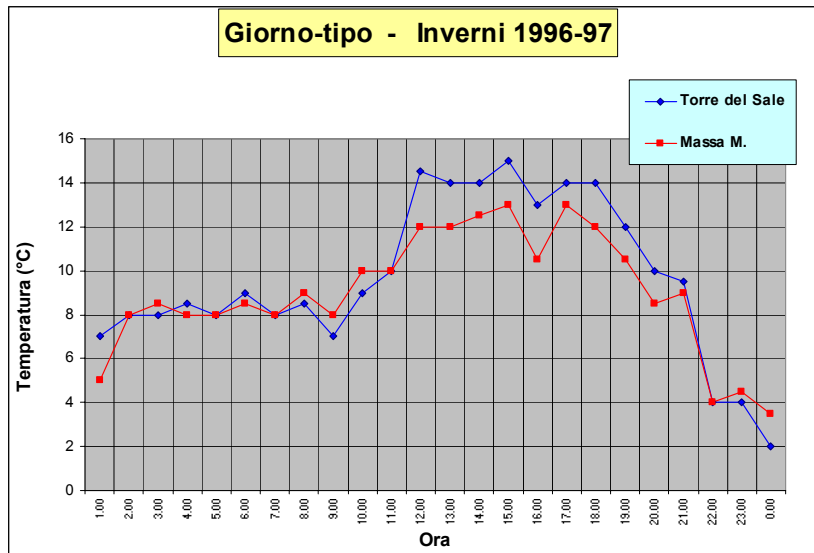


Fig. 89 – Andamento delle variabili meteo considerate nella definizione del giorno tipico nell'area di Piombino.

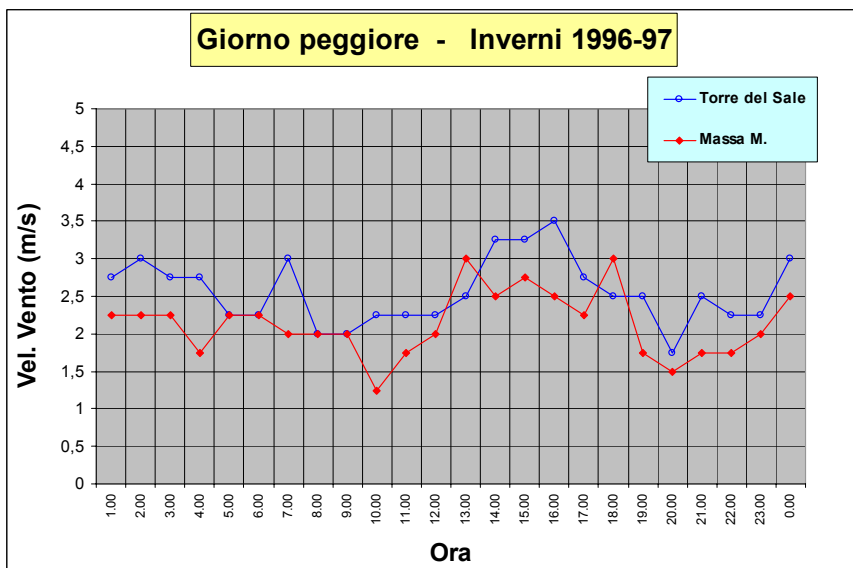
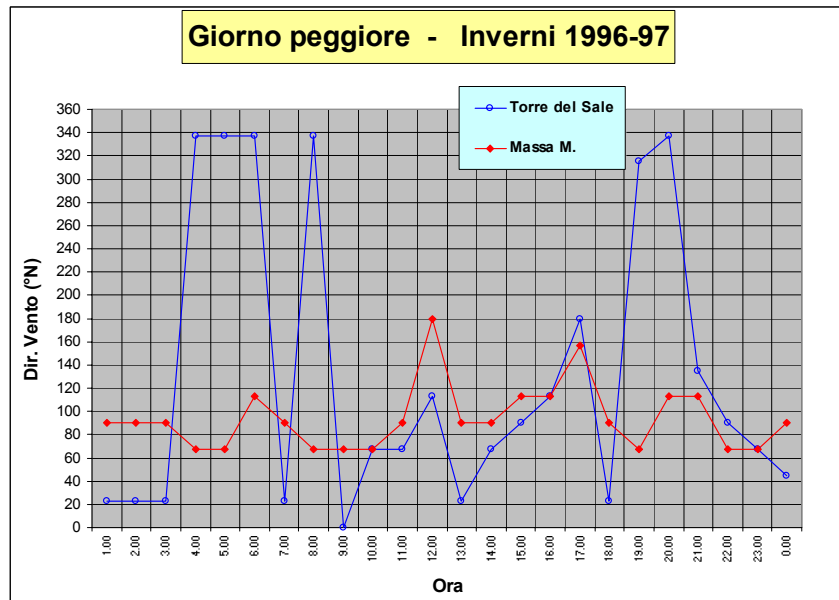
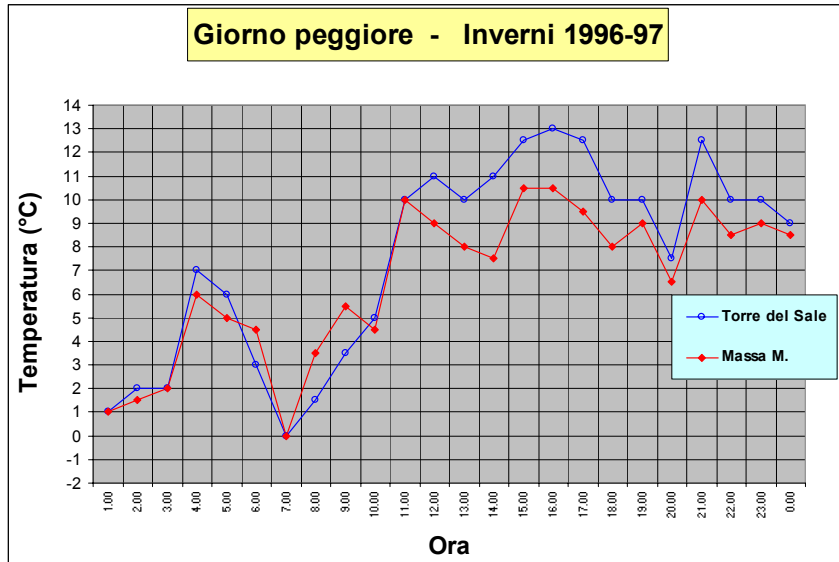


Fig. 90 – Andamento delle variabili meteo considerate nella definizione del giorno “peggiore” nell’area di Piombino.

Dall'esame della Fig. 87 (giorno tipico nelle stazioni del sito di Livorno), emerge in particolare il differente regime anemologico tra le stazioni dell'entroterra (S. Piero e Cecina) e quella costiera localizzata nell'area del porto di Livorno (Labromare), nel senso che per quest'ultima si registrano intensità di vento decisamente superiori. Ciò trova conferma anche nel caso del giorno "peggiore" (Fig. 88).

Altro elemento interessante evidenziato dalla ricostruzione del giorno tipico nell'area di Livorno (Fig. 87) è il sistematico ricorrere di venti che fino alle ore 13-14 spirano dalla terra verso il mare, mentre nelle ore pomeridiane invertono la loro direzione dal mare verso terra, evidenziando cioè il ciclico alternarsi giornaliero delle brezze di terra e di mare.

Più elevate temperature si registrano presso la stazione di Cecina rispetto a quella di S. Piero, e ciò sia per il giorno tipico (Fig. 87) che per quello "peggiore" (Fig. 88).

La stazione di S. Piero si segnala inoltre per valori di velocità del vento particolarmente bassi, soprattutto nel giorno "peggiore" (Fig. 88), mentre nel corso del giorno tipico tale andamenti appaiono paragonabili a quelli della stazione di Cecina (Fig. 87).

L'andamento delle variabili atmosferiche in corrispondenza delle due stazioni considerate per l'area di Piombino si presenta piuttosto omogeneo, soprattutto per quanto riguarda la temperatura, e ciò sia durante il giorno tipico che durante quello "peggiore" (Figg. 89 e 90).

Meno uniforme tra le due stazioni appare il regime dei venti. Sia a fronte di condizioni meteo tipiche che "peggiori", è dato riscontrare venti più intensi presso la stazione costiera di Torre del Sale rispetto a quella più interna di Massa Marittima.

Anche le direzioni di provenienza del vento mostrano andamenti differenti tra le due stazioni, sebbene tali differenze appaiano più marcate durante il giorno "peggiore" (Fig. 90), nel senso che la stazione di Massa Marittima risulta maggiormente soggetta a venti provenienti da Est ($90\div 135^\circ\text{N}$), mentre quella di Torre del Sale appare più influenzata da venti spiranti da Nord ($-45\div 45^\circ\text{N}$). Meno differenti sono gli andamenti della direzione del vento durante il giorno tipico (Fig. 89), soprattutto nel corso delle ore pomeridiane, anche se durante la mattina e di notte emerge uno scarto di circa 45°N verso Est della stazione di Massa Marittima rispetto a quella di Torre del Sale.

Un confronto più immediato tra le diverse stazioni meteorologiche utilizzate nell'analisi, per entrambi i siti e gli scenari meteo considerati, si può avere attraverso le figure presentate nel seguito, in particolare per quanto riguarda il regime dei venti. Tali figure rappresentano il punto di partenza della modellistica meteorologica sviluppata nel corso del presente studio e basata sull'impiego del modello MINERVE.

Dopo aver visto infatti l'andamento che le tre variabili meteo utilizzate (temperatura, direzione e velocità del vento prevalente) assumono durante il giorno tipico e quello "peggiore" in ogni singola stazione, di seguito gli stessi andamenti sono mostrati in maniera comparata nell'area di Livorno e in quella di Piombino. Lo scopo è quello di acquisire chiarimenti ulteriori rispetto a quanto visto in precedenza, ottenendo quindi una visione meteorologica d'insieme.

In particolare, in tali figure è illustrato l'andamento dei vettori di vento presso le suddette stazioni, selezionando dell'animazione temporale i *frames* più significativi atti a meglio descrivere le principali variazioni che avvengono nel corso della giornata.

Le Figg. 91 e 92 mostrano, rispettivamente per il giorno tipico e per quello "peggiore", gli andamenti dei venti presso le stazioni comprese nell'area di Livorno, mentre le Figg. 93 e 94 si riferiscono all'area di Piombino.

Nelle mappe mostrate non compare la localizzazione delle città principali, in quanto di fatto la stazione di S. Piero è localizzata presso Pisa, quella di Labromare coincide col centro di Livorno, e quella di Torre del Sale di poco si discosta dal centro di Piombino.

Il regime anemologico più frequente – cioè quello del giorno tipico – nell'area di Livorno (Fig. 91) evidenzia delle marcate differenze tra la fascia costiera e l'entroterra. Durante le ore notturne (h. 04:00) si registrano infatti venti molto intensi presso la stazione di Labromare, più

modesti in corrispondenza delle altre due stazioni; anche le direzioni di provenienza mostrano andamenti sostanzialmente diversi, nonostante prevalgano in tutti i casi brezze di mare, con direzioni di provenienza Nordest-Est-Sudest.

Il prevalere di condizioni con masse d'aria dirette da terra verso il mare permane per tutta la mattinata (h. 12:00), sebbene per intensità l'andamento dei venti tenda ad uniformarsi tra le varie stazioni considerate.

Immediatamente dopo (h. 15:00) lo scenario anemologico cambia radicalmente: i venti spirano dal mare verso terra, con direzioni rigorosamente provenienti da Ovest ed intensità praticamente coincidenti.

Tale situazione appare tuttavia di breve durata: nel tardo pomeriggio (h. 18:00) si ripristina l'andamento anemologico usuale, con venti più intensi in corrispondenza di Livorno, e direzioni di provenienza da terra verso il mare (Est), sebbene presso la stazione di S. Piero i venti siano diretti verso Nordovest.

In presenza delle condizioni atmosferiche più sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti – cioè nel giorno “peggiore” –, nell'area di Livorno si riscontrano andamenti anemologici sostanzialmente simili a quelli del giorno tipico (Fig. 92). Premesso che i venti si mantengono con sistematicità per l'intera giornata decisamente più forti presso la stazione di Labromare, per tutta la notte e fino alla tarda mattinata (hh. 02:00 e 07:00) spirano da terra verso il mare.

Anche durante il giorno “peggiore”, le correnti di vento invertono la propria direzione durante la fascia pomeridiana (h. 17:00), spirando chiaramente dal mare verso terra in direzione Est.

Ma già immediatamente dopo (h. 20:00), come durante il giorno tipico, tornano a prevalere condizioni di brezza di terra, con orientazioni che vanno da Nordovest a Sudovest.

Lo scenario anemologico che si presenta in corrispondenza delle due stazioni considerate durante il giorno tipico nell'area di Piombino (Fig. 93) mostra sia delle analogie che delle difformità rispetto a quello appena visto per Livorno. Le analogie sono da ricercare soprattutto nel fatto che durante le ore notturne (hh. 03:00 e 22:00) le correnti siano dirette da terra verso il mare, mentre in quelle centrali della giornata (hh. 12:00 e 18:00) spirino dal mare verso terra. Altra analogia è che i venti più intensi ricorrono prevalentemente presso la stazione di mare di Torre del Sale che non in corrispondenza di quella più interna di Massa Marittima. Le differenze rispetto agli andamenti nell'area di Livorno riguardano invece il fatto che il fenomeno dell'inversione di direzione delle correnti durante le ore del pomeriggio si presenti meno brusco, nel senso che la variazione di direzione risulta dell'ordine di 90° e non di 180° come nel caso di Livorno.

Tra le due stazioni considerate emergono divergenze anche nelle direzioni di vento, nel senso che in quella localizzata presso Piombino le correnti spirano – a seconda dei casi – verso Sudovest o Nordovest, mentre in presso Massa Marittima le direzioni prevalenti sono Ovest o Nord.

Durante il giorno “peggiore”, nell'area di Piombino (Fig. 94) le correnti continuano a spirare da terra verso il mare nelle ore notturne e per tutta la mattinata (hh. 02:00 e 08:00); invertono la loro direzione – anche se in maniera molto meno radicale che non durante il giorno tipico – nel corso del pomeriggio (h. 16:00), ed infine riprendono l'usuale andamento al sopraggiungere dell'oscurità (h. 19:00).

Anche durante il giorno “peggiore” gli andamenti di vento mostrano sostanziali differenze in corrispondenza delle due stazioni considerate, soprattutto per quanto riguarda la direzione. Il disaccordo è evidente sia durante la mattinata (h. 08:00) che il tardo pomeriggio (h. 19:00), mentre scompare temporaneamente durante il pomeriggio (h. 16:00).

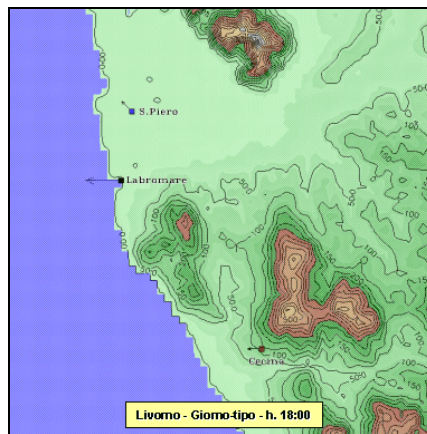
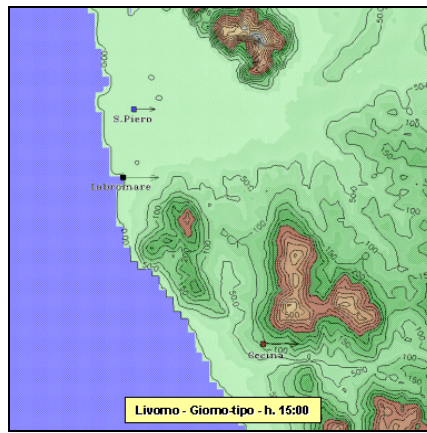
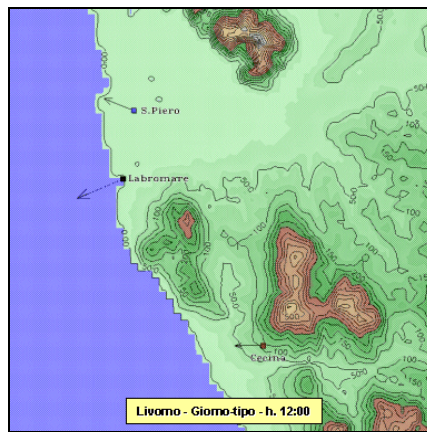
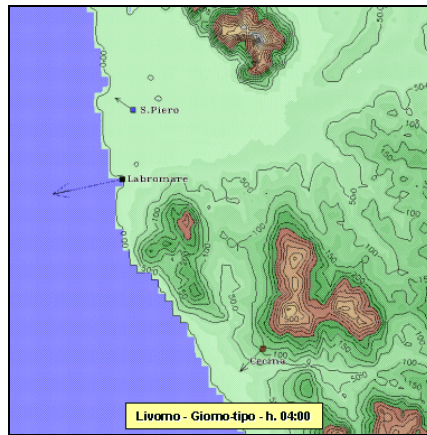


Fig. 91 – Andamento dei vettori di vento presso le stazioni meteo durante il giorno tipico nell'area di Livorno.

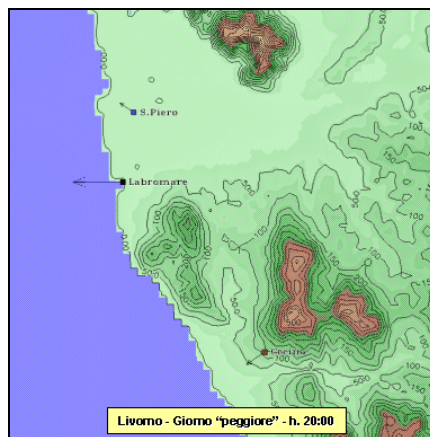
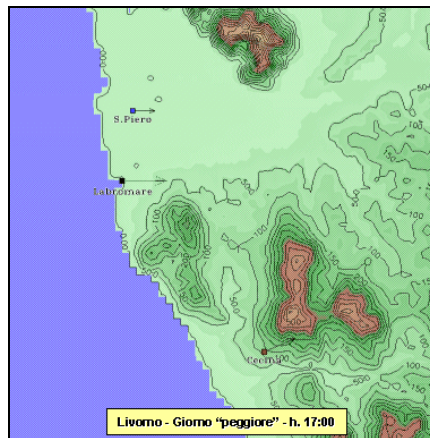
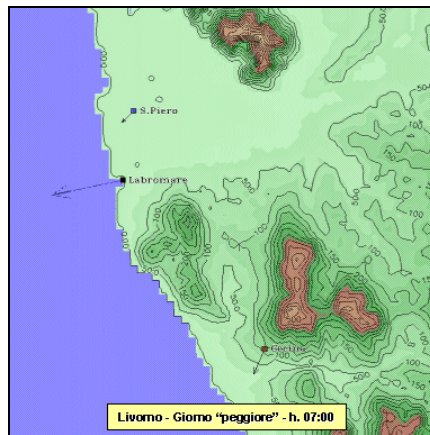
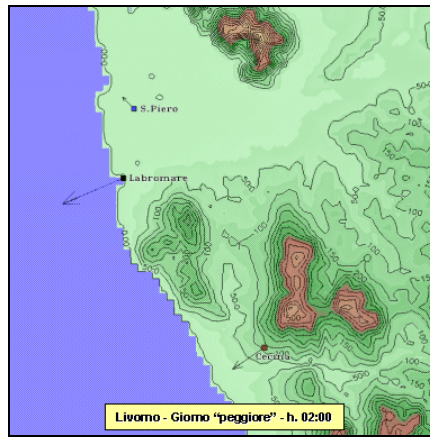


Fig. 92 – Andamento dei vettori di vento presso le stazioni meteo durante il giorno “peggiore” nell’area di Livorno.

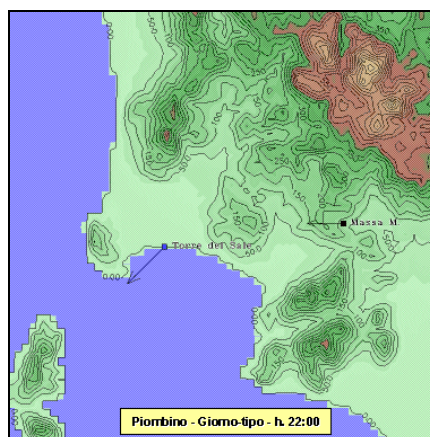
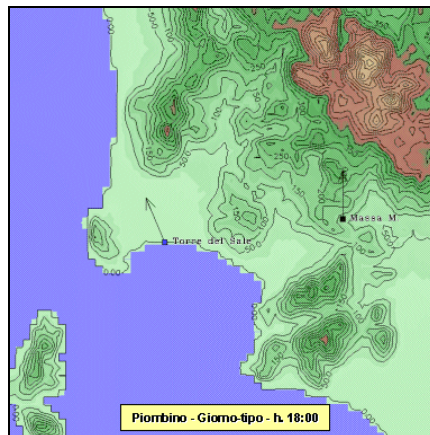
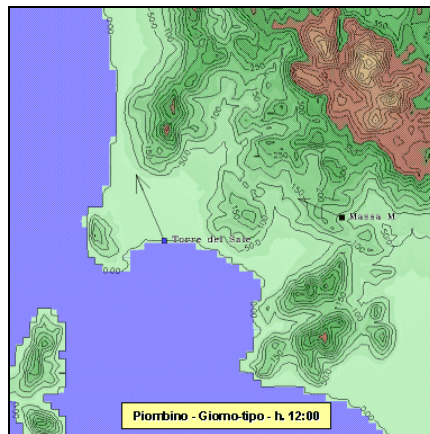
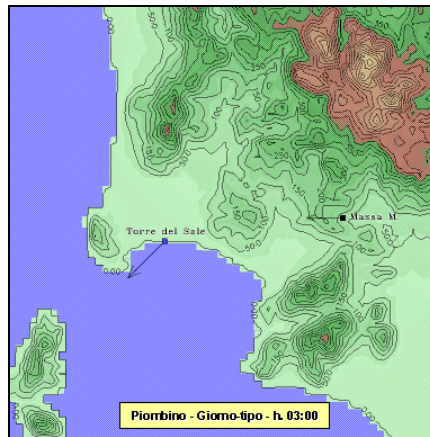


Fig. 93 – Andamento dei vettori di vento presso le stazioni meteo durante il giorno tipico nell'area di Piombino.

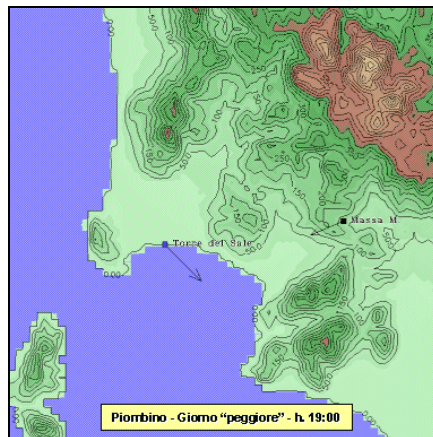
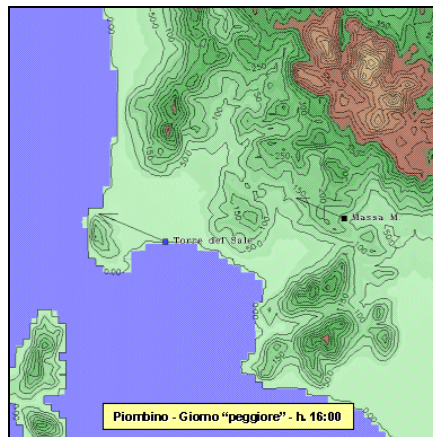
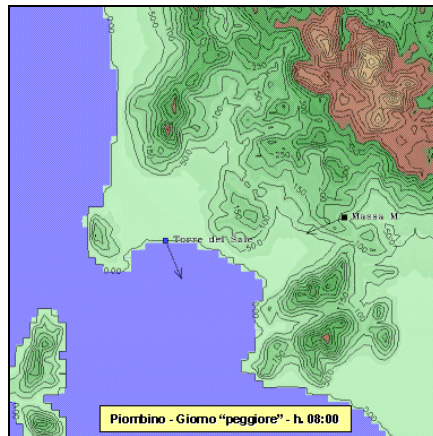
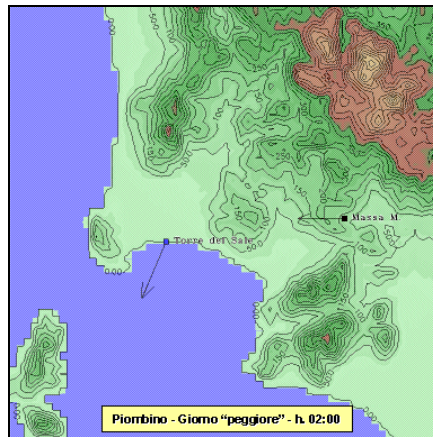


Fig. 94 – Andamento dei vettori di vento presso le stazioni meteo durante il giorno “peggiore” nell’area di Piombino.

5.4 Applicazione della modellistica meteorologica (MINERVE)

Utilizzando i dati delle stazioni meteo appena visualizzati e le informazioni di carattere territoriale, è possibile applicare il modello meteorologico MINERVE ed ottenere i campi di vento e temperatura sul grigliato tridimensionale di calcolo.

Nelle figure che seguono sono illustrate le animazioni temporali dei campi di vento e temperatura al suolo (cioè a 10 m di quota dal terreno) ricostruite da MINERVE durante il giorno tipico e quello “peggiore” nell’area di studio di Livorno e in quella di Piombino. Nelle stesse figure è visualizzata la posizione delle stazioni meteo utilizzate nello studio, mentre l’orografia è descritta attraverso delle curve di livello di passo pari a 50 m.

Naturalmente, da tali animazioni sono estrapolati alcuni *frames* nelle ore maggiormente significative, per meglio fotografare un momento di particolare importanza nel corso della giornata. Chiaramente, il loro andamento generale evidenzia la stretta influenza esercitata sui campi modellizzati sia dall’orografia, che soprattutto dalle misure fornite dalle stazioni meteo.

Le Figg. 95/a e 95/b raffigurano l’andamento del campo di vento superficiale modellizzato da MINERVE nel corso del giorno tipico nell’area di Livorno, mentre le Figg. 96/a e 96/b sono relative al giorno “peggiore” nel medesimo sito. Sempre nell’area di Livorno, le Figg. 97/a e 97/b mostrano il campo di temperatura al suolo ricostruito nel giorno tipico, e le Figg. 98/a e 98/b quello nel giorno “peggiore”. Analogamente, le Figg. 99/a e 99/b, 100/a e 100/b, 101/a e 101/b, 102/a e 102/b forniscono il medesimo tipo di illustrazione, e cioè i campi di vento e temperatura a 10 m dal suolo in presenza dei due differenti scenari meteorologici nell’area di studio di Piombino.

Le Figg. 95/a e 95/b mostrano i vettori di vento sull’area di Livorno alla quota di 10 m dal suolo modellizzati da MINERVE nel corso del giorno invernale più ricorrente. Oltre che in base alla lunghezza, l’intensità dei vettori di vento è rappresentata per ranghi di colore, ed espressa in m/s.

Durante le ore notturne e del mattino (hh. 05:00 e 12:00, Fig. 95/a), i venti spirano dalla costa verso il mare (direzione Ovest), con intensità particolarmente pronunciate soprattutto nell’area del porto di Livorno. Tali venti si mostrano inoltre più forti al largo della costa, risultando al contrario decisamente meno intensi nelle zone dell’entroterra, sia attorno alla stazione di S. Piero a Grado, che a quella di Cecina. Soprattutto nelle prime ore della giornata (h. 05:00), appare particolarmente al riparo da venti di bassa quota – probabilmente perché schermata dai rilievi retrostanti – l’area circostante la stazione meteo di Cecina, mentre più uniforme – e quindi di maggiore intensità – si presenta l’andamento anemologico nella vallata attorno a Pisa.

Da segnalare con particolare rilievo è il fatto che, alla quota di 10 m di riferimento, il regime dei venti appaia maggiormente sviluppato in mare – dove è assente l’effetto di rugosità e quindi lo smorzamento aerodinamico – che non sulla terraferma. In particolare, si può concludere che condizioni di sostanziale calma di vento caratterizzano tipicamente la fascia costiera a Nord di Livorno durante le prime ore dei giorni invernali.

Nelle successive ore della giornata (h. 12:00), l’intensità dei venti pare localmente aumentare nella valle del fiume Cecina e ridursi nella zona dell’immediato entroterra livornese. Tale situazione di maggiore turbolenza investe anche l’area industriale di Rosignano Solvay, localizzata a Sud dei rilievi al di sotto di Livorno, e sostanzialmente in prossimità della stazione meteo di Via Veneto (Fig. 3).

Come già evidenziato, le correnti di vento modificano radicalmente il proprio regime nel corso del pomeriggio, spirando dal mare verso la costa – quindi con direzione Est –, come esemplificato nell’immagine delle h. 15:00 (Fig. 95/b). Anche in questo caso, l’effetto della rugosità sui venti superficiali attenua la loro intensità nel passaggio dal mare alla costa. Tale fenomeno ha tuttavia breve durata, nel senso che al calar del sole – e quindi nel momento in cui l’irraggiamento della terra ha termine –, viene a ripristinarsi il fenomeno della brezza di terra, con conseguente spostamento delle masse d’aria verso le zone più calde poste al di sopra del mare (h 19:00). L’andamento dei venti superficiali esemplificato durante la fascia serale (h. 19:00) mostra inoltre un loro generale attenuarsi, praticamente in tutta l’area del dominio considerato.

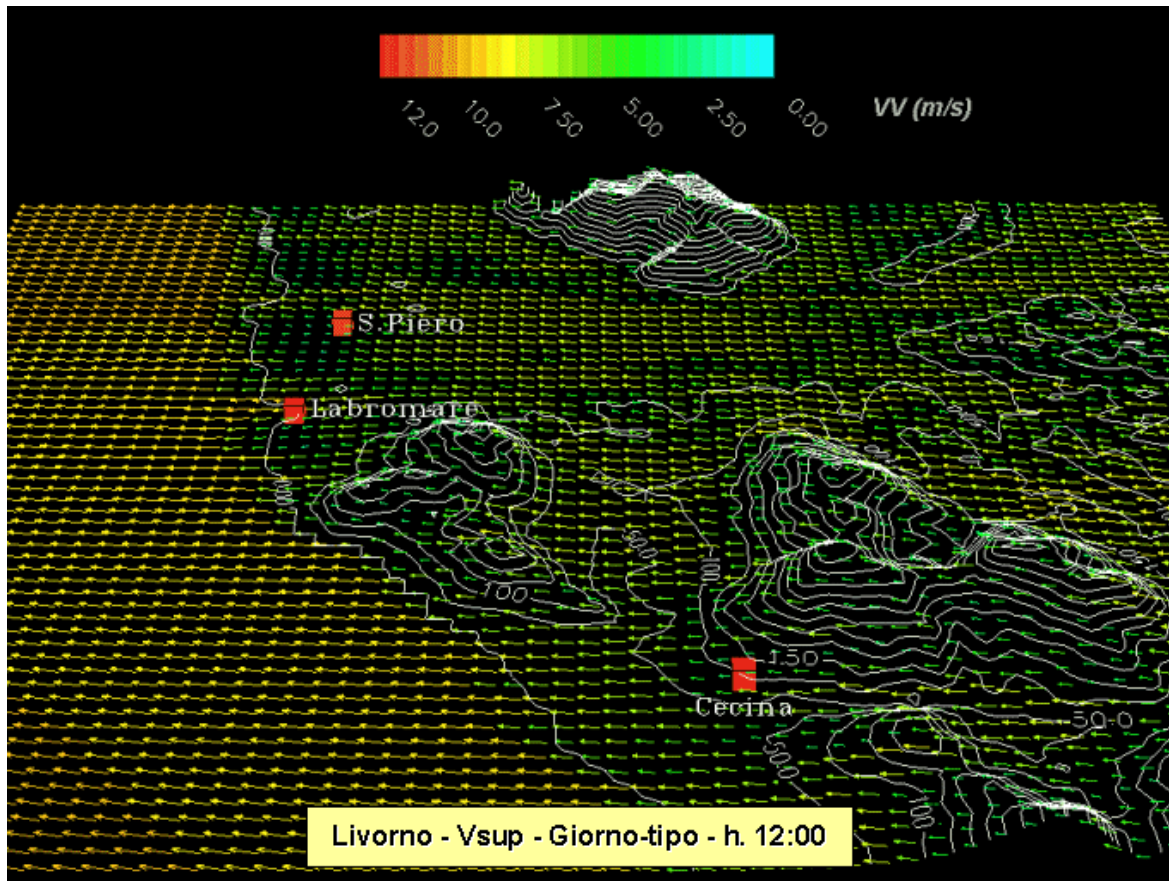
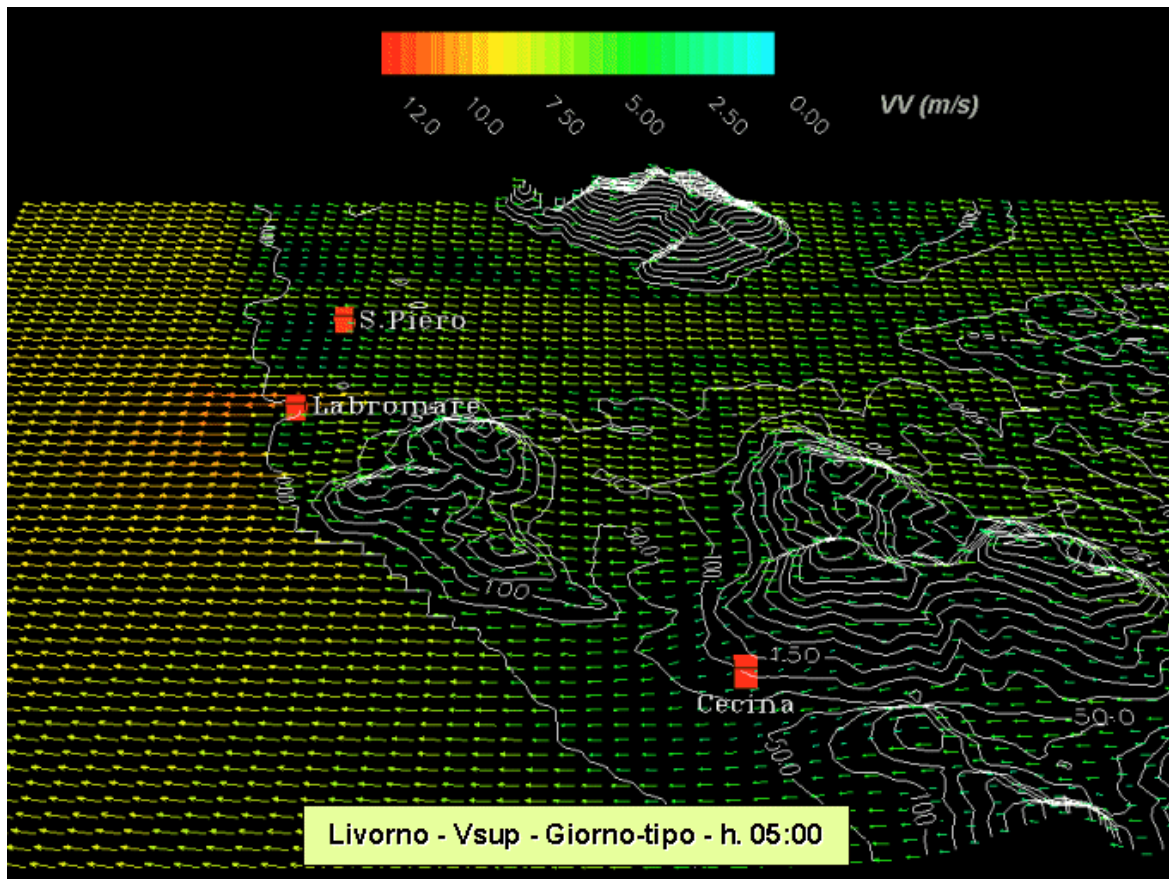


Fig. 95/a – Campo di vento durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 05-12).

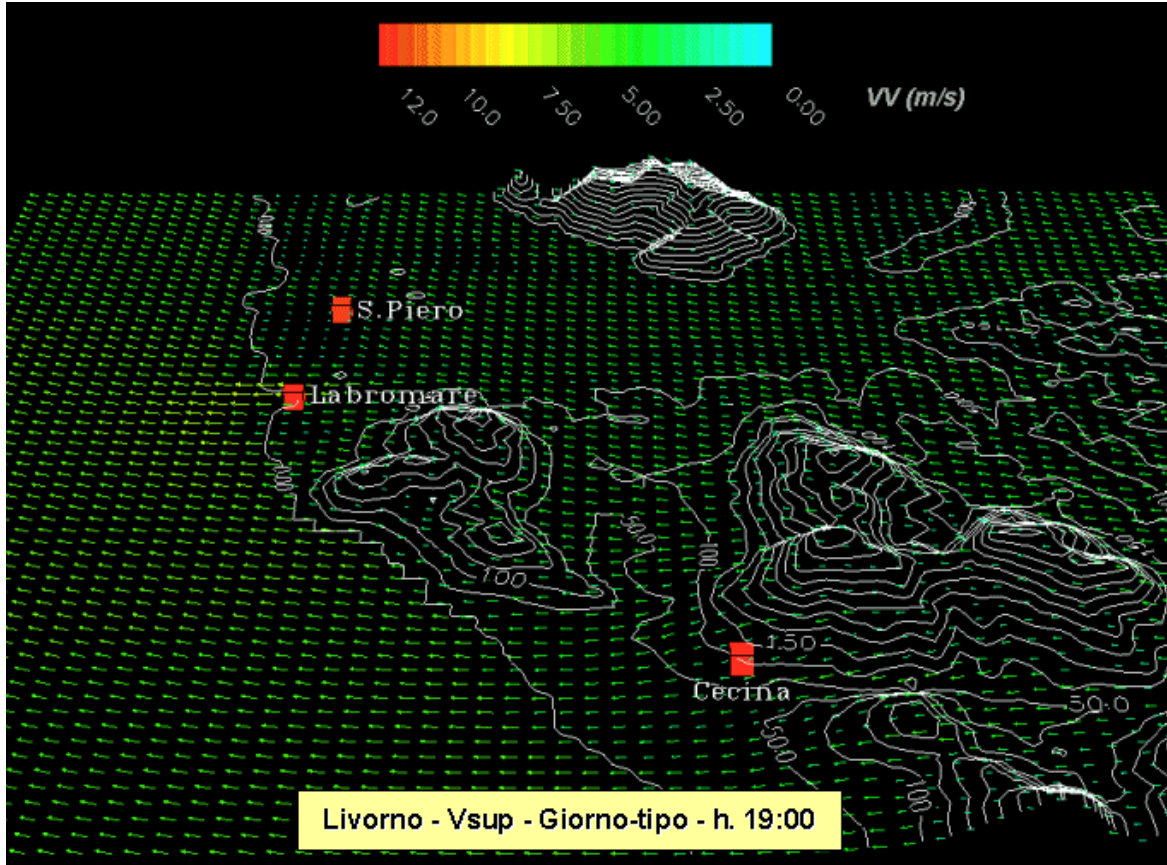
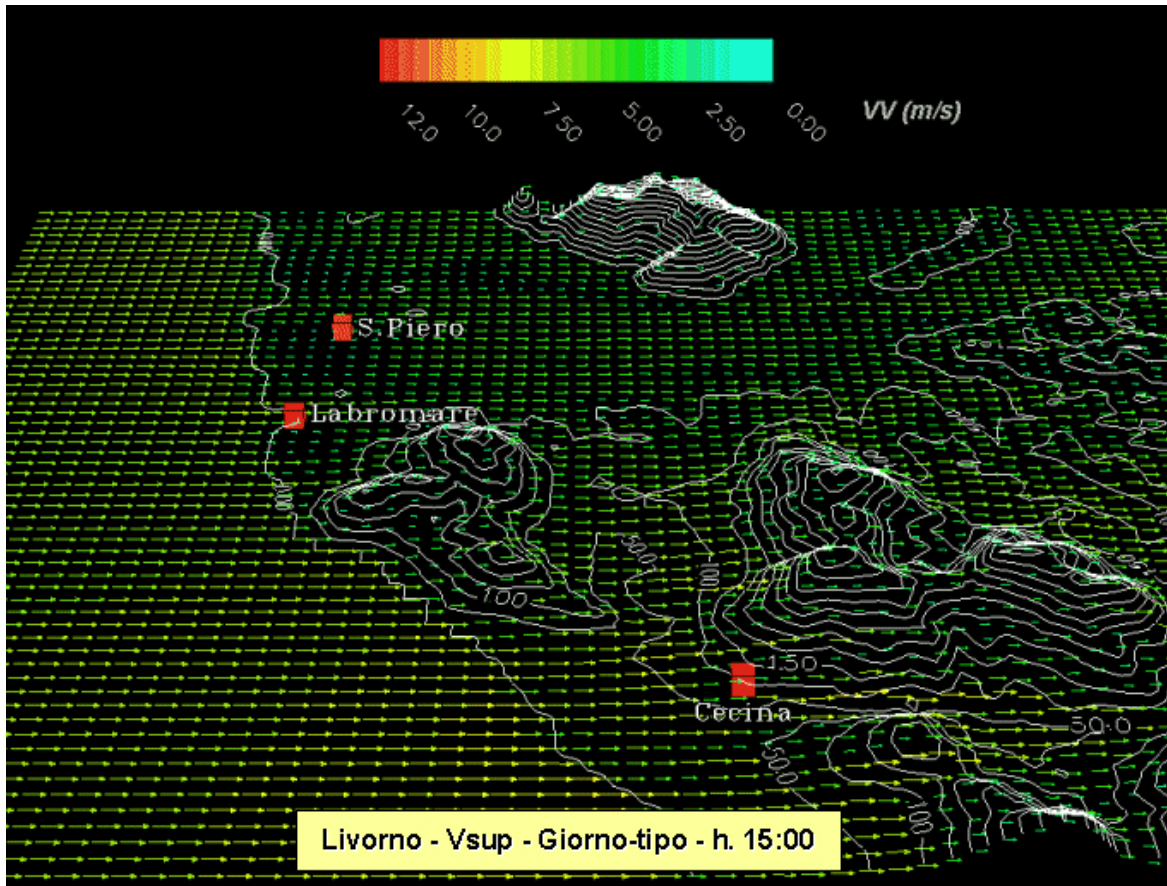


Fig. 95/b – Campo di vento durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 15-19).

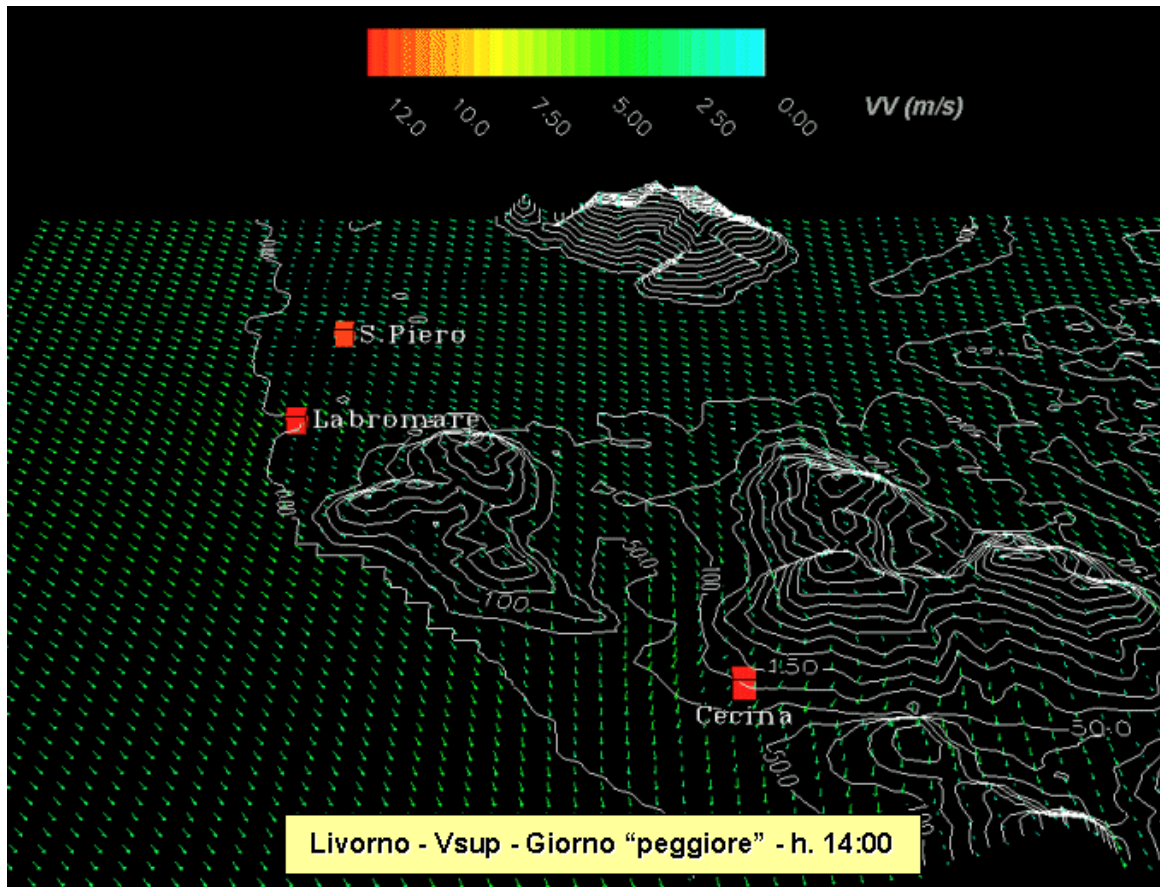
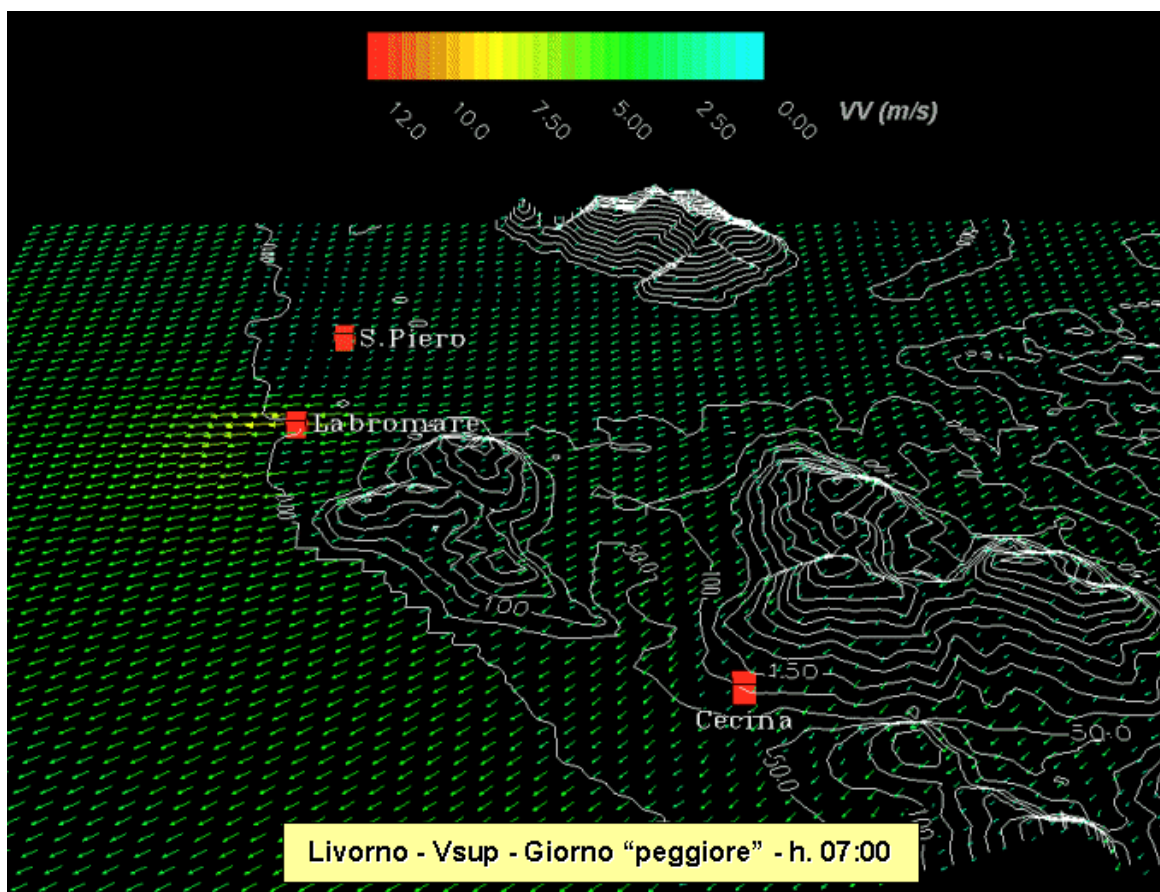


Fig. 96/a – Campo di vento durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 07-14).

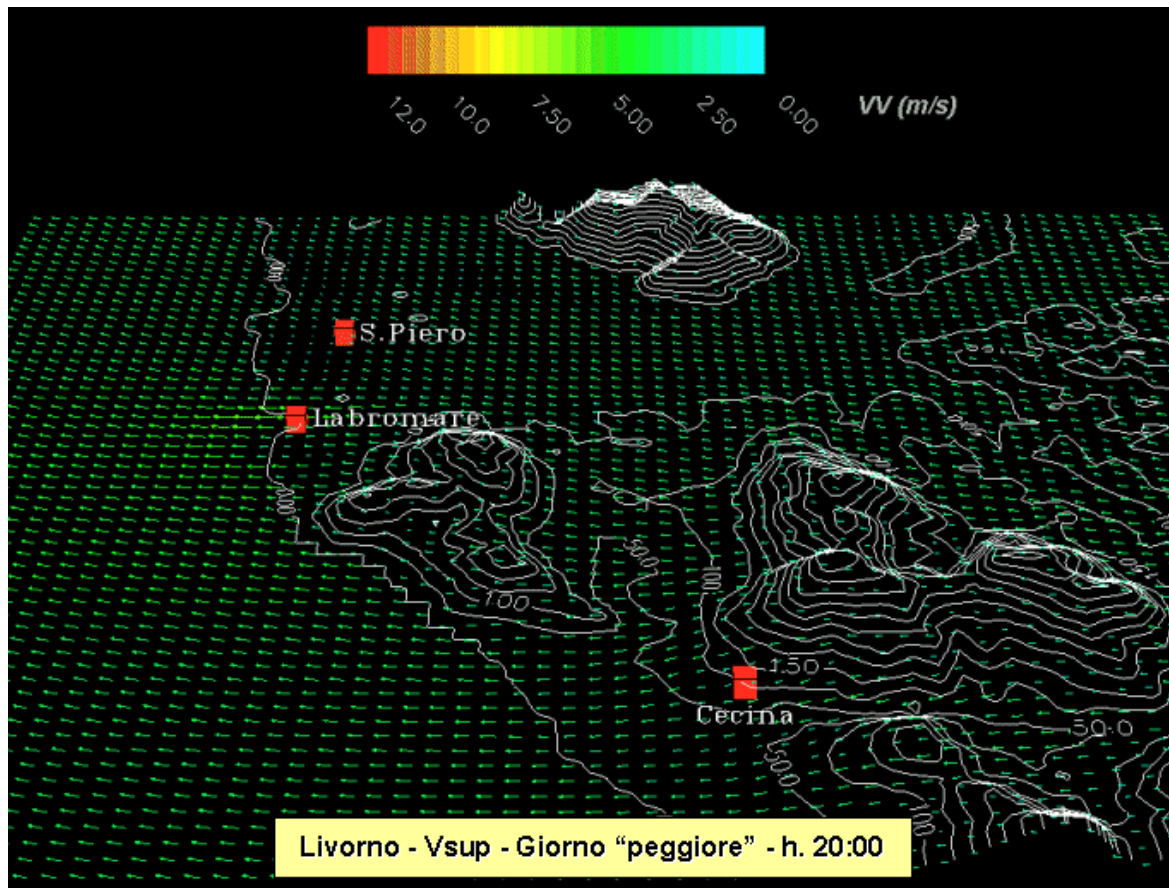
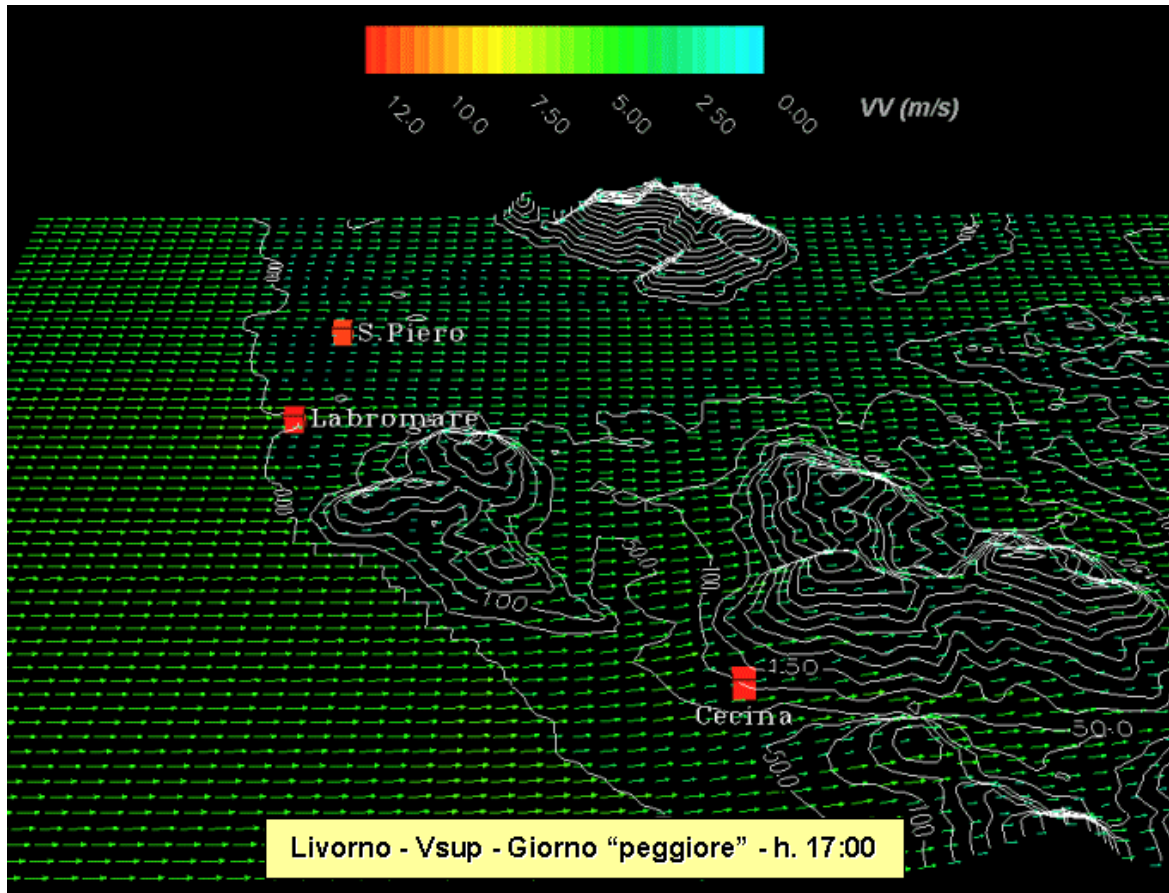


Fig. 96/b – Campo di vento durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 17-20).

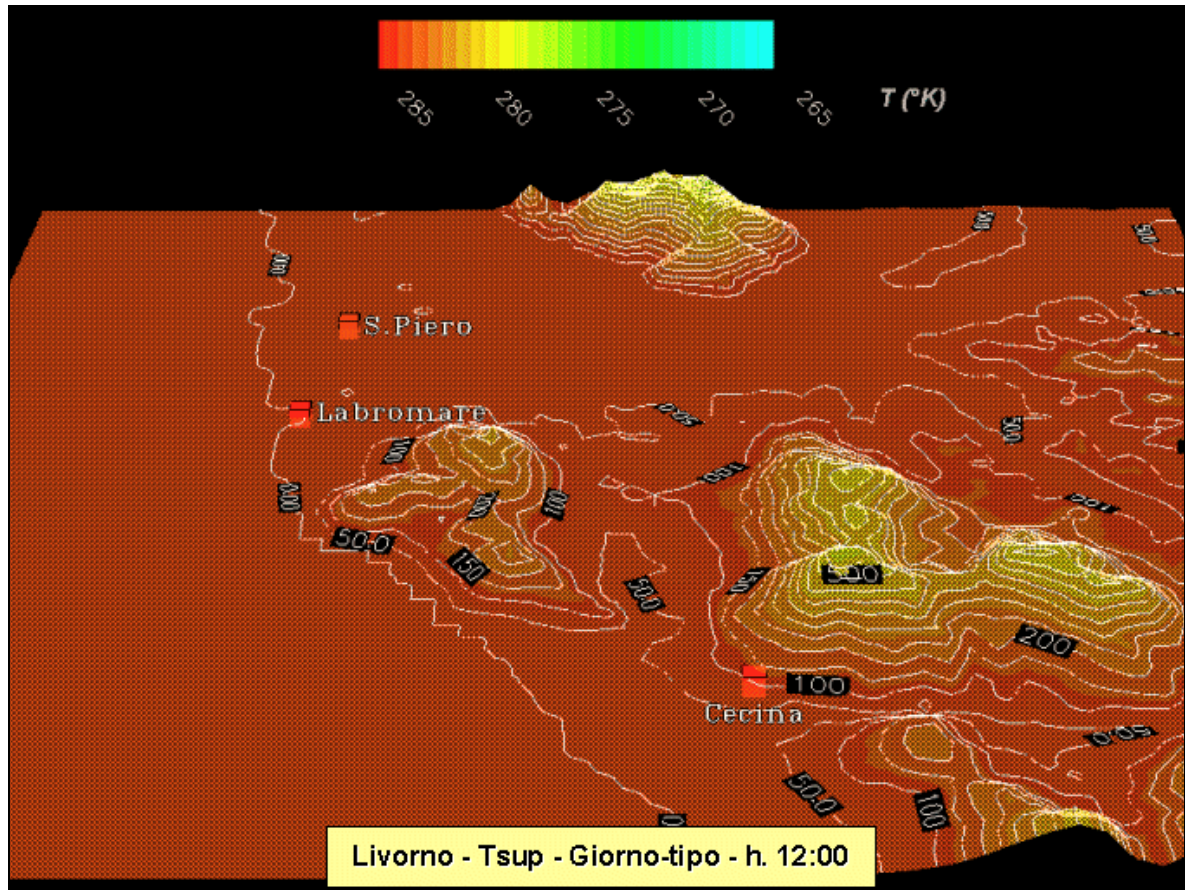
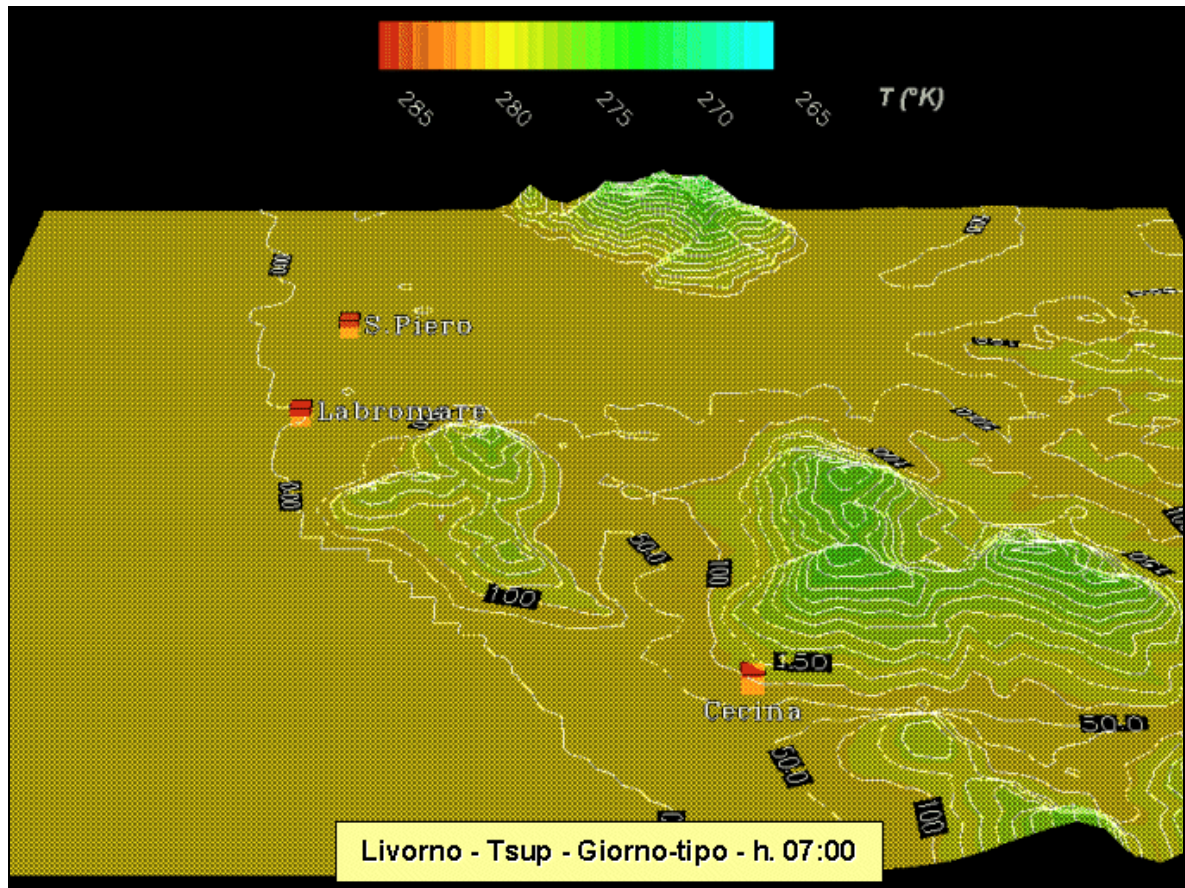


Fig. 97/a – Campo di temperatura durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 07-12).

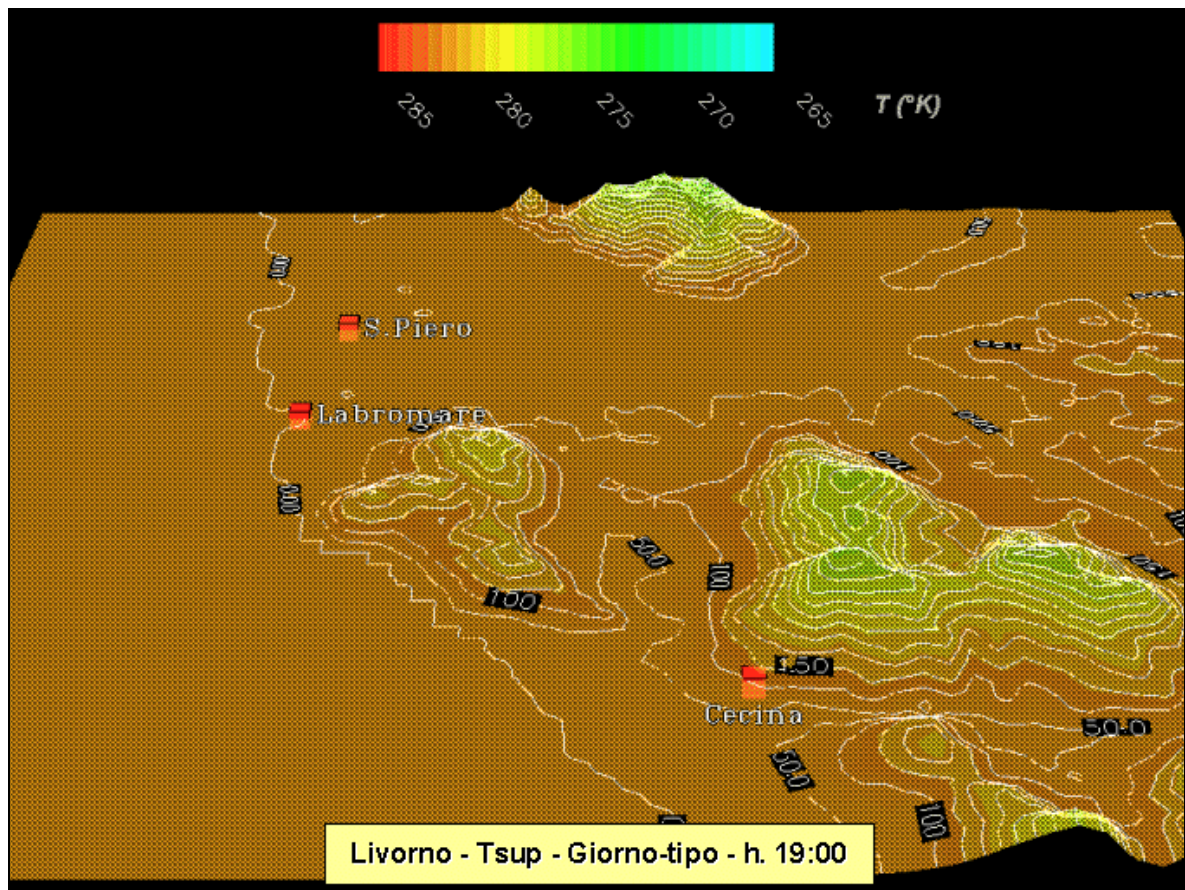
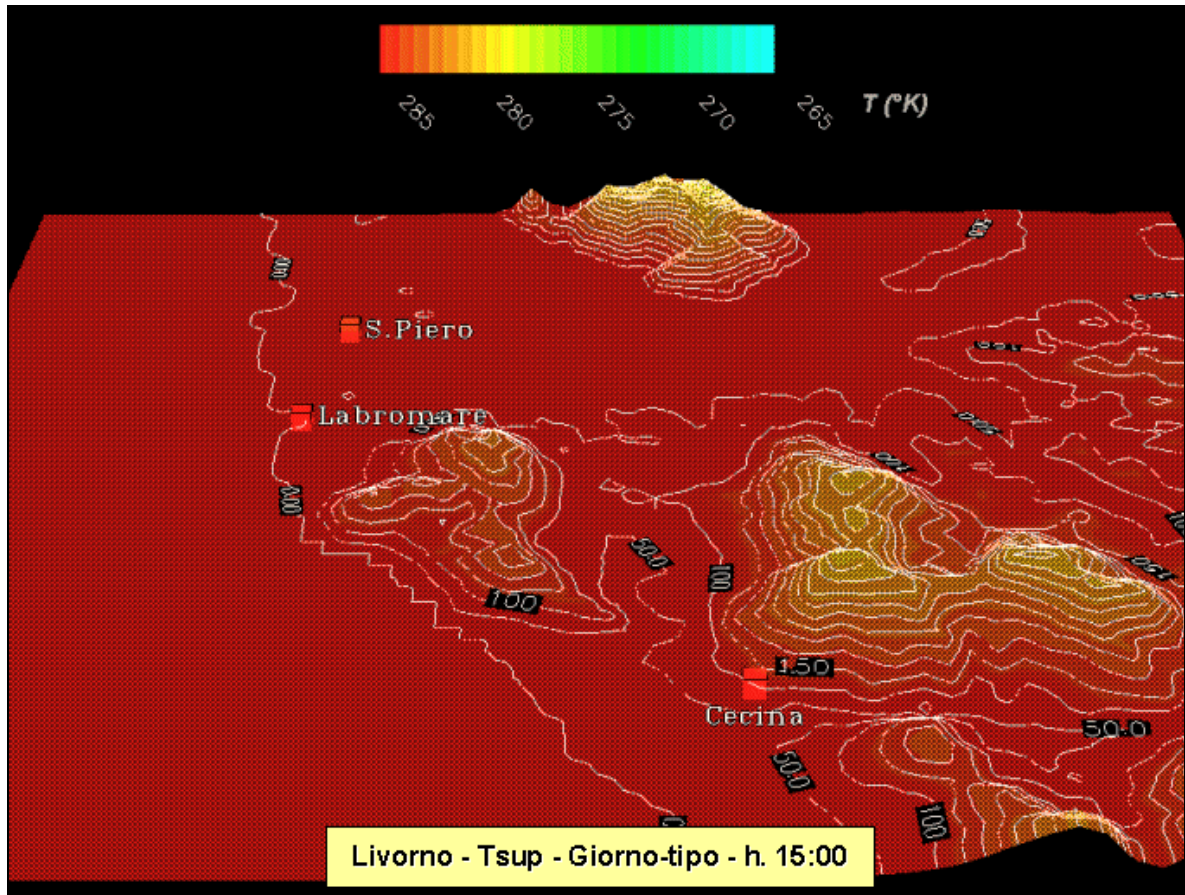


Fig. 97/b – Campo di temperatura durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 15-19).

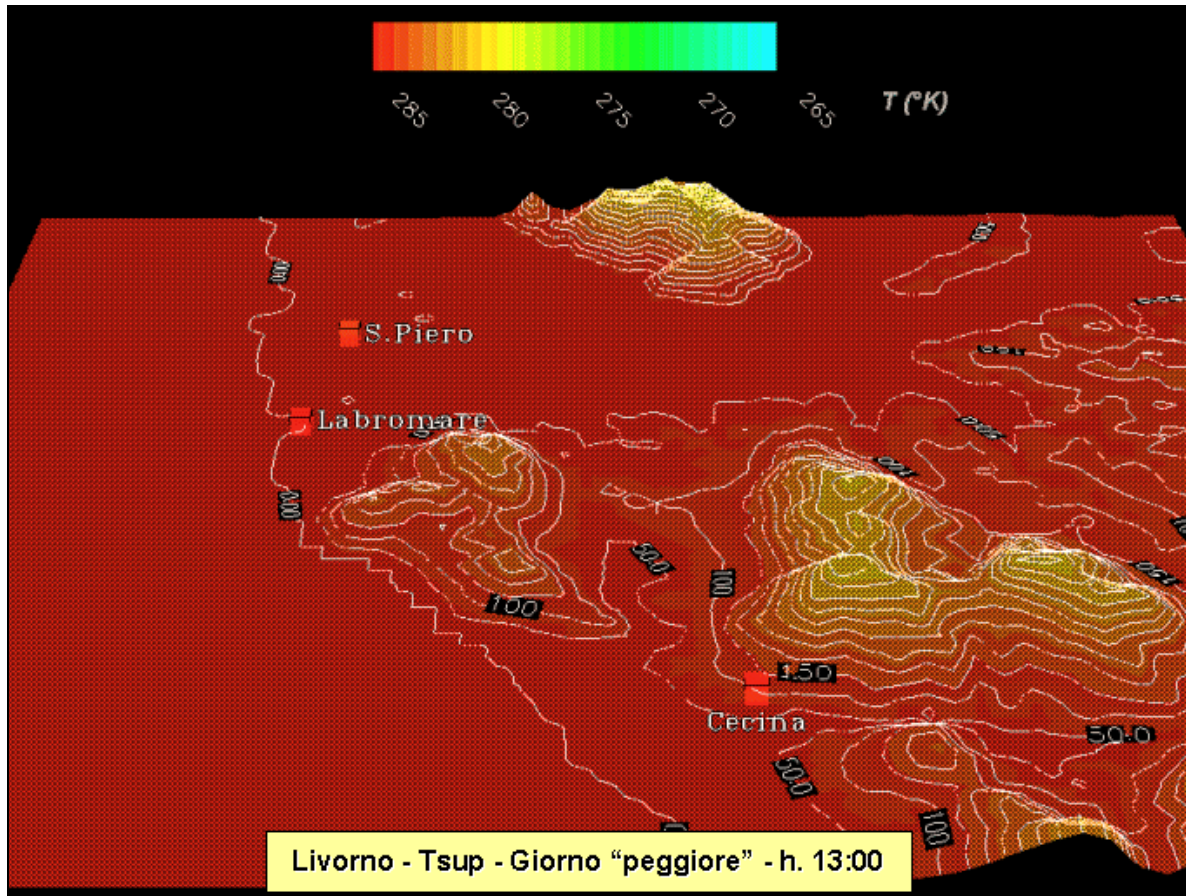
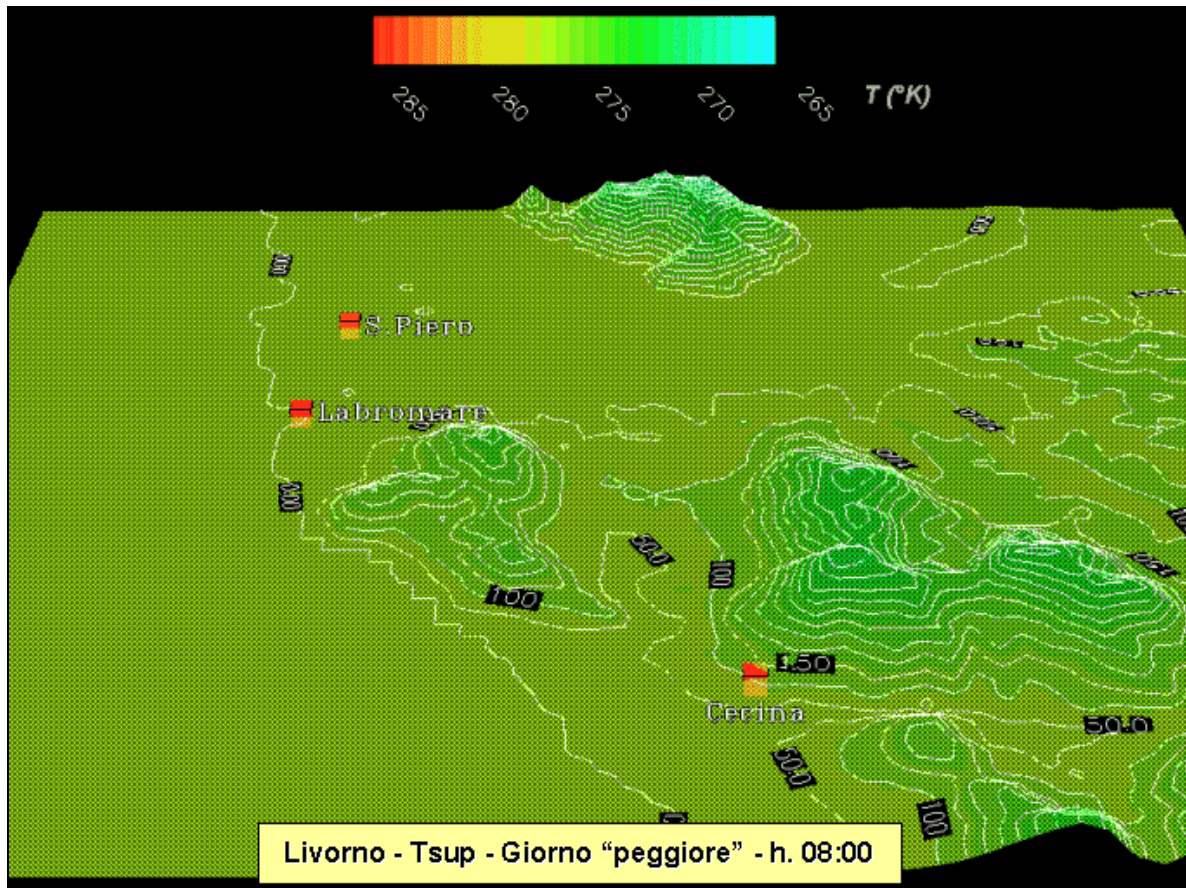


Fig. 98/a – Campo di temperatura durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 08-13).

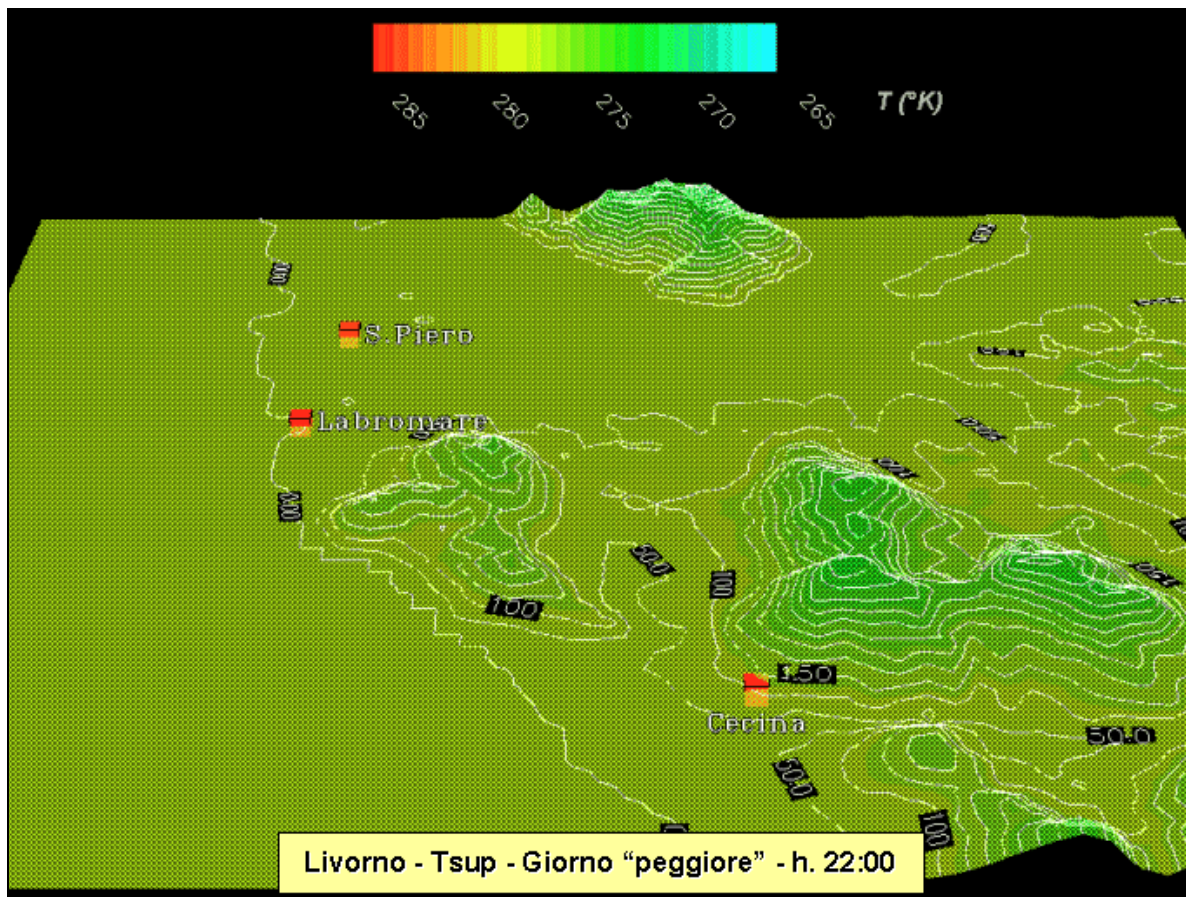
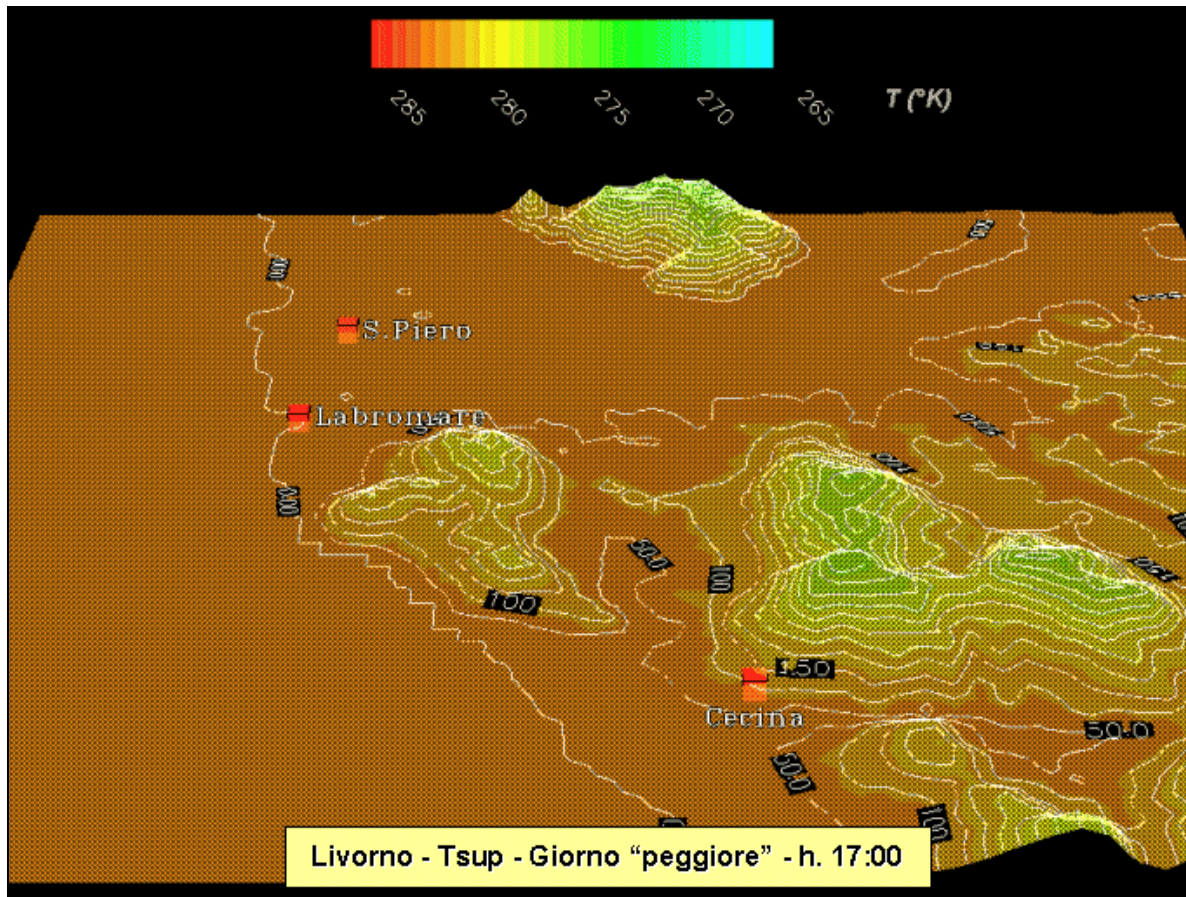


Fig. 98/b – Campo di temperatura durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Livorno (hh. 17-22).

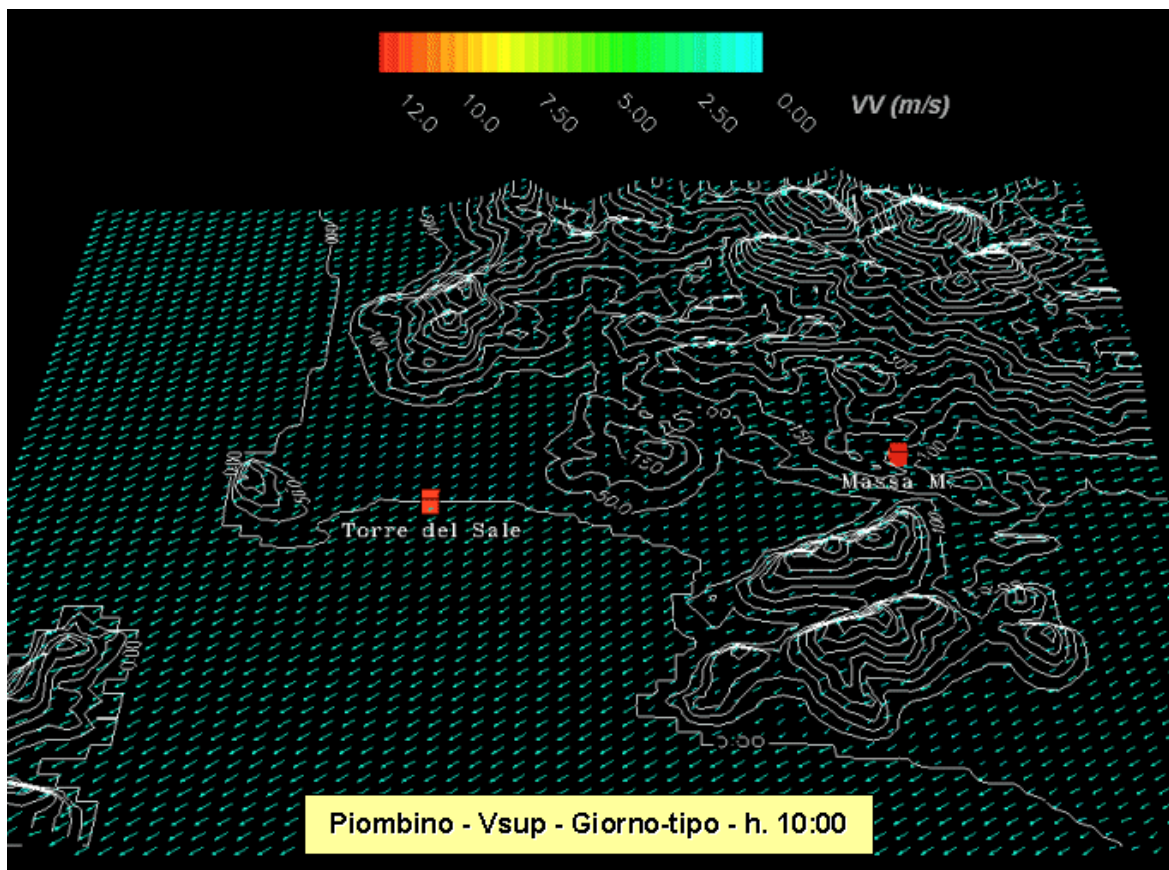
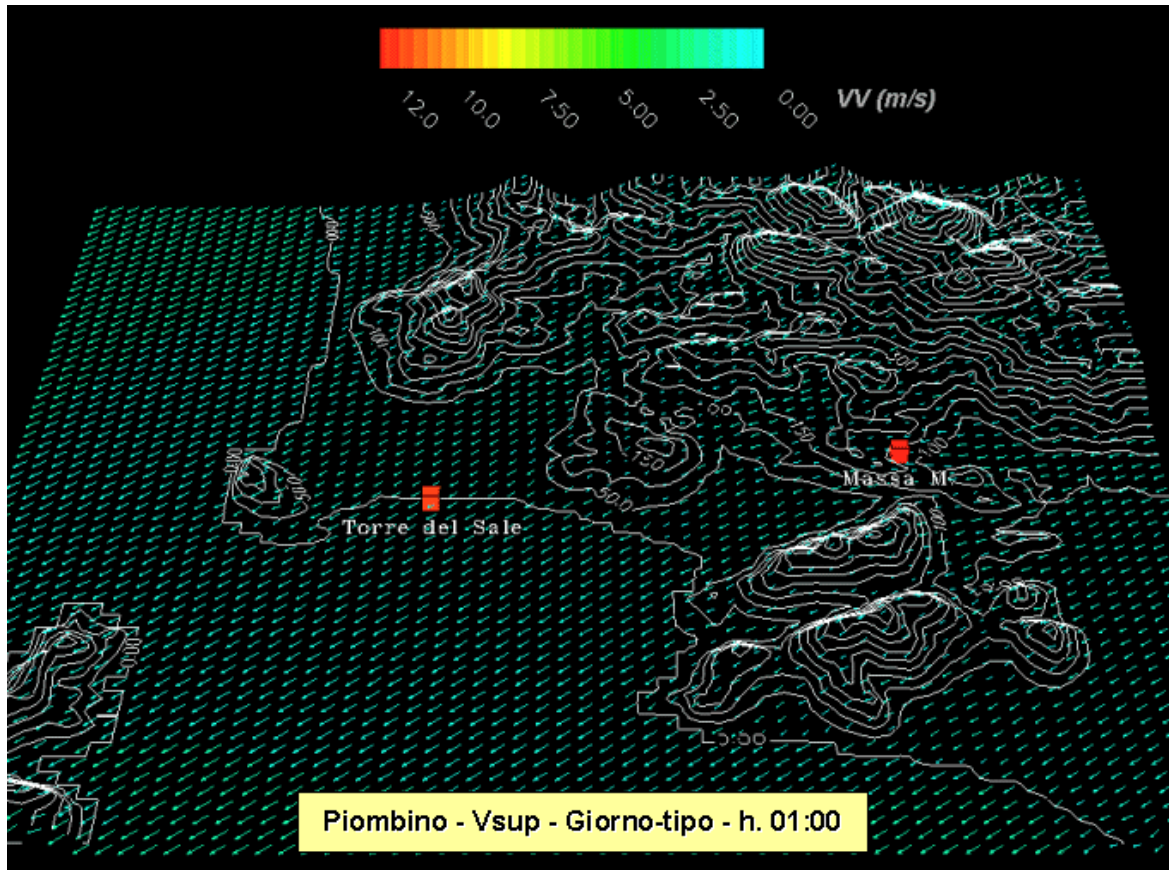


Fig. 99/a – Campo di vento durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 01-10).

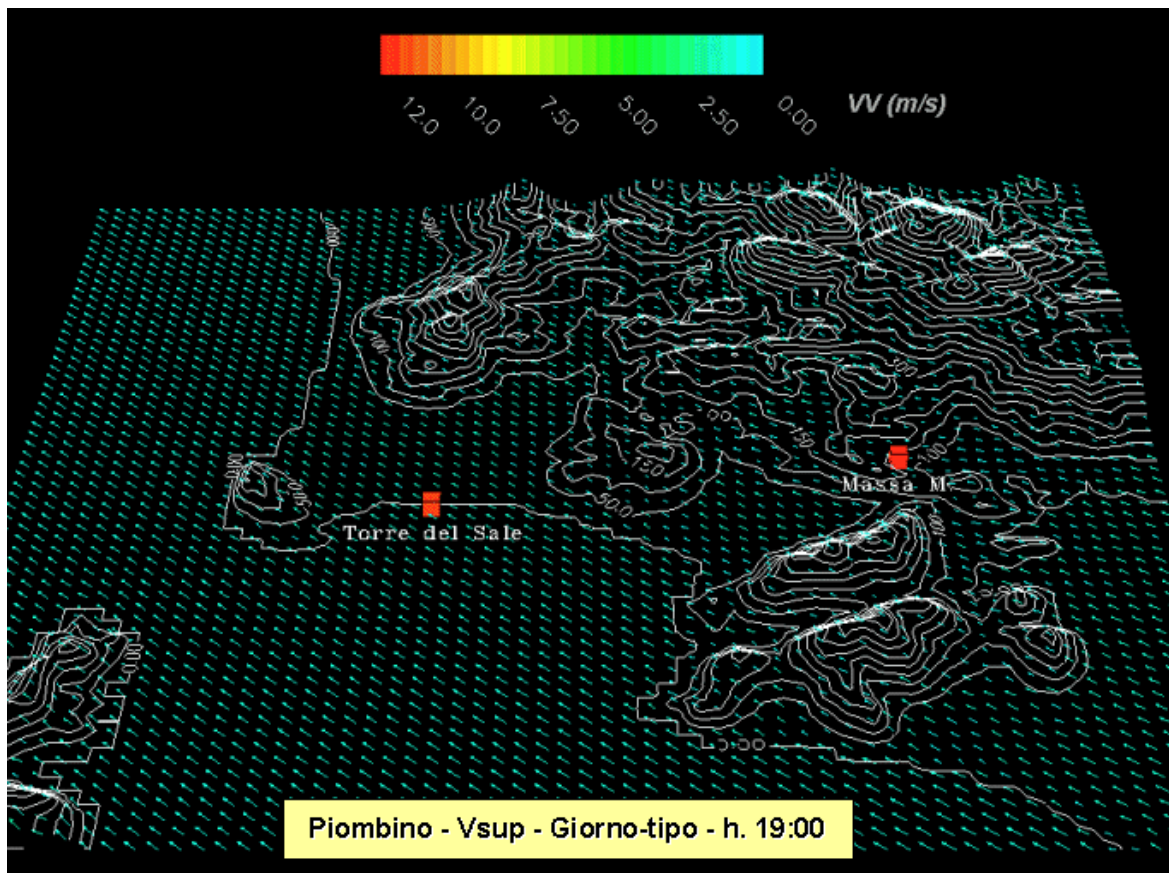
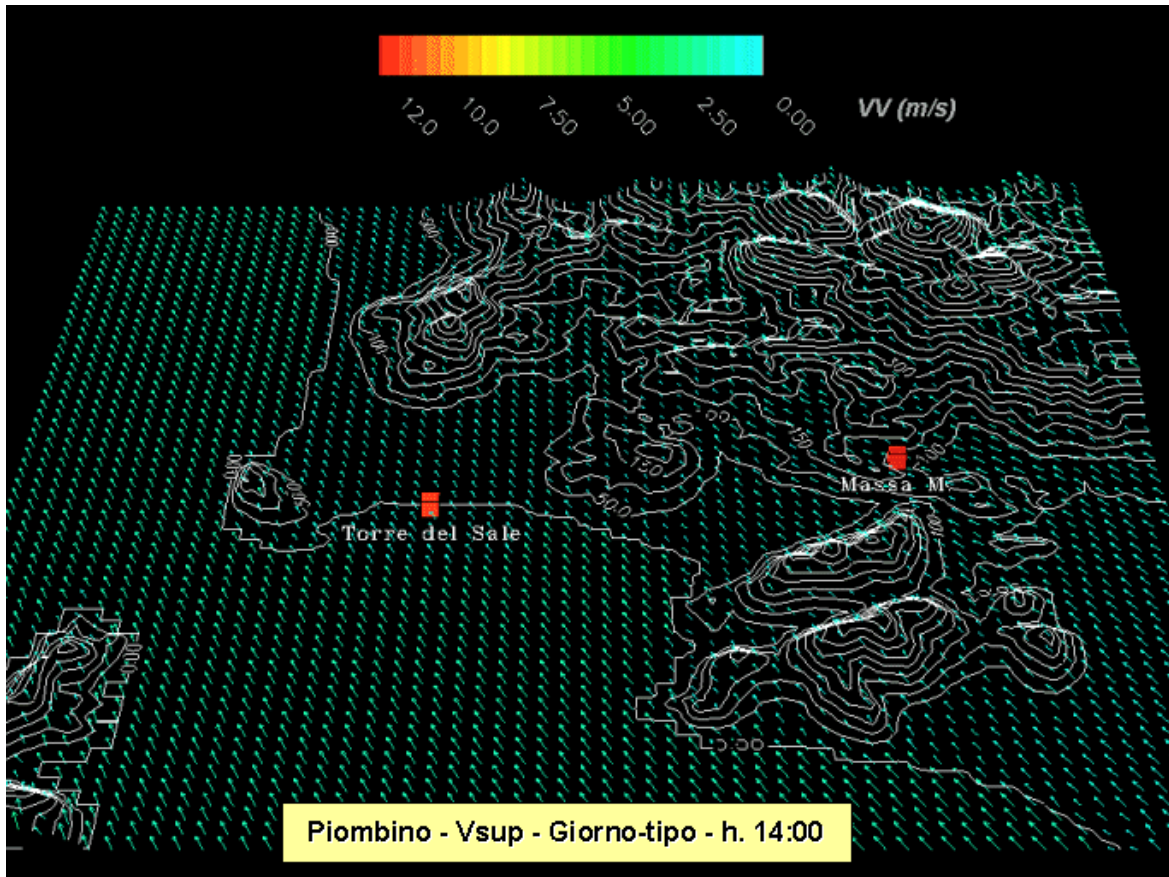


Fig. 99/b – Campo di vento durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 14-19).

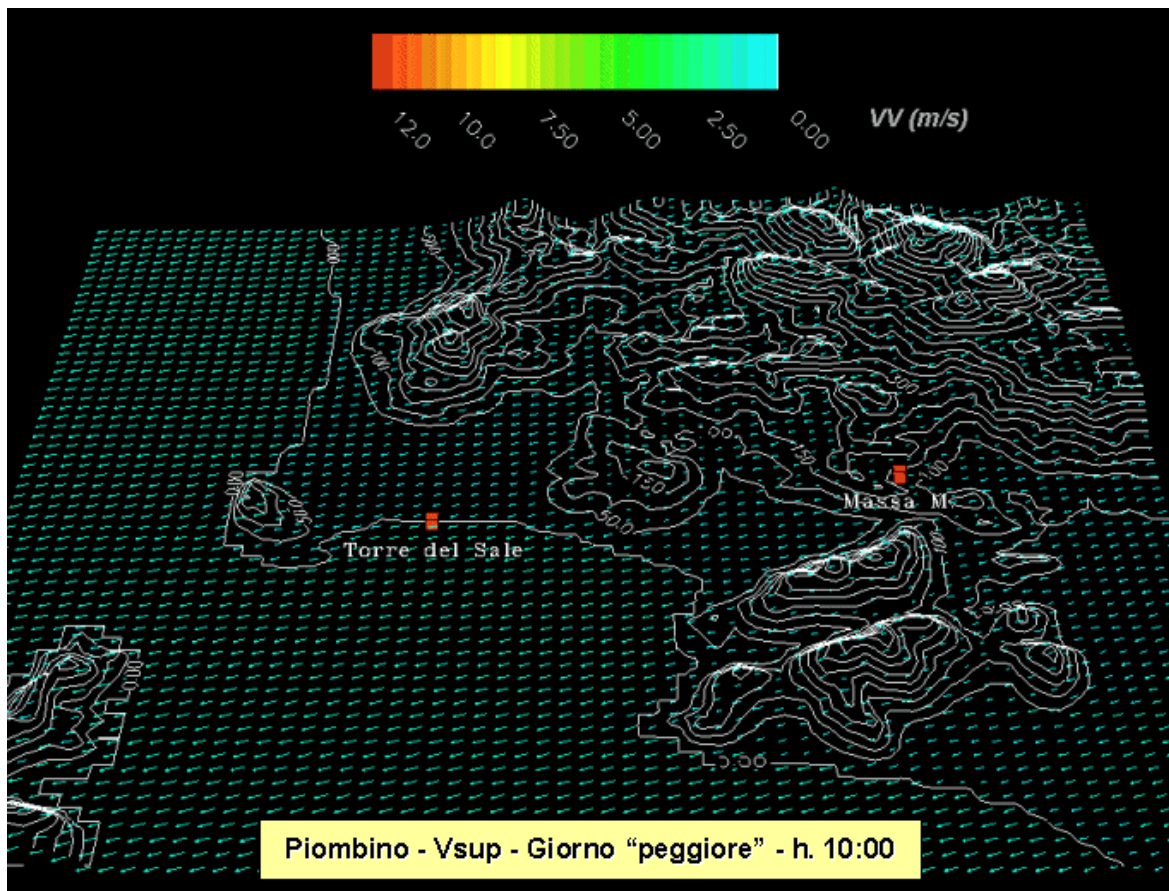
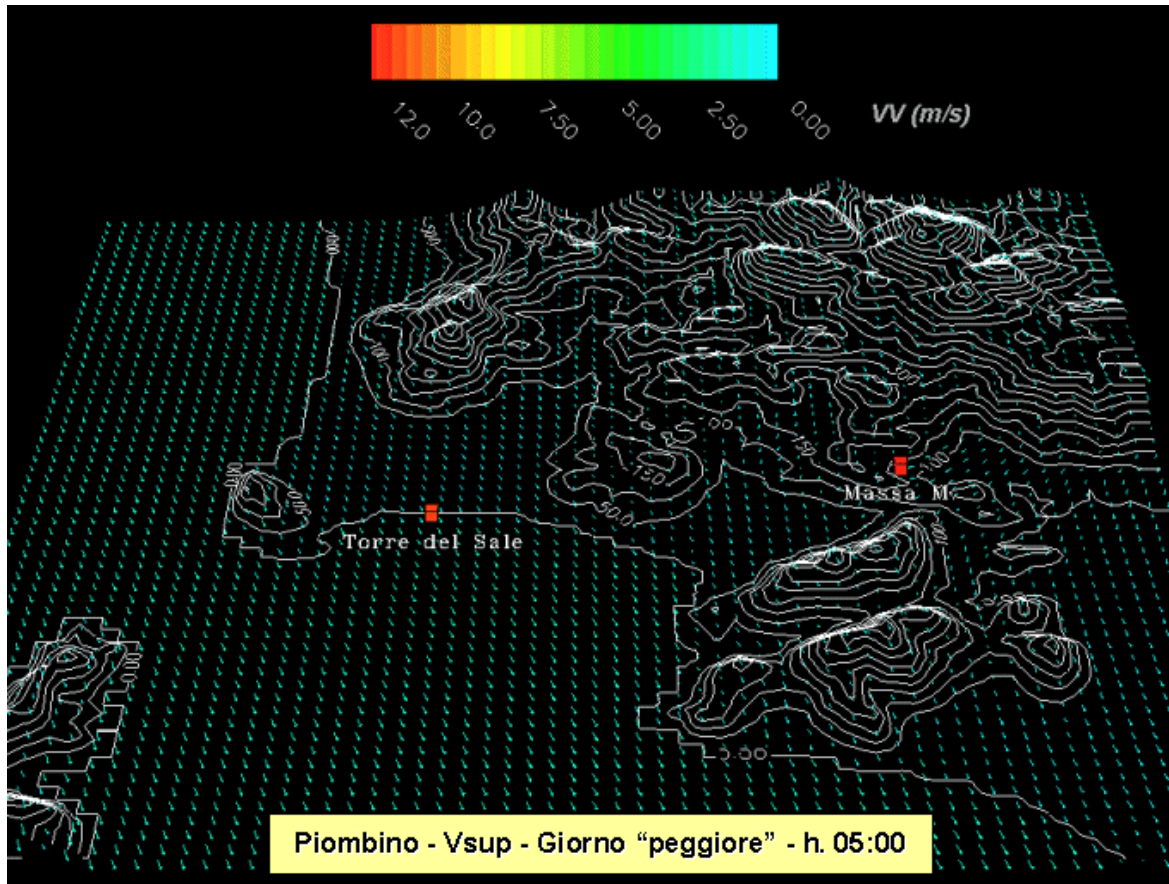


Fig. 100/a – Campo di vento durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 05-10).

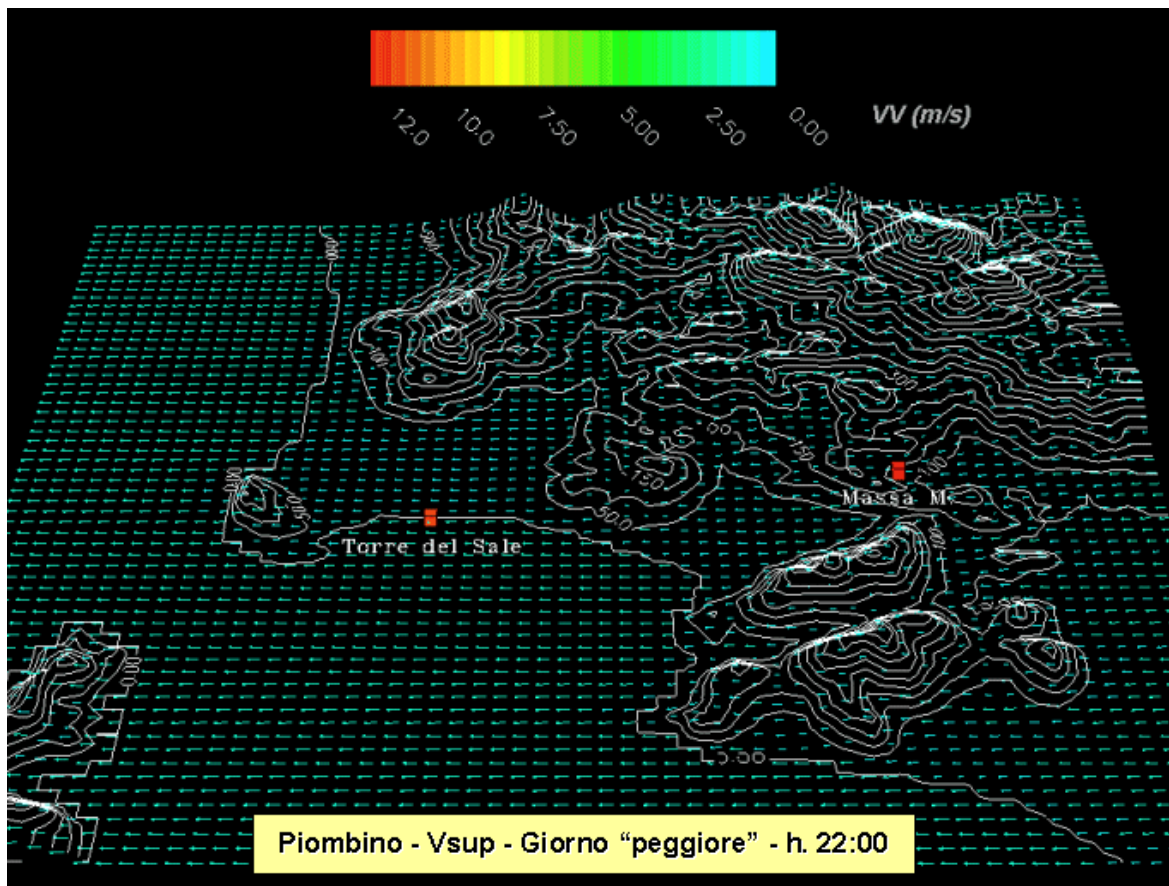
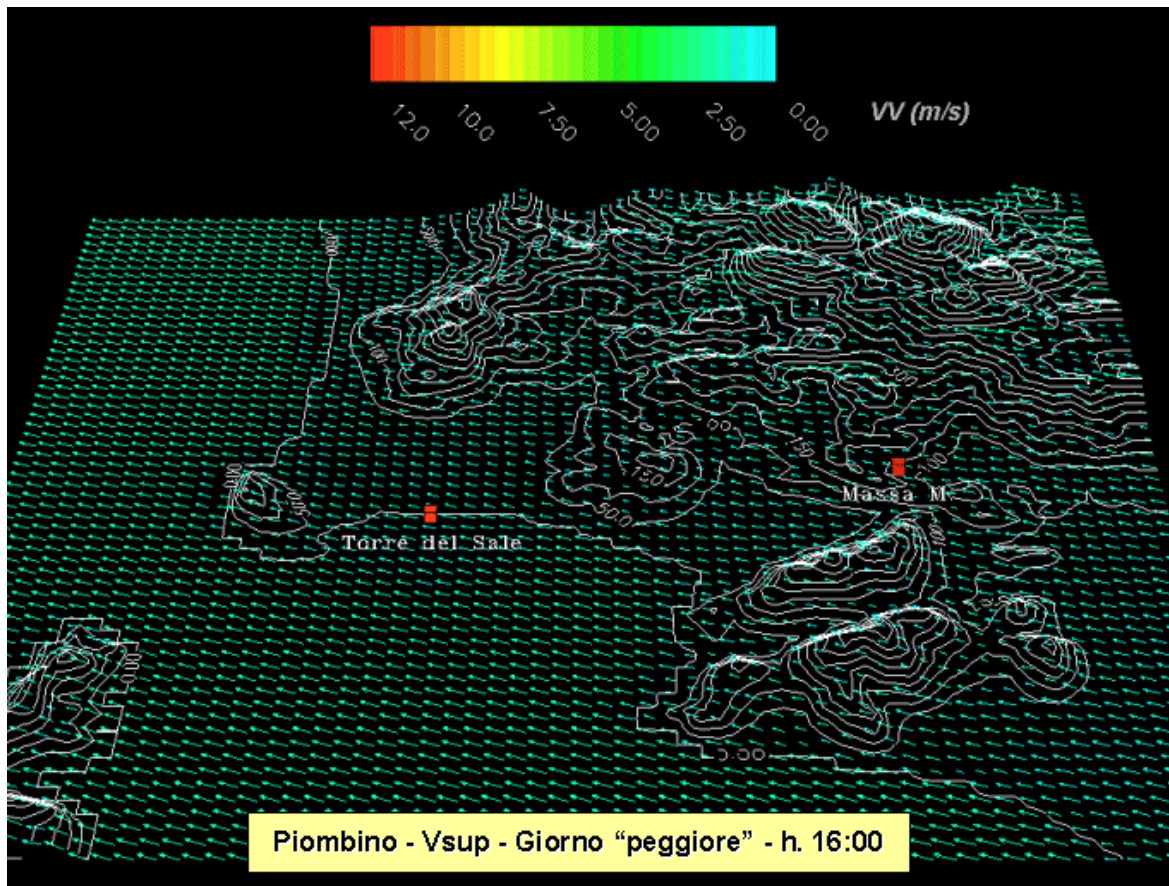


Fig. 100/b – Campo di vento durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 16-22).

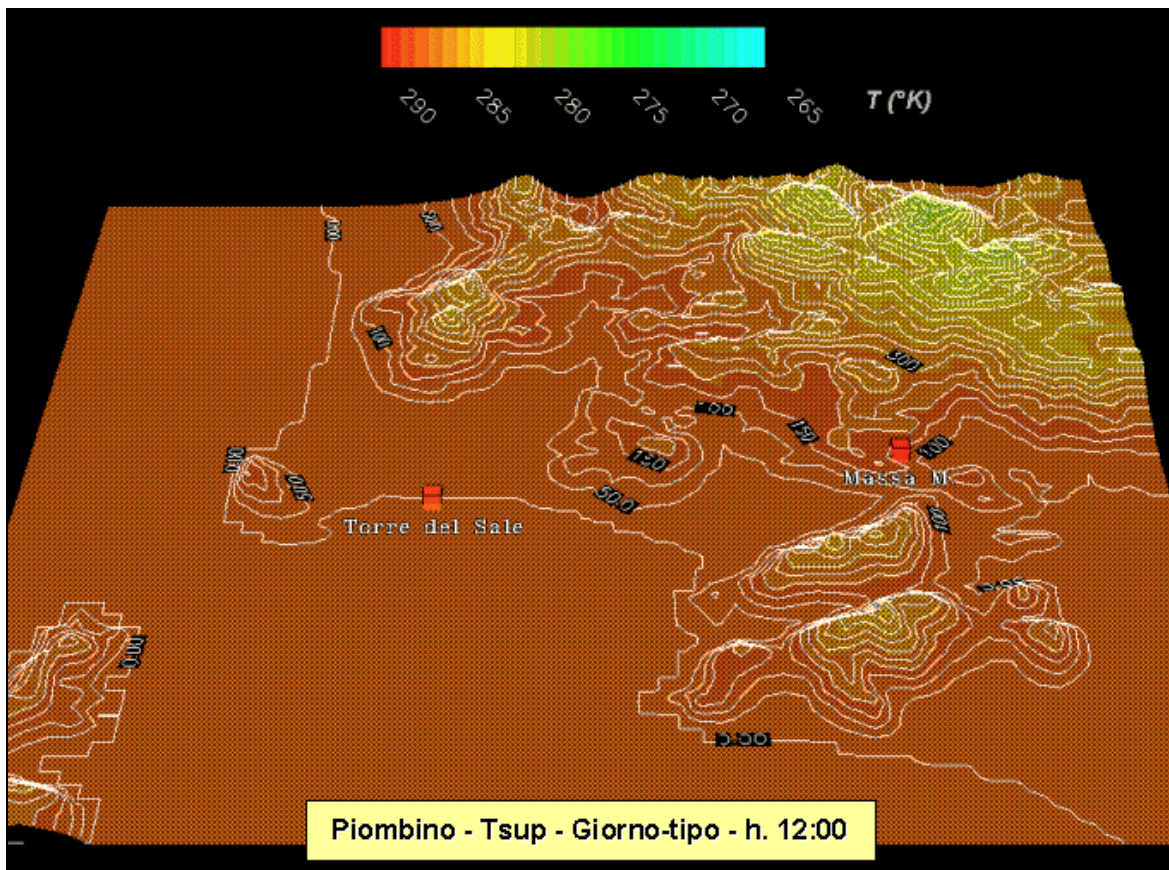
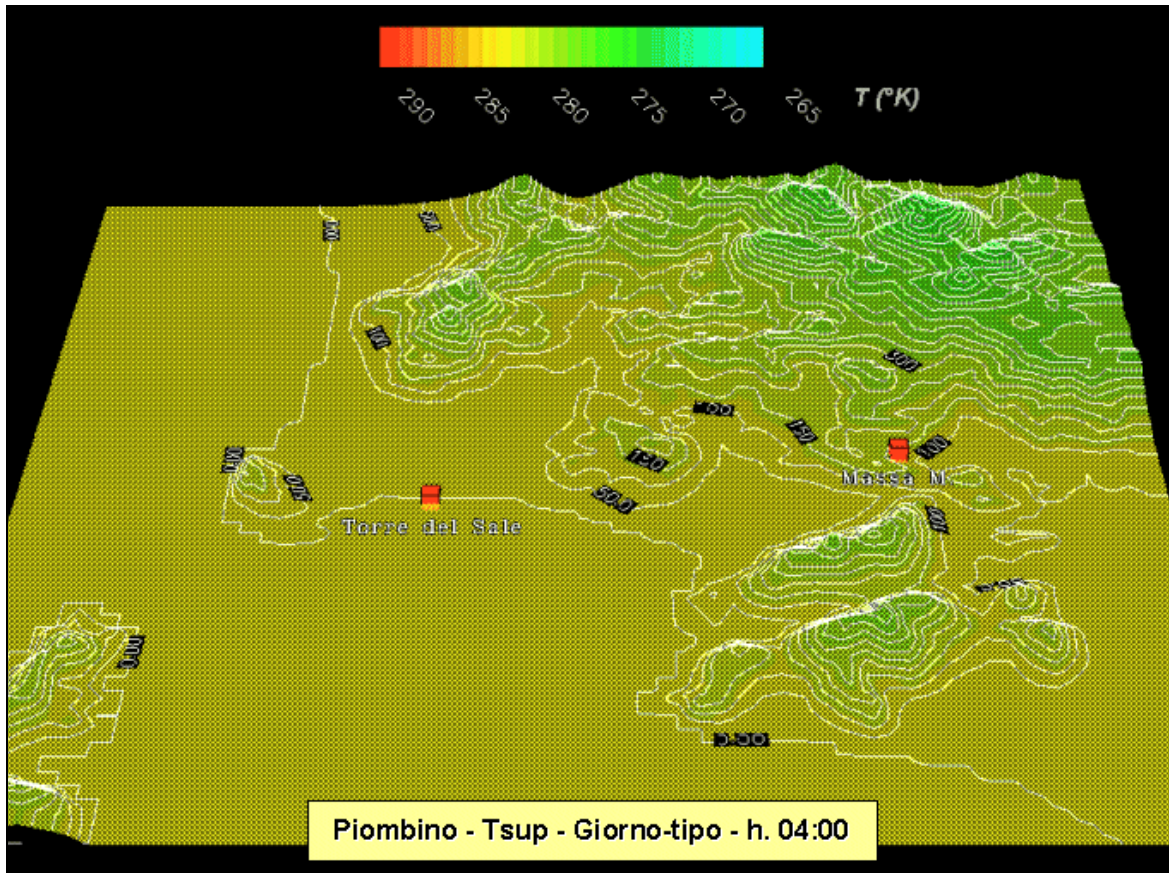


Fig. 101/a – Campo di temperatura durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 04-12).

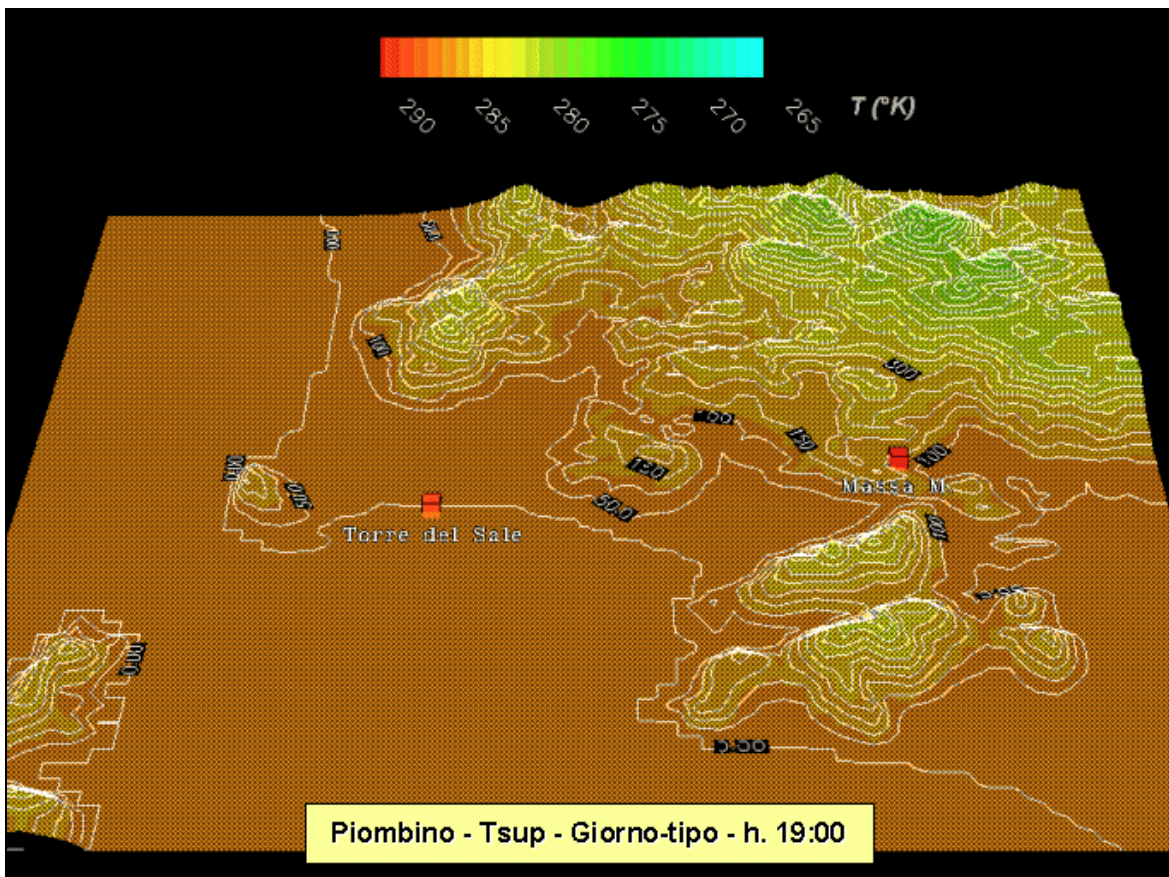
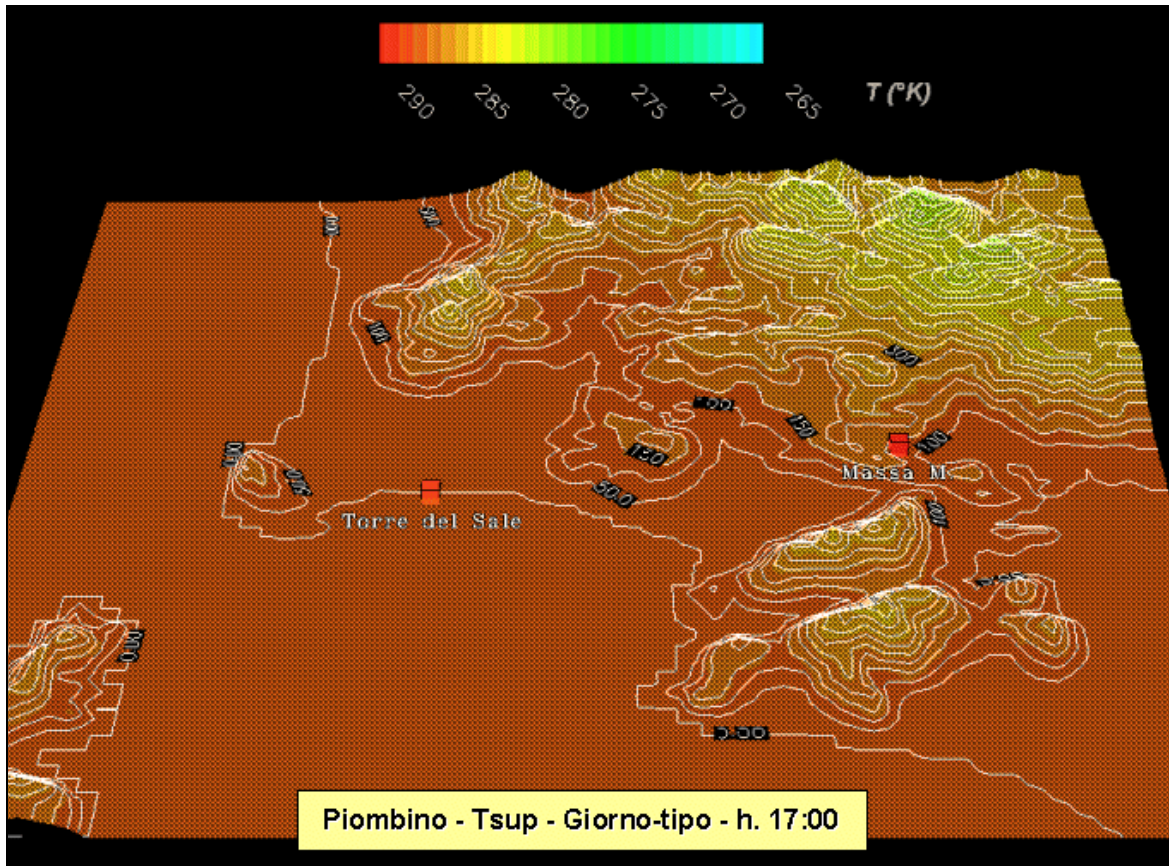


Fig. 101/b – Campo di temperatura durante il giorno tipico ricostruito da MINERVE nell'area di Piombino (hh. 17-19).

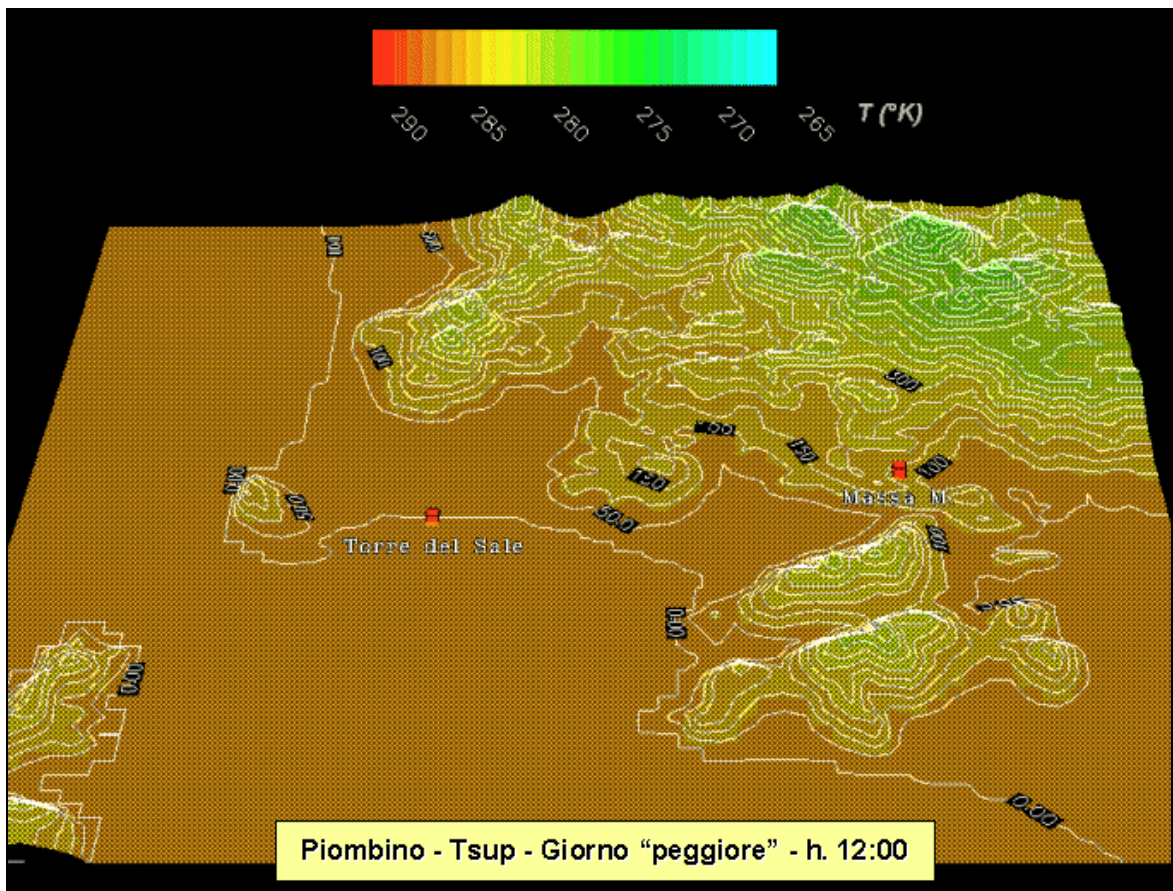
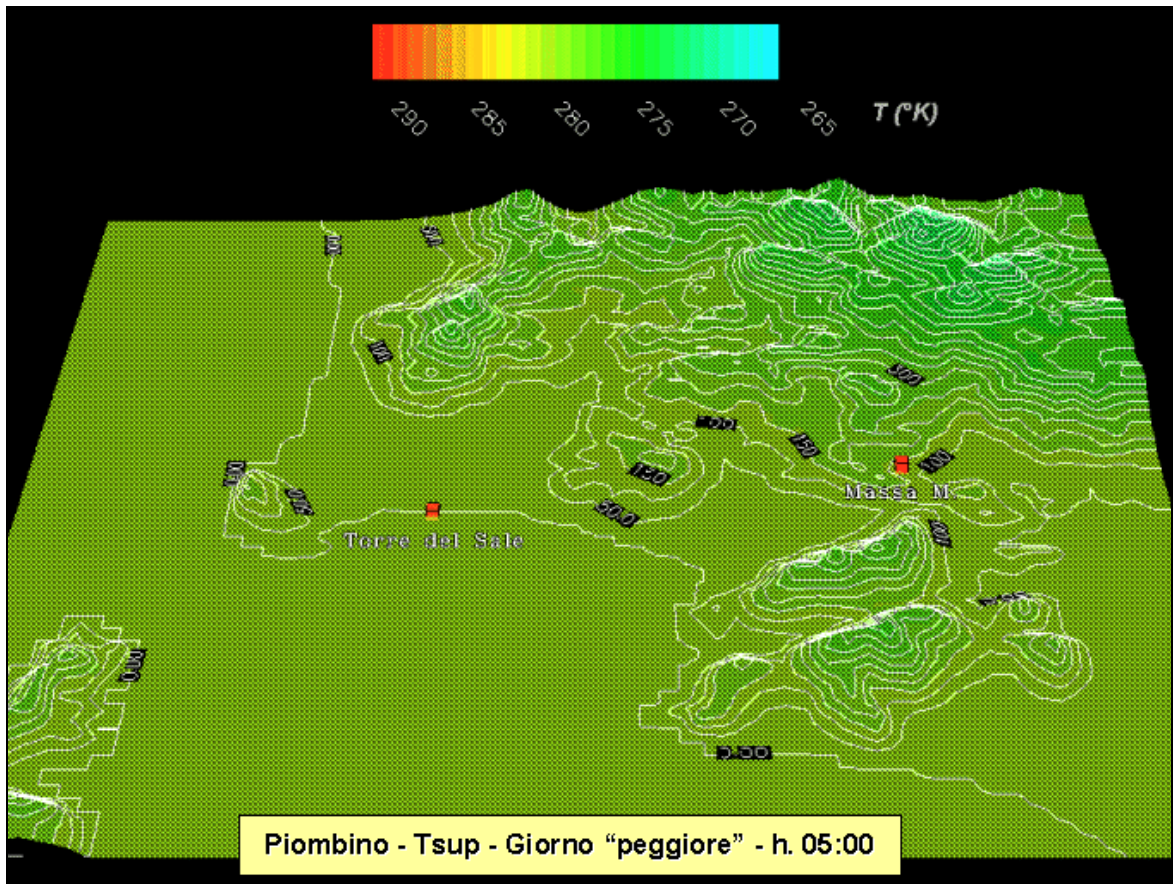


Fig. 102/a – Campo di temperatura durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 05-12).

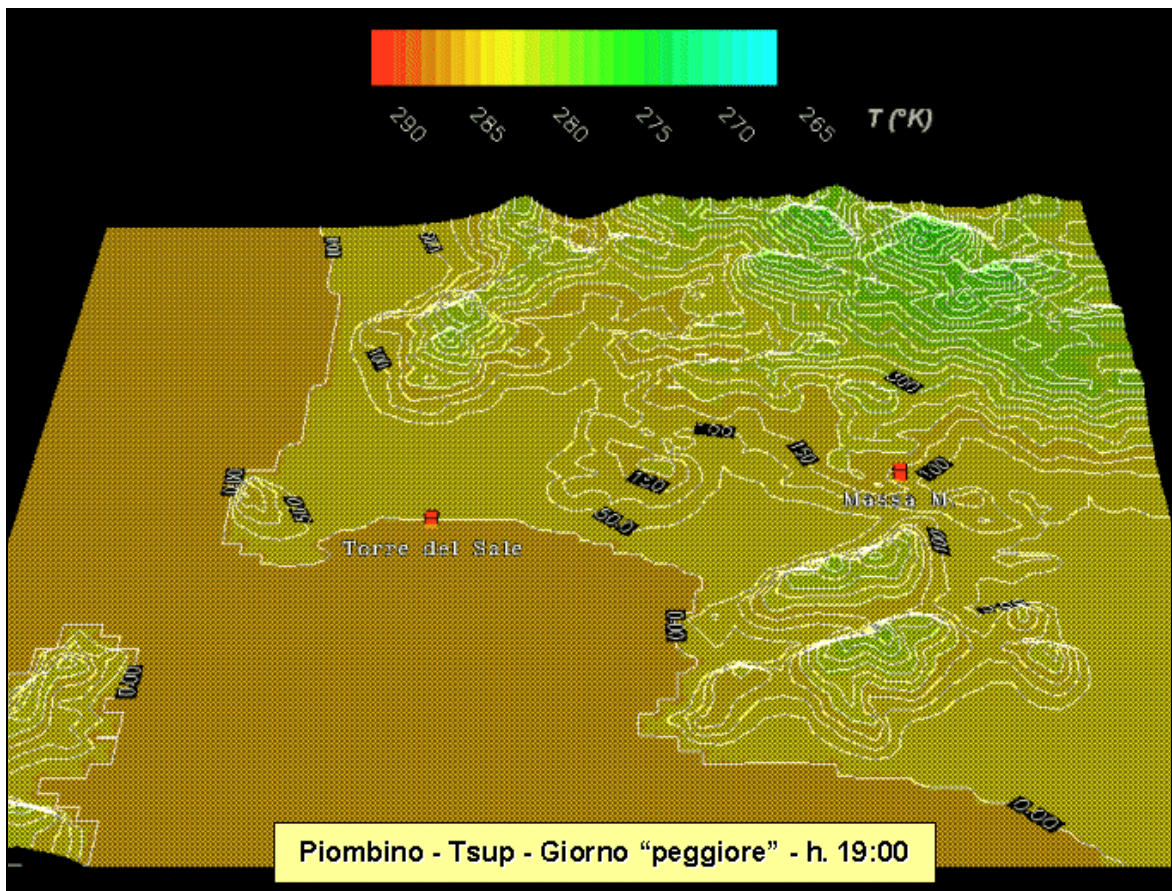
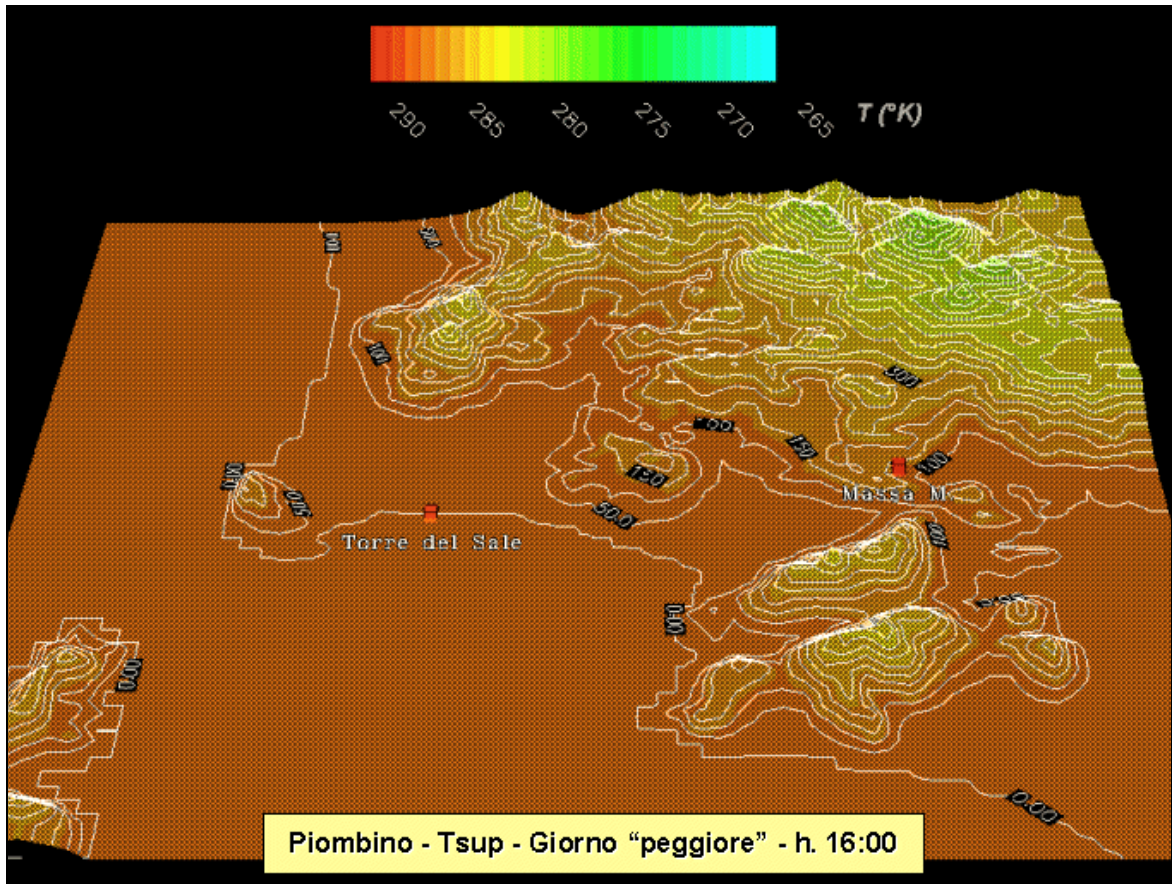


Fig. 102/b – Campo di temperatura durante il giorno “peggiore” ricostruito da MINERVE nell’area di Piombino (hh. 16-19).

L'insieme delle condizioni atmosferiche che, sempre per l'area di Livorno, definiscono il giorno "peggiore", mostrano l'andamento anemologico illustrato nelle Figg. 96/a e 96/b. Pur considerando il fatto che – per definizione – tale andamento sia stato scelto proprio come quello coi venti ora per ora più bassi, durante le prime ore del giorno (h. 07:00) nella zona di Livorno tali venti appaiono decisamente più sviluppati che non in altri punti del territorio, ferma restando la loro maggiore intensità al di sopra del mare rispetto alle zone terrestri.

Durante questa prima fase della giornata, i venti spirano in direzione del mare, ma con orientamento differente rispetto a quello del medesimo periodo del giorno tipico (Fig. 95/a), spirando cioè verso Sudovest piuttosto che decisamente verso Ovest.

Durante le successive ore della mattinata, il regime dei venti pare decisamente attenuarsi un po' dovunque (h. 14:00). Ciò spiega perché in questa fase le direzioni risultino sostanzialmente variabili, con prevalere di provenienze da Nordovest nella vallata a nord di Livorno e al largo della costa, mentre locali fenomeni di incanalamento nella valle del torrente Savalano (alle spalle di Rosignano) generano correnti di provenienza decisamente Nord in tutta la spianata antistante la stazione meteo di Cecina.

Il moto delle correnti di vento subisce in questa fase centrale della giornata l'inversione di direzione più volte messa in risalto. Essa appare ben pronunciata nell'immagine delle h. 17:00, dove il moto di rotazione cominciato nelle ore precedenti (h. 14:00) pare concludersi stabilizzandosi nella direzione mare-terra, cioè con provenienza Ovest. In questa fase della giornata, oltretutto, i venti paiono riacquistare intensità, non solo al di sopra del mare, ma anche in alcune zone interne, come in particolare la zona di Cecina; correnti meno intense si riscontrano invece nella zona di Livorno.

L'immagine raffigurata alle h. 20:00 mostra invece lo scenario anemologico radicalmente mutato alla luce dell'instaurarsi dell'inversione del moto da terra verso il mare tipicamente ricorrente al calar del sole. I venti spirano verso Ovest-Nordovest, mostrando al contempo una generalizzata attenuazione d'intensità un po' in tutta la fascia costiera.

Le illustrazioni mostrate nelle Figg. 97/a e 97/b descrivono il campo di temperatura alla quota di 10 m dal suolo modellizzato da MINERVE a fronte dello scenario meteo tipicamente ricorrente nell'area di studio di Livorno. Le isoterme sono rappresentate per ranghi di colori ed espresse in (°K). L'orografia del terreno è al solito rappresentata attraverso curve di livello equidistanti 50 m in altezza, curve di livello che spesso si sovrappongono alle stesse isoterme.

Isoterme praticamente coincidenti con le curve di livello del terreno si presentano in maniera abbastanza evidente alle h. 07:00 (Fig. 97/a), allorché il ridursi della temperatura ricorre sistematicamente all'aumentare dell'altimetria, e quindi in presenza dei rilievi. Tale condizione appare fortemente influenzata dall'assenza – durante le ore notturne – dell'azione di irraggiamento terrestre esercitata dal sole. Col riscaldamento terrestre che si attua nelle successive ore della giornata, infatti, lo scenario termico muta radicalmente. È quanto si presenta alle h. 12:00 (Fig. 97/a), allorché all'aumentare dei valori assoluti nelle zone di mare e di pianura si affianca un generalizzato riscaldamento di ampie fasce pedemontane. L'innalzamento delle temperature superficiali raggiunge il suo apice alle h. 15:00 (Fig. 97/b), quando il riscaldamento terrestre investe per intero anche i rilievi alle spalle di Livorno, lasciando a temperature più basse le sole cime dei Monti Pisani e quelle dei rilievi alle spalle di Cecina.

Diverso è lo scenario termico che si presenta nel tardo pomeriggio (h. 19:00). Vaste fasce collinari, a quote anche fino ai 200 m dal mare, si presentano più calde di quelle poste alla quota del mare, probabilmente perché la loro conformazione li porta a disperdere calore meno velocemente rispetto ad esse.

Le Figg. 98/a e 98/b descrivono il campo termico superficiale nella medesima area di studio di Livorno durante il giorno "peggiore".

Durante le prime ore del mattino (h. 08:00), nell'area considerata si registrano temperature molto basse un po' dappertutto. Le differenze tra gli andamenti alle alte quote e quelli in pianura o

al di sopra del mare appaiono infatti piuttosto modeste. Il confronto tra il suddetto scenario termico e quello all'incirca alla stessa ora del giorno tipico (h. 07:00 di Fig.97/a) evidenzia temperature inferiori soprattutto a livello di mare e pianura.

Tra lo scenario tipico e quello "peggiore", ben maggiori appaiono le affinità nel corso delle successive ore della giornata. Nell'immagine delle h. 13:00, in particolare, i valori di temperatura si presentano piuttosto elevati sia in termini assoluti, che per quanto riguarda la loro distribuzione sul territorio, interessando anche ampie fasce collinari.

Il permanere di condizioni termiche sostanzialmente miti mostra nel corso del giorno "peggiore" una durata inferiore rispetto a quella del giorno tipico. L'immagine delle h. 17:00 (Fig. 98/b) indica come già nel tardo pomeriggio il raffreddamento terrestre abbia portato a termine il suo corso: all'abbassamento delle temperature in pianura e sul mare si associa quello dei rilievi montuosi, con le cime di questi ultimi apprezzabilmente più fredde di tutto quanto il resto.

Lo scenario termico fotografato alle h. 22:00 del giorno "peggiore" (Fig. 98/b) mostra palesi affinità sostanziali con quello del primo mattino già illustrato nel medesimo giorno (h. 08:00). Le temperature a 10 m dal suolo si presentano infatti generalmente basse un po' dappertutto, seguendo abbastanza fedelmente l'altimetria del terreno, e quindi riducendosi all'aumentare della quota sul livello del mare. Il fatto che il regime termico risulti praticamente lo stesso tra le ultime ore del giorno e le prime del mattino indica come, nel corso del giorno "peggiore", tale situazione possa essere considerata stabile per l'intera durata della sera e della notte.

La descrizione delle simulazioni operate da MINERVE nell'area di studio di Piombino è illustrata nelle Figg. 99, 100, 101 e 102, dove – al solito – sono presentati i campi di vento e temperatura a 10 m dal suolo nel corso del giorno tipico e di quello "peggiore".

Il regime anemologico più frequente durante l'inverno nell'area di Piombino si presenta sostanzialmente poco sviluppato per l'intera durata della giornata (Figg. 99/a e 99/b). Ciò è vero sia in termini assoluti, che in relazione al sito di Livorno precedentemente analizzato. Se infatti si pone a confronto l'andamento anemologico con quello del medesimo giorno nell'area di Livorno (Figg. 95/a e 95/b), appare evidente come nel caso di Piombino l'intensità dei venti risulti decisamente inferiore, non solo lungo la fascia costiera e l'entroterra montuoso, ma anche in mare. Di particolare rilievo è il fatto che per l'intero corso della giornata tipico, forti calme di vento governino l'andamento anemologico lungo l'intera fascia costiera che si affaccia sul Golfo di Follonica, e in particolare l'ampia spianata retrostante la zona industriale di Piombino.

I venti spirano verso Sudovest durante la notte e la mattina (hh. 01:00 e 10:00), mentre nel corso del pomeriggio sono orientati stabilmente verso Nordovest (hh. 14:00-19:00). Come già evidenziato, quindi, anche nel caso del dominio di Piombino l'azione di irraggiamento solare combinata con l'interazione terra-mare determina il ciclico fenomeno dell'inversione di direzione delle correnti d'aria, una volta dirette da terra verso il mare, e l'altra dal mare verso terra.

Il fenomeno può essere spiegato alla luce della particolare conformazione morfologica dell'area considerata. Durante la notte e la mattinata (hh. 01:00 e 10:00 di Fig. 99/a), la baia che si sviluppa a Sud di Piombino (Golfo di Follonica) risulta infatti ben schermata dai venti provenienti da Nordest dai rilievi montuosi che si estendono nell'entroterra, e più precisamente dalle ultime propaggini delle Colline Metallifere. All'instaurarsi dell'inversione di direzione delle correnti verso terra (hh. 14:00 e 19:00 di Fig. 99/b), allorquando cioè i venti spirano da Sudest, le due spianate che si affacciano sul Golfo di Follonica sono schermate dai rilievi che separano Follonica con Grosseto e che culminano con Punta Ala.

Il regime anemologico che governa il giorno "peggiore" nell'area di studio di Piombino mostra delle sostanziali differenze rispetto a quello del giorno tipico. Nelle ore di passaggio tra notte e giorno (h. 05:00 di Fig. 100/a) le correnti hanno provenienza Nord-Nordovest; la loro intensità si presenta estremamente modesta in tutto il dominio di studio. Al contrario, nella fase

centrale della mattinata (h. 10:00) emergono delle forti analogie con quanto accade nel giorno tipico, sia per le direzioni prevalenti di provenienza dei venti che per la loro intensità.

Le analogie si presentano anche nella fascia pomeridiana (h. 16:00 di Fig. 100/b), nel senso che in tale fase della giornata anche nel corso del giorno “peggiore” le correnti si dirigono dal mare verso la costa (Ovest-Nordovest). A differenza del giorno tipico, tuttavia, in tal caso si evidenziano venti di maggiore intensità, sia nella striscia di terra del Golfo di Follonica, che soprattutto in mare aperto.

Il fenomeno mostra però breve durata. Al calar del sole (h. 22:00) l’attenuazione dei venti appare evidente, mentre per contro le masse d’aria si presentano dirette verso il mare, e più precisamente con stabile direzione Ovest.

Nelle Figg. 101 e 102 è descritto il campo di temperatura superficiale modellizzato da MINERVE nell’area di studio di Piombino per i due differenti scenari meteo.

Le condizioni termiche ricorrenti nel corso del giorno tipico ripropongono anche per l’area di Piombino gli andamenti caratteristici del sito di Livorno (Figg. 101/a e 101/b). Le isoterme seguono abbastanza fedelmente le curve di livello del terreno in assenza di irraggiamento solare (hh. 04:00 e 19:00), mentre quando al contrario tale azione si manifesta, il riscaldamento superficiale investe anche le zone poste a quote altimetriche superiori a quelle a livello del mare (hh. 12:00 e 17:00).

Nelle ore centrali della giornata (h. 12:00) la distribuzione della temperatura superficiale evidenzia che le zone dell’entroterra, pur collinari, si presentano più calde di quelle poste a livello del mare; analoga situazione si registra in punti particolari, come ad esempio la cima della propaggine che declina verso il mare all’altezza di Punta Ala (Poggio Peroni).

In conclusione, la fascia costiera affacciata sul Golfo di Follonica si presenta termicamente mite durante il tipico giorno invernale.

Rispetto al giorno tipico, globalmente più freddo si presenta invece il giorno “peggiore” in tutto il dominio spaziale di Piombino (Figg. 102/a e 102/b).

Alle h. 12:00 il riscaldamento terrestre non appare aver ancora completato la sua azione, come invece risulta alle h. 16:00.

Molto peculiare è lo scenario termico che si presenta nel tardo pomeriggio (h. 19:00). Il surriscaldamento delle acque del mare fa sì che le sovrastanti masse d’aria si presentino più calde di quelle lungo la costa, mentre al tempo stesso permangono alcune risacche dell’entroterra a temperature più elevate, dove verosimilmente la dispersione del calore accumulato durante il giorno è più lenta.

6. Modellistica diffusionale

6.1 Schema funzionale

L'applicazione della modellistica mirata a ricostruire il trasporto e la diffusione in atmosfera degli inquinanti rilasciati all'interno delle due aree di studio si innesta direttamente su quella meteorologica sviluppata nel precedente capitolo. Lo schema operativo della modellistica diffusionale, mostrato in Fig. 103, rappresenta infatti la prosecuzione dello schema illustrato in Fig. 84. Una volta ricostruiti i campi meteo tridimensionali come risultato conclusivo della modellistica meteorologica, occorre fornire in *input* tutte le informazioni riguardanti le sorgenti di emissione dei gas inquinanti in atmosfera. A questo punto è previsto l'impiego di due differenti modelli di dispersione, e cioè del modello lagrangiano a particelle SPRAY e di quello euleriano a griglia HERMES.

È il caso di sottolineare che, diversamente da HERMES, nel caso particolare di SPRAY occorre introdurre in ingresso anche i dati ottenuti dalla matrice di uso del suolo, e cioè la caratterizzazione del territorio in base a rugosità, albedo e rapporto di Bowen (Fig. 103). Per le due aree di studio tali mappe sono state ottenute utilizzando le Tab. 23 e 24. Di tali mappe, quella di rugosità è già stata presentata nel precedente capitolo (Fig. 85 e 86), in quanto dato utilizzato in ingresso da MINERVE; le mappe di albedo e rapporto di Bowen per l'area di Livorno e per quella di Piombino sono invece illustrate di seguito, e precisamente nelle Figg. 104 e 105 per Livorno, e 106 e 107 per Piombino.

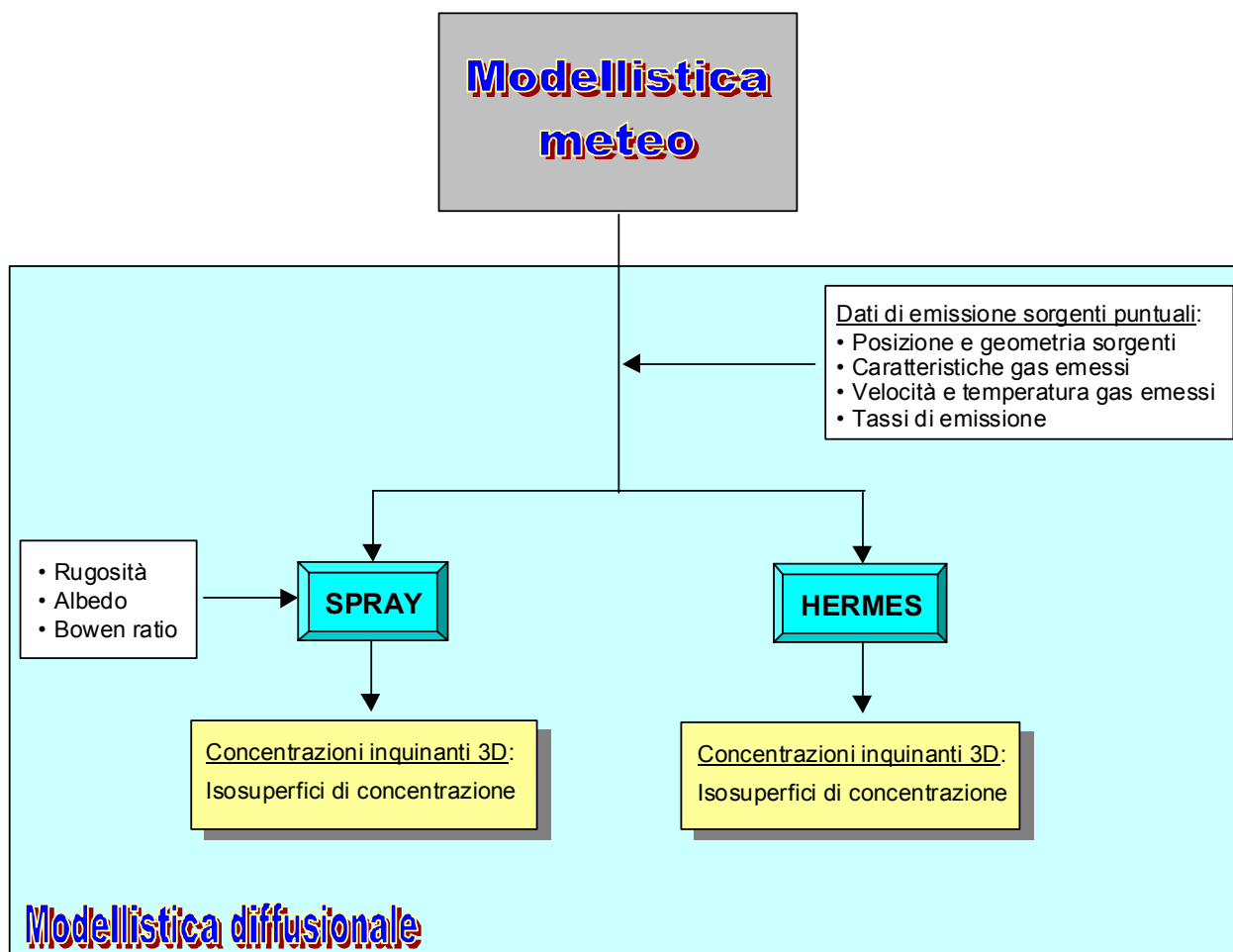


Fig. 103 – Schema operativo della modellistica diffusionale adoperata nello svolgimento dell'attività 2.

Altra differenza riscontrabile tra i due modelli in questione è il diverso approccio seguito nel risolvere la mancanza come dato di *input* dei campi di turbolenza, dato che MINERVE non è in grado di stimare tale parametro (§ 5.1). Su questo punto si tornerà nei paragrafi successivi.

Il risultato ultimo prodotto dai modelli SPRAY ed HERMES consiste nell'elaborazione di isosuperfici tridimensionali di concentrazione degli inquinanti in atmosfera.

Al riguardo occorre osservare che, data l'approssimazione da cui risultano inevitabilmente affetti tutti i dati forniti in ingresso ai modelli (andamenti meteorologici, emissioni, classificazione del territorio, etc.), i risultati ottenuti dovranno essere intesi soprattutto allo scopo di fornire valutazioni qualitative e di massima. Una mappatura rigorosa del territorio in termini di qualità dell'aria non può infatti essere ottenuta se non considerando la totalità di tutte le possibili fonti d'inquinamento, oltre che i contributi di concentrazione al contorno. Disponendo di un numero considerevole – ma soprattutto rappresentativo – di stazioni di misura delle concentrazioni inquinanti, sarebbe inoltre possibile la calibrazione accurata dei suddetti modelli di dispersione, il che consentirebbe di utilizzarne i risultati anche in termini assoluti e non solo qualitativi.

6.2 Dati di emissione

L'applicazione dei modelli diffusionali SPRAY ed HERMES richiede la disponibilità di tutte le informazioni necessarie a caratterizzare le sorgenti di emissione degli inquinanti in atmosfera. Entrambi i modelli sono in grado di gestire una molteplice varietà di specie gassose inerti (CO , SO_x , PST, etc.), oltre che sorgenti di varia natura (areali, lineari, puntiformi).

I dati di emissione utilizzati nello studio in esame sono quelli relativi all'inventario messo a punto dalla *Regione Toscana*. Esso comprende tutte le sorgenti (areali, lineari, puntiformi) interne al territorio regionale, tiene conto di una notevolissima varietà di specie inquinanti, ed è aggiornato al 1995 – anche se è atteso a breve un aggiornamento all'anno 2000.

Data la complessità delle elaborazioni modellistiche, per il presente studio si è reso necessario operare una scelta tra le molteplici applicazioni possibili: in particolare l'attenzione è stata incentrata sullo studio delle emissioni di sorgenti industriali, indicate come grandi sorgenti puntiformi, in quanto nelle aree in esame operano alcuni grandi complessi industriali. Come specie gassosa si è fatto riferimento agli ossidi di zolfo (SO_x), in quanto, come è stato evidenziato nel cap. 3, particolare attenzione è rivolta alla misura di SO_2 (in tutte le stazioni di monitoraggio di qualità dell'aria è presente un analizzatore di tale inquinante): tuttavia dalle sole misure rilevate dalla rete di stazioni non è possibile ottenere informazioni riguardanti tutta l'area in esame, data la forte dipendenza spaziale dei valori rilevati.

Le informazioni di cui occorre disporre in merito alle sorgenti puntiformi prese in esame riguardano le coordinate geografiche di ogni singolo camino, l'altezza dal suolo, il suo diametro, la temperatura e la velocità di fuoriuscita dei gas, nonché il tasso di emissione e il cadenzamento temporale con cui avviene il rilascio. A queste vanno poi aggiunte le informazioni chimico-fisiche dell'inquinante considerato.

L'ubicazione delle sorgenti di emissione prese in esame nel presente studio è illustrata di seguito, in Fig. 108 per il sito di Livorno e in Fig. 109 per quello di Piombino.

Nell'area di studio di Livorno (Fig. 108) le grandi sorgenti puntiformi si concentrano essenzialmente nel complesso industriale del porto di Livorno e nell'area vicino a Pisa. Altra zona da tener presente è quella di Rosignano Solvay, soprattutto per la presenza di un impianto di grosse dimensioni, di forte impatto ambientale.

I più alti tassi di emissione sono quelli dovuti agli impianti termoelettrici di Livorno, alle raffinerie di Collesalveti, e agli stabilimenti di Rosignano Solvay. L'altezza media dei loro camini è generalmente intorno agli 80 m, anche se alcune ciminiere presentano un'altezza decisamente inferiore (~20m).

Le principali sorgenti di emissione ubicate nell'area di studio di Piombino (Fig. 109) sono quelle dei grossi impianti di produzione termoelettrica operanti nella zona industriale di Piombino.

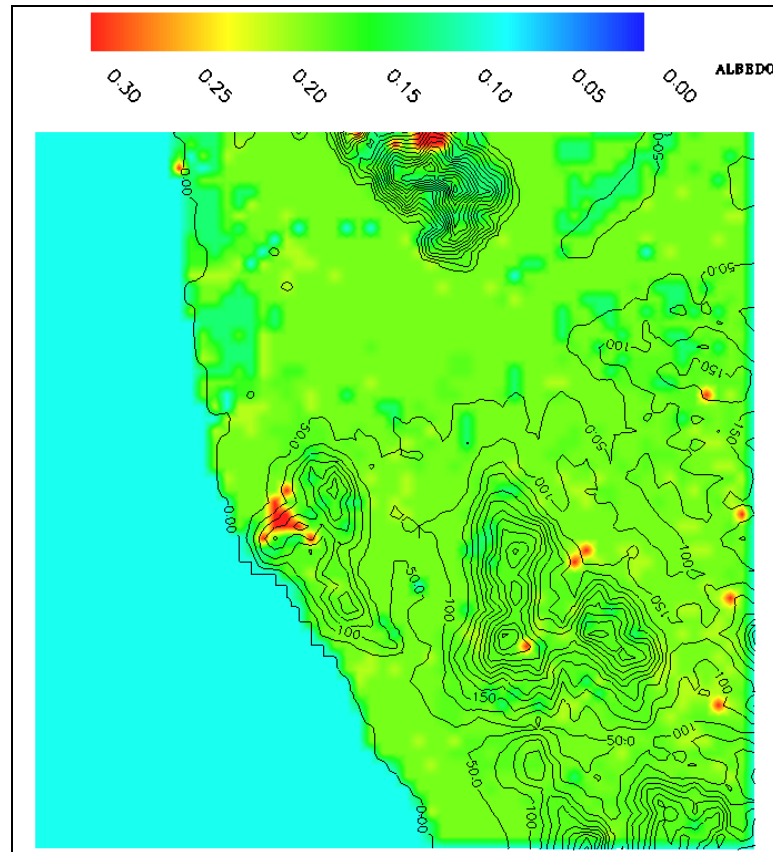


Fig. 104 – Mappa di albedo elaborata per l'area di studio di Livorno.

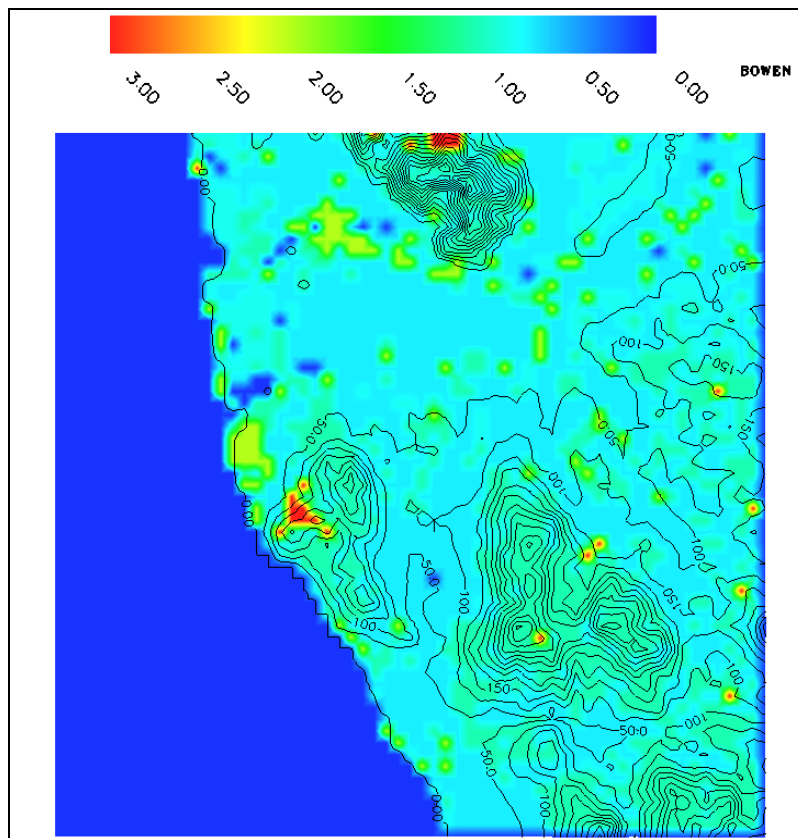


Fig. 105 – Mappa del rapporto di Bowen elaborata per l'area di studio di Livorno.

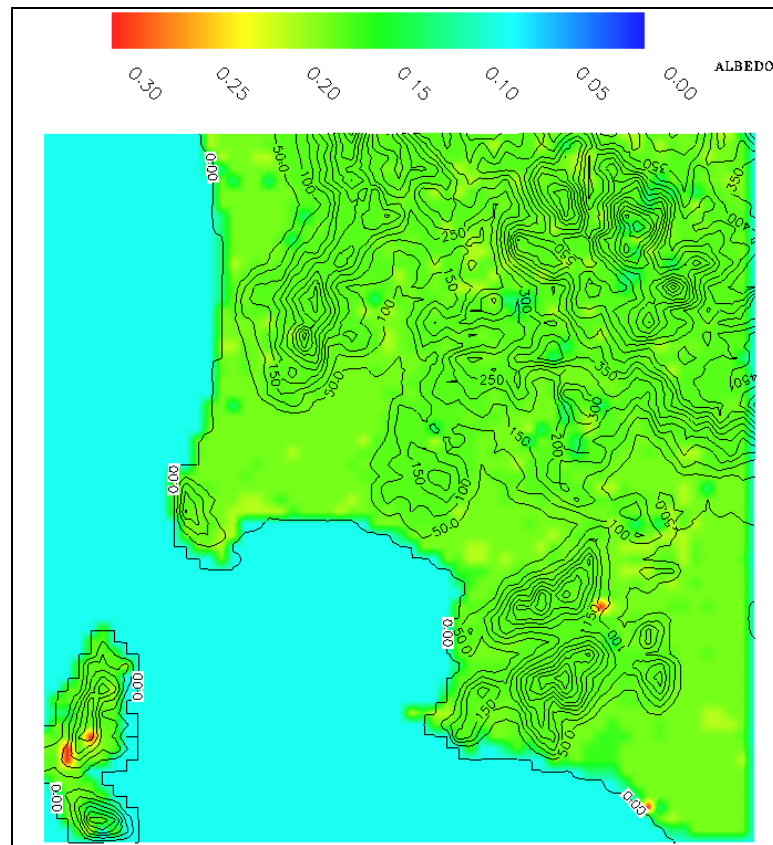


Fig. 106 – Mappa di albedo elaborata per l'area di studio di Piombino.

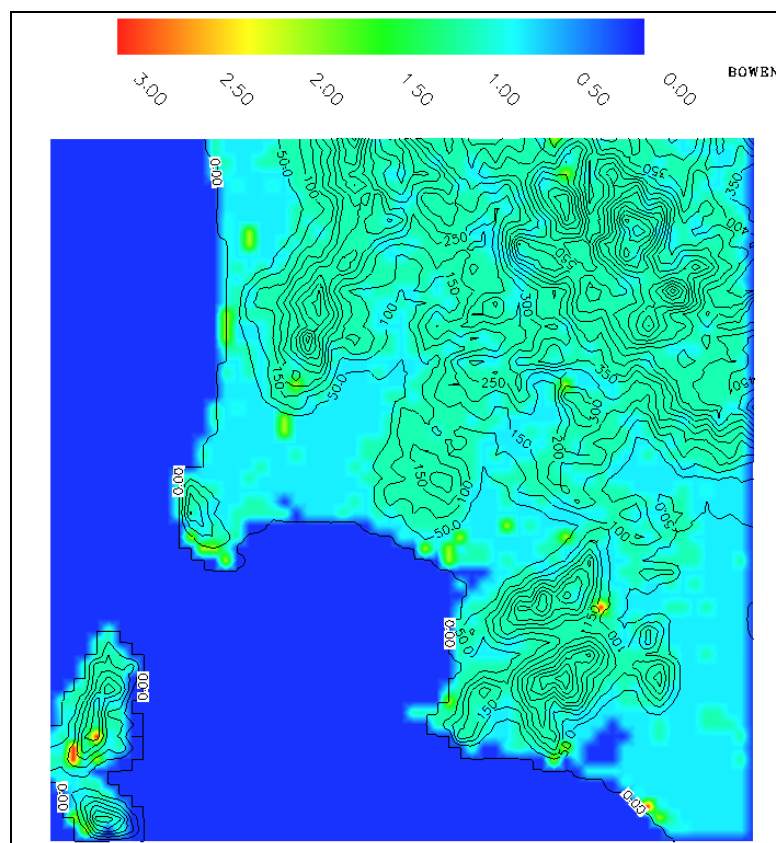


Fig. 107 – Mappa del rapporto di Bowen elaborata per l'area di studio di Piombino.

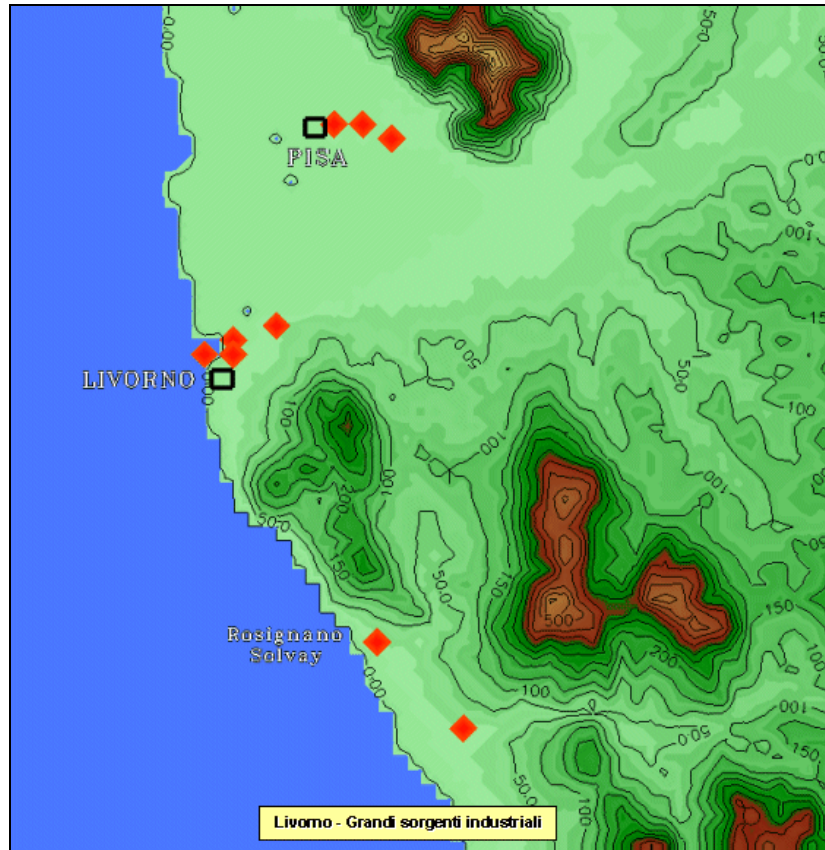


Fig. 108 – Ubicazione delle grandi sorgenti industriali operanti nell'area di Livorno.

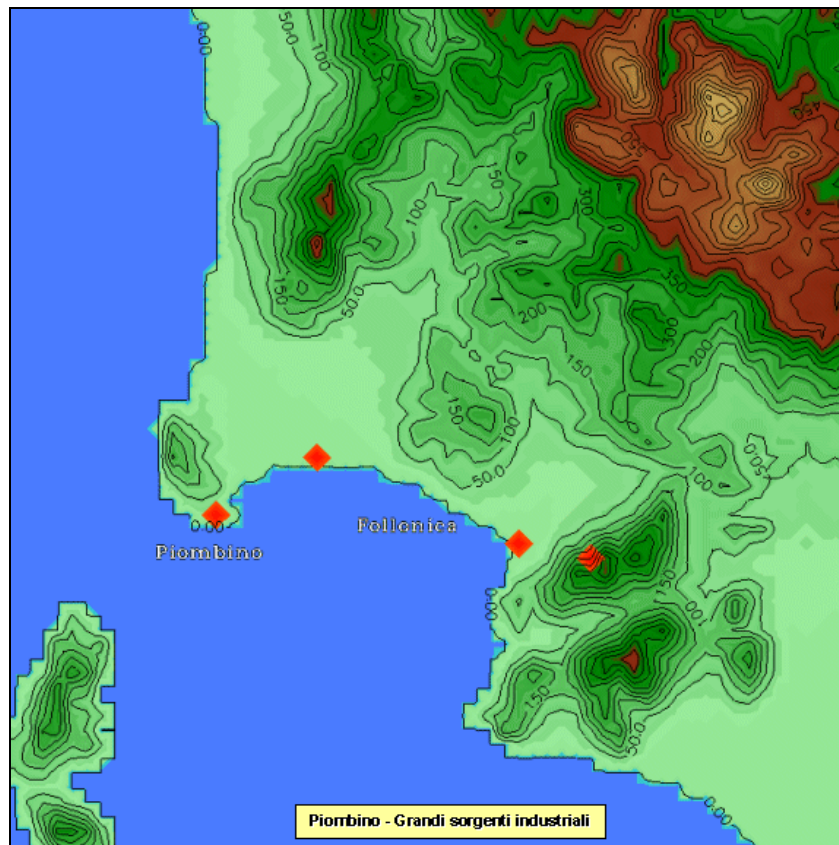


Fig. 109 – Ubicazione delle grandi sorgenti industriali operanti nell'area di Piombino.

Altra zona in cui sono presenti sorgenti puntiformi è quella di Scarlino, anche se il loro contributo di emissione risulta decisamente inferiore.

L'altezza media delle ciminiere degli impianti termoelettrici si aggira sui 200 m, mentre quella dei camini degli altri impianti è nettamente inferiore (20÷40 m).

6.3 Applicazione del modello SPRAY

Analogamente a quanto fatto nell'ambito della modellistica meteorologica, nelle applicazioni della modellistica diffusionale verranno esaminati i casi relativi all'area di Livorno e a quella di Piombino, considerando per entrambi i siti sia lo scenario tipico che quello "peggiore". Per ognuna di tali applicazioni è inoltre previsto l'impiego in parallelo sia del modello SPRAY che del modello HERMES. Lo scopo è quello di porre a confronto le prestazioni dei due modelli diffusionali disponibili, non solo in termini di risultati computazionali, ma anche sulla base della diversa snellezza d'uso e mole di dati richiesta in ingresso.

Una prima differenza – peraltro già segnalata – tra SPRAY ed HERMES, nei dati utilizzati in ingresso, riguarda il fatto che per il primo è necessario introdurre le informazioni relative a rugosità, albedo e rapporto di Bowen (Fig. 103). Per quanto riguarda i dati di uso del suolo, HERMES tiene conto della sola rugosità, e lo fa in maniera indiretta, ossia attraverso le stime operate da MINERVE, che per l'appunto prevede in *input* il dato di rugosità (Fig. 84).

Altra differenza tra i due modelli diffusionali è il diverso modo di risolvere la mancanza dell'informazione relativa alla turbolenza atmosferica, che MINERVE non fornisce loro in ingresso. I due modelli ricostruiscono in maniera semplificata il campo di turbolenza attraverso dei propri moduli interni: SPRAY utilizza un modulo (TURKEY) che fa uso dei campi 3D forniti da MINERVE, delle tre matrici di uso del suolo, nonché dei dati di una stazione a terra di riferimento; HERMES si serve invece di uno specifico algoritmo diagnostico che utilizza i campi stimati da MINERVE e - attraverso una trattazione particolarmente semplificata - la rugosità del terreno.

Nelle figure che seguono è illustrato il risultato grafico delle simulazioni operate dal modello SPRAY per i due siti di studio e a fronte dei due diversi scenari meteo considerati. L'ipotesi di lavoro è quella di considerare gli impianti di produzione attivi 24 ore su 24, con emissioni inquinanti quindi continue nel corso della giornata, a partire dalla prima ora di simulazione (h. 01:00).

Le elaborazioni grafiche sono presentate selezionando alcuni *frames* tra i più significativi dell'animazione giornaliera, attraverso una visuale più panoramica, dall'alto, ed una più ravvicinata, in sezione. I risultati sono presentati in termini di isosuperfici di concentrazione degli SO_x , espresse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con gradazioni in scala di grigio crescenti al crescere delle concentrazioni. In particolare, le Figg. 110 si riferiscono alla dispersione degli inquinanti nell'area di studio di Livorno durante il giorno tipico, mentre le Figg. 111 descrivono lo stesso sito a fronte delle condizioni meteo "peggiori"; analogamente, le Figg. 112 e 113 illustrano i casi dell'area di Piombino in presenza dello scenario meteo tipico e "peggiore", rispettivamente.

6.3.1 Concentrazioni di SO_x nell'area di Livorno

Nel corso della tipica giornata invernale, nell'area di Livorno lo scenario di qualità dell'aria modellizzato da SPRAY appare fortemente influenzato dai grossi impianti di produzione ubicati nelle zone industriali di Livorno e di Rosignano Solvay (Figg. 110 e 111). Al contrario, di peso ben più modesto è l'impatto esercitato in atmosfera dalle sorgenti limitrofe a Pisa e soprattutto da quella ubicata nella zona di Cecina, le cui concentrazioni risultano praticamente trascurabili per l'intera globalità della giornata.

Il regime anemologico che governa il giorno tipico, con correnti di vento dirette da terra verso il mare nel corso della mattinata, influenza naturalmente il trasporto degli inquinanti rilasciati dalle sorgenti di emissione presenti nell'area di studio (Fig. 110/a). Le stesse isosuperfici di

concentrazione di SO_x si presentano inoltre spazialmente piuttosto estese, il che sta ad indicare che il tipico giorno invernale è governato da condizioni di pronunciata turbolenza atmosferica. In termini di concentrazione, l'impatto maggiore è sicuramente esercitato dai grossi impianti operanti nella zona industriale di Livorno, impatto che si riscontra non solo nei punti posti immediatamente sottovento rispetto a tali sorgenti, ma, a causa dell'elevata turbolenza, anche ad elevata distanza da essi, e cioè in mare aperto ben al largo dalla costa.

Per l'intera durata della mattinata e fino al primo pomeriggio la dispersione degli inquinanti procede verso il mare, mentre a partire dalle h. 15:00 inverte il suo andamento, dirigendosi verso terra (Fig. 110/b), arrivando ad interessare l'intera piana dell'Arno compresa tra Livorno e Pisa fino a Pontedera da una parte, e l'intero entroterra alle spalle di Rosignano e Cecina dall'altra.

Il punto di visuale presentato nei *frames* di Fig. 110/c fornisce un quadro ancora più chiaro degli andamenti che caratterizzano la dispersione degli SO_x nell'area di studio considerata. Da essi si nota come lo sviluppo spaziale delle isoconcentrazioni aumenti progressivamente nel corso della giornata, raggiungendo nel corso del pomeriggio e della sera notevoli estensioni anche in verticale, il che porta a concludere che concentrazioni di tali inquinanti si riscontrino anche ad alte quote.

Lo scenario di dispersione degli SO_x in presenza delle condizioni atmosferiche maggiormente penalizzanti per la qualità dell'aria mostra andamenti in parte diversi da quanto accade nel corso del giorno tipico (Fig. 111).

Durante le ore della mattinata (Fig. 111/a) il consueto regime anemologico diretto da terra verso il mare veicola le masse d'inquinante rilasciate dai camini industriali decisamente al largo della costa. Il fatto che sia la turbolenza dinamica che quella convettiva nel corso del giorno "peggiore" risultino – per definizione stessa – le meno sviluppate possibili, comporta un deciso innalzamento dei livelli di concentrazione rispetto al caso del giorno tipico, soprattutto nella fascia di mare antistante il porto di Livorno.

Nel corso del pomeriggio (Fig. 111/b) le dinamiche della dispersione manifestano andamenti differenti sia rispetto alle ore della mattinata, che alla medesima fascia oraria del giorno tipico. Alle h. 15:00, in particolare, è possibile cogliere la fase di passaggio tra le brezze di terra e quelle di mare già evidenziate nel corso del precedente capitolo. Alla dispersione in direzione Sudovest sottovento alle sorgenti di emissione si contrappone il riflusso delle masse d'inquinante dirette verso Est, cioè dal mare verso terra; il risultato è il formarsi di isosuperfici di concentrazione estese, e quindi il persistere in atmosfera di livelli di inquinamento di notevoli dimensioni spaziali.

Le condizioni di riflusso pomeridiano delle masse d'aria che inglobano gli inquinanti, dirette dal mare verso terra, appaiono evidenti alle h. 18:00 (Fig. 111/b). Conseguenza immediata di tutto questo è sia il loro persistere, piuttosto prolungato nel tempo, al di sopra delle aree di Livorno e Rosignano Solvay, sia il loro esteso diffondersi in atmosfera. Dal confronto con la situazione alla stessa ora del giorno tipico (Fig. 110/b) emergono tuttavia delle sostanziali differenze, nel senso che durante il giorno "peggiore" i venti risultano meno intensi, e quindi gli inquinanti emessi dai camini industriali percorrono distanze inferiori, per cui non interessano se non marginalmente le aree dell'entroterra costiero. Ciò naturalmente ha come conseguenza l'innalzamento dei livelli di concentrazione nelle aree sedi delle sorgenti industriali, come già osservato.

Un quadro più esaustivo può essere ottenuto dai *frames* presentati in Fig. 111/c. L'aspetto che salta immediatamente all'occhio è che, rispetto al caso del giorno tipico, per l'intero corso della mattinata e del pomeriggio la turbolenza appare poco sviluppata, col risultato che le isosuperfici di concentrazione si mostrino poco estese, anche in direzione verticale. La situazione cambia durante tardo pomeriggio (h. 19:00), quando condizioni di maggiore turbolenza determinano una più marcata diffusione spaziale degli inquinanti in atmosfera, ancora una volta soprattutto in altezza.

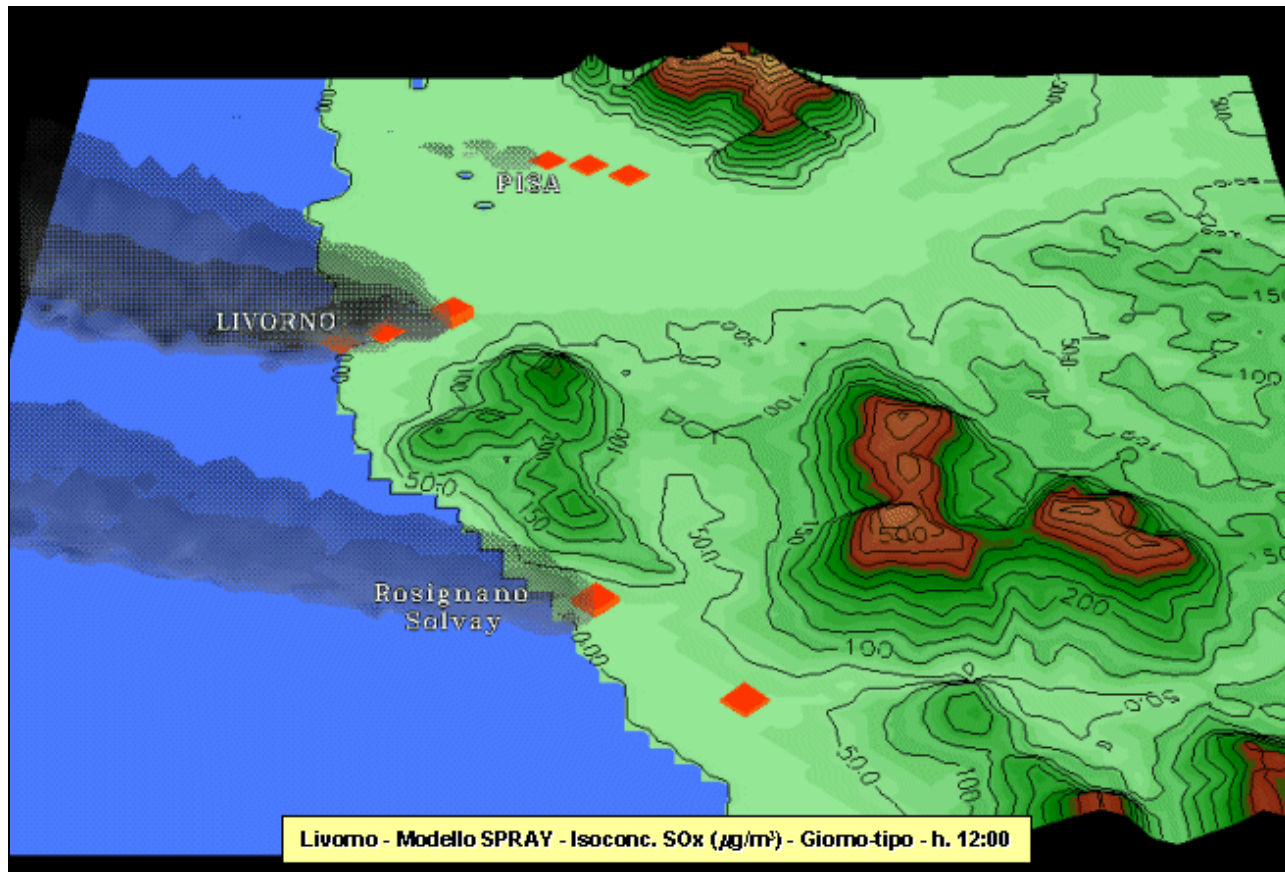
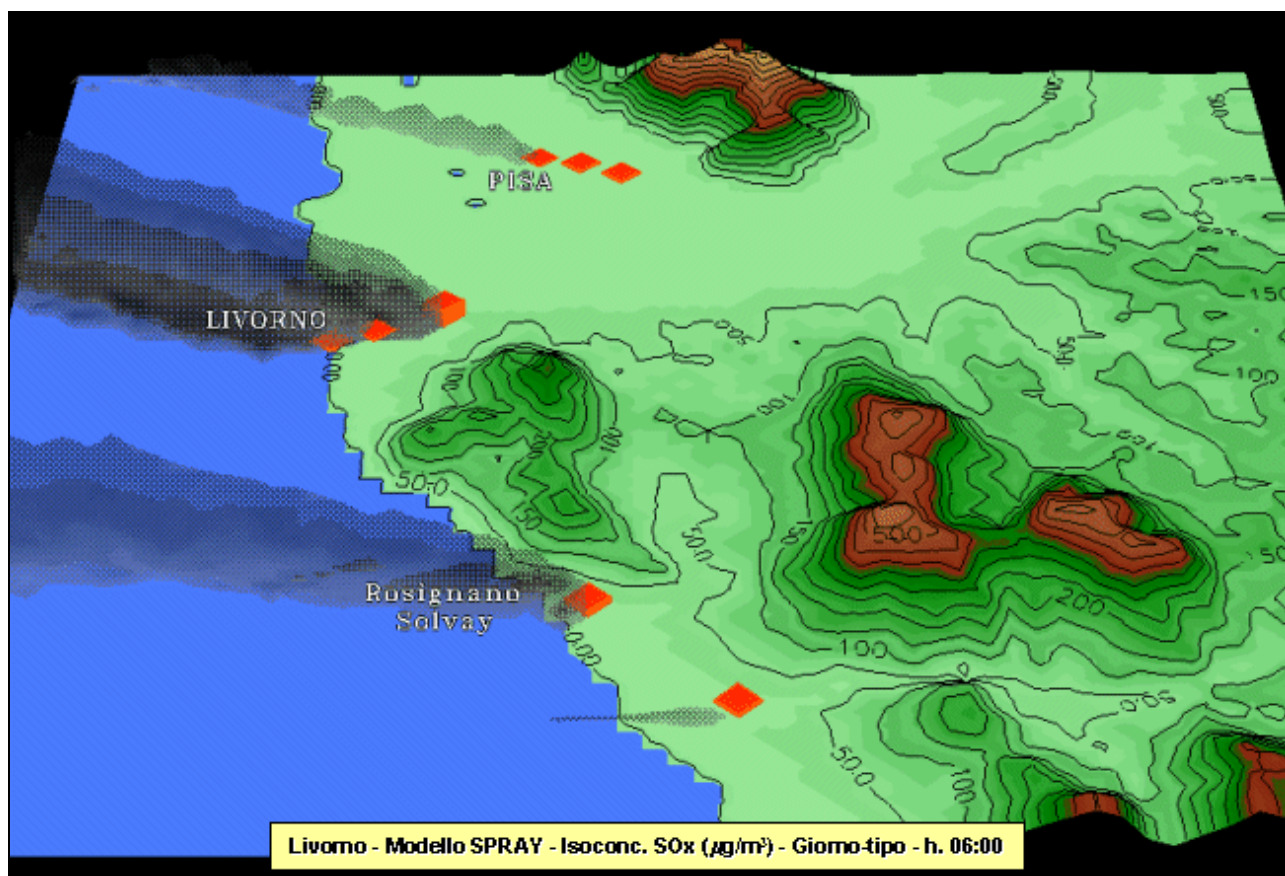


Fig. 110/a – Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da SPRAY nell'area di Livorno (hh. 06-12).

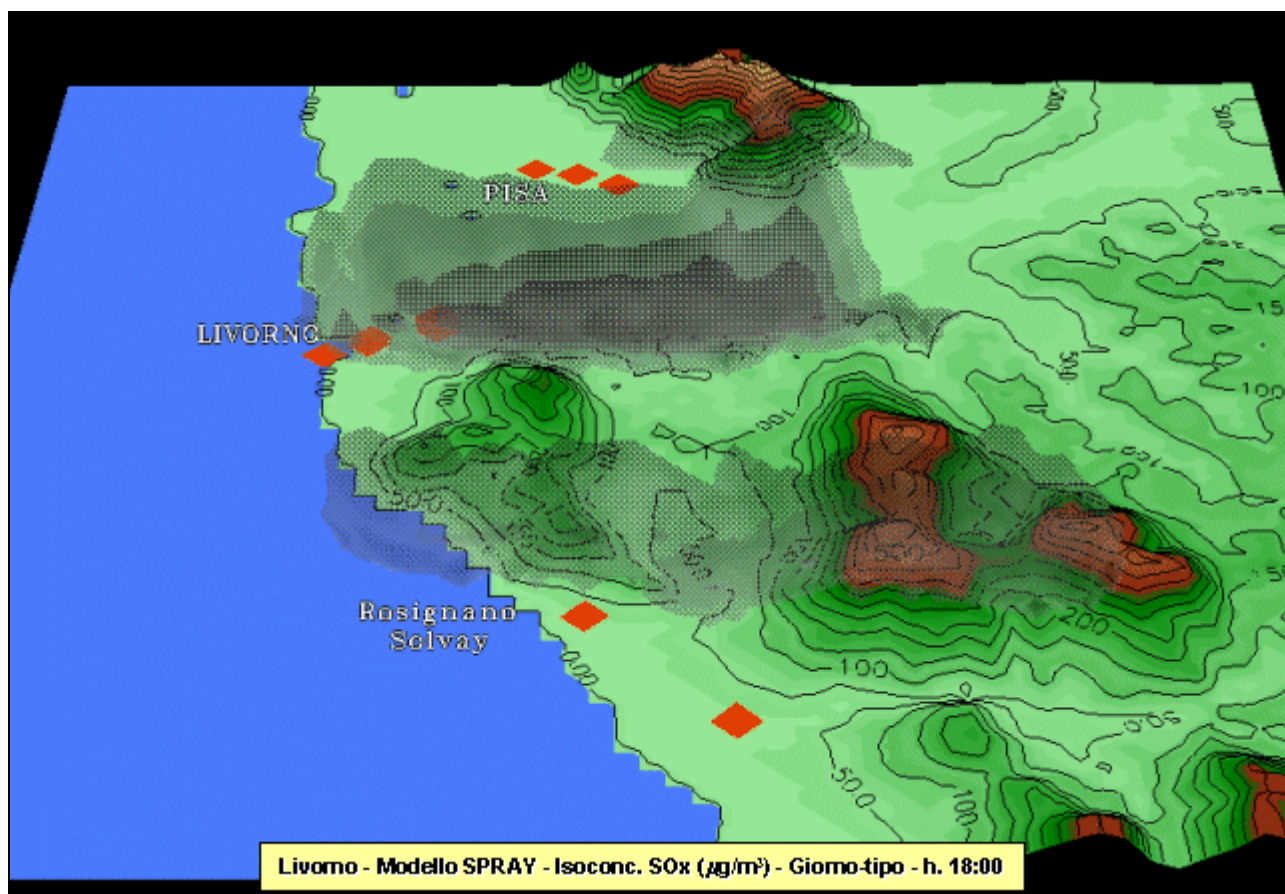
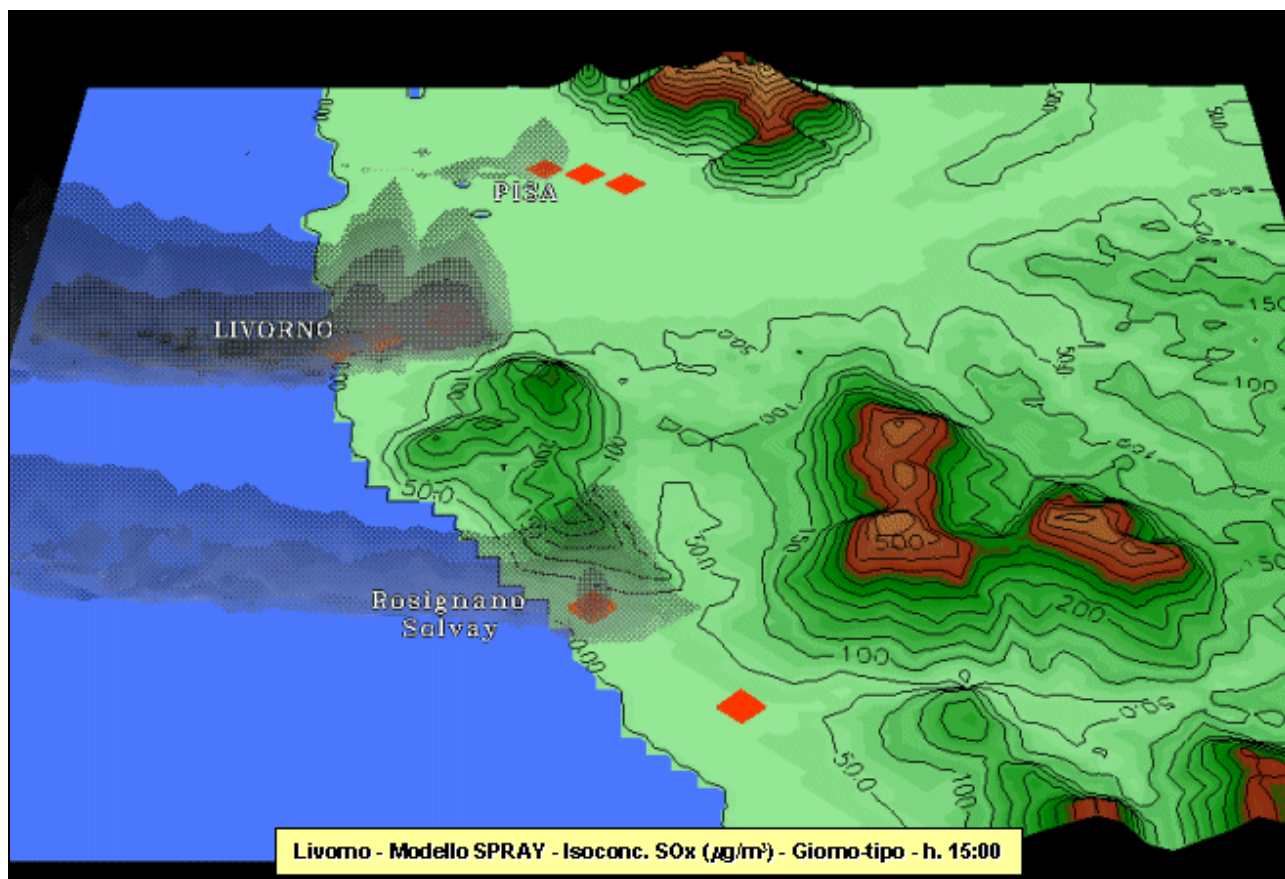
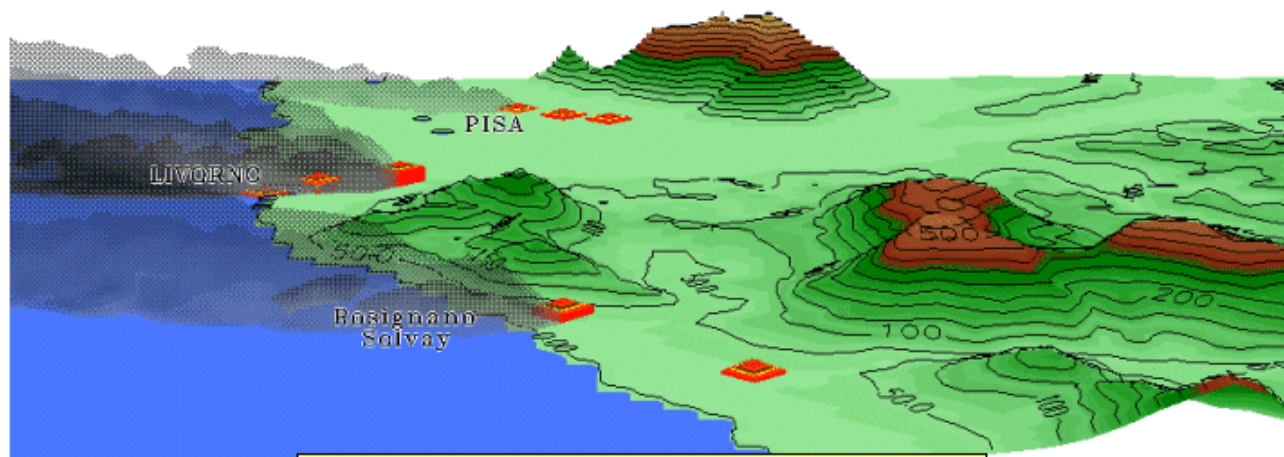
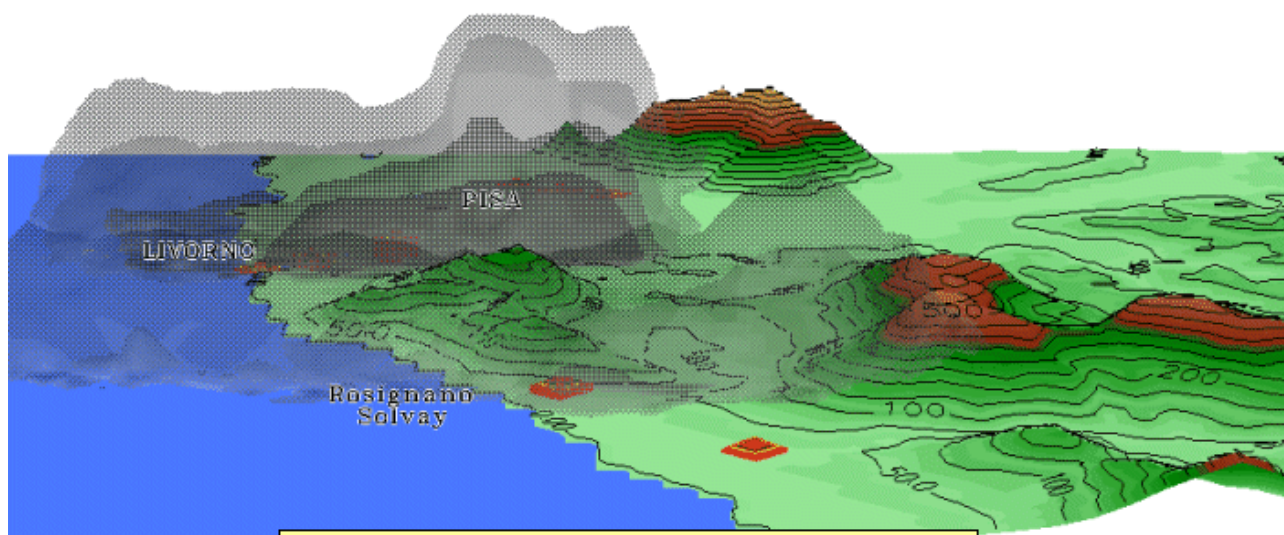


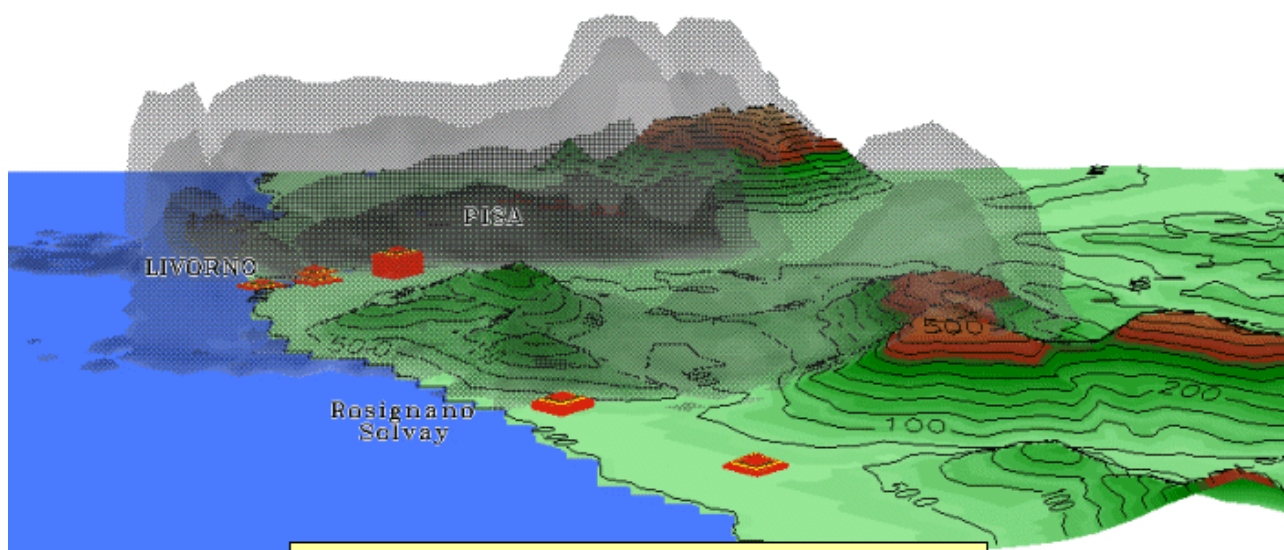
Fig. 110/b – Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da SPRAY nell'area di Livorno (hh. 15-18).



Livorno - Modello SPRAY - Isoconc. SO_x (µg/m³) - Giorno-tipo - h. 08:00



Livorno - Modello SPRAY - Isoconc. SO_x (µg/m³) - Giorno-tipo - h. 16:00



Livorno - Modello SPRAY - Isoconc. SO_x (µg/m³) - Giorno-tipo - h. 19:00

Fig. 110/c – Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da SPRAY nell'area di Livorno (hh. 08-16-19).

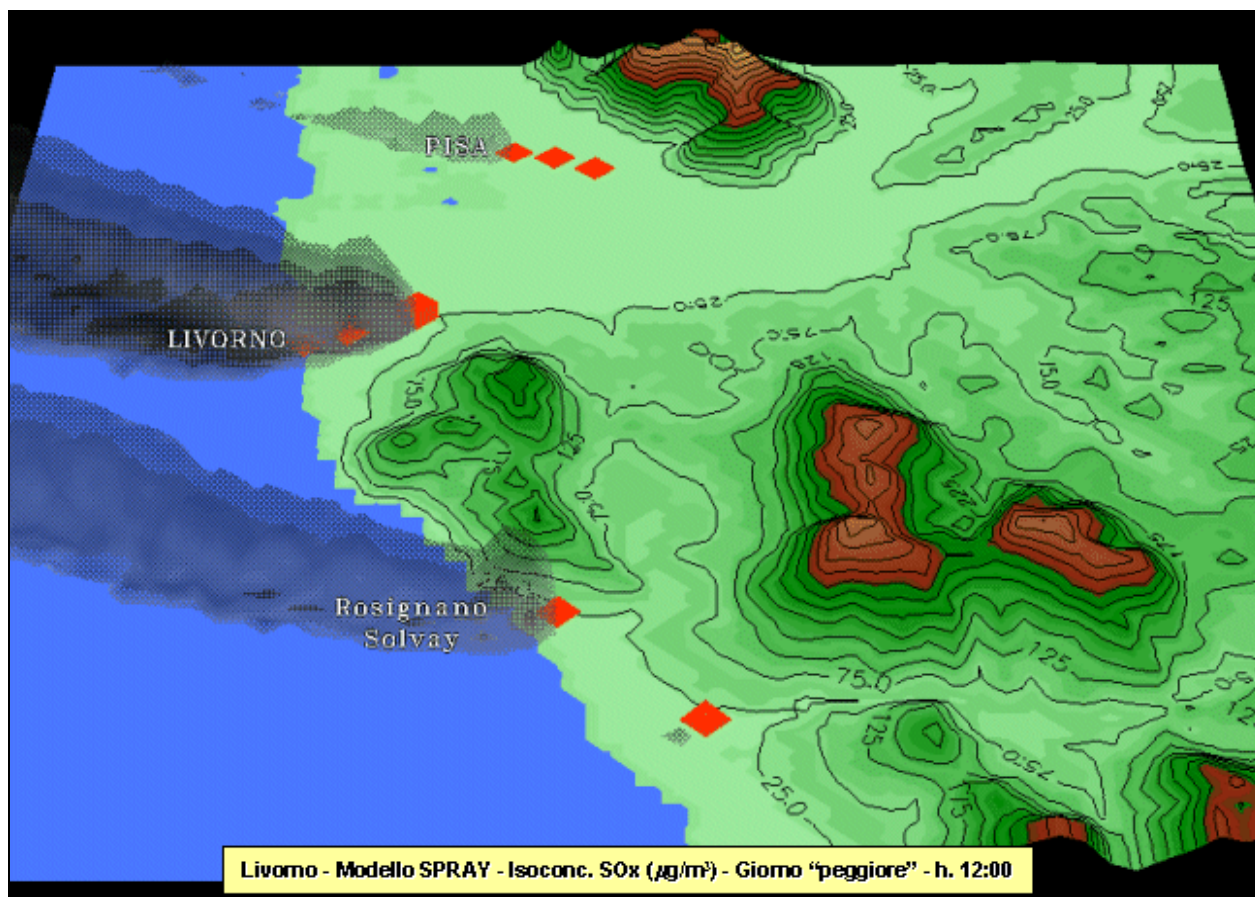
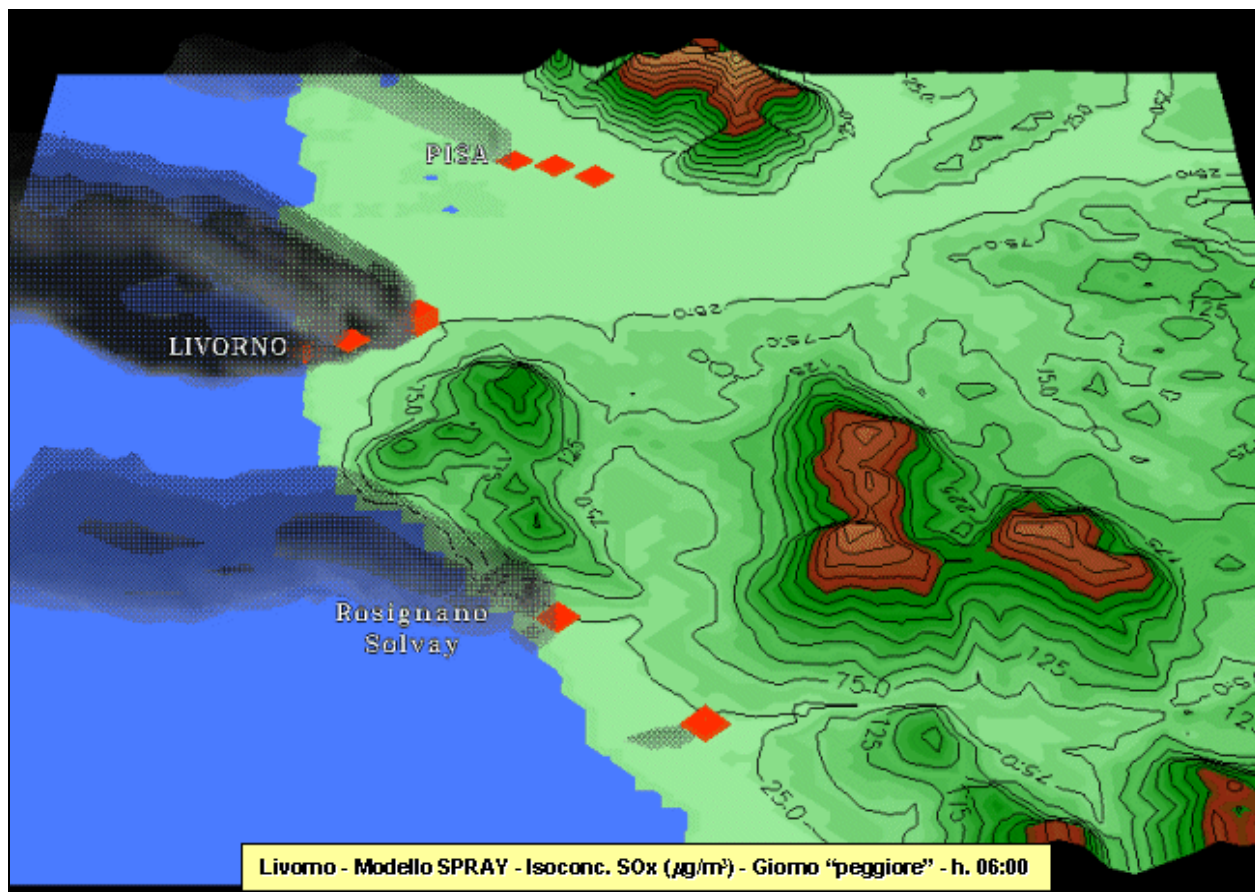


Fig. 111/a - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da SPRAY nell'area di Livorno (hh. 06-12).

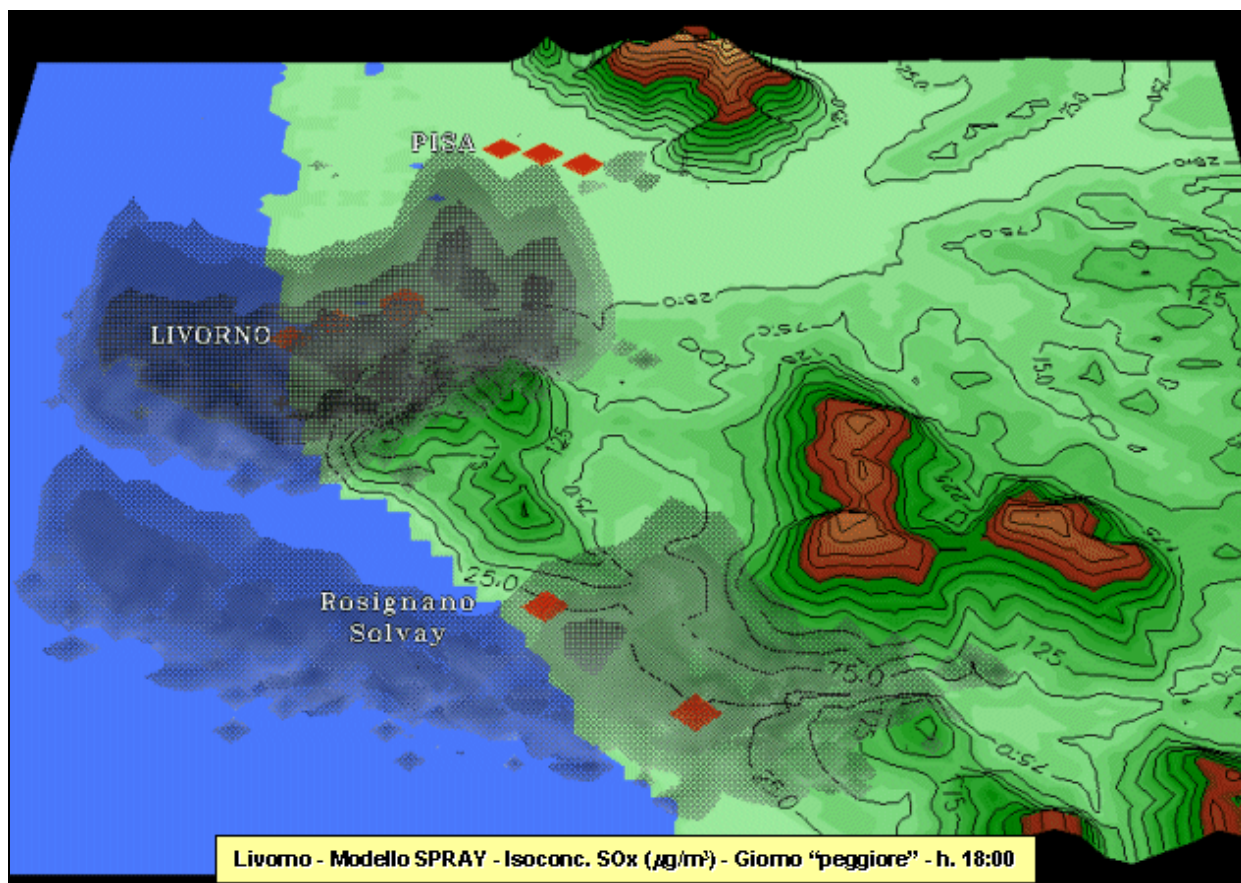
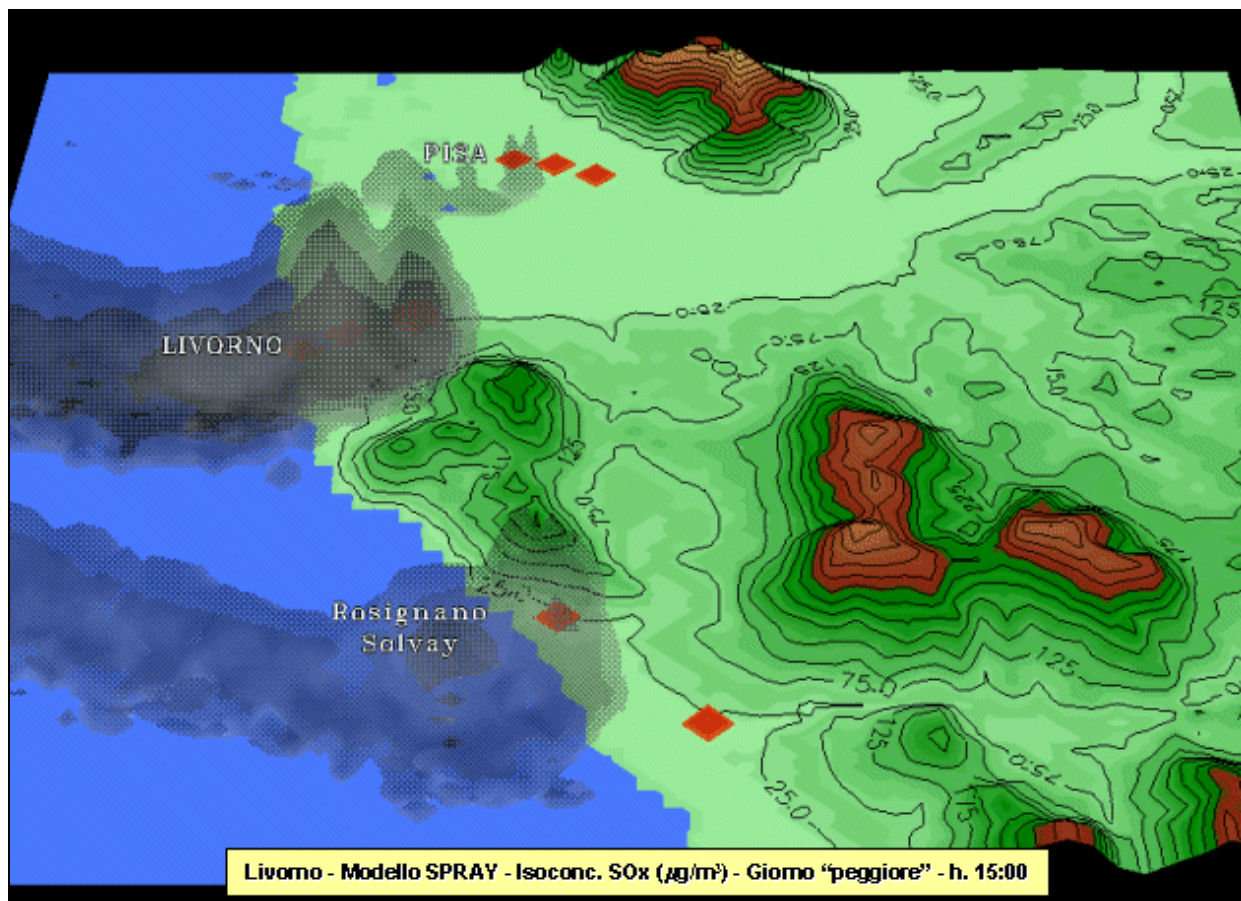


Fig. 111/b - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da SPRAY nell'area di Livorno (hh. 15-18).

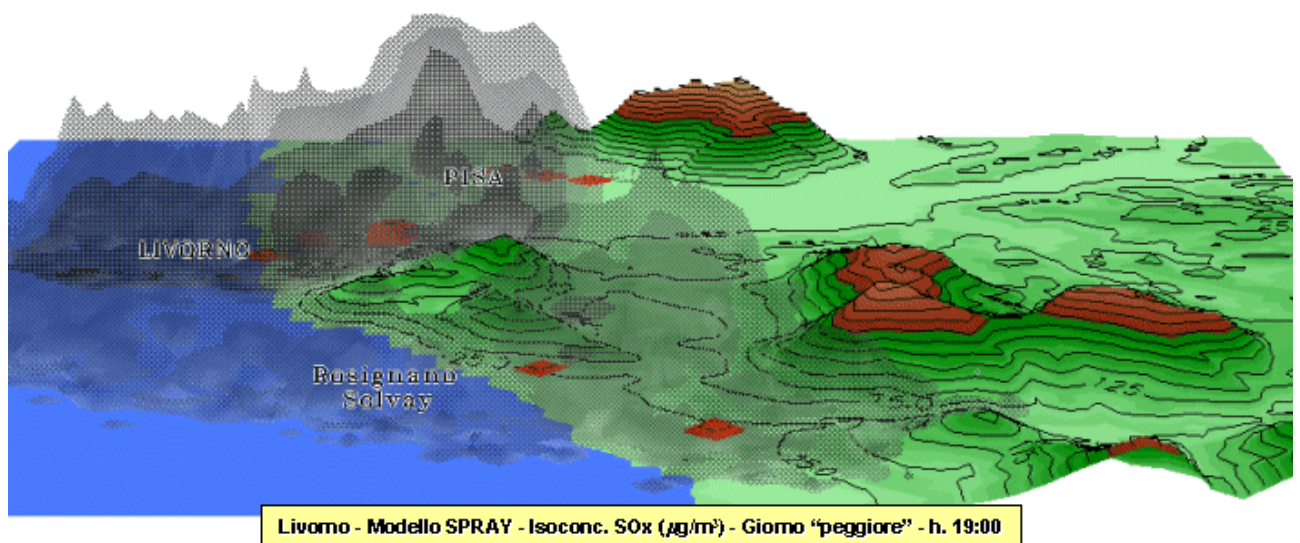
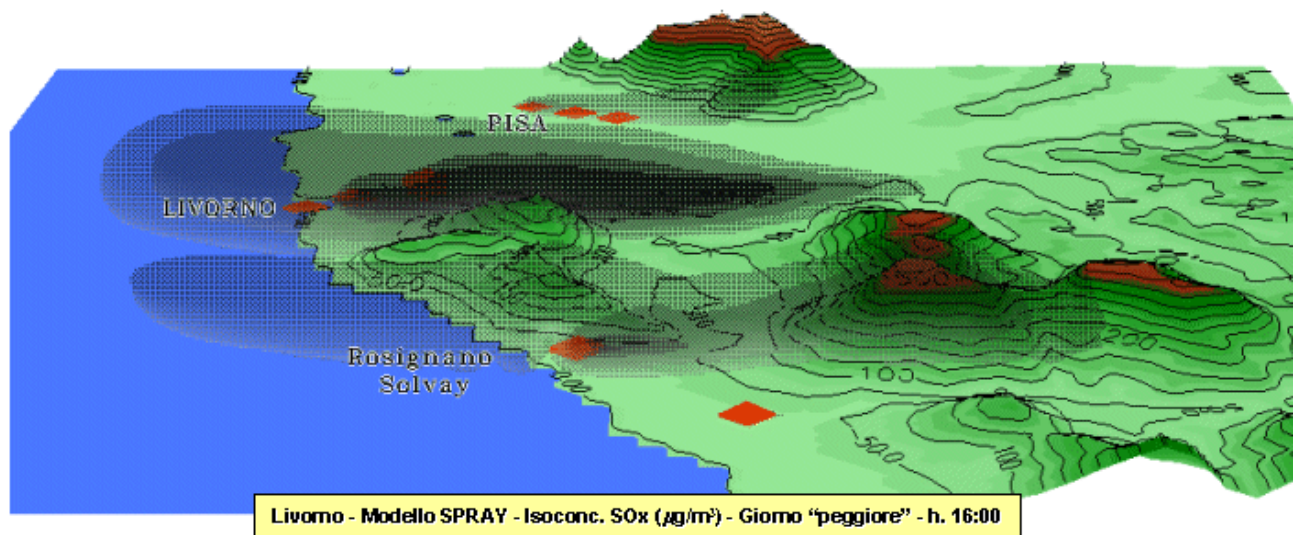
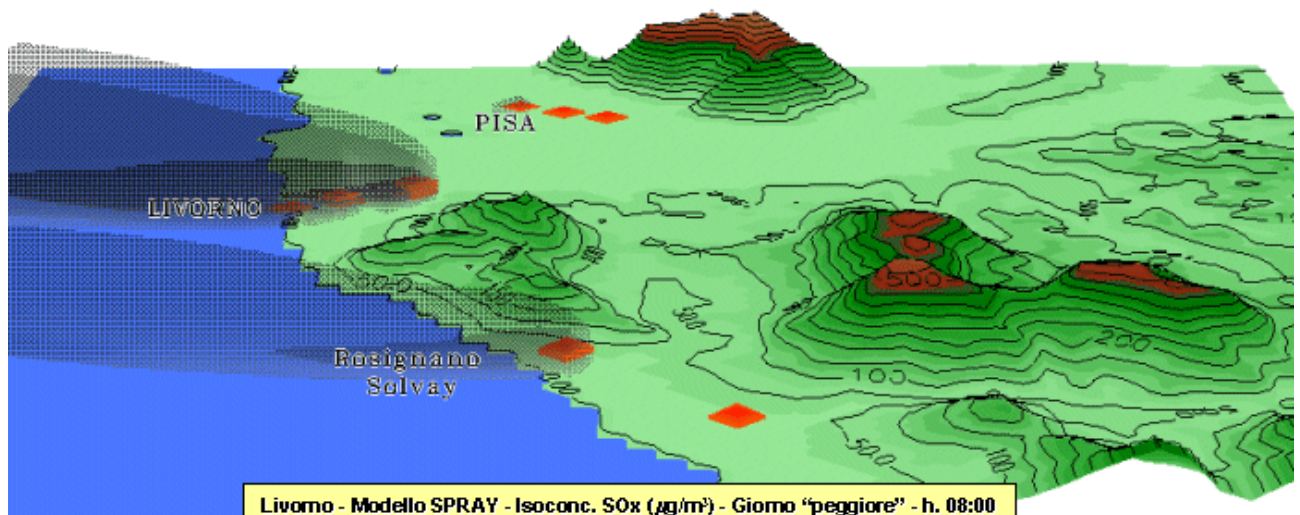


Fig. 111/c - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da SPRAY nell'area di Livorno (hh. 08-16-19).

Sempre attraverso lo studio delle rappresentazioni di Fig. 111/c, si può osservare come ad un aumentare della turbolenza atmosferica corrisponda un sintomatico ridursi dei livelli di concentrazione.

L'elevata stabilità atmosferica delle ore della mattina e del pomeriggio ostacola infatti la diffusione degli inquinanti in atmosfera, causando il formarsi di una stretta fascia di concentrazioni centrata attorno alla loro direzione media di percorrenza, dove si raggiungono localmente valori elevati. La situazione delle h. 16:00 è particolarmente esplicativa, in tal senso: una stretta fascia di elevate isoconcentrazioni di SO_x si estende da Livorno per un lungo tratto dell'entroterra, arrivando ad interessare la zona di Pontedera e Ponsacco. Come già sottolineato, invece, l'innescarsi di condizioni di maggiore turbolenza delle successive ore della giornata determina una maggiore diffusione spaziale degli inquinanti, e quindi il ridursi dei relativi valori di concentrazione.

6.3.2 Concentrazioni di SO_x nell'area di Piombino

L'andamento della dispersione degli inquinanti modellizzata da SPRAY nell'area di studio di Piombino è illustrata nei *frames* raggruppati nelle Figg. 112 e 113, relativi ai casi del giorno tipico e di quello "peggiore", rispettivamente.

Da uno sguardo d'insieme, si può notare che i camini che emettono i tassi di SO_x più alti sono concentrati esclusivamente nell'area industriale di Piombino. L'altezza di tali camini è decisamente superiore a quella degli impianti dell'area di Livorno; questo favorisce il trasporto a grande distanza degli inquinanti, e al tempo stesso riduce le ricadute nelle immediate vicinanze delle sorgenti.

In presenza delle condizioni meteorologiche invernali più frequenti, nell'area di studio di Piombino le masse d'aria che veicolano il trasporto degli inquinanti rilasciati dalle sorgenti presenti si muovono in direzione Sudovest nel corso della mattinata (Fig. 112/a).

Condizioni di forte stabilità atmosferica nelle prime ore della giornata (h. 06:00) fanno in modo che la diffusione degli SO_x rilasciati dalle sorgenti di emissione risulti assai poco sviluppata, come appare chiaro dal fatto che le isosuperfici di concentrazione si presentino poco estese nei piani trasversali al percorso medio degli inquinanti. Per quanto l'entità delle concentrazioni non risulti eccessivamente elevata, è da rimarcare il fatto che durante la mattinata le ricadute degli SO_x rilasciate dagli impianti industriali della zona di Piombino investano l'estremità nordorientale dell'Isola d'Elba, e in particolare le zone di Rio Marina e del Monte Serra.

Nel corso della tarda mattinata (h. 12:00) il regime anemologico modifica il suo andamento, con venti che spirano in direzione Nordovest. Durante tale fase di passaggio, le isosuperfici di concentrazione sottovento alle sorgenti della zona di Piombino risultano spazialmente più estese rispetto alle ore precedenti, mentre al contrario si evidenzia una sostanziale riduzione di quelle dovute alle sorgenti della zona di Scarlino.

Le mutate direzioni predominanti dei venti, stabilmente orientate verso Nordovest, si manifestano nel corso del pomeriggio (Fig. 112/b). Ancora ben poco sviluppata appare la turbolenza atmosferica, il che fa sì che le isoconcentrazioni degli SO_x si ripresentino come una fascia stretta e sottile centrata assialmente attorno al percorso medio seguito dagli inquinanti.

A livello di impatto, come d'altro canto già emerso nei *frames* delle ore precedenti, si può notare come l'azione preponderante sia quella esercitata dall'impianto ubicato in località Torre del Sale, mentre al contrario di scarso peso è l'inquinamento dovuto alle sorgenti della zona di Scarlino e soprattutto di Follonica. Le aree interessate dall'inquinamento nel corso del pomeriggio sono soprattutto quelle a Nordovest di Piombino (Venturina, S. Vincenzo), e molto più marginalmente quelle delle colline retrostanti Follonica.

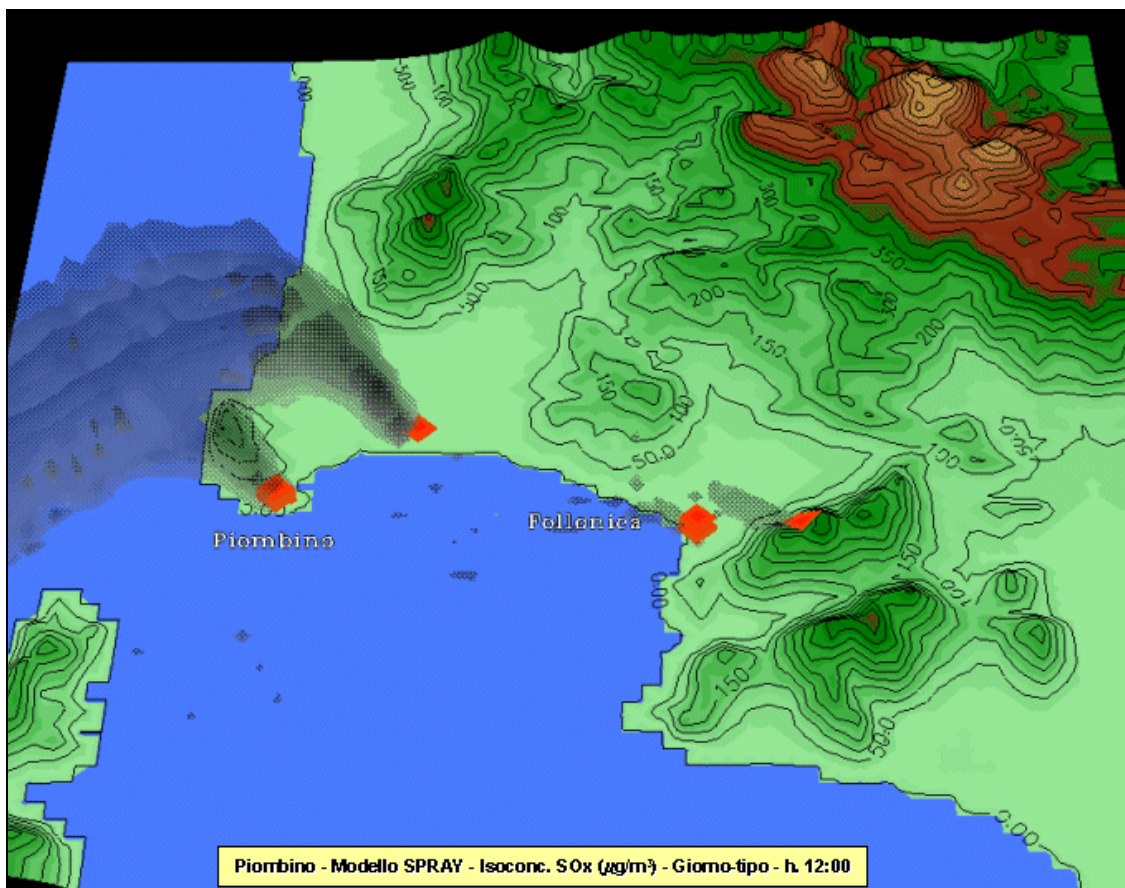
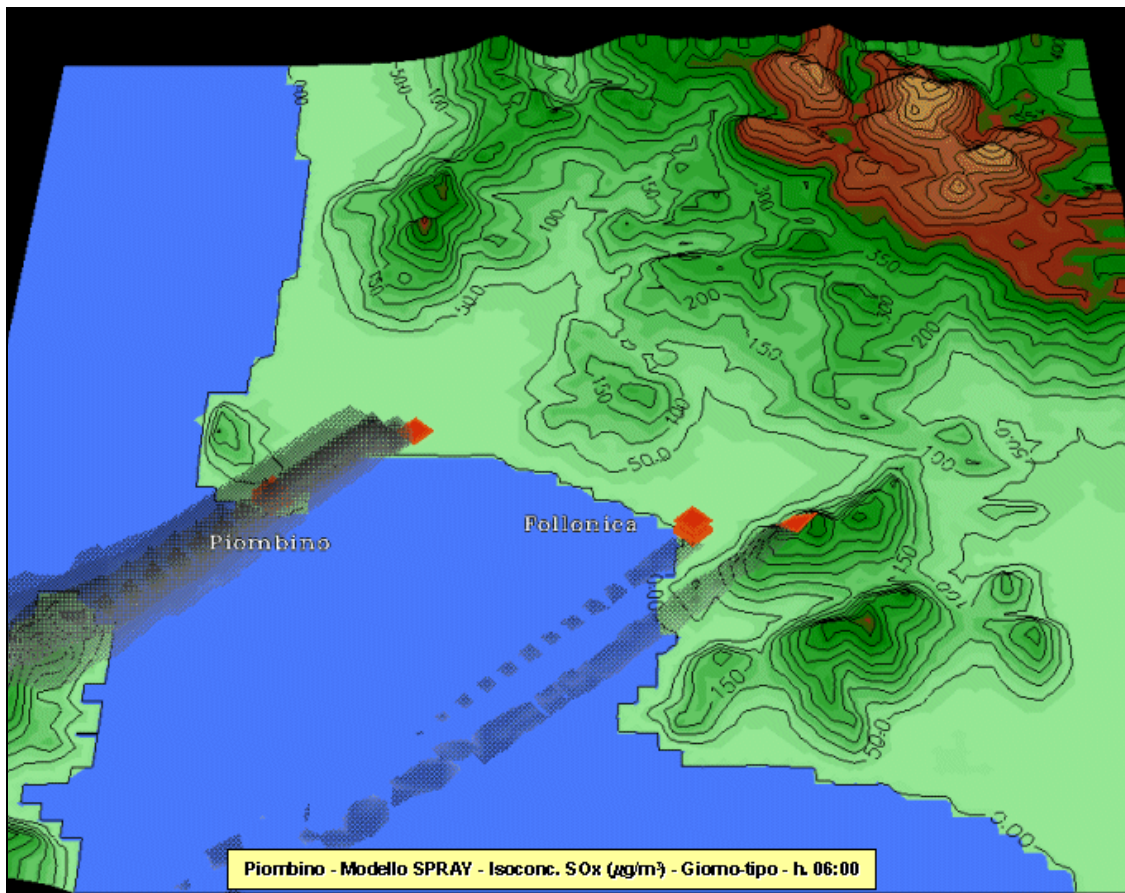


Fig. 112/a - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da SPRAY nell'area di Piombino (hh. 06-12).

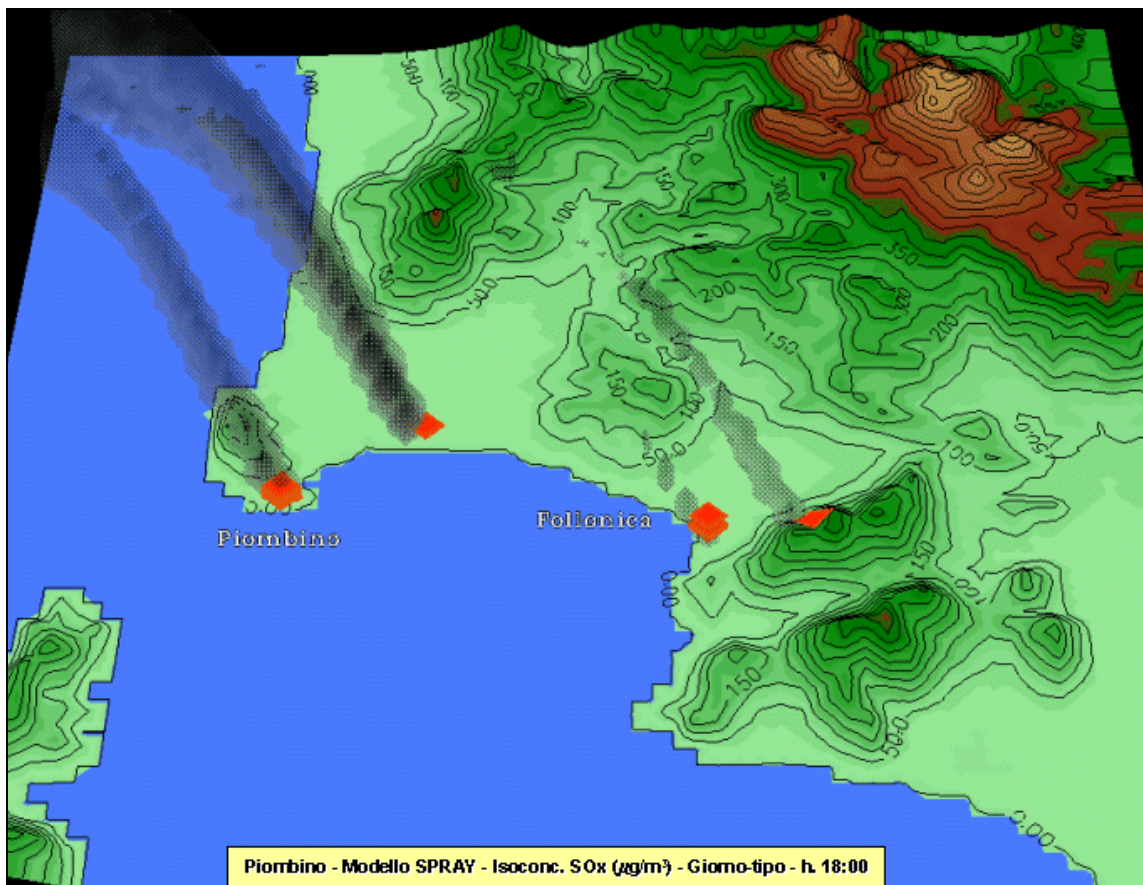
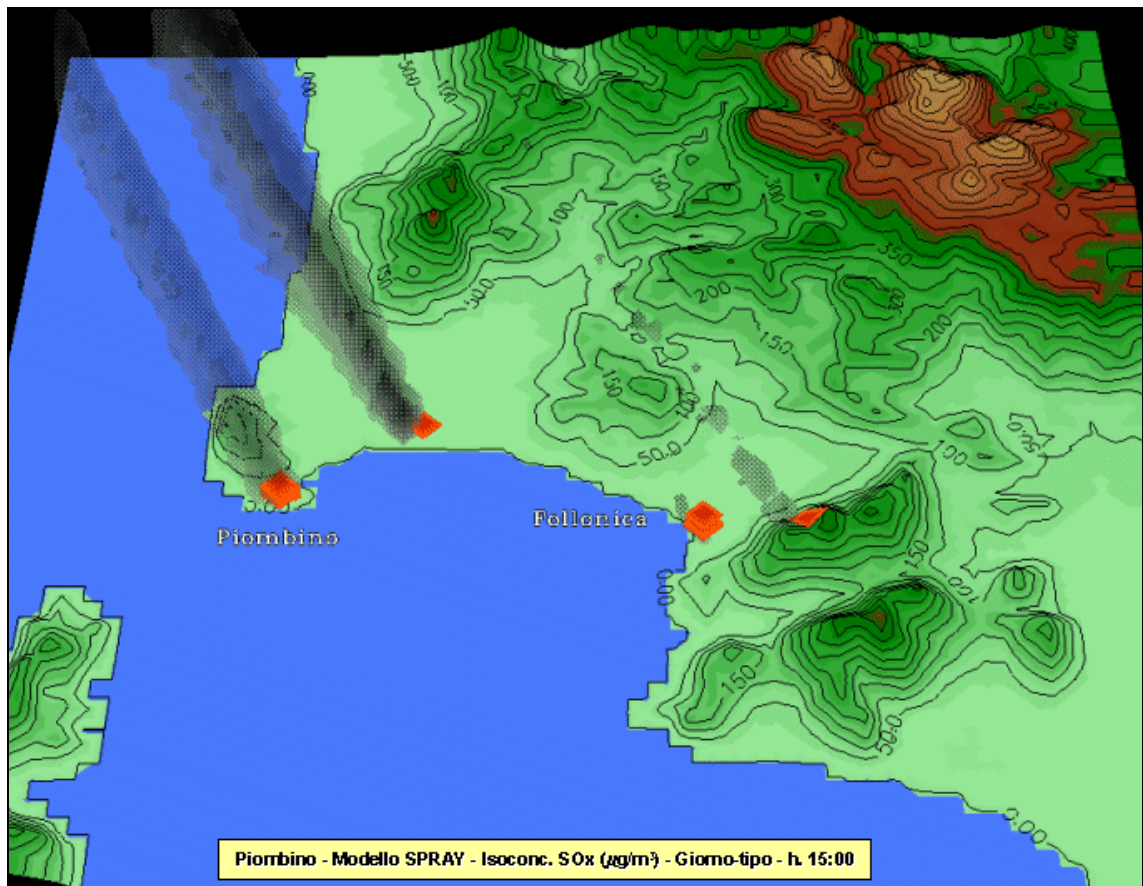


Fig. 112/b - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da SPRAY nell'area di Piombino (hh. 15-18).

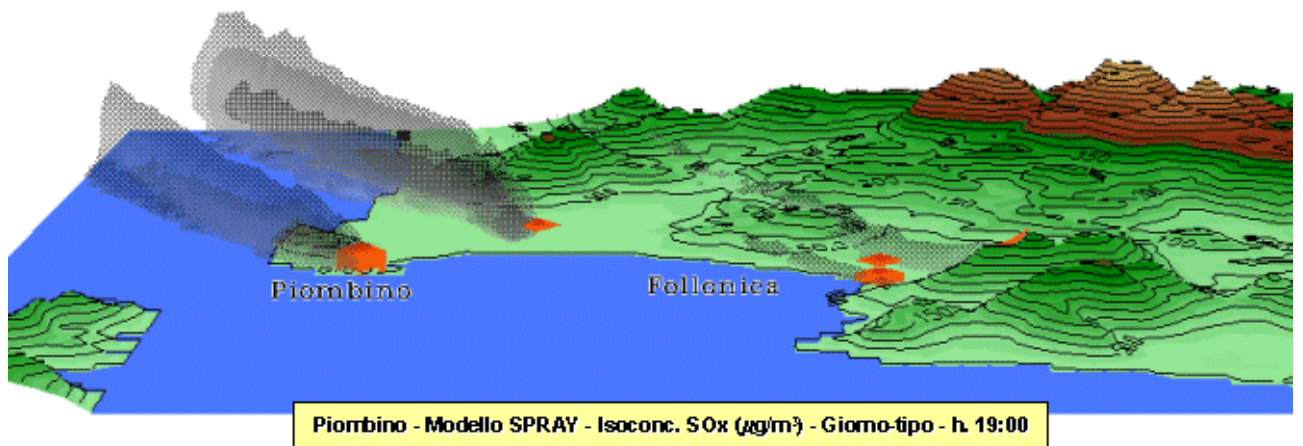
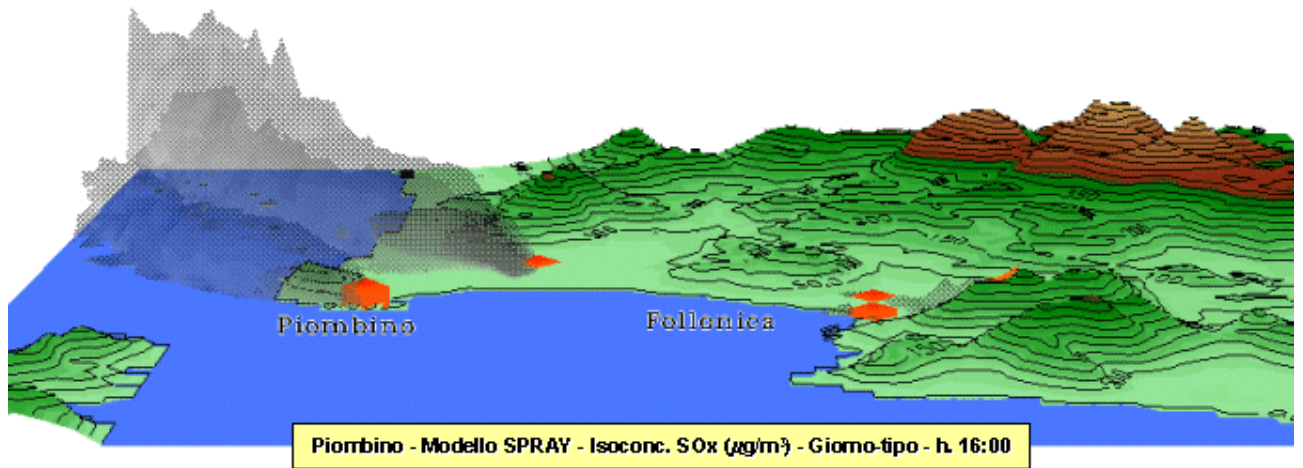
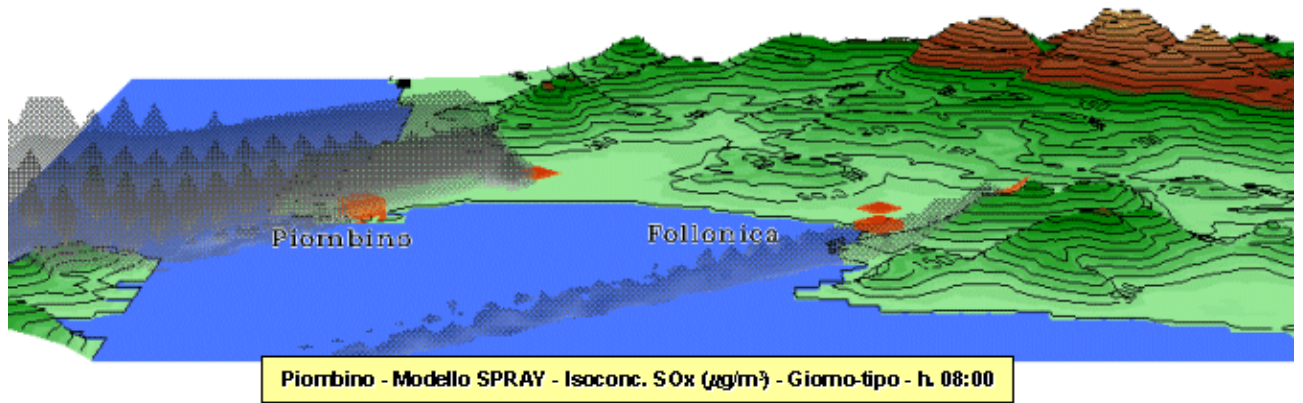


Fig. 112/c - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da SPRAY nell'area di Piombino (hh. 08-16-19).

Gli andamenti temporali della dispersione ricostruiti da SPRAY e visualizzati in Fig. 112/c forniscono un quadro certamente più esauriente di quanto visto finora. Nella prima mattinata (h. 08:00) la diffusione spaziale degli SO_x rilasciati nella zona industriale di Piombino si presenta molto più pronunciata di quanto non accada per quella al largo della zona di Follonica e Scarlino, salvo il fatto che nel primo caso i livelli d'inquinamento risultino decisamente superiori. Nella fase centrale del pomeriggio (h. 16:00), l'estensione spaziale – e soprattutto verticale – delle isoconcentrazioni di SO_x a Nordovest di Piombino appare considerevole, il che comporta una locale riduzione dei valori di concentrazione in atmosfera. Viceversa, l'inquinamento nelle vicinanze delle sorgenti della zona di Follonica e Scarlino pare quasi estinguersi completamente. L'attenuarsi della turbolenza atmosferica del tardo pomeriggio (h. 19:00) determina, per contro, una riduzione dell'estensione spaziale delle concentrazioni in atmosfera, e quindi un innalzamento dei valori di concentrazione.

Lo scenario di dispersione degli SO_x rilasciati dai complessi industriali operanti nell'area di Piombino nel corso del giorno "peggiore" è graficamente schematizzato nelle Figg. 113.

Nelle prime ore del giorno "peggiore" (h. 06:00), il meccanismo della dispersione degli inquinanti appare ben diverso da quello che caratterizza la stessa ora del giorno tipico (Fig. 113/a). Le correnti di vento spirano infatti verso Sud-Sudest e non verso Sudovest, ma soprattutto sono le condizioni di turbolenza atmosferica a presentarsi sostanzialmente diverse. Le emissioni di SO_x rilasciate dai camini industriali presenti danno luogo ad isosuperfici di concentrazione estremamente compatte, caratterizzate – soprattutto quelle emesse dagli impianti di Piombino e di Torre del Sale – da valori piuttosto rilevanti, anche se confinate in un'area piuttosto limitata. Nonostante nel primo mattino le concentrazioni di SO_x risultino superiori a quelle del giorno tipico, il fatto che le ricadute interessino aree di mare aperto determina condizioni d'inquinamento meno nocive rispetto a quelle del giorno tipico, in quanto in quel caso erano investite le coste nordorientali dell'Isola d'Elba (Fig. 112/a).

Nella tarda mattinata (h. 12:00), condizioni di turbolenza più sviluppate favoriscono il progressivo diffondersi in atmosfera delle masse d'inquinante, che vengono sospinte dai venti in direzione Ovest analogamente a quanto accade nel giorno tipico. Anche alle h. 12:00, tuttavia, nel giorno "peggiore" si riscontrano condizioni di maggiore stabilità rispetto al giorno tipico, come appare evidente soprattutto per le concentrazioni originate dall'impianto di Torre del Sale, che mostrano isosuperfici compatte e caratterizzate da valori elevati. Di modesta entità risultano invece le ricadute degli inquinanti rilasciati dalle sorgenti operanti nell'area di Follonica e Scarlino, le cui isoconcentrazioni tendono progressivamente a diradarsi in atmosfera non appena in mare aperto.

Lo scenario di qualità dell'aria che si presenta nel primo pomeriggio (h. 15:00) non si discosta di molto da quello delle h. 12.00, se non in un leggero ridursi delle concentrazioni dovute alle sorgenti di Piombino e soprattutto di Torre del Sale (Fig. 113/b). Aspetto invece meno positivo è che in questa fase della giornata le masse d'inquinante tendono a spostarsi più verso Sud, interessando le coste settentrionali dell'Isola d'Elba (Portoferraio, etc.). Tale scenario di dispersione degli inquinanti si presenta radicalmente differente – e in particolare più nocivo – rispetto a quello alle stesse ore del giorno tipico, quando correnti dirette verso Nordovest trasportavano gli inquinanti in zone di mare aperto (Fig. 112/b).

Nel tardo pomeriggio (h. 18:00) si verifica una fase di transizione nel regime dei venti che si orientano in direzione Nord (Fig. 113/b). Ciò fa sì che le isosuperfici di concentrazione degli SO_x emesse nella zona industriale di Piombino presentino una forma particolare, come risultato di due fattori: le mutate condizioni di direzione del vento dirette verso Nord e il riflusso delle masse d'aria provenienti da Sud. In termini di qualità dell'aria, i pennacchi inquinanti investono le località a Nord della zona industriale di Piombino (Venturina e S. Vincenzo).

Il trasporto e la diffusione degli SO_x secondo il punto di vista delle illustrazioni riassunte in Fig. 113/c fornisce spunti ulteriori di analisi.

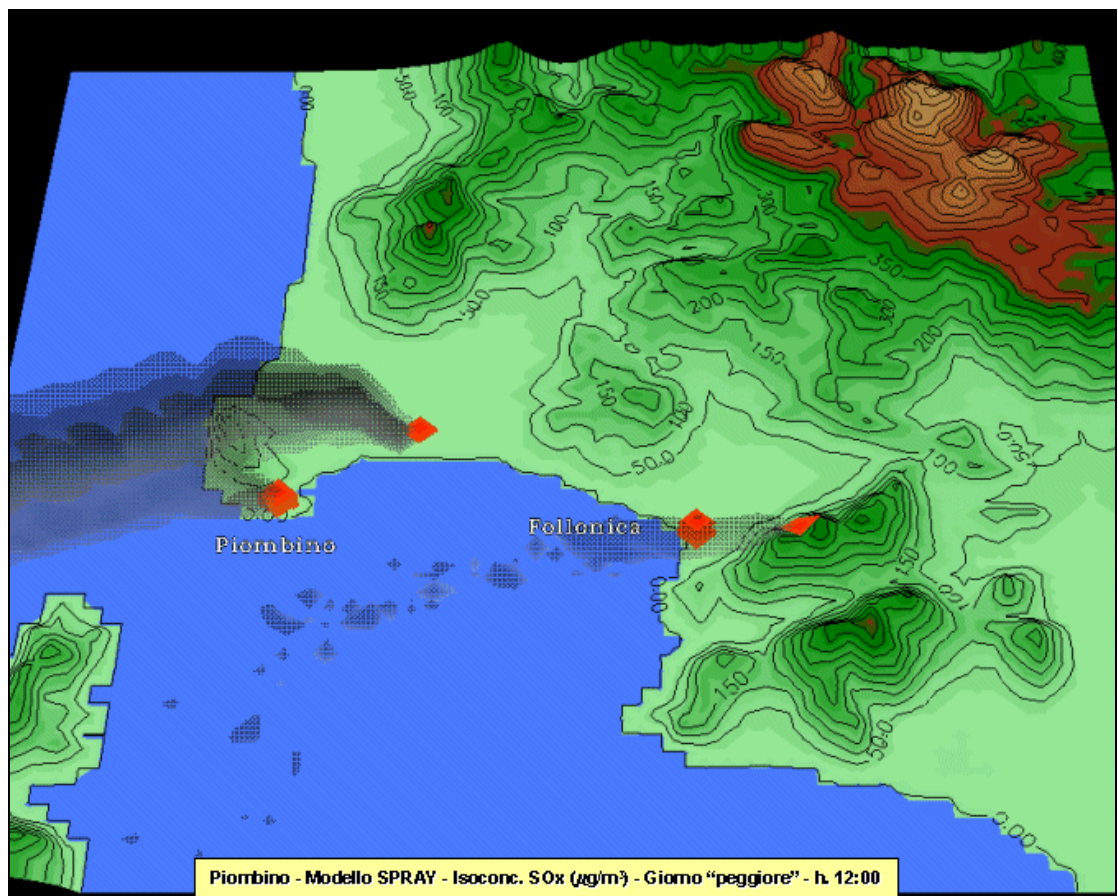
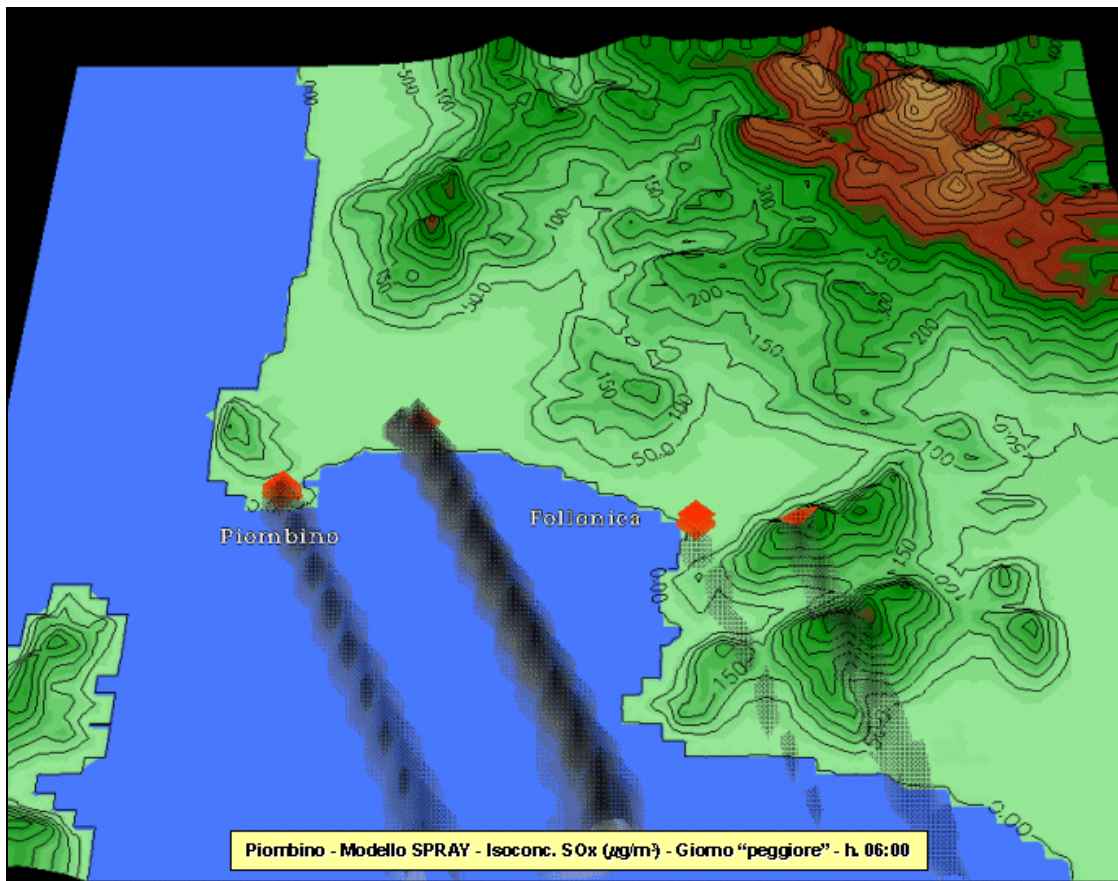


Fig. 113/a - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da SPRAY nell'area di Piombino (hh. 06-12).

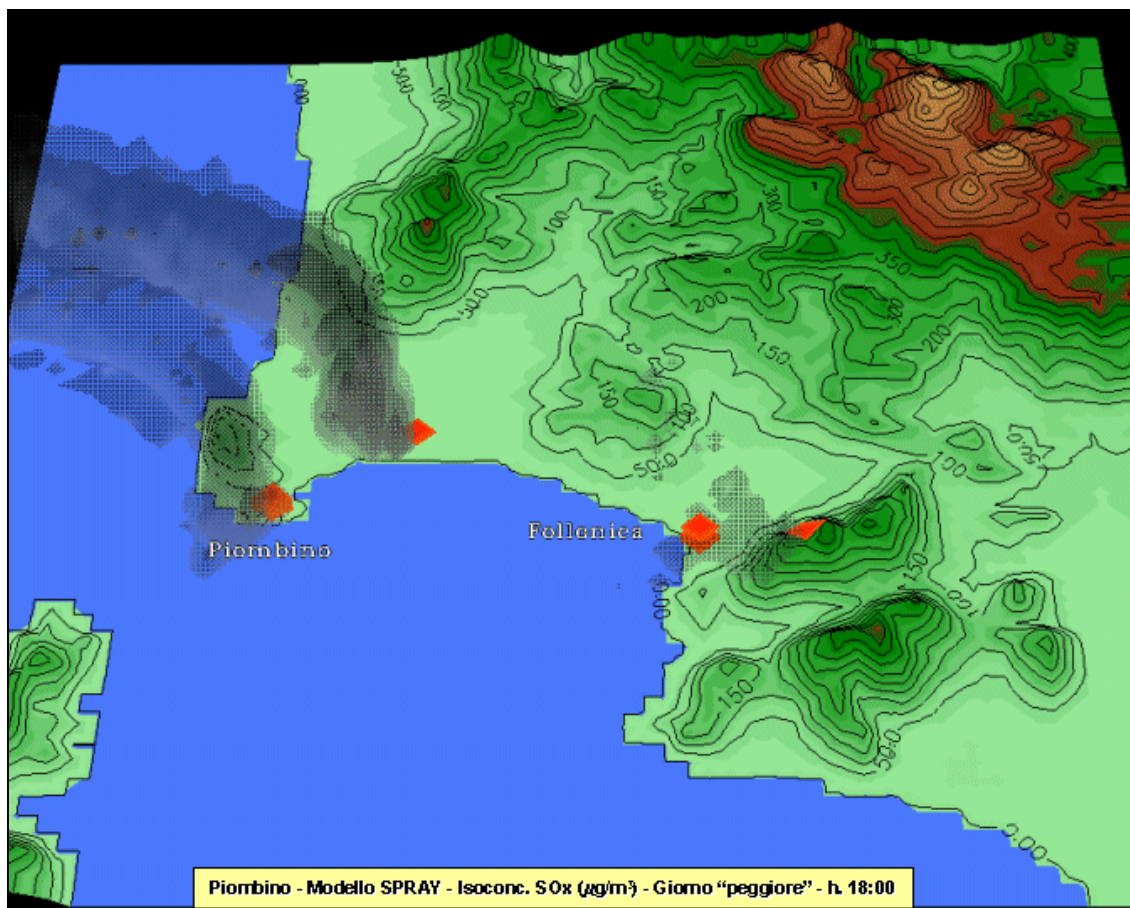
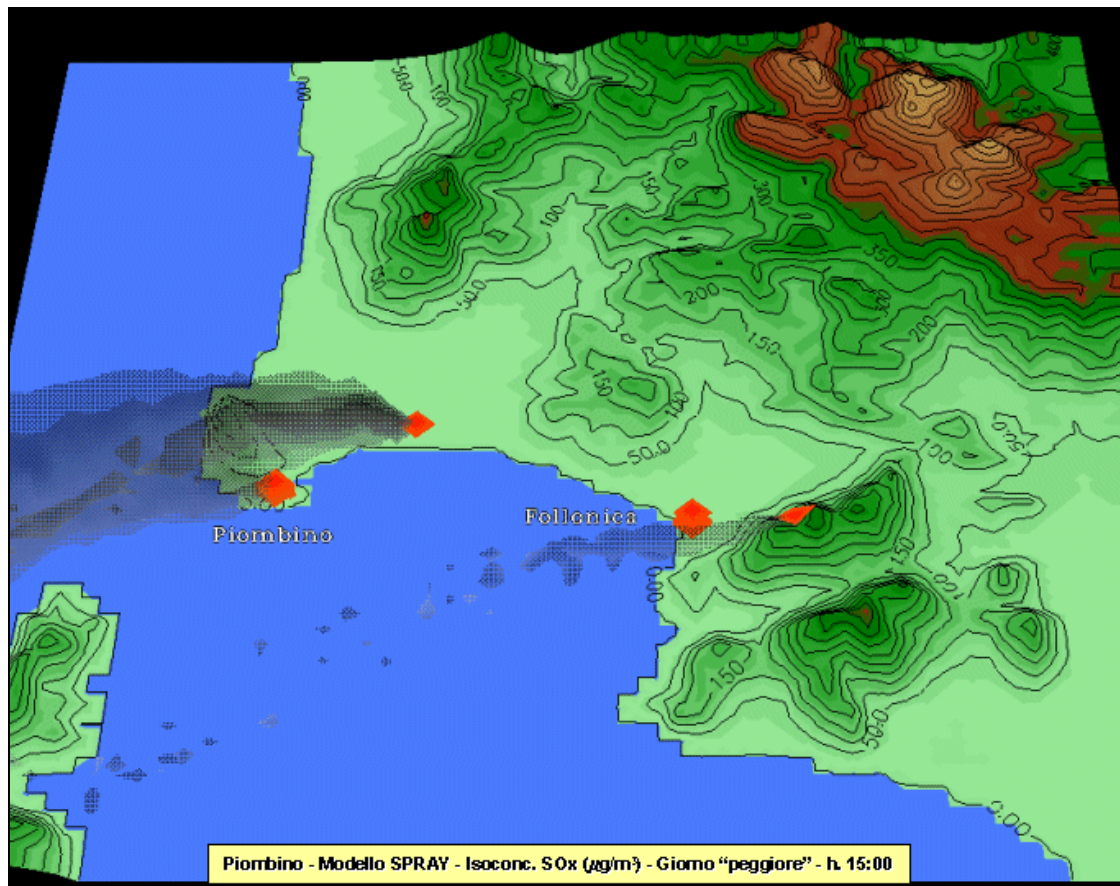


Fig. 113/b - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da SPRAY nell'area di Piombino (hh. 15-18).

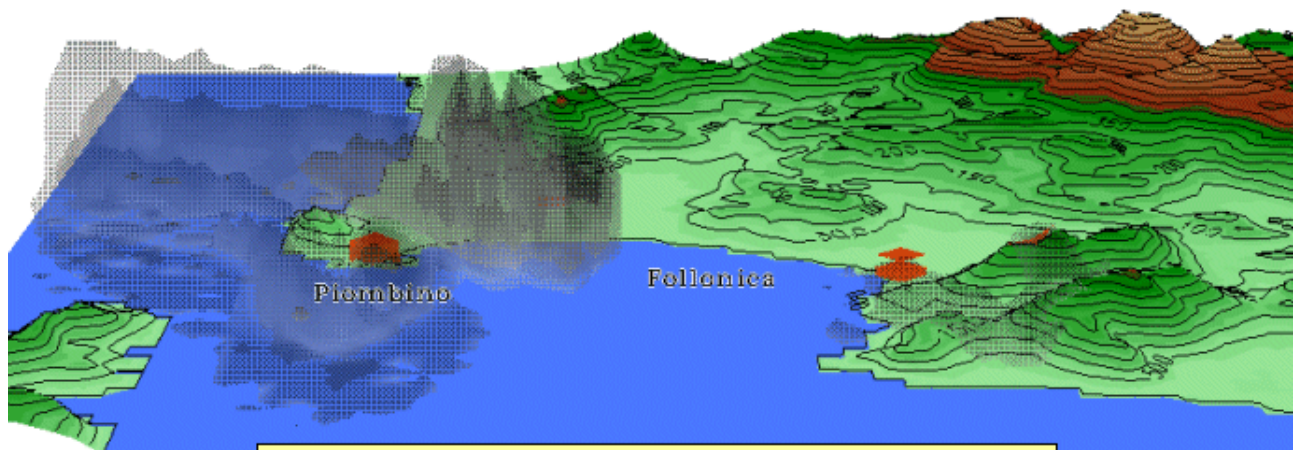
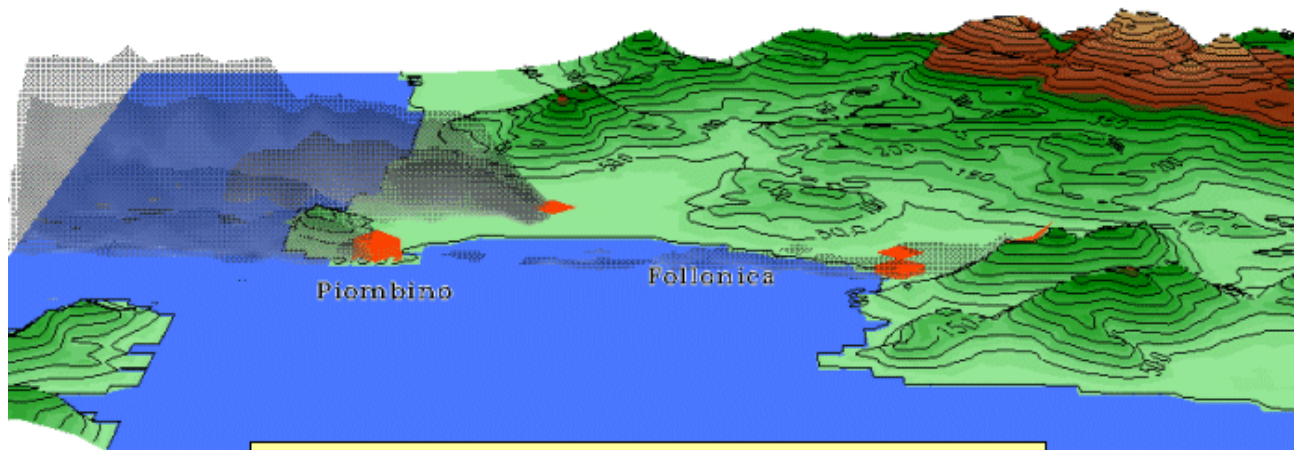
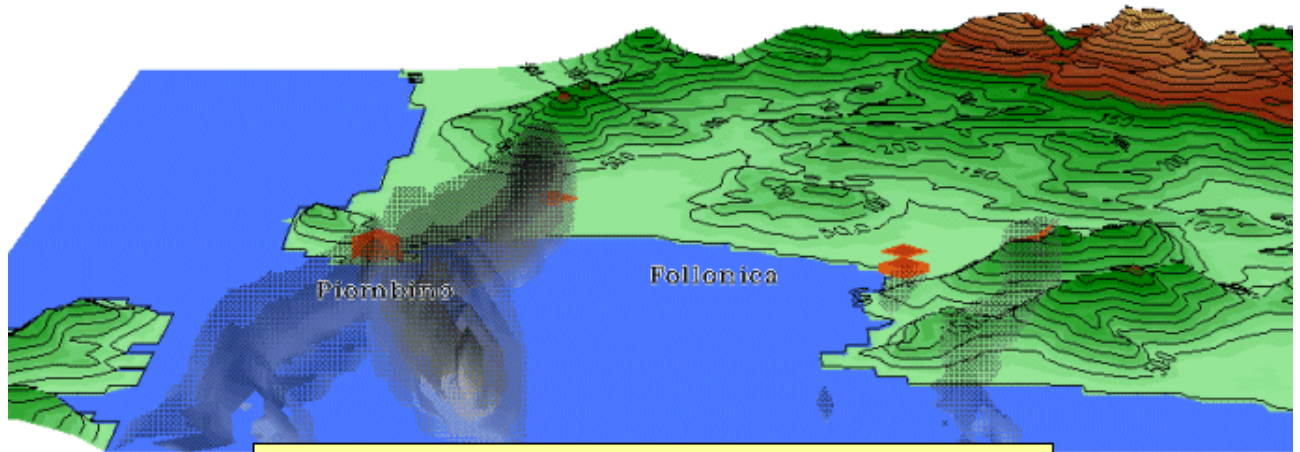


Fig. 113/c - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da SPRAY nell'area di Piombino (hh. 08-16-19).

Di particolare effetto è la dispersione che si presenta alle h. 08:00, quando le isosuperfici di concentrazione dovute alle sorgenti della zona industriale di Piombino danno luogo ad una sorta di biforcazione, che in realtà è il risultato della sovrapposizione dei due distinti pennacchi dovuti ai gas emessi dalle due diverse sorgenti.

Alle h. 16:00 si evidenzia una maggiore dispersione degli inquinanti, soprattutto in verticale, che si spostano verso Ovest.

Nel tardo pomeriggio (h. 19:00), la dispersione degli inquinanti dà luogo ad un andamento estremamente caotico, caratterizzato da una diffusività spaziale molto pronunciata che interessa anche gli strati più alti dell'atmosfera.

6.4 Applicazione del modello HERMES

Le elaborazioni grafiche ottenute applicando il modello HERMES nelle aree di studio di Livorno e Piombino in presenza del tipico giorno invernale e di quello "peggiore" sono riassunte nelle figure che seguono. In particolare, le Figg. 114 e 115 illustrano i casi del sito Livorno durante il giorno tipico e quello "peggiore", rispettivamente, mentre le Figg. 116 e 117 si riferiscono per gli stessi scenari meteo al sito di Piombino.

Un primo sguardo d'insieme di tutte le uscite grafiche elaborate da HERMES mostra delle sostanziali differenze rispetto a quelle ottenute dal modello SPRAY illustrate nel precedente paragrafo. L'approccio tipicamente euleriano di HERMES, che suddivide idealmente il dominio tridimensionale di calcolo in una serie di celle – aventi, come già riferito, dimensioni orizzontali di $1 \times 1 \text{ Km}^2$ –, sortisce l'effetto di una più omogenea diffusione spaziale dell'inquinante in atmosfera, col risultato visivo di produrre isosuperfici di concentrazione ben smussate. Al contrario, nell'approccio lagrangiano di SPRAY, che segue il tragitto di ogni singola particella d'inquinante per tutto il suo percorso a partire dalla sorgente, il meccanismo della diffusione risente fortemente del moto di tali particelle – e quindi della loro presenza o meno in un determinato punto dello spazio –, col risultato grafico che le isosuperfici di concentrazione presentino una forma decisamente più irregolare.

Altra sostanziale differenza nelle uscite prodotte dai due modelli in questione riguarda i livelli di concentrazione, che nel caso di HERMES risultano nettamente superiori a quelli di SPRAY. Ciò può essere spiegato ricordando che HERMES opera una trattazione particolarmente semplificata della turbolenza atmosferica (§ 6.3), la quale – soprattutto in direzione verticale – risulta assai poco sviluppata.

6.4.1 Concentrazioni di SO_x nell'area di Livorno

Come già osservato, le condizioni anemologiche che governano la tipica mattina invernale nell'area di studio di Livorno (Fig. 114/a) presentano correnti dirette da terra verso il mare, cioè in direzione Ovest.

Alle h. 06:00, una situazione di sviluppata turbolenza atmosferica dà origine a isosuperfici di concentrazione estremamente estese, caratterizzate da livelli di concentrazione sostanzialmente inferiori a quelle prodotte nella medesima situazione dal modello SPRAY. Le sorgenti che danno un maggior contributo si confermano quelle di Rosignano Solvay e soprattutto della zona industriale di Livorno, mentre praticamente trascurabile può dirsi il contributo all'inquinamento dovuto agli altri impianti compresi nell'area di studio.

I più alti livelli di concentrazione risultano senz'altro quelli provocati dai molteplici camini degli impianti di produzione ubicati nella zona del porto di Livorno, come appare evidente anche nella tarda mattinata (h. 12:00). L'area urbana di Livorno, posta proprio sottovento rispetto a tali sorgenti, appare pertanto fortemente penalizzata dai suddetti rilasci di SO_x , che danno luogo ad elevati livelli di concentrazione e che si estendono peraltro in un'ampia fascia spaziale nella zona di mare antistante il porto. Le isosuperfici di concentrazione ricostruite da HERMES presentano inoltre valori più alti di quelle ricostruite da SPRAY.

È comunque nel corso del pomeriggio che si raggiungono le condizioni più gravose per la qualità dell'aria (Fig. 114/b). Il riflusso delle masse d'aria, richiamate da terra a partire all'incirca dalle h. 15:00, determina un forte ristagno degli inquinanti nelle aree vicine alle maggiori sorgenti d'emissione, in particolare nella zona industriale di Livorno.

Condizioni ancora più sfavorevoli si presentano nel tardo pomeriggio (h. 18:00), quando l'inquinamento prodotto dal complesso industriale di Livorno si diffonde per l'intera vallata a monte della foce dell'Arno, con valori di concentrazione elevati. C'è da aggiungere che, sebbene in misura minore, anche le emissioni generate dall'impianto di Rosignano Solvay risultano responsabili di condizioni inquinamento, che interessano la vasta area collinare posta nell'entroterra.

I *frames* presentati in Fig. 114/c illustrano con maggiore completezza il quadro della dispersione degli SO_x modellizzata da HERMES nel corso del giorno tipico per il sito di Livorno.

Nel corso della mattina (h. 08:00) la diffusione degli inquinanti si mostra ben pronunciata anche in direzione verticale, per quanto le fasce più alte di concentrazione risultino confinate in un'area dello spazio piuttosto limitata.

Nel pomeriggio (h. 16:00), e cioè nella fase in cui risultano maggiormente interessate le zone costiere, la diffusione in verticale pare ridursi, determinando di conseguenza il formarsi di una stretta fascia di concentrazioni.

Un quadro simile si presenta nel tardo pomeriggio (h. 19:00), quando condizioni di stabilità atmosferica ben stratificate impediscono la diffusione verso l'alto degli inquinanti emessi dalle sorgenti, comportando pertanto ricadute al suolo di maggiore entità. La dispersione a bassa quota degli SO_x nella zona a monte di Rosignano non interagisce in maniera sensibile con le condizioni orografiche del terreno, nel senso che i rilievi dell'entroterra non svolgono appieno la funzione di barriera allo spostamento delle masse d'aria che veicolano gli inquinanti, col risultato che gli stessi tendono a seguire il loro profilo ed a raggiungere anche le zone più interne.

Nelle illustrazioni di Fig. 115 sono rappresentate graficamente le dinamiche che caratterizzano la dispersione degli inquinanti durante il giorno "peggiore".

Alle h. 06:00 (Fig. 115/a) le condizioni di qualità dell'aria – in particolare sottovento rispetto alle grossi sorgenti della zona di Livorno – si presentano peggiori di quelle alla stessa ora del giorno tipico, sia nei valori di concentrazione che nell'estensione spaziale raggiunta dal fenomeno.

Sostanzialmente analogo al caso del giorno tipico è l'andamento della dispersione che si presenta in tarda mattinata (h. 12:00), sia nei valori quantitativi che qualitativamente, cioè nella forma delle isosuperfici di concentrazione.

Apprezzabilmente differente da tutto quanto fin qui visto è lo scenario di dispersione ricorrente nel primo pomeriggio (h. 15:00), soprattutto per il sovrapporsi di condizioni atmosferiche diverse tra le due zone di Livorno e di Rosignano (Fig. 115/b). Mentre infatti la vallata dell'Arno è dominata da venti diretti verso Ovest, nella zona di Rosignano le correnti sono invece dirette verso Sud. Fermo restando che in prossimità delle sorgenti industriali le concentrazioni di SO_x presentino valori elevati, il forte rimescolamento atmosferico che caratterizza tale fase della giornata fa sì che l'inquinamento raggiunga estensioni spaziali davvero considerevoli, tali da interessare praticamente l'intera fascia di mare antistante la linea costiera.

Tale situazione appare ben diversa dalla analoga relativa al giorno tipico, e al contempo anche da quella modellizzata da SPRAY (Fig. 111/b). A parte i livelli di concentrazione più alti, la grande differenza delle stime ottenute da HERMES rispetto a quelle di SPRAY riguarda il fatto che le isosuperfici di concentrazione elaborate da HERMES tendano a fondersi tra loro, mentre in quelle ottenute da SPRAY si evidenzia la netta separazione tra i pennacchi originati dagli impianti di Livorno e da quelli di Rosignano Solvay.

Ciò appare ancora più evidente alle h. 18:00, che fotografa senz'altro il raggiungimento delle condizioni più acute d'inquinamento, sia per le quantità localmente raggiunte, che per l'estensione spaziale notevolissima del fenomeno.

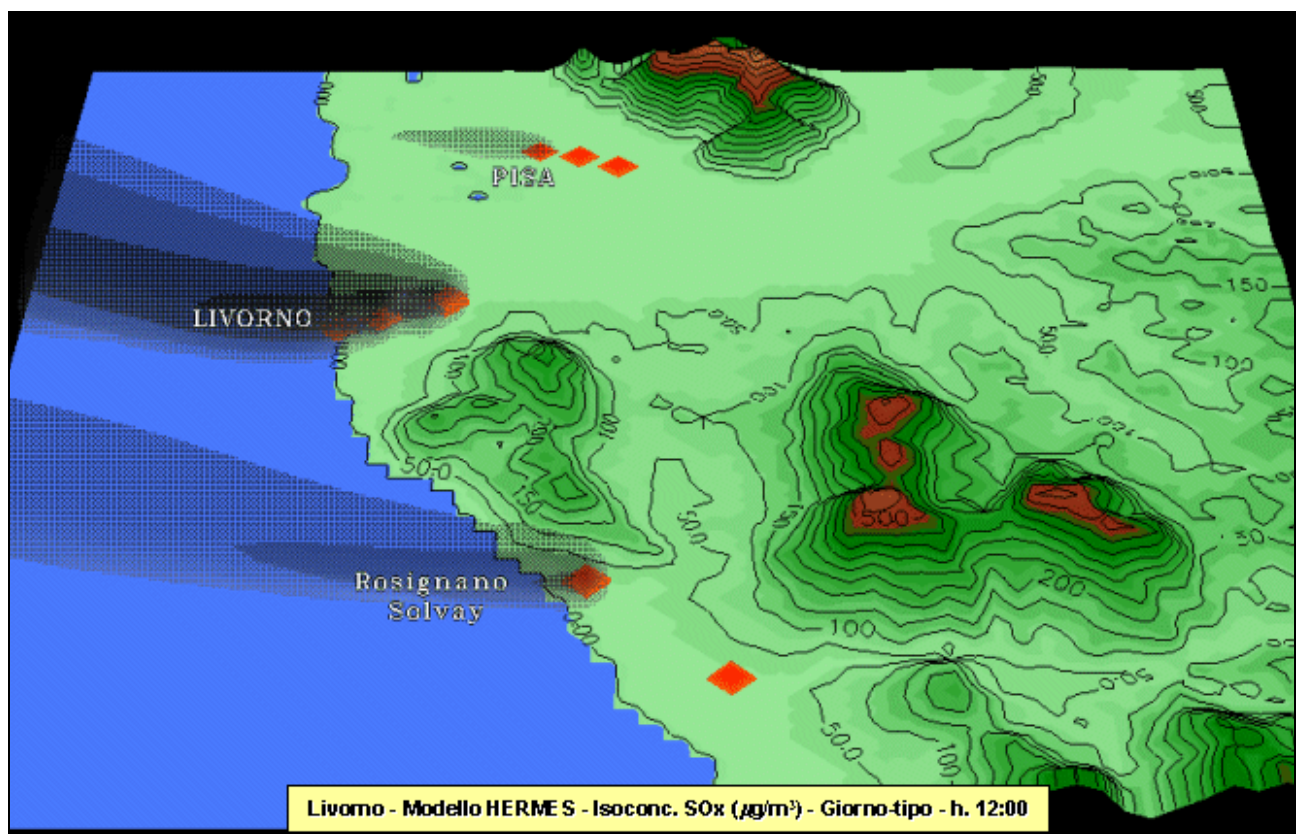
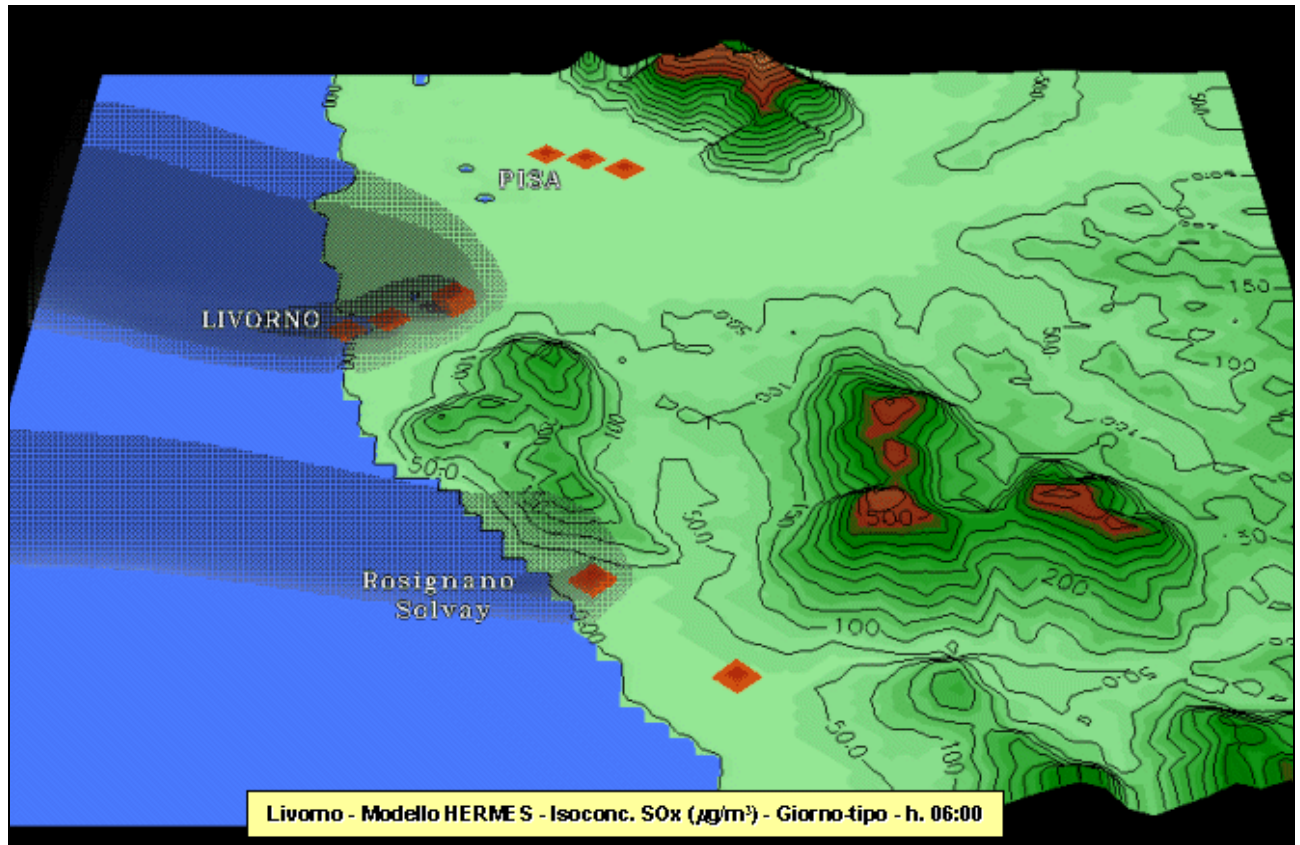


Fig. 114/a – Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da HERMES nell'area di Livorno (hh. 06-12).

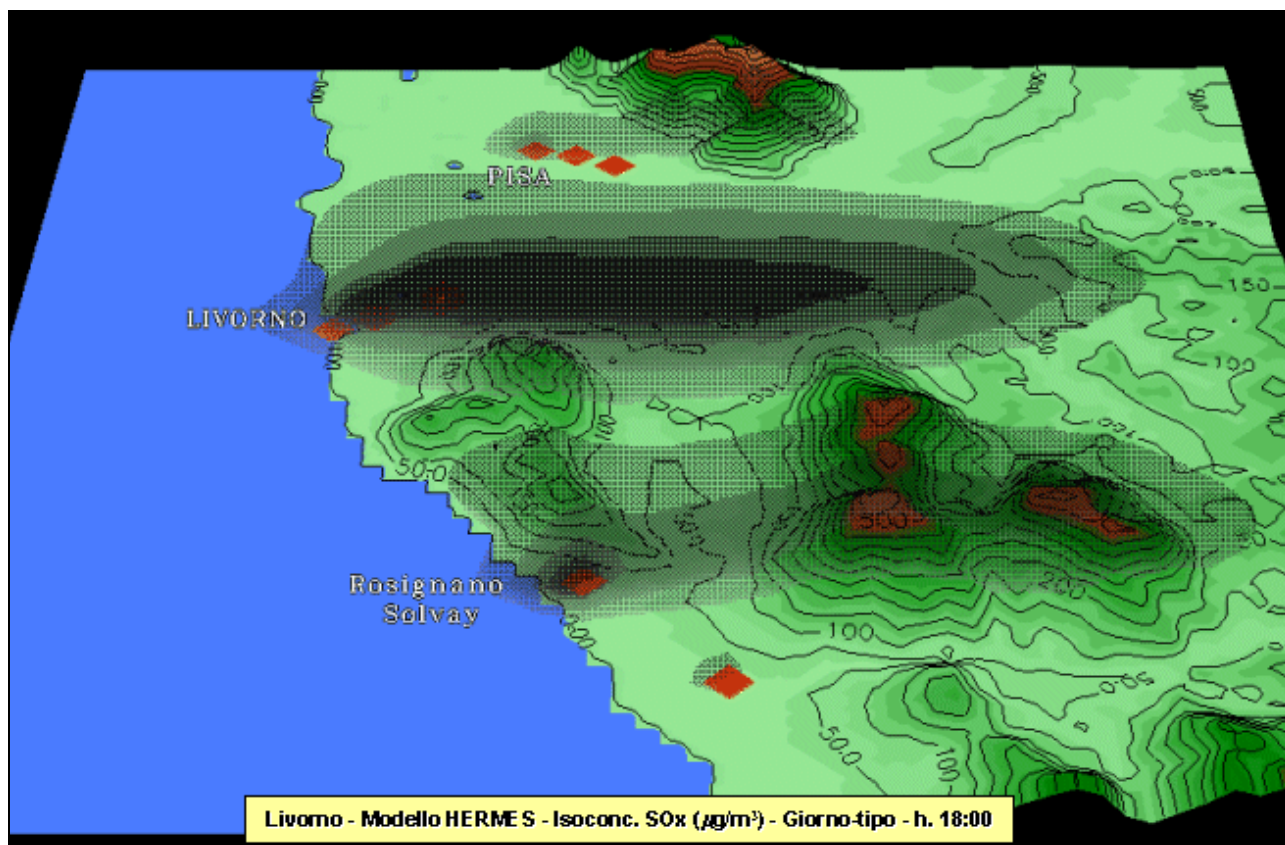
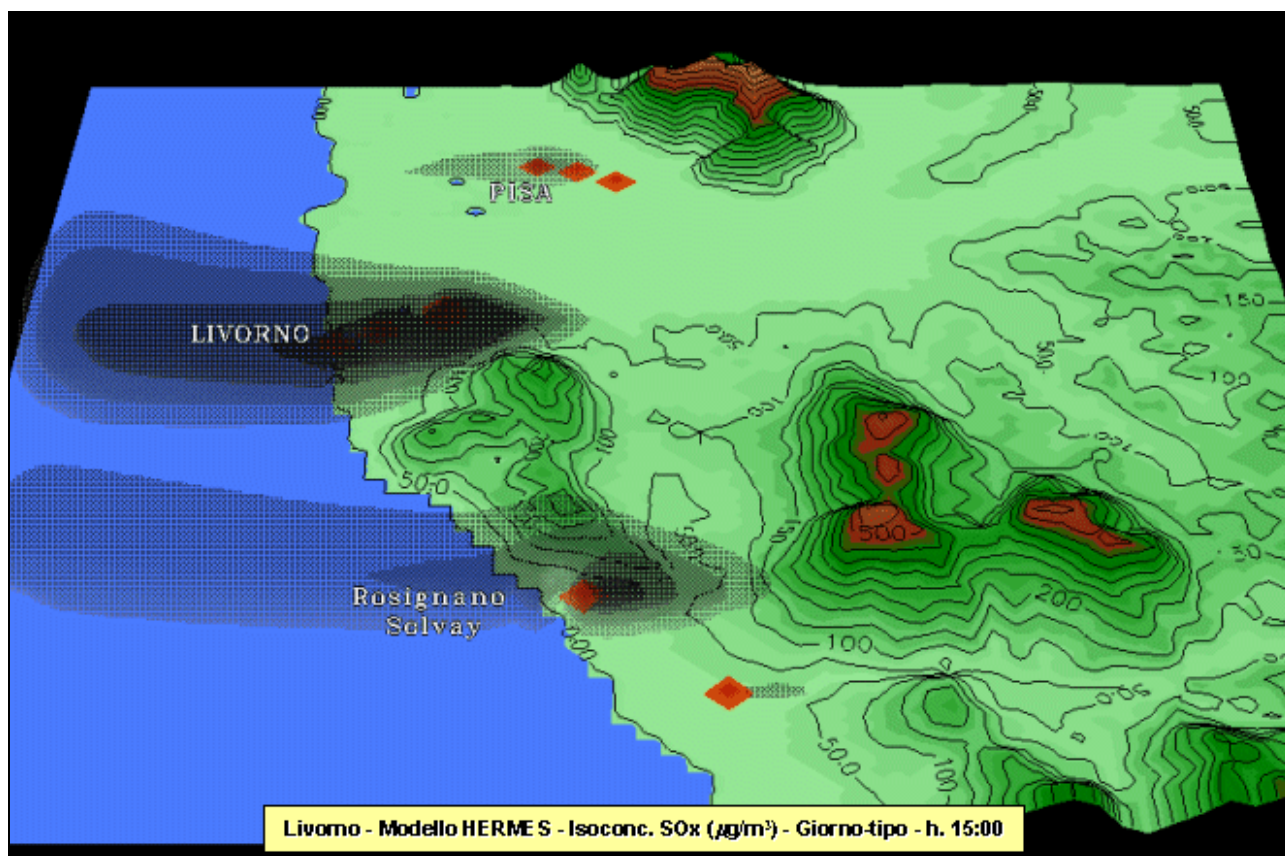


Fig. 114/b – Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da HERMES nell'area di Livorno (hh. 15-18).

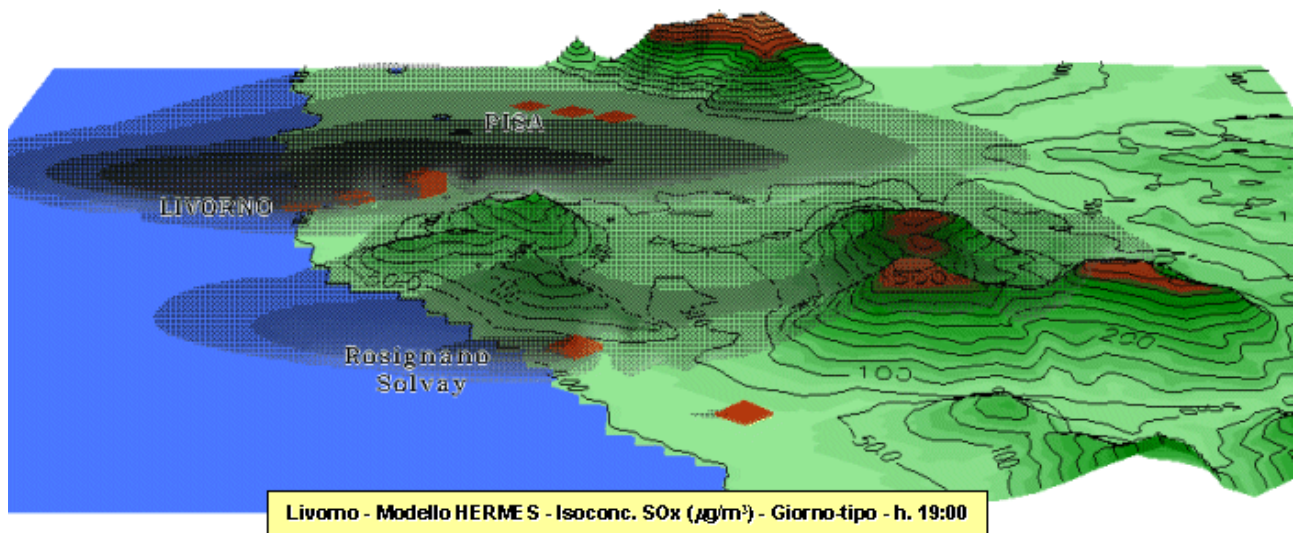
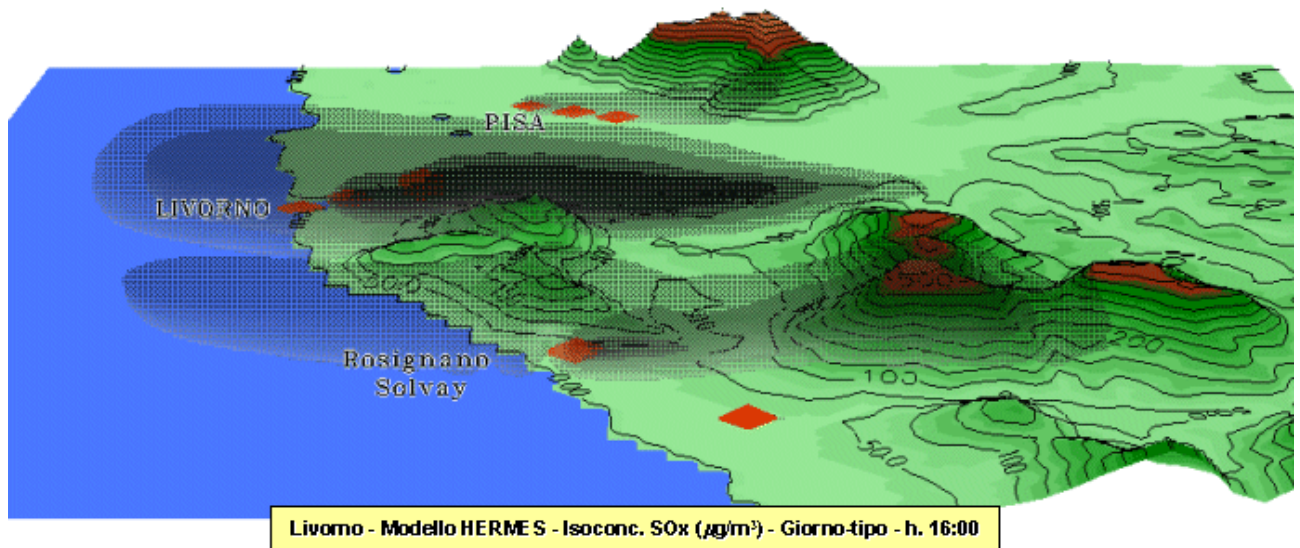
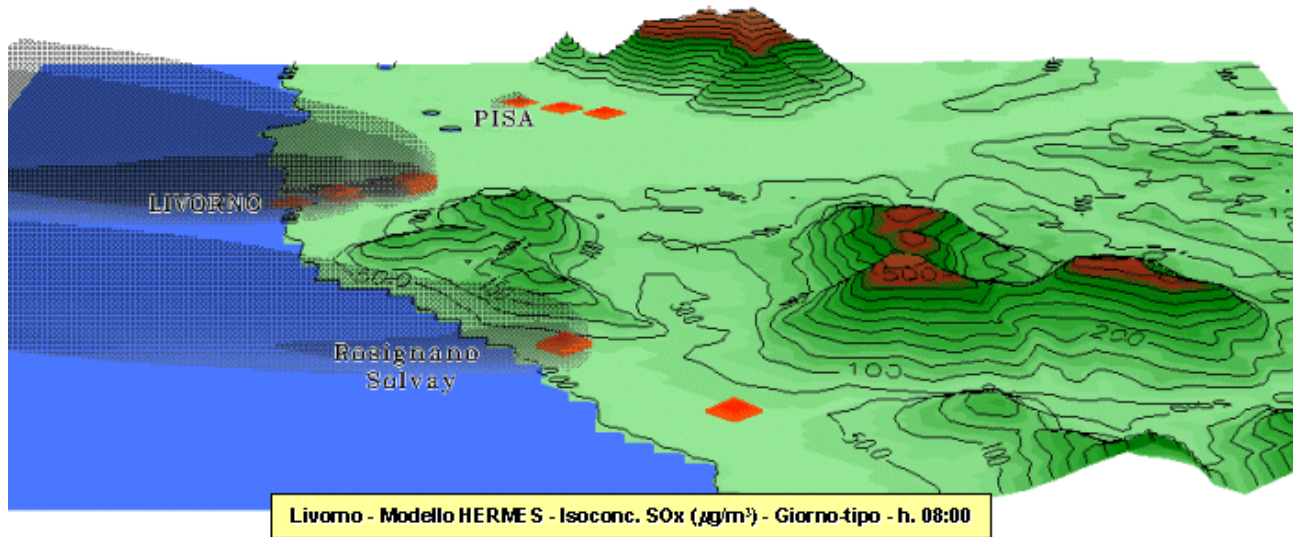


Fig. 114/c – Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da HERMES nell'area di Livorno (hh. 08-16-19).

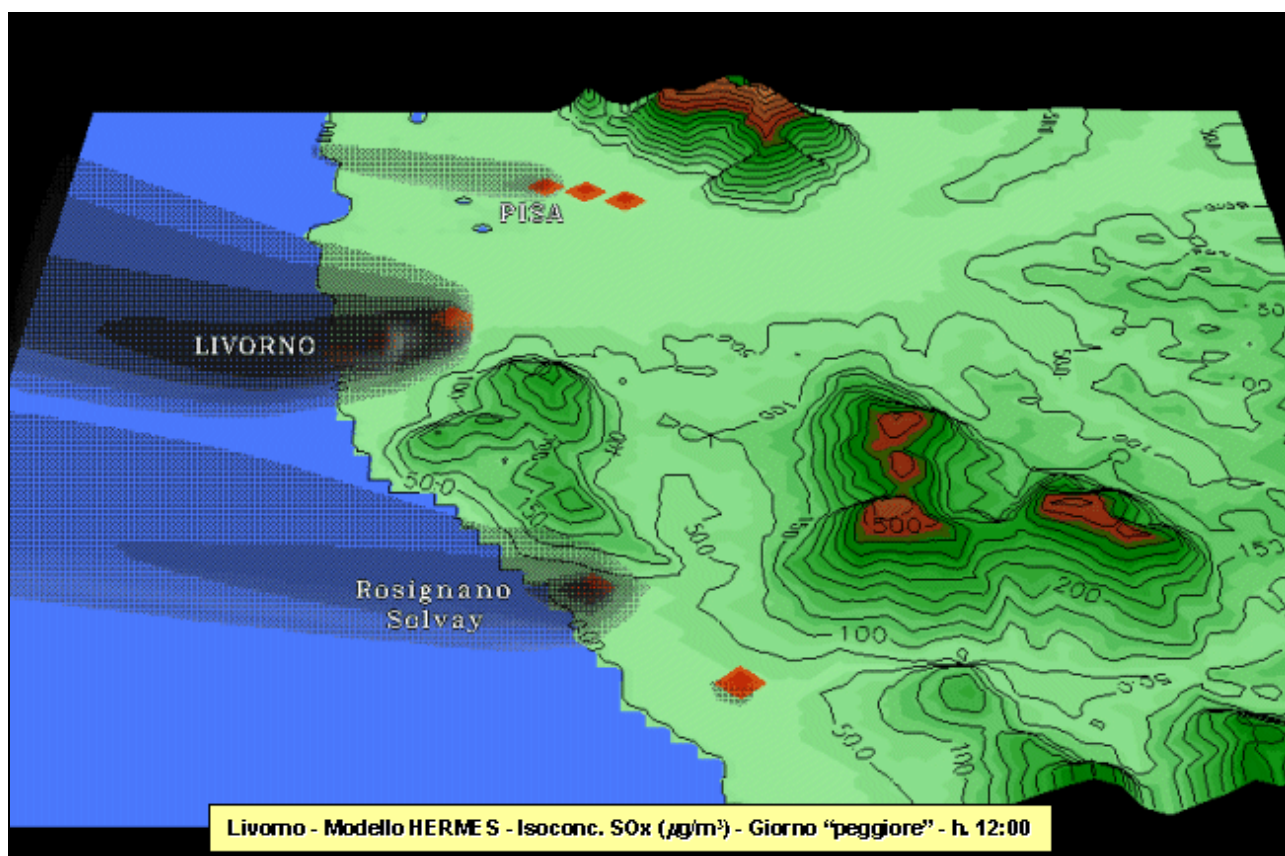
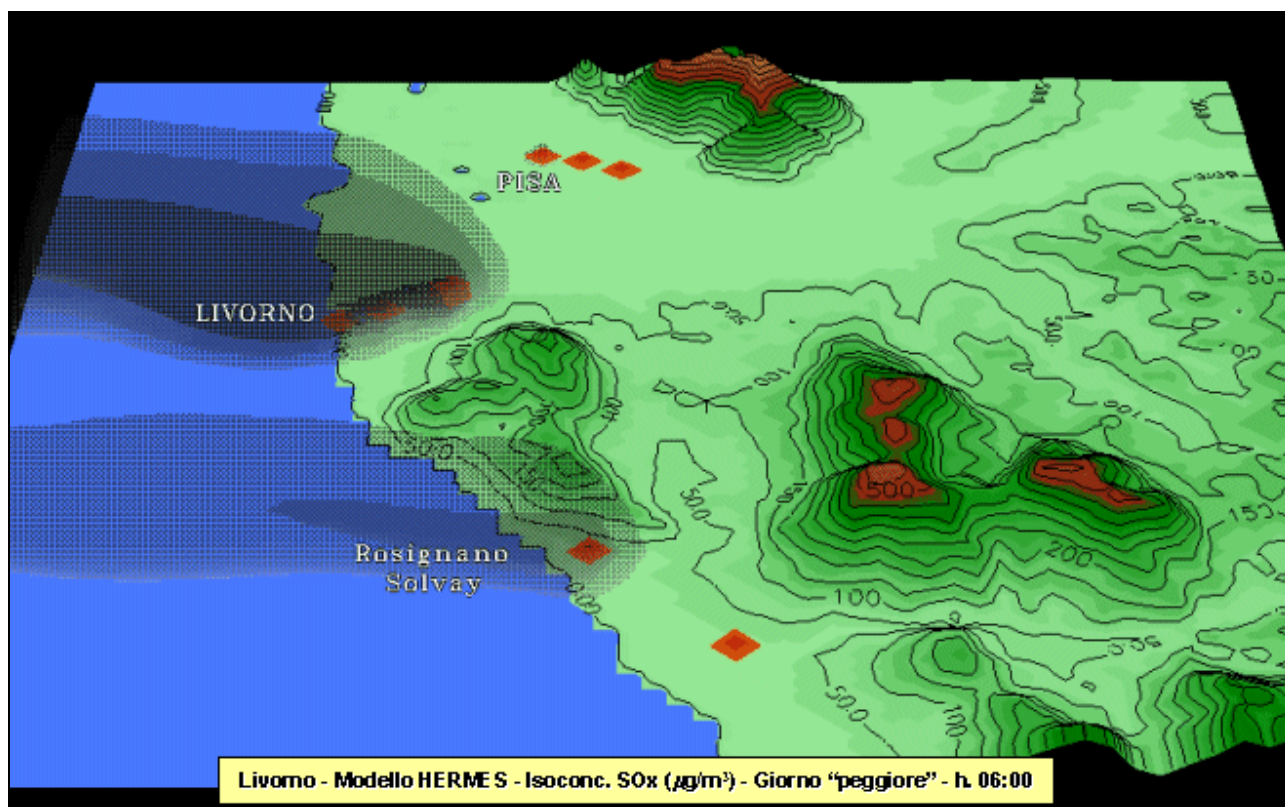


Fig. 115/a - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da HERMES nell'area di Livorno (hh. 06-12).

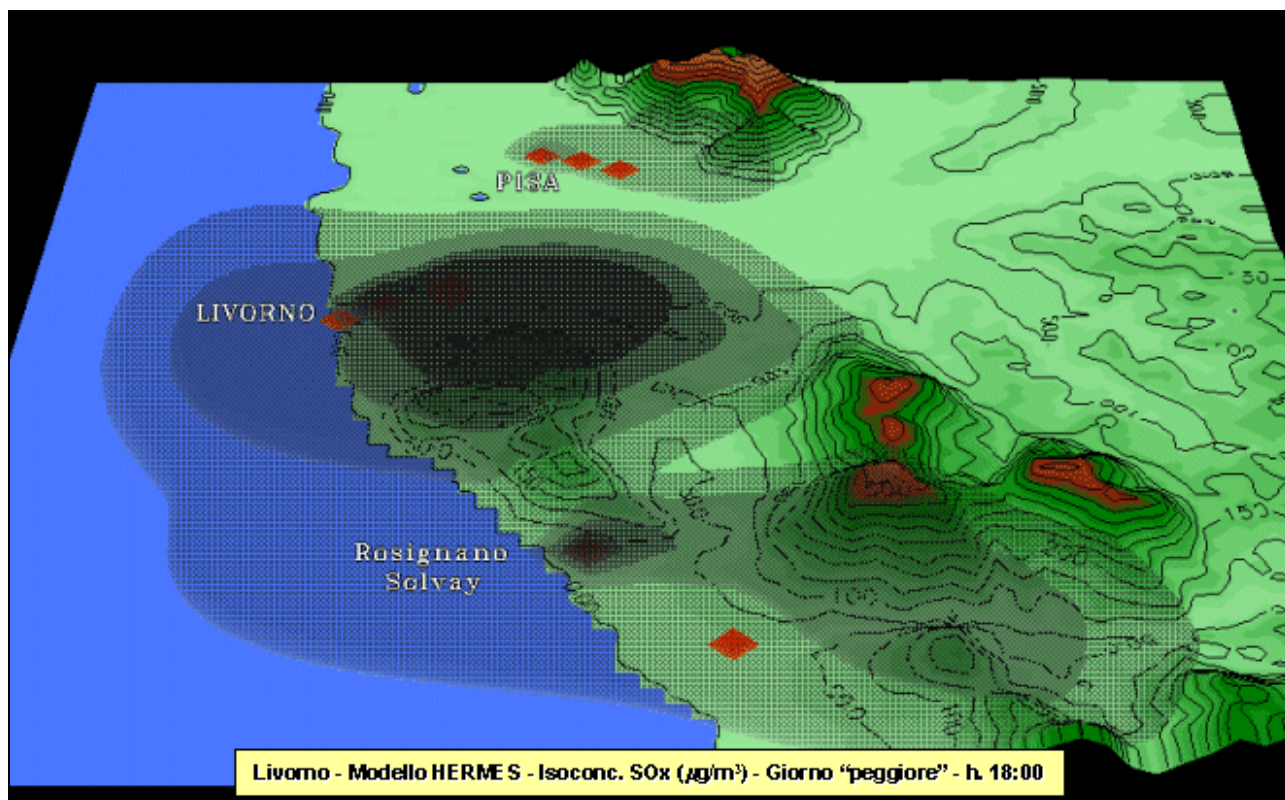
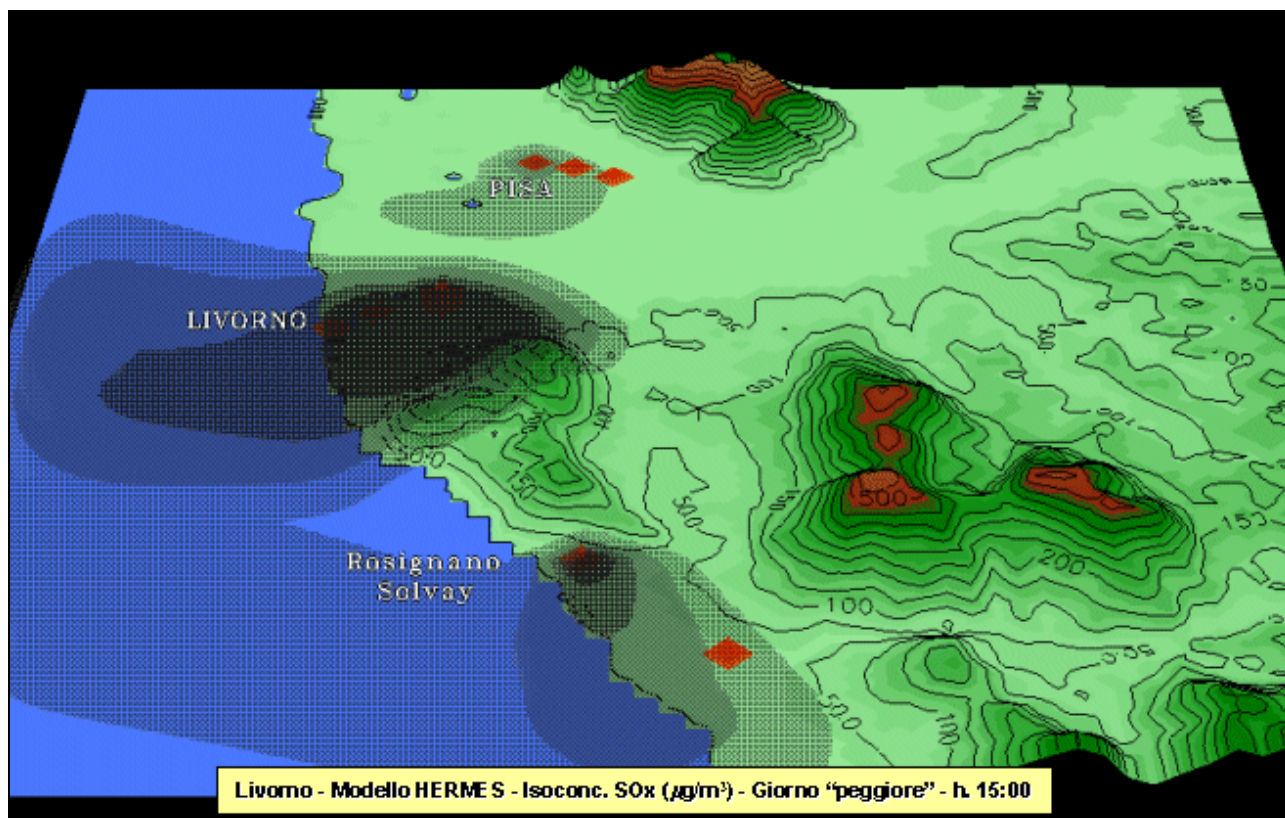
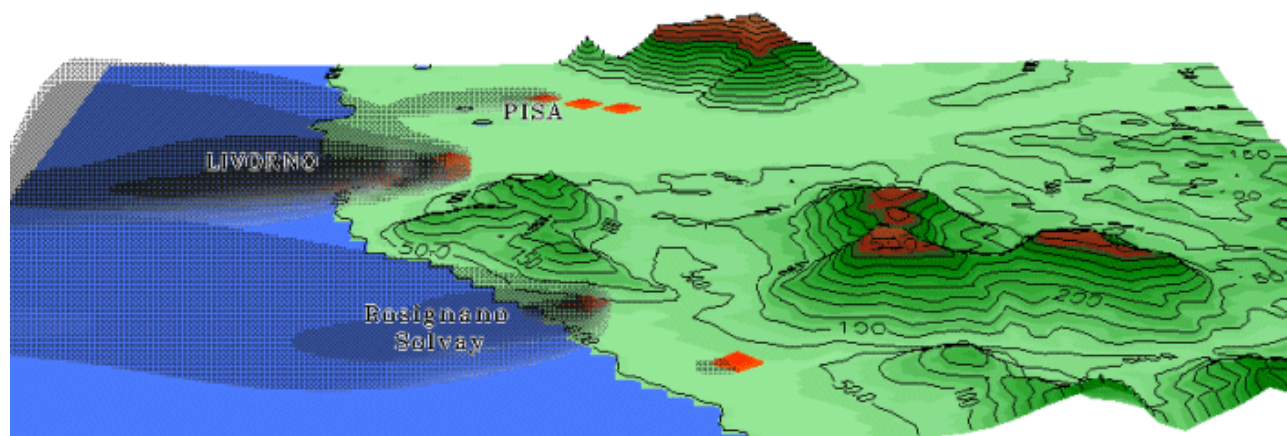
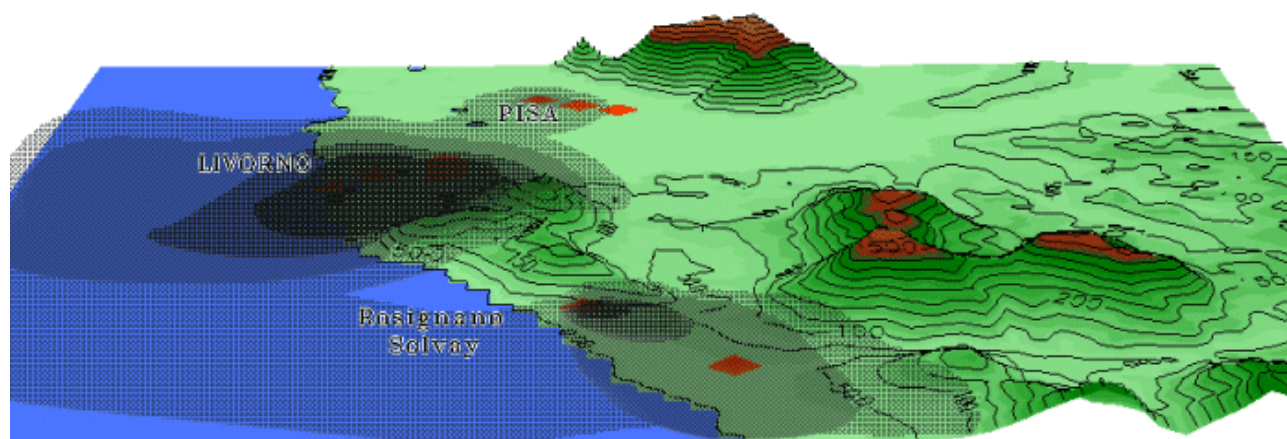


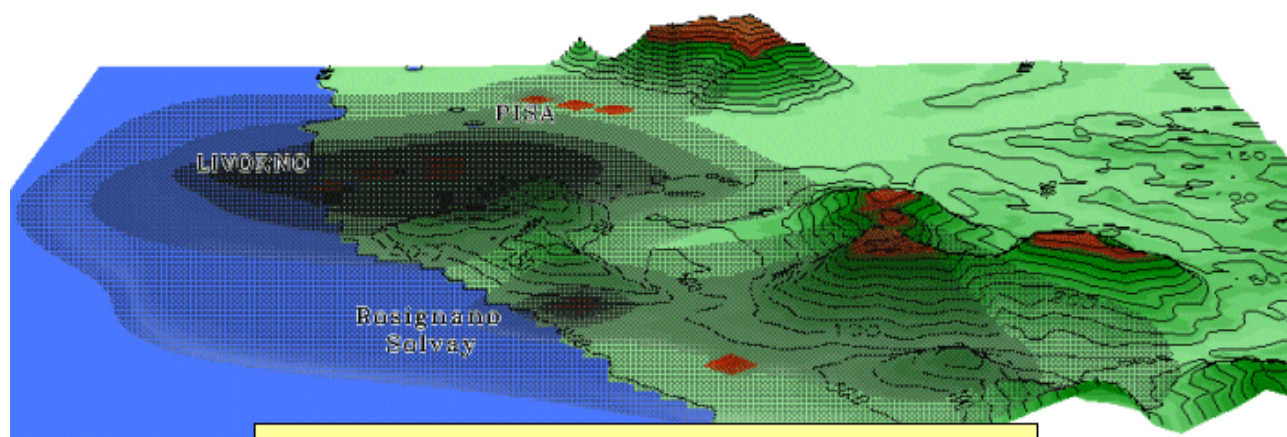
Fig. 115/b - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da HERMES nell'area di Livorno (hh. 15-18).



Livorno - Modello HERMES - Isoconc. SO_x (µg/m³) - Giorno "peggiore" - h. 08:00



Livorno - Modello HERMES - Isoconc. SO_x (µg/m³) - Giorno "peggiore" - h. 16:00



Livorno - Modello HERMES - Isoconc. SO_x (µg/m³) - Giorno "peggiore" - h. 19:00

Fig. 115/c - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da HERMES nell'area di Livorno (hh. 08-16-19).

La visuale fornita nelle Figg. 115/c indica come il fenomeno della dispersione non raggiunga in altezza le stesse proporzioni che assume in orizzontale.

Sia alle h. 08:00 che alle h. 16:00, in termini qualitativi l'andamento modellizzato da HERMES presenta delle analogie con quello ottenuto da SPRAY, sebbene la diffusione degli inquinanti simulata da HERMES appaia maggiormente sviluppata.

Al contrario, alle h. 19:00 le isoconcentrazioni ottenute da HERMES conservano l'aspetto tipico delle ore precedenti, denotando cioè un forte confinamento verso gli strati più bassi dell'atmosfera, e quindi discostandosi notevolmente dal caotico andamento ricostruito da SPRAY (Fig. 111/c), evidenza di un'accentuata diffusività verticale, e quindi di condizioni di pronunciata turbolenza.

6.4.2 Concentrazioni di SO_x nell'area di Piombino

Per l'area di studio di Piombino, la modellizzazione da parte di HERMES della dispersione degli SO_x rilasciati dai grossi camini industriali presenti è illustrata nelle figure che seguono, relative al giorno tipico (Fig. 116) e a quello "peggiore" (Fig. 117). Anche in questo caso, da un primo sguardo d'insieme appare evidente la diversità di risultato ottenuta rispetto al modello SPRAY (Figg. 112 e 113), sia in termini quantitativi che qualitativi.

Le prime ore (h. 06:00) del tipico giorno invernale sono dominate da venti che spirano verso Sudovest (Fig. 116/a). La ricostruzione da parte di HERMES – in particolare – della dispersione degli SO_x emessi nella zona industriale di Piombino dà luogo a conseguenze ben più gravi di quelle poste in luce da SPRAY (Fig. 112/a): più elevati risultano i valori delle concentrazioni, e al tempo stesso più ampia si presenta l'estensione delle corrispondenti isosuperfici, al punto che ad essere investito dalle ricadute degli inquinanti risulta l'intero versante orientale dell'Isola d'Elba.

Nella tarda mattinata (h. 12:00), rispetto a SPRAY la dispersione degli inquinanti ripropone le stesse conclusioni appena formulate: nella struttura, le isosuperfici di concentrazione appaiono simili, con la differenza che però maggiore è la loro estensione spaziale – e quindi più spiccata la diffusione degli inquinanti –, e inoltre più alti risultano i valori di concentrazione.

Anche nel primo pomeriggio (h. 15:00) il confronto tra i risultati di HERMES e SPRAY si mantiene sulla stessa linea (Fig. 116/b), nel senso che pressoché analogo appare il trasporto delle particelle, dirette verso Nord-Nordovest, mentre molto più accentuata è la diffusione trasversale ricostruita da HERMES. In tal caso, ad essere investita dalla dispersione degli inquinanti risulta l'intera fascia costiera a Nord di Piombino, a partire da Populonia fino a Marina di Castagneto. Marginalmente interessate dall'inquinamento industriale risultano le aree dell'entroterra di Follonica.

Alle h. 18:00 lo scenario di qualità dell'aria ben di poco si discosta da quello di tre ore prima, sia qualitativamente che quantitativamente.

Utilizzando la visuale in sezione (Fig. 116/c), nella prima mattinata del giorno tipico (h. 08:00) appare ancora più evidente come il Canale di Piombino – e quindi il versante dell'Isola d'Elba che su di esso si affaccia – sia investito dai gas emessi dai camini della zona di Piombino. Anche in questo caso – come del resto nell'illustrazione delle h. 16:00 – i livelli delle isoconcentrazioni ottenute da HERMES si dimostrano superiori a quelli modellizzati da SPRAY. Sempre alle h. 16:00, il confronto con le analoghe elaborazioni ottenute da SPRAY (Fig. 112/c) sottolinea ancora una volta come la diffusione verticale degli inquinanti risulti abbastanza ostacolata, e quindi molto più confinata verso il basso.

Nel tardo pomeriggio (h. 19:00), al contrario, le isosuperfici di concentrazione ottenute applicando HERMES si presentano più estese sia verticalmente che trasversalmente, segno che la diffusione spaziale degli inquinanti gassosi risulti molto più sviluppata. Per l'intera durata del pomeriggio e della prima serata, in ogni caso, l'area investita dalle emissioni gassose è la fascia costiera di Venturina e S. Vincenzo.

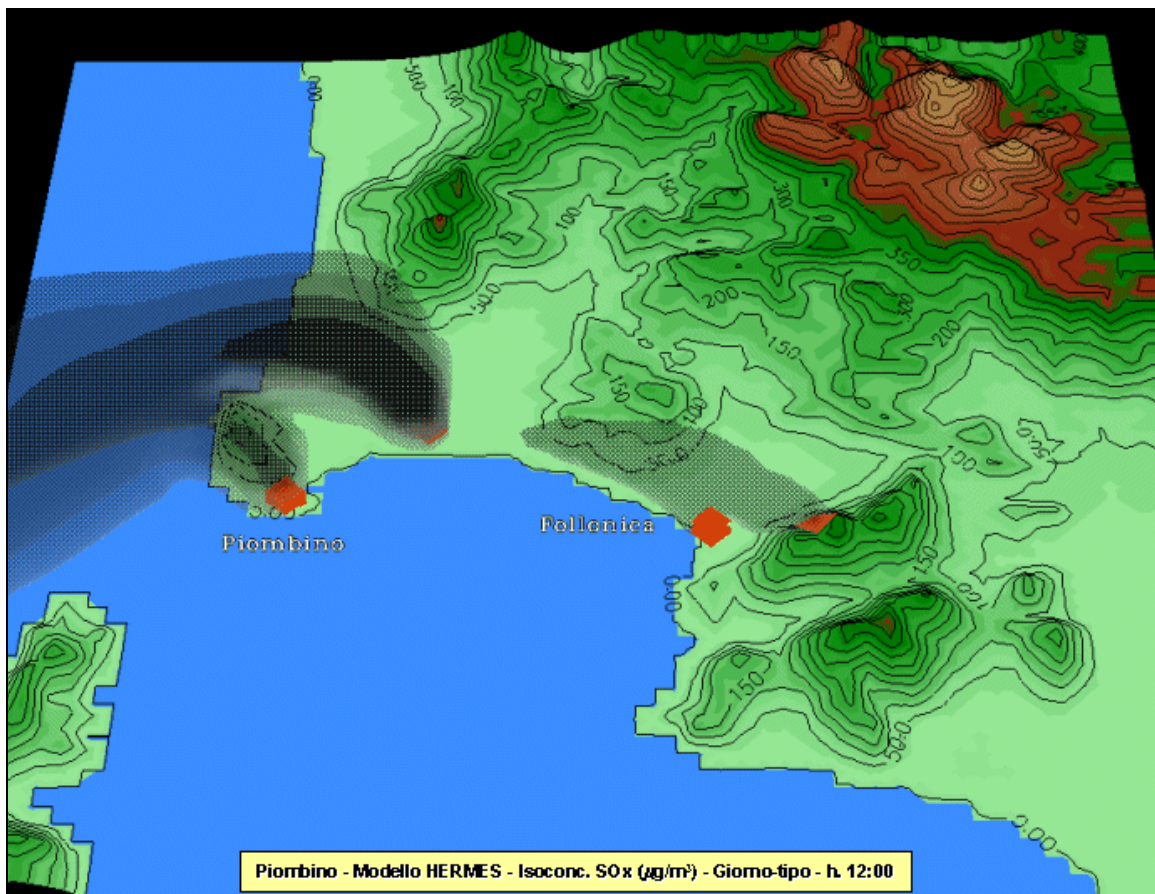
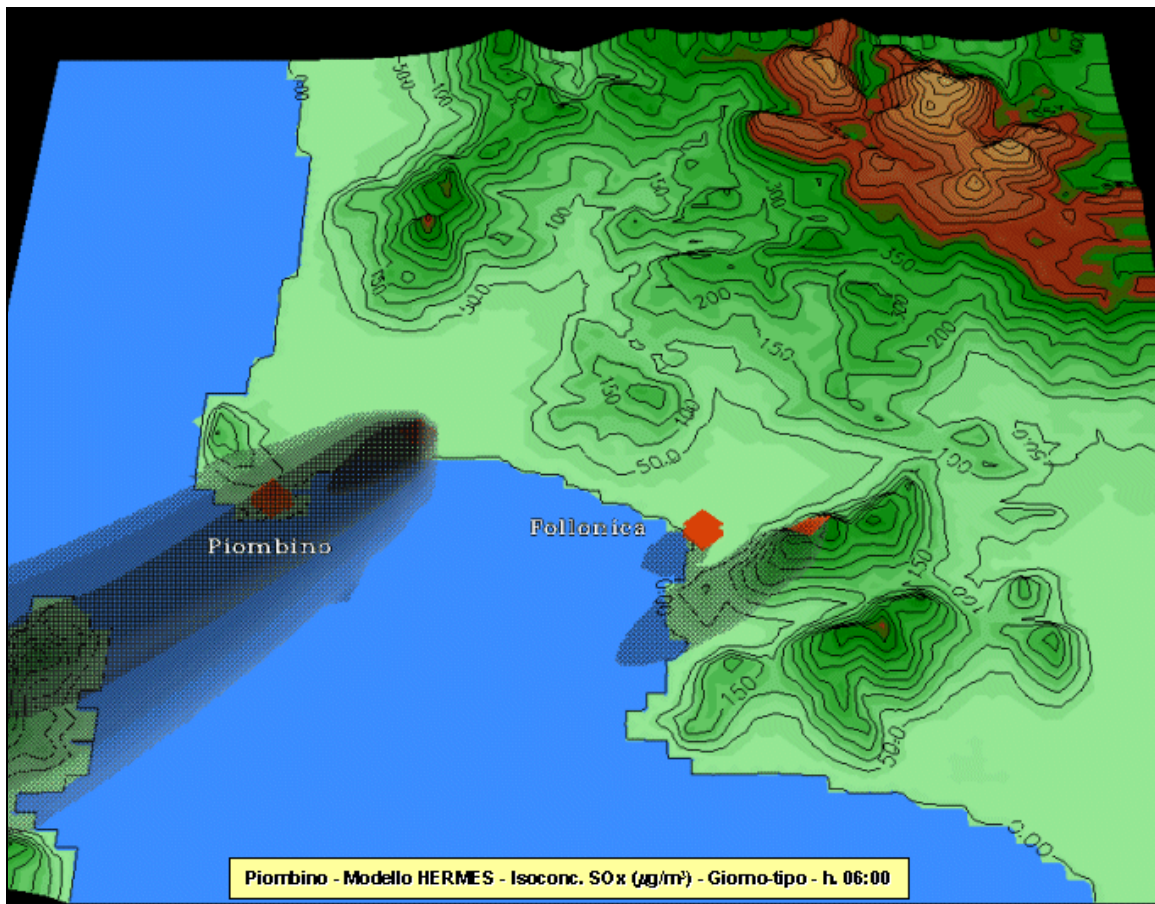


Fig. 116/a - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da HERMES nell'area di Piombino (hh. 06-12).

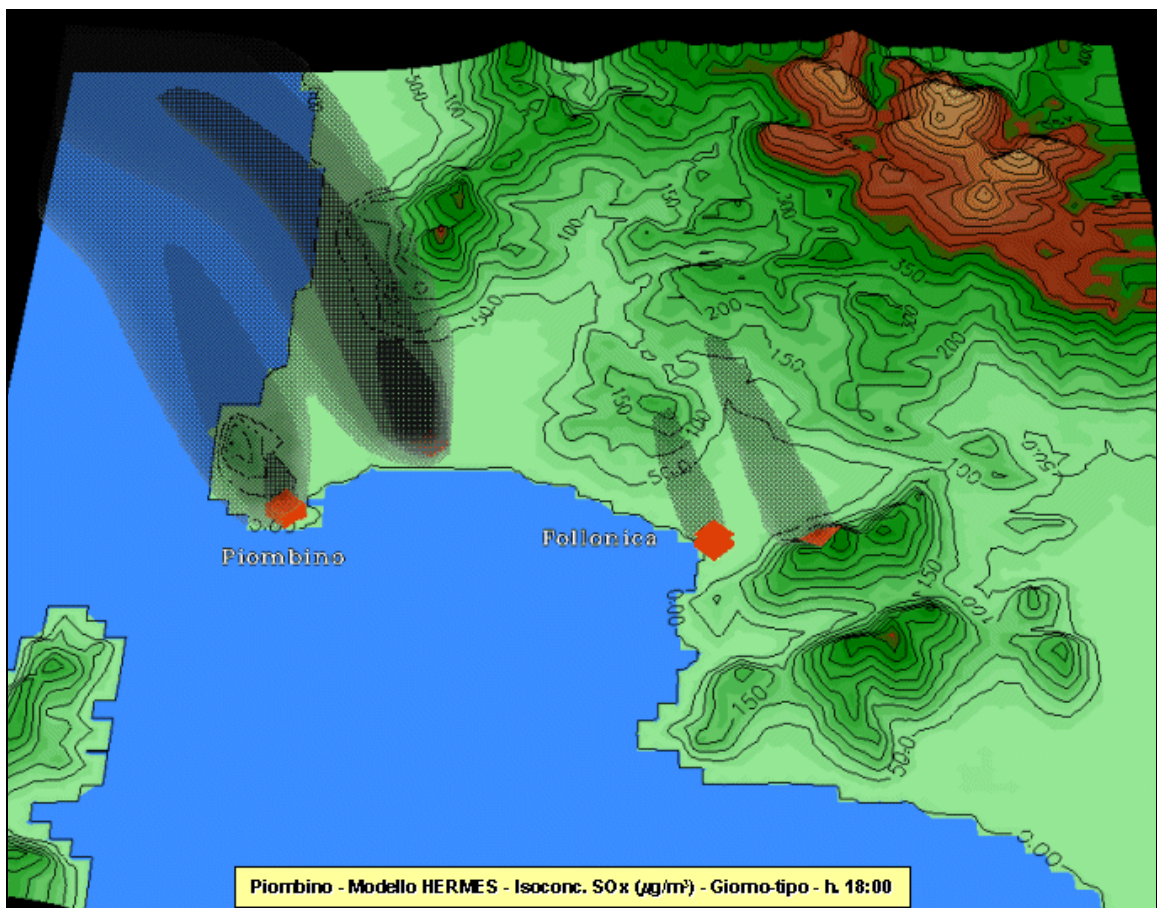
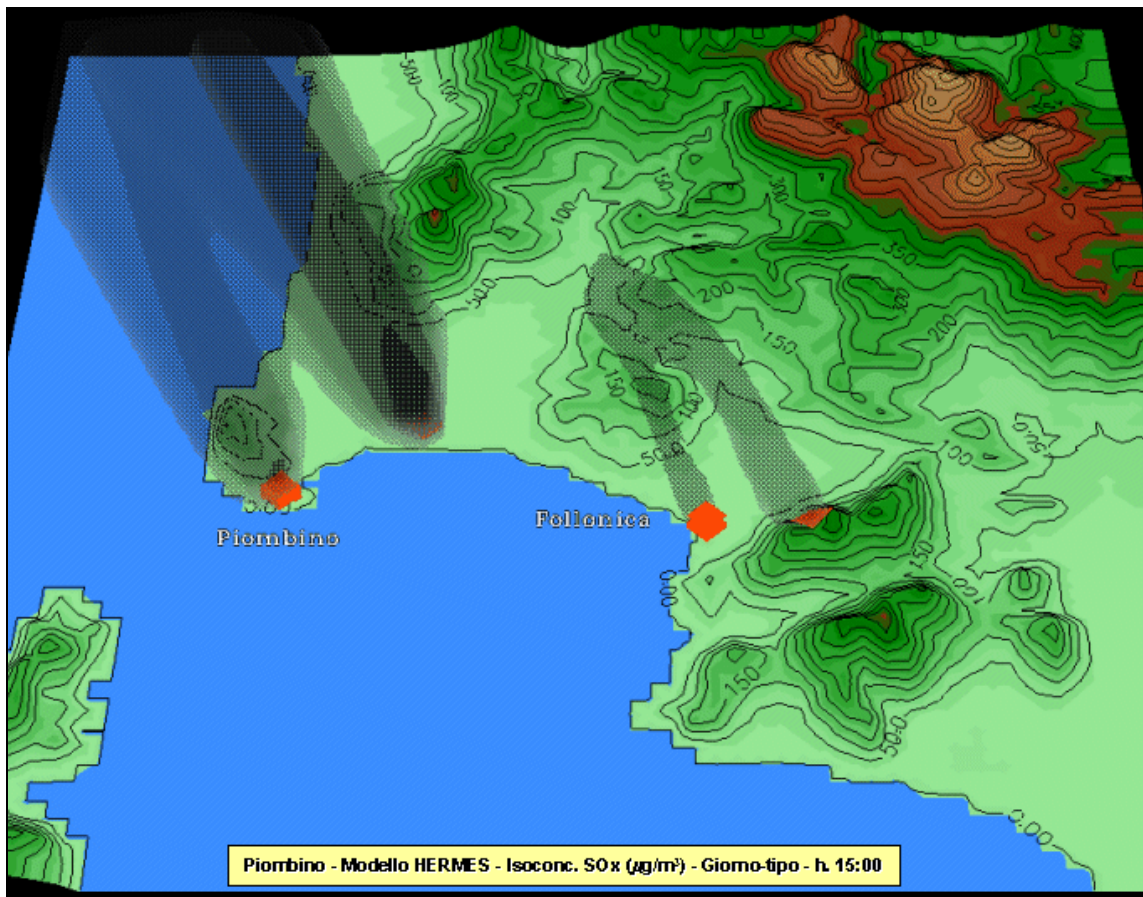


Fig. 116/b - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da HERMES nell'area di Piombino (hh. 15-18).

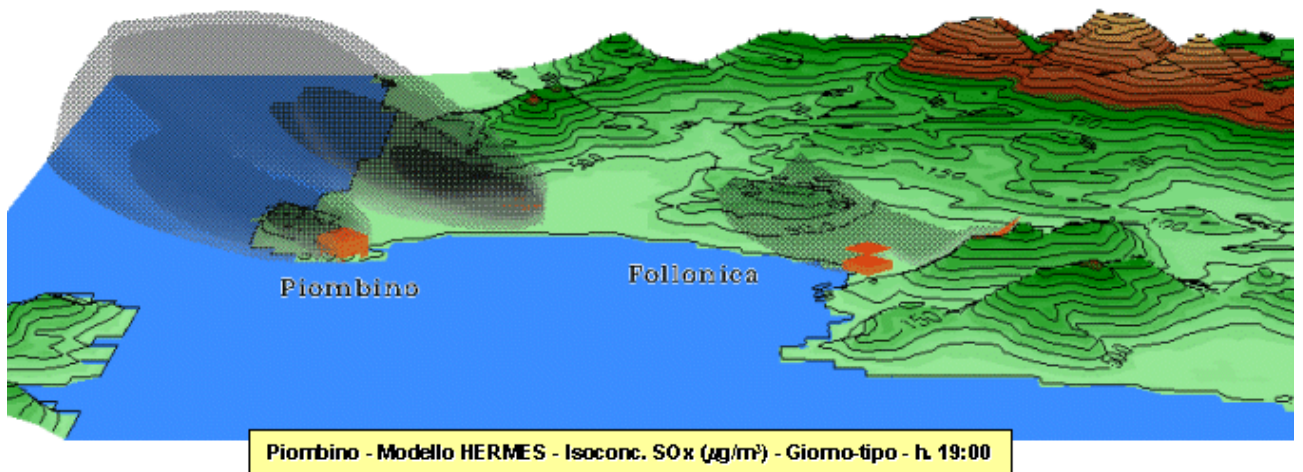
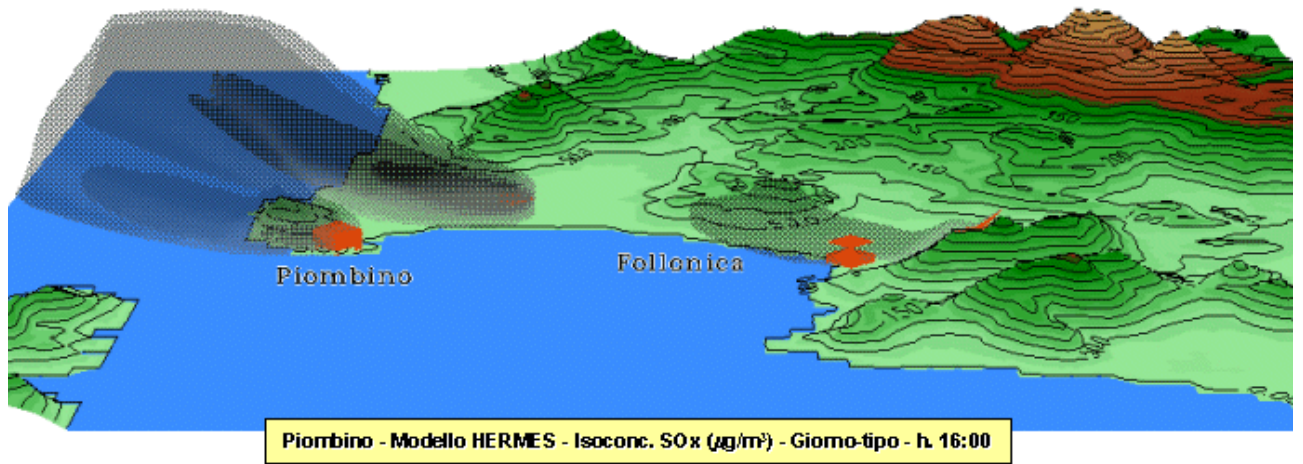
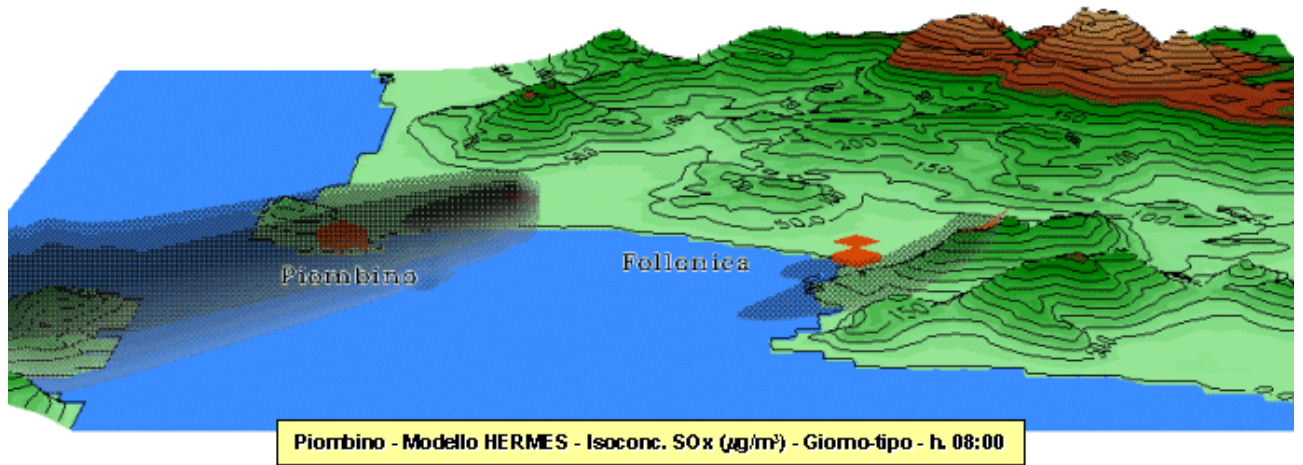


Fig. 116/c - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno tipico ricostruite da HERMES nell'area di Piombino (hh. 08-16-19).

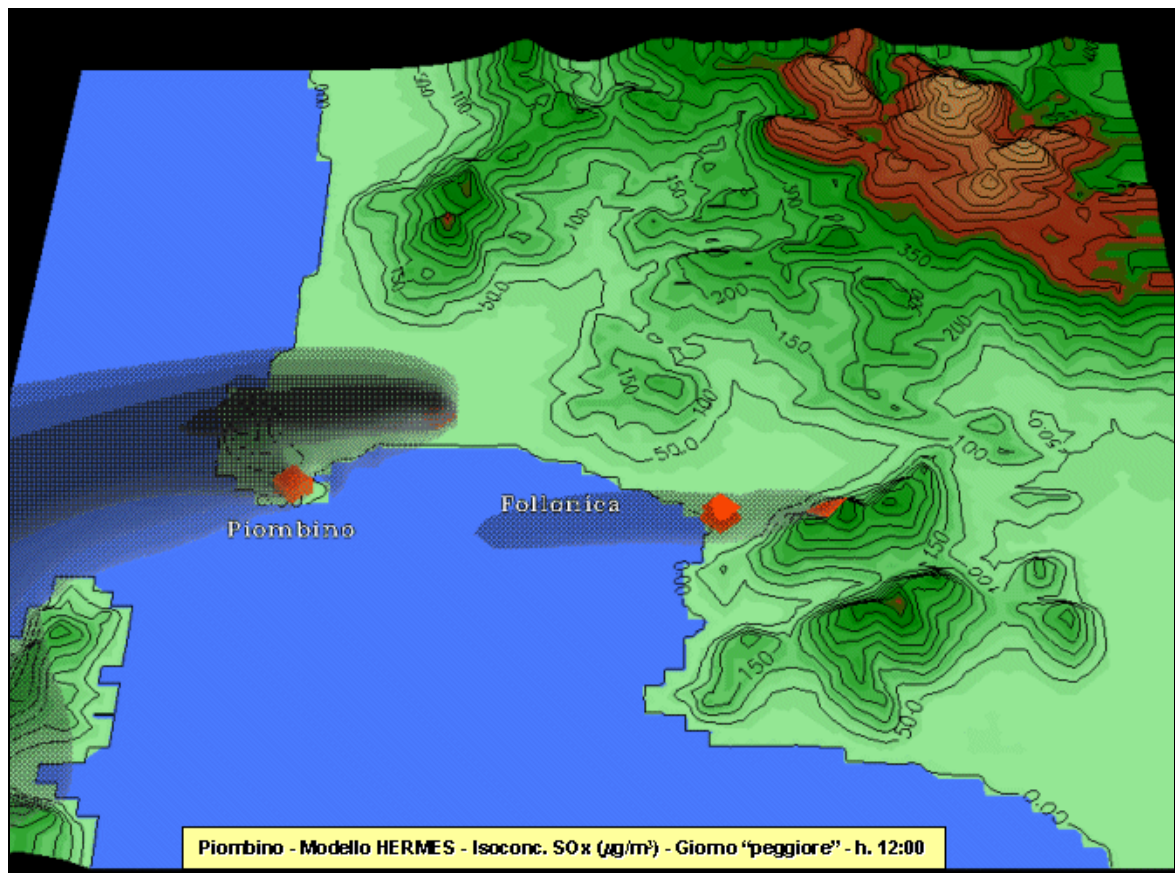
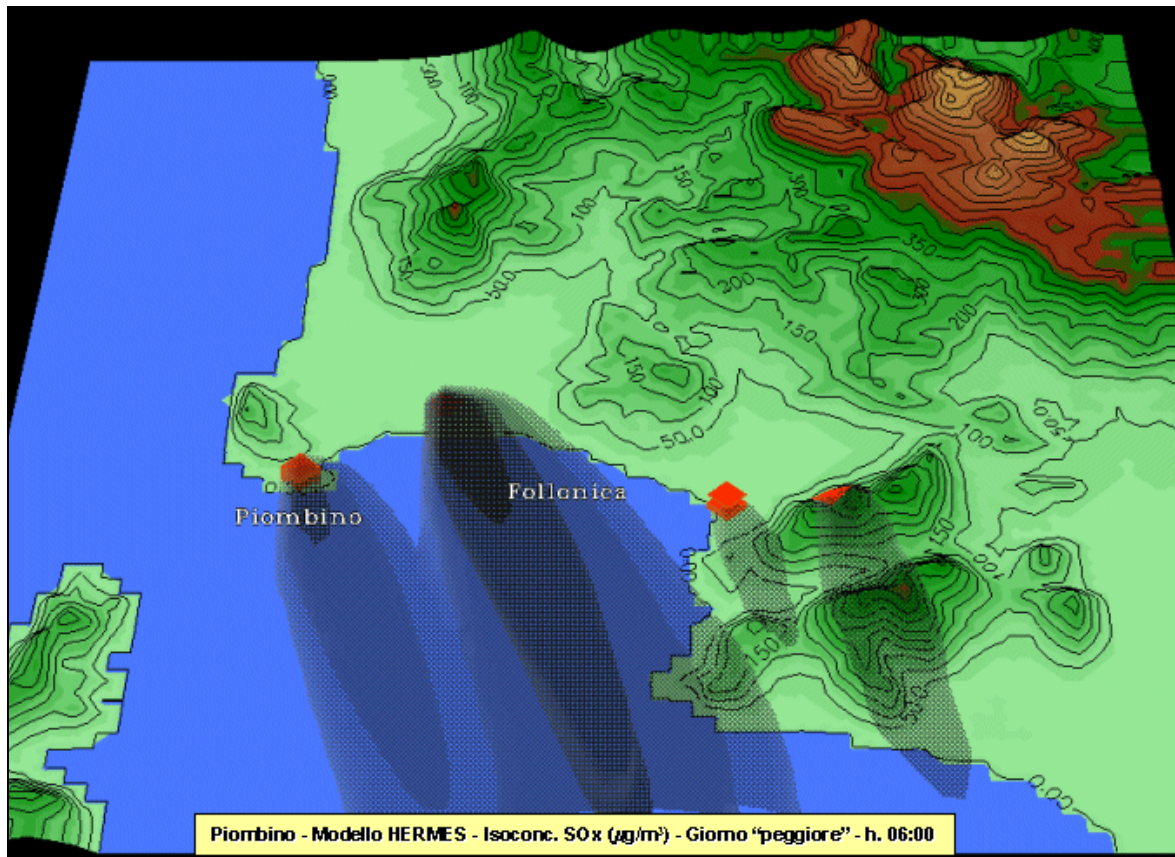


Fig. 117/a - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da HERMES nell'area di Piombino (hh. 06-12).

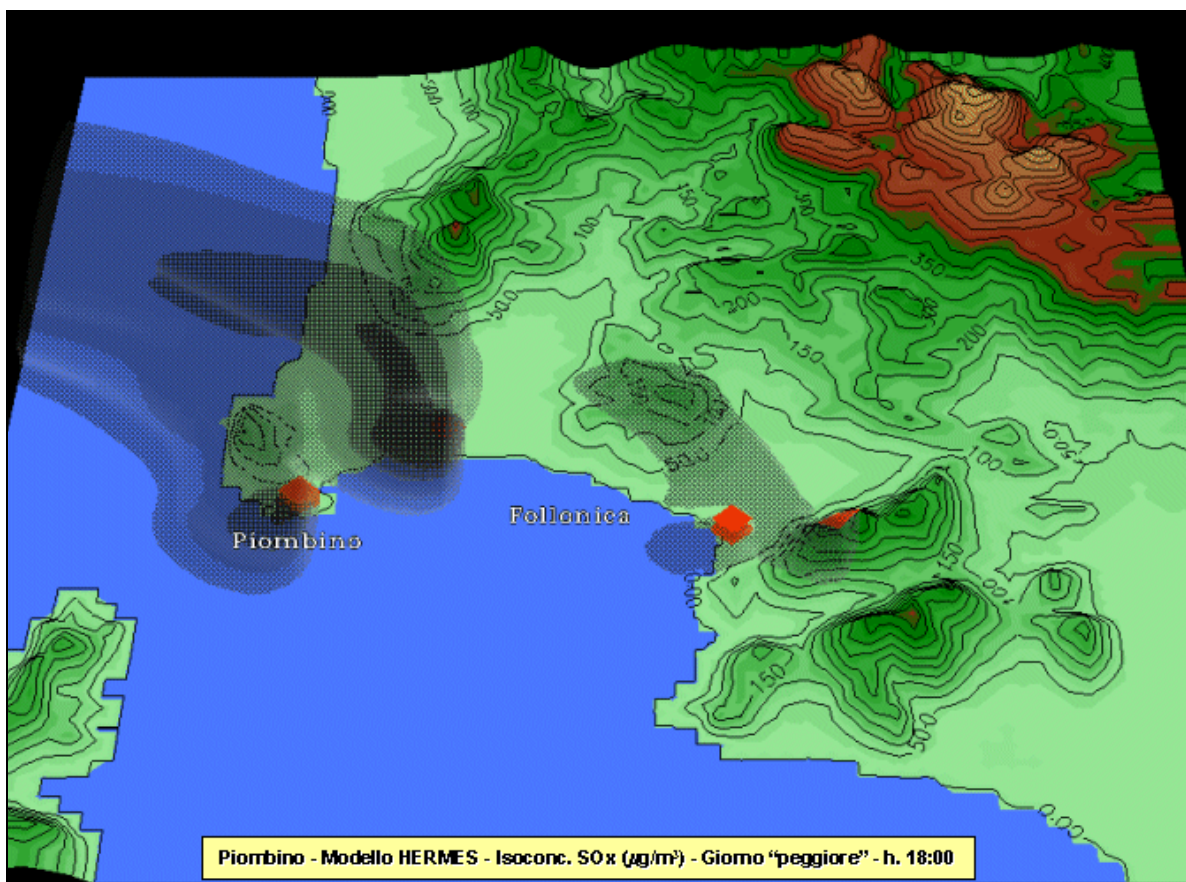
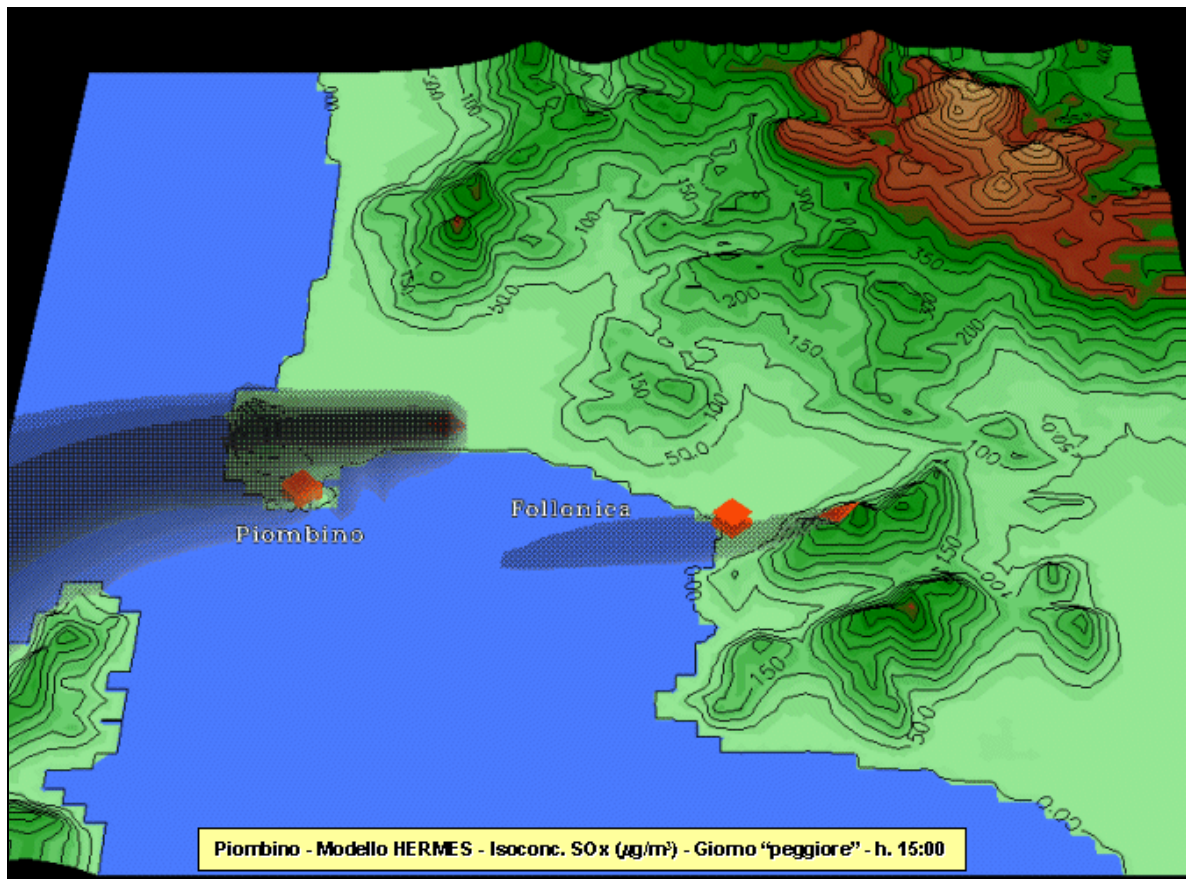


Fig. 117/b - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da HERMES nell'area di Piombino (hh. 15-18).

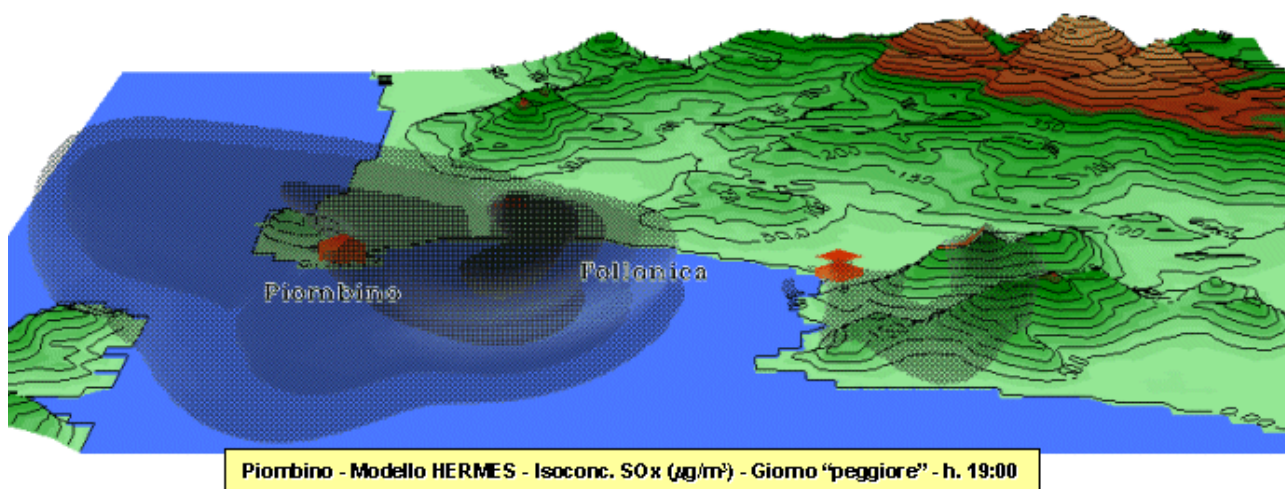
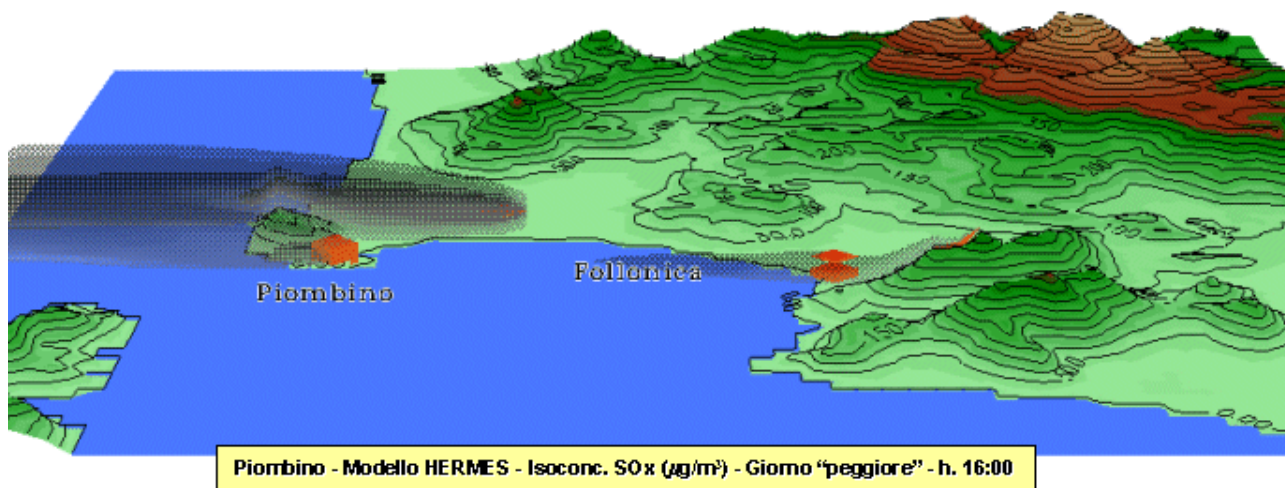
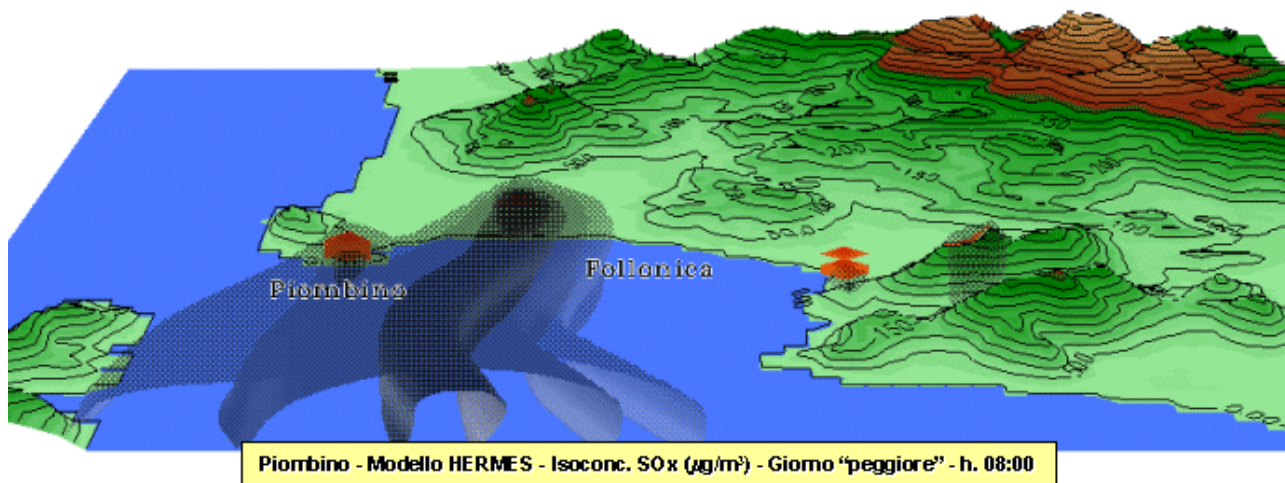


Fig. 117/c - Isosuperfici di concentrazione di SO_x nel giorno "peggiore" ricostruite da HERMES nell'area di Piombino (hh. 08-16-19).

Nel corso del giorno “peggiore”, le condizioni di qualità dell’aria nell’area di studio di Piombino modellizzate da HERMES si presentano decisamente critiche. Nel complesso, più alte appaiono le concentrazioni rispetto al giorno tipico, e allo stesso tempo rispetto a quelle ottenute applicando il modello SPRAY.

Alle h. 06:00, ad esempio, le quote d’inquinante vengono sospinte verso Sud (Fig. 117/a), analogamente a quanto modellizzato da SPRAY (Fig. 113/a). A differenza di SPRAY, tuttavia, le isosuperfici di concentrazione risultano molto ampie, e i corrispondenti livelli estremamente elevati, col risultato che l’intero Golfo di Follonica viene ad essere investito dall’inquinamento prodotto dagli impianti di Piombino e Torre del Sale.

Nella tarda mattinata (h. 12:00) il mutato regime dei venti spinge le concentrazioni di SO_x in direzione Ovest, cioè verso il Canale di Piombino. A differenza di quanto elaborato da SPRAY, ancora una volta, il quadro tracciato da HERMES risulta decisamente più critico, soprattutto per il fatto che più elevati valori di concentrazione investano per intero la costa settentrionale ed anche l’interno dell’Isola d’Elba.

Tale situazione si mantiene pressoché immutata fino al primo pomeriggio (h. 15:00), il che indica come le aree sottovento rispetto alle grosse sorgenti della zona di Piombino risultino penalizzate anche nel tempo dai rilasci inquinanti che da essa hanno origine (Fig. 117/b).

Alle h. 18:00 lo scenario anemologico si presenta molto simile a quello del giorno tipico (Fig. 116/b), con venti tuttavia meno intensi: gli inquinanti emessi dagli impianti di Piombino e Torre del Sale diffondono verso Nord per il primo tratto, per poi divergere verso Ovest nel secondo tratto, verosimilmente risentendo degli effetti della brezza di mare. Il risultato è che l’intera fascia litoranea che si estende dal promontorio di Piombino fino a Marina di Castagneto risulta esposta alla ricaduta di inquinanti.

Le illustrazioni proposte in Fig. 117/c mostrano ancora più in dettaglio le particolari modalità della dispersione degli inquinanti nel giorno invernale “peggiore” nell’area di studio.

Nel *frame* delle h. 08:00 appare di particolare impatto visivo il meccanismo di formazione delle isosuperfici di concentrazione degli inquinanti. Un primo risultato è che il contributo principale è dovuto all’impianto di Torre del Sale; in secondo luogo, le isosuperfici si presentano molto estese in orizzontale, cioè trasversalmente al percorso medio dell’inquinante, e decisamente poco ampie in altezza.

L’accentuato confinamento verticale della diffusione degli SO_x permane fino al pomeriggio (h. 16:00), diversamente da quanto modellizzato nelle medesime circostanze da SPRAY (Fig. 113/c).

Analogamente a quanto fatto da SPRAY, nel tardo pomeriggio (h. 19:00) condizioni di turbolenza atmosferica molto più accentuate si riflettono in una diffusività verticale – oltre che orizzontale – decisamente maggiore. A differenza del quadro tracciato da SPRAY, tuttavia, le isoconcentrazioni prodotte da HERMES mostrano valori quantitativamente superiori, e inoltre interessano più direttamente lo specchio di mare del Golfo di Follonica che non il Canale di Piombino, e quindi l’area a Sud di Piombino piuttosto che quella ad Ovest.

7. Previsioni meteorologiche

In questa sezione viene descritto il lavoro che è stato svolto per la realizzazione di una procedura automatica per la previsione di campi di vento e di temperatura nelle aree di Livorno e di Piombino.

I due domini spaziali presi in esame, ognuno dei quali presenta un'estensione complessiva di 60x60 Km², corrispondono all'area centrata sulla città di Livorno e a quella centrata su Piombino, come mostrato, rispettivamente, in Fig. 1 e in Fig. 2 (§ 2.1). Come per il lavoro relativo alla modellistica meteorologica (cap. 5), il dominio di calcolo è caratterizzato da un grigliato tridimensionale di passo orizzontale pari ad 1 Km (e quindi con 61x61 nodi orizzontali), e da 20 livelli verticali. Anche in questo caso, il modello digitale del terreno (DTM) utilizzato per l'estrazione delle due aree di interesse è quello fornito dalla *Regione Toscana*, caratterizzato da una risoluzione orizzontale di 100 m.

La procedura realizzata ha lo scopo di elaborare previsioni fino a 72 ore, con cadenza trioraria³.

Partendo dai profili di vento e di temperatura previsti dal modello meteorologico ad area limitata DALAM (*Data Assimilation Limited Area Model*), elaborati su un grigliato di maglie di 20x20 Km², si procede ad una post-elaborazione attraverso il modello meteorologico MINERVE, con cui viene eseguita un'interpolazione, ottenendo così i profili delle variabili di interesse su maglie di 1x1 Km².

Il risultato finale è rappresentato da una serie di immagini in formato GIF, relative a sette campi meteo: il campo di vento a 10 m, a 60 m, a 200 m, a 500 m, a 1500 m; il campo di temperatura superficiale a 10 m; il profilo di temperatura (dal suolo fino a 1200 m), rispettivamente, su Livorno e su Piombino.

Le previsioni sono relative al giorno corrente (previsioni a 0-24 ore), al giorno successivo (previsioni a 24-48 ore), a due giorni successivi (previsioni a 48-72 ore), per un totale di 168 immagini per ciascuna delle due aree. Le immagini vengono infine inviate ad un sito *internet* appositamente predisposto⁴, che viene quotidianamente aggiornato.

In sintesi, questa procedura consiste in un programma sviluppato in linguaggio C e compilato su IBM-AIX 4.2, con cui vengono gestite le seguenti operazioni:

- recupero dei dati elaborati dal modello previsionale DALAM;
- formattazione dei dati e dei *files* di configurazione per il modello meteorologico MINERVE;
- esecuzione sequenziale degli applicativi per la creazione di un *file* in formato binario che contiene tutte le informazioni relative alle variabili meteorologiche, per ciascun giorno⁵;
- realizzazione di immagini in formato GIF;
- procedura di aggiornamento del sito *internet*;
- archiviazione dei *files* binari.

Di seguito sono riportati lo schema della procedura automatica (Fig. 118) e, a titolo di esempio, le immagini dei sette campi elaborati per l'area di Livorno (Figg. 119÷125) e l'area di Piombino (Figg. 126÷132). Tali immagini si riferiscono al giorno 08/05/2000, alle ore 12, partendo dai profili DALAM previsti a 24-48 ore.

³ Le previsioni, ogni giorno, si riferiscono alle ore (UTC) 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24.

⁴ Il sito WEB del LaMMA, progettato con un sistema di *menu* a tendine e articolato su tre giorni di previsione è realizzato con *JAVA script*.

⁵ Ogni giorno sono elaborate le previsioni per il giorno corrente e per i due successivi, per un totale di tre *files* binari.

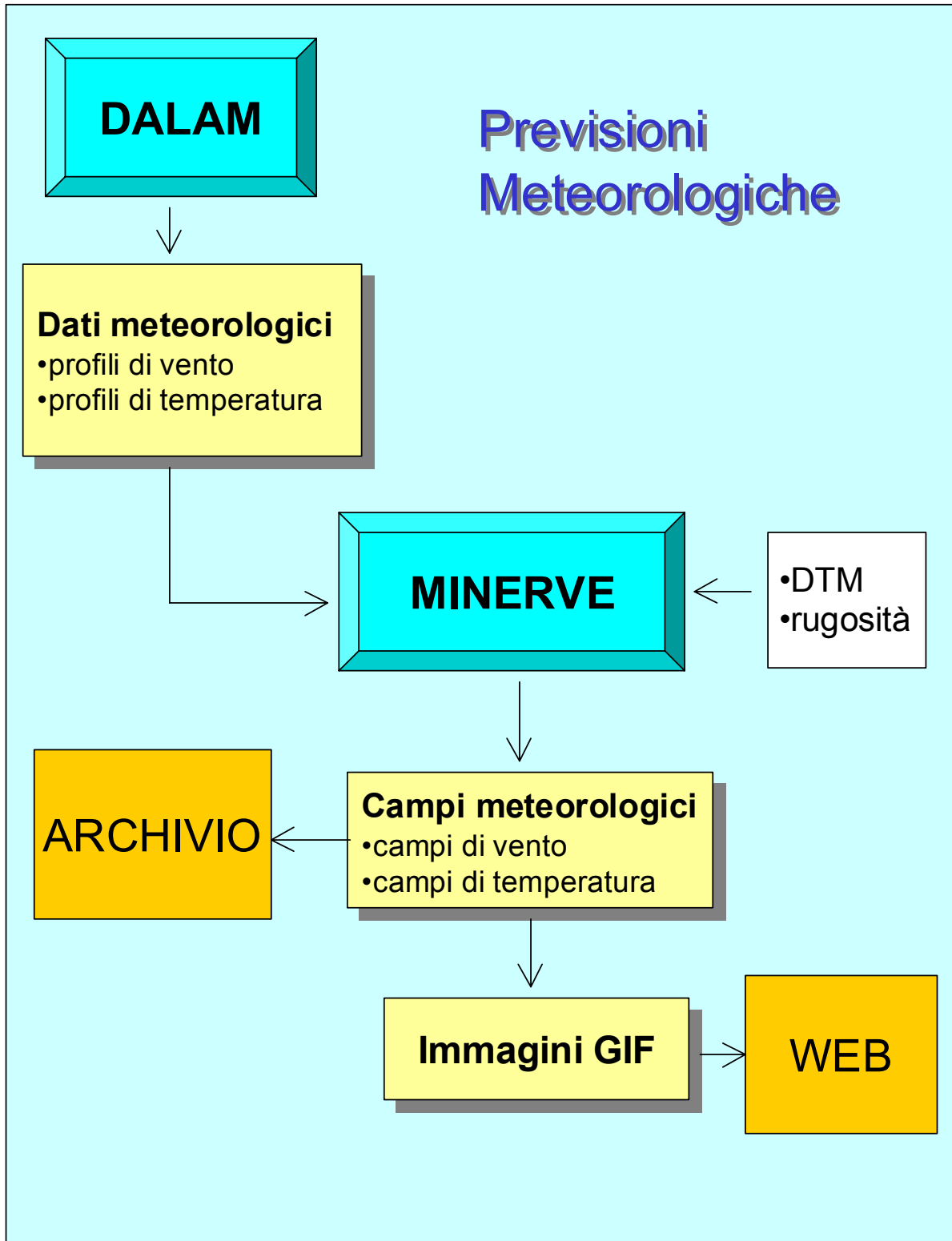


Fig. 118 - Schema della procedura automatica per le previsioni meteorologiche.

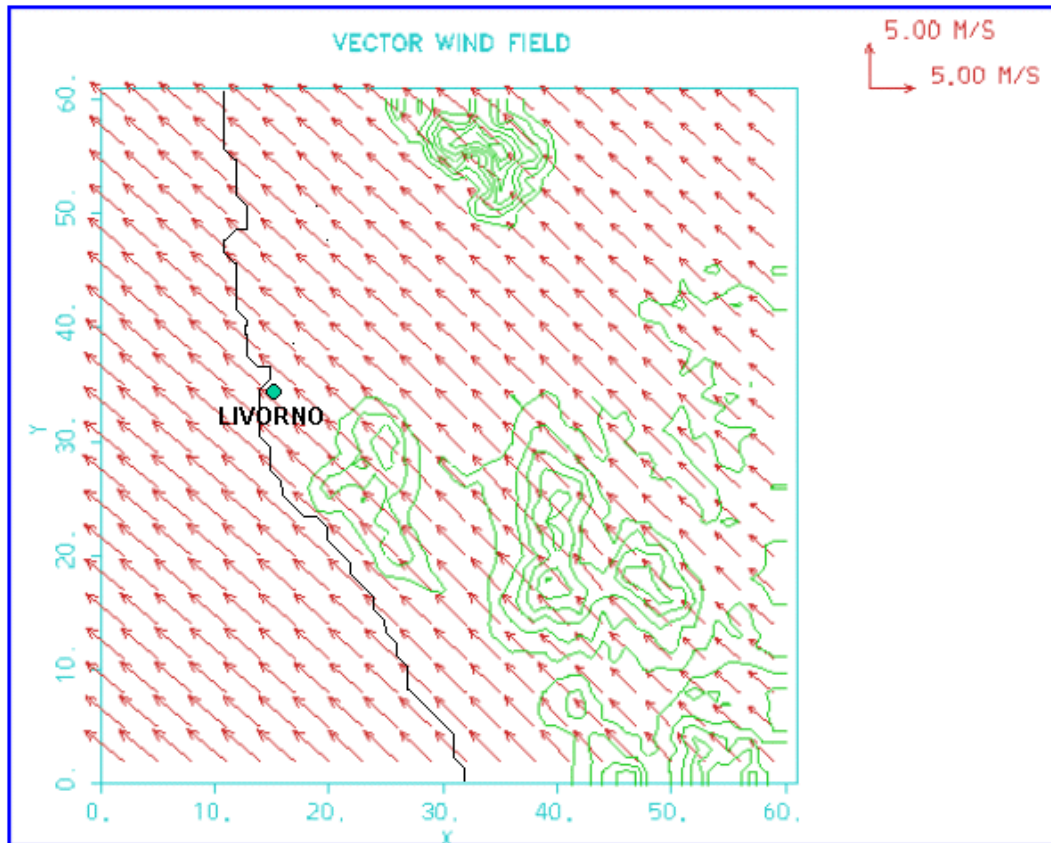


Fig. 119 - Livorno: campo di vento a 10 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

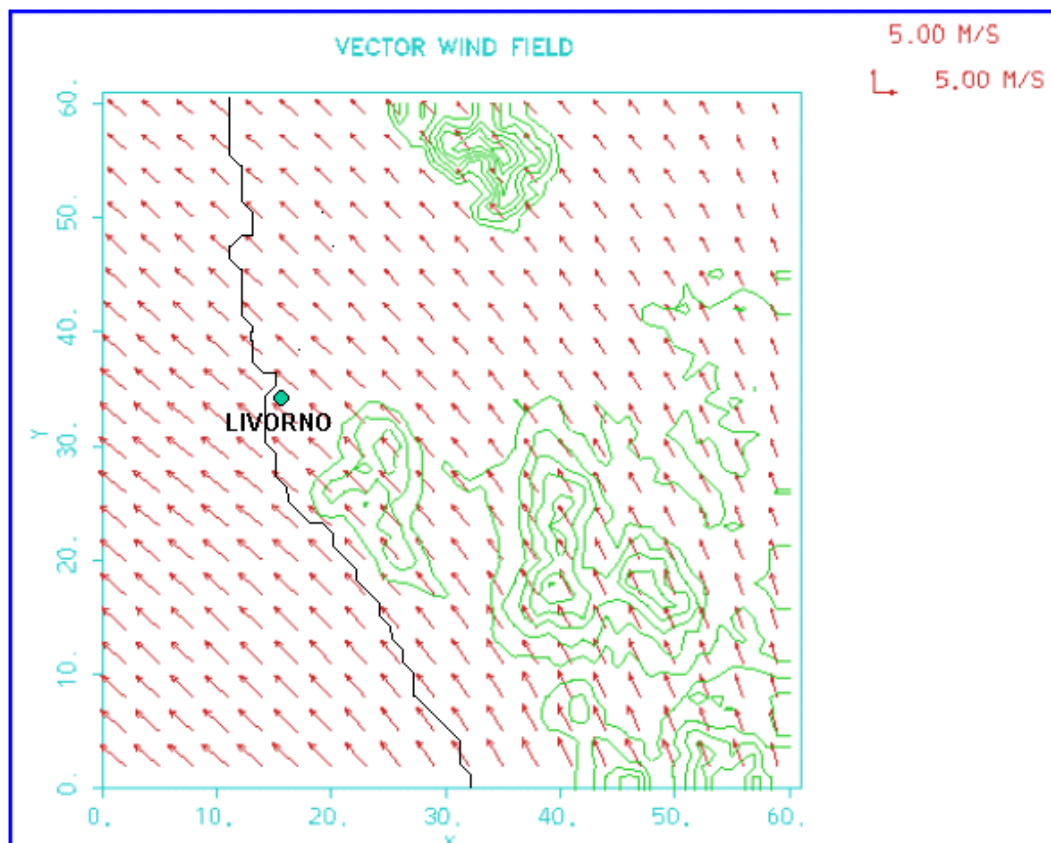


Fig. 120 - Livorno: campo di vento a 60 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC

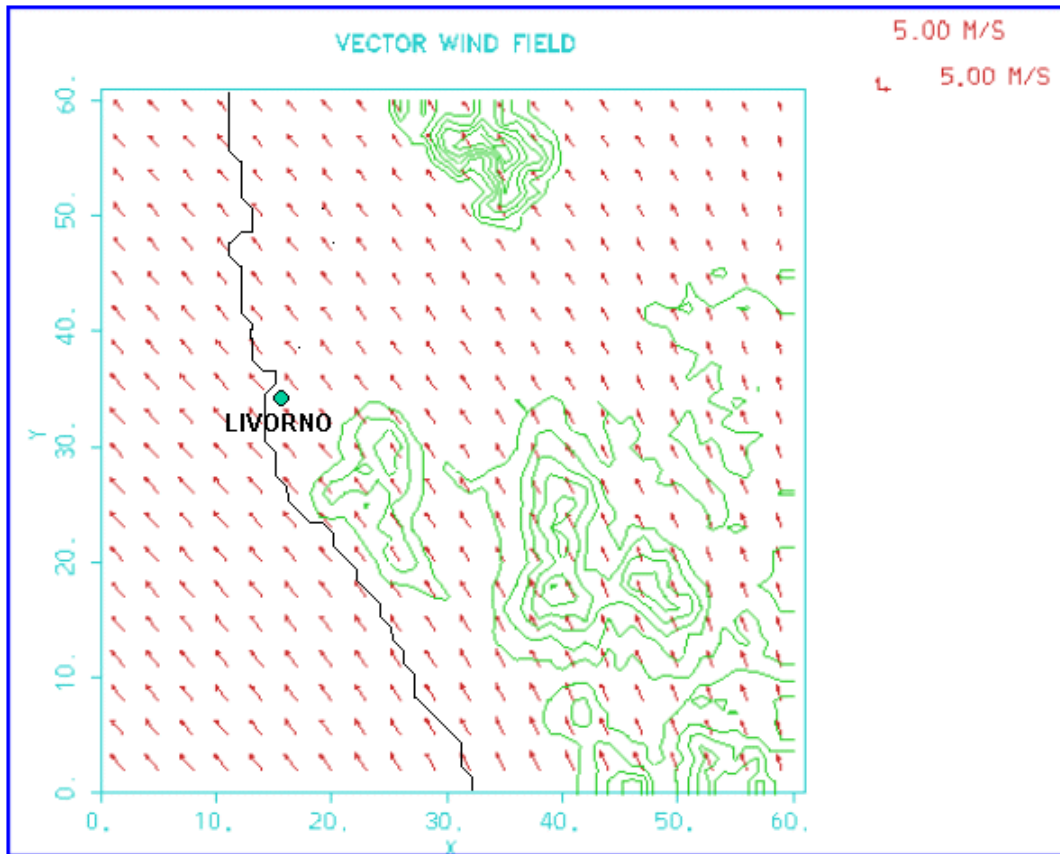


Fig. 121 - Livorno: campo di vento a 200 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

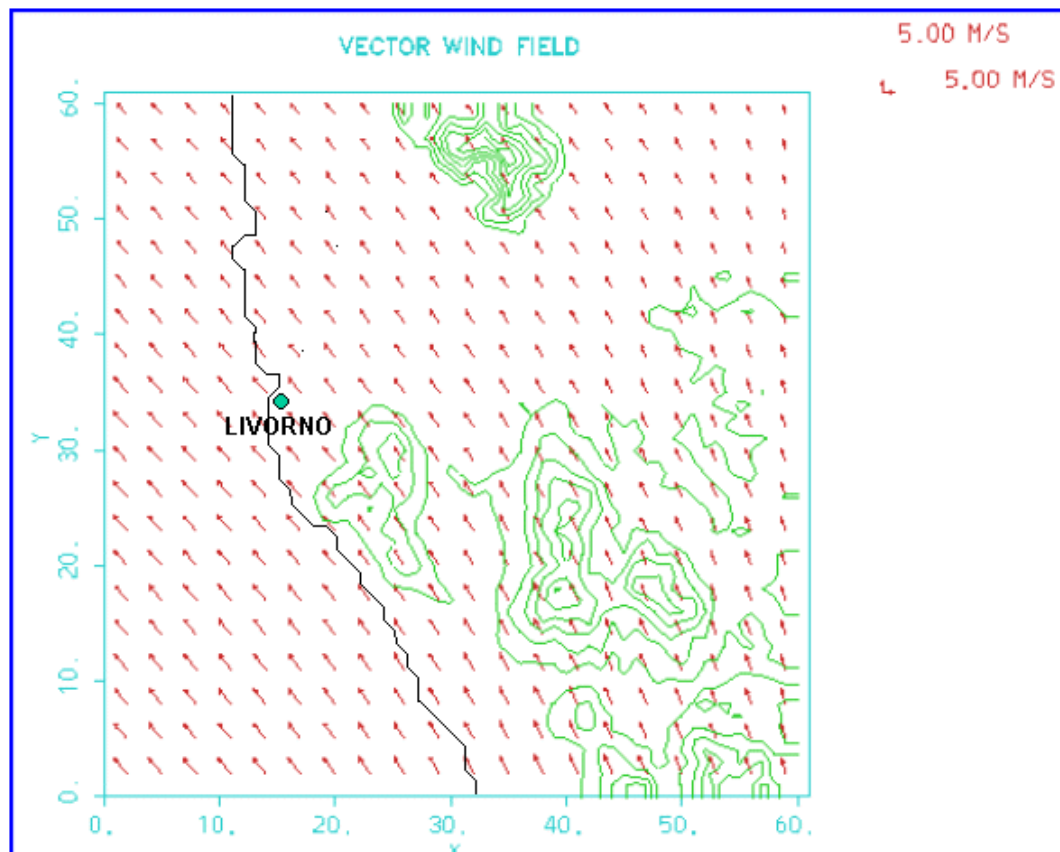


Fig. 122 - Livorno: campo di vento a 500 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC

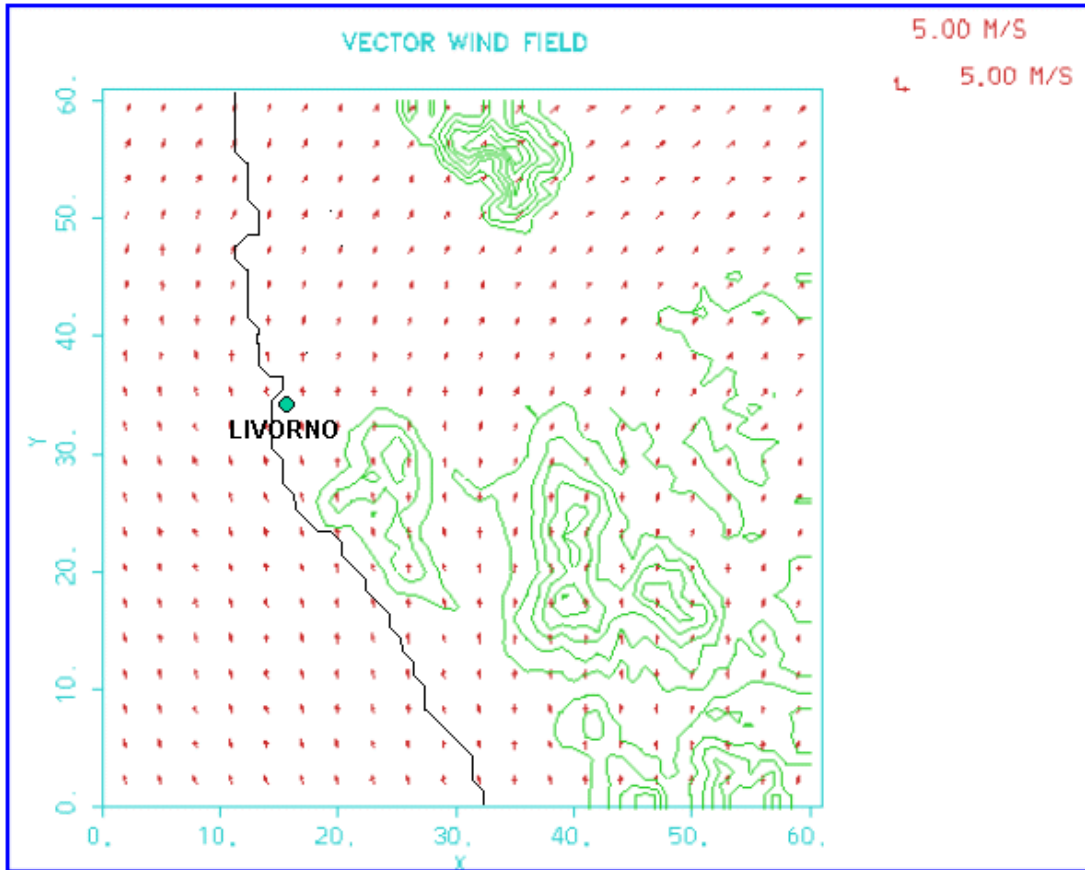


Fig. 123 - Livorno: campo di vento a 1500 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

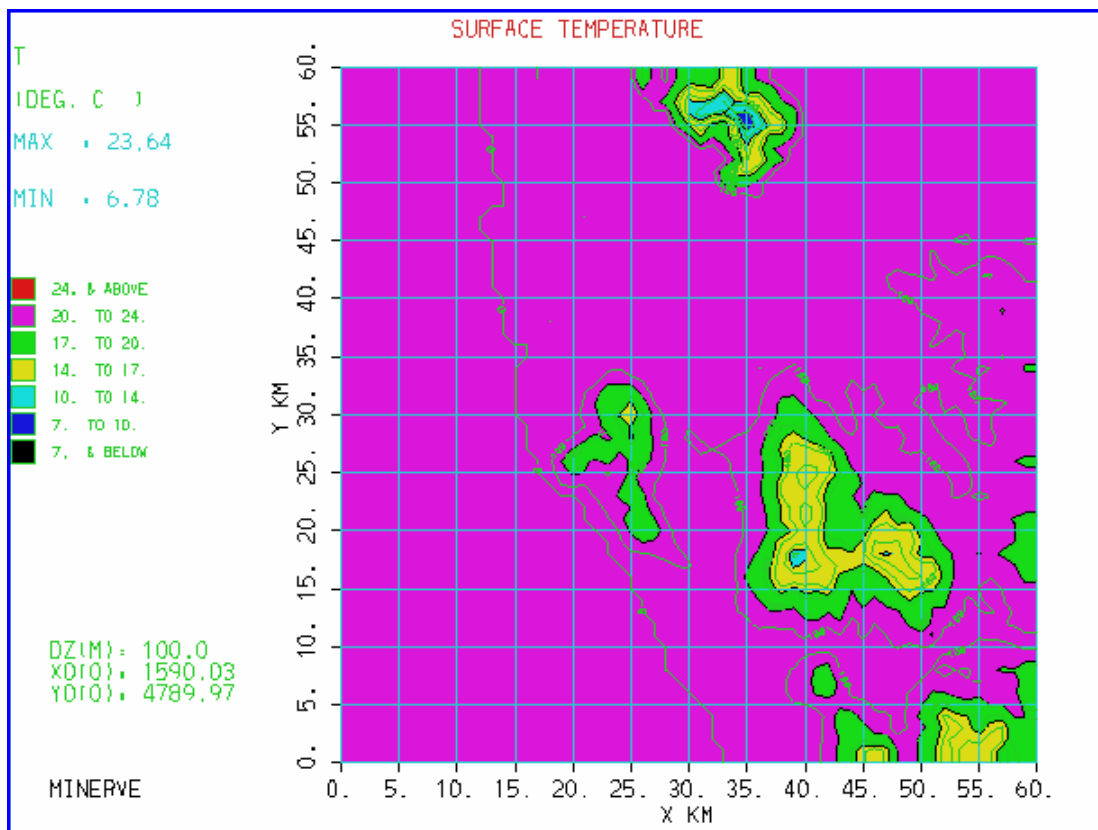


Fig. 124 - Livorno: campo di temperatura a 10 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il 08/05/00, ore 12 UTC.

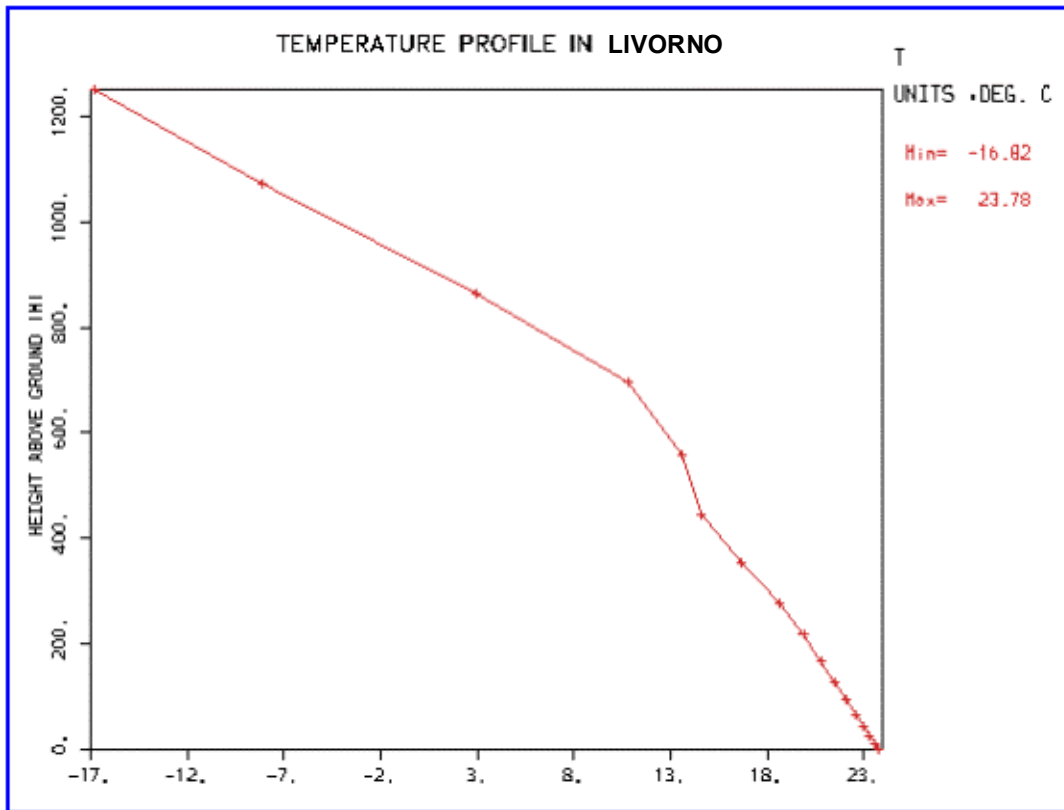


Fig. 125 - Profilo di temperatura a Livorno, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

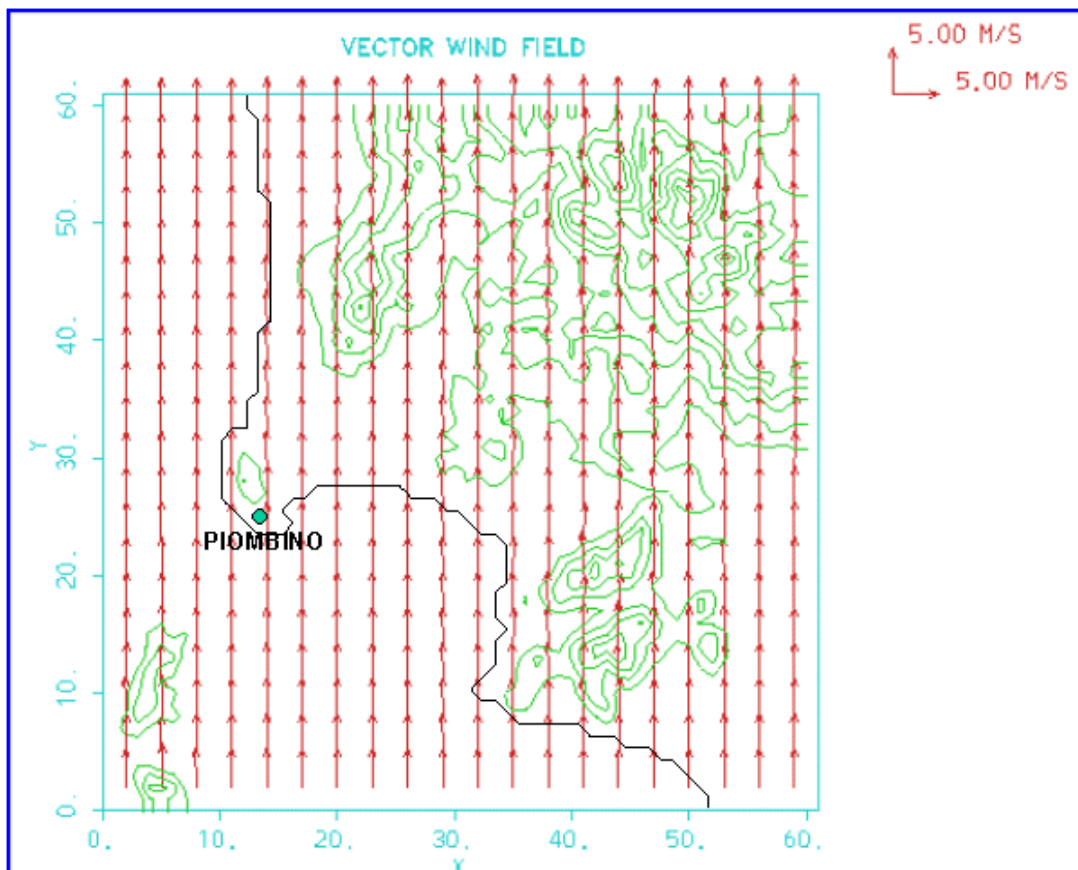


Fig. 126 - Piombino: campo di vento a 10 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

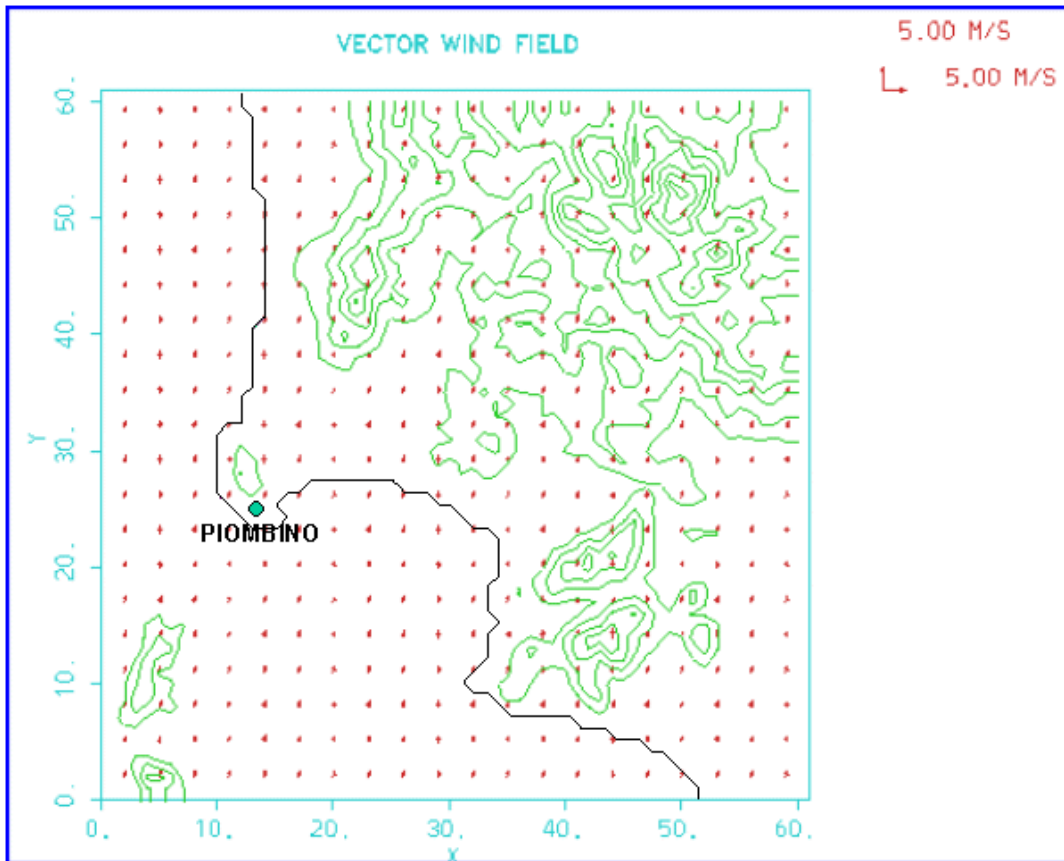


Fig. 127 - Piombino: campo di vento a 60 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

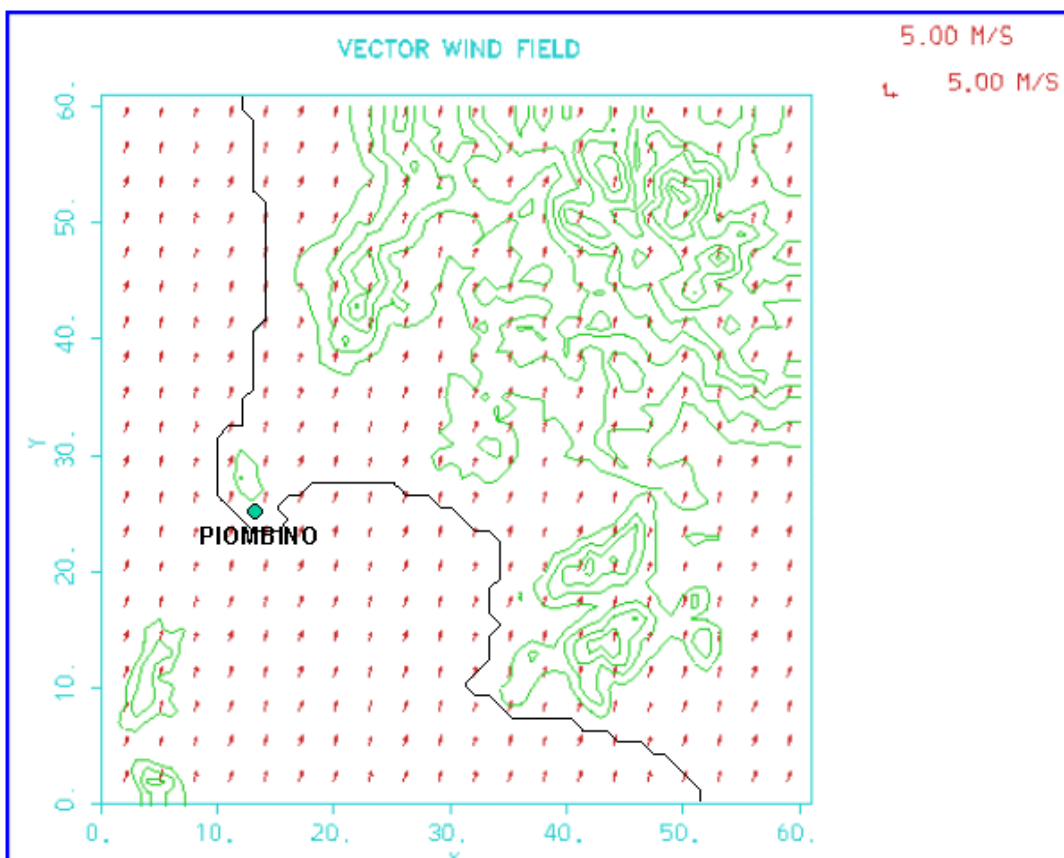


Fig. 128 - Piombino: campo di vento a 200 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

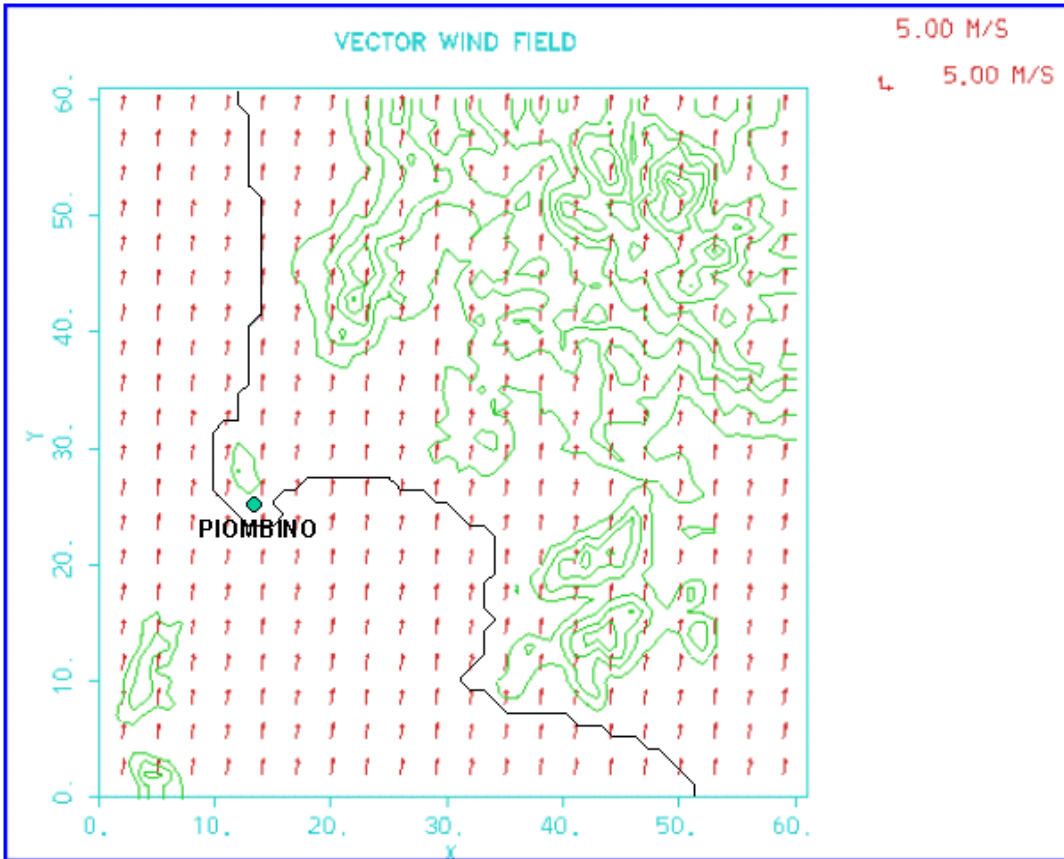


Fig. 129 - Piombino: campo di vento a 500 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

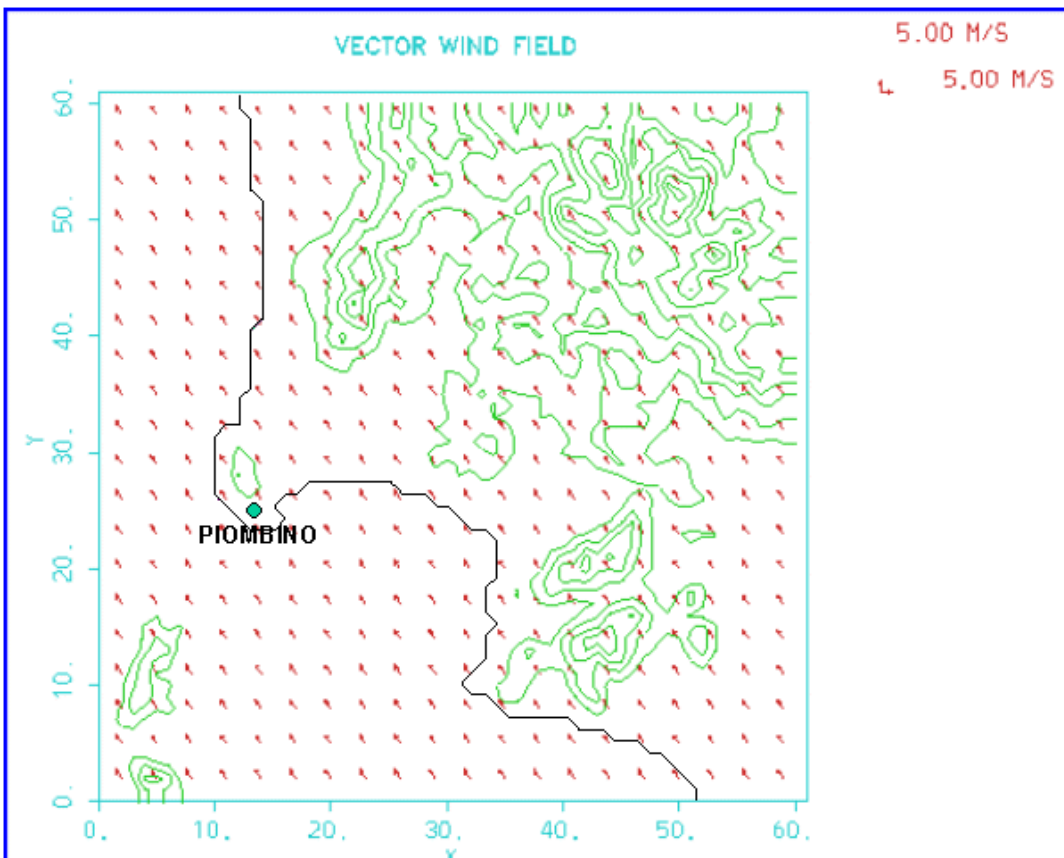


Fig. 130 - Piombino: campo di vento a 1500 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

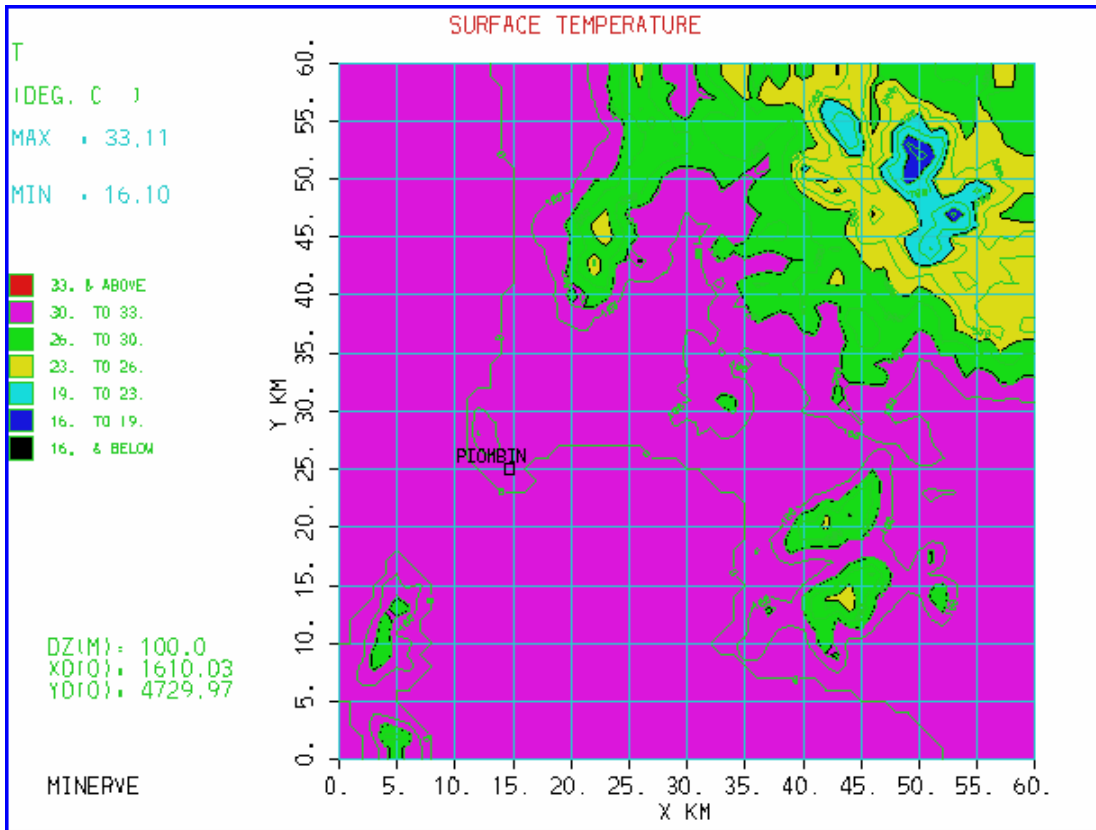


Fig. 131 - Piombino: campo di temperatura a 10 m dal suolo, previsione a 24-48 ore per il 08/05/00, ore 12 UTC.

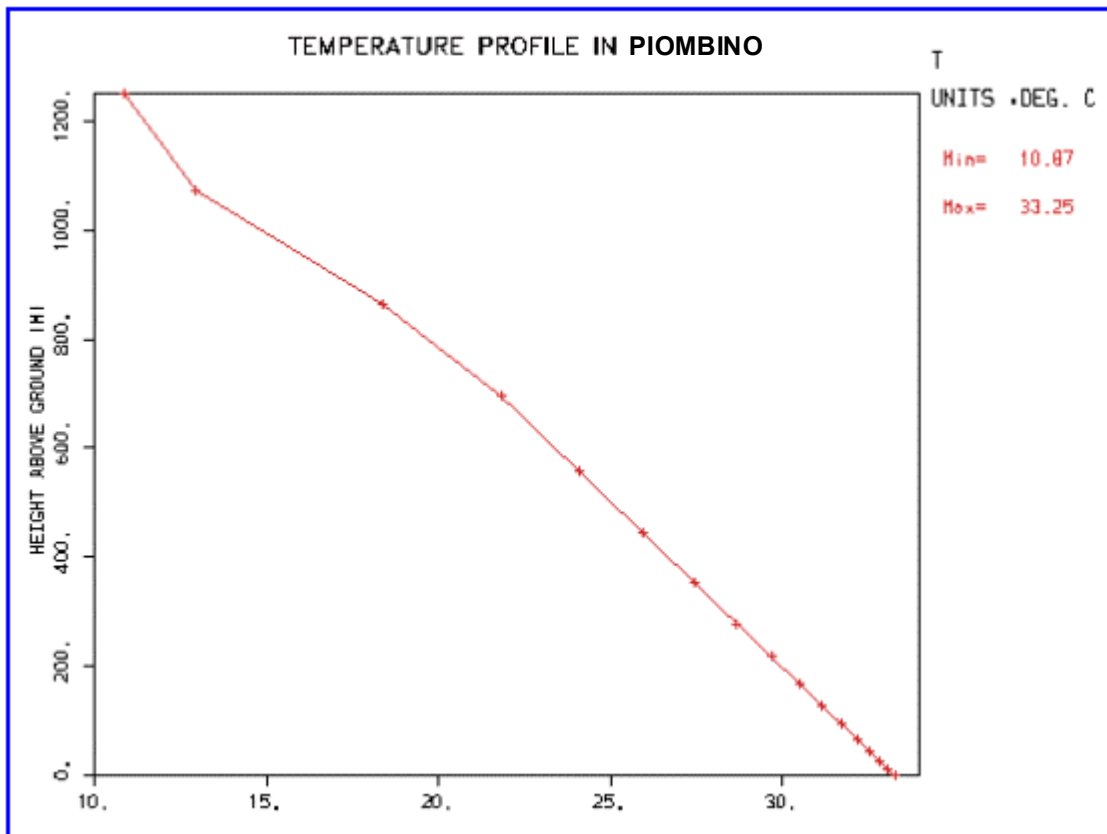


Fig. 132 - Profilo di temperatura a Piombino, previsione a 24-48 ore per il giorno 08/05/00, ore 12 UTC.

Conclusioni

Obiettivo del presente lavoro è stato quello di studiare il regime meteorologico e le dinamiche di dispersione degli inquinanti in alcune tra le aree geografiche più a rischio – in termini di qualità dell'aria – del territorio della provincia di Livorno, e più precisamente i comuni di Livorno, Collesalveti, Rosignano Marittimo e Piombino. Per lo studio sono stati individuati due domini spaziali di riferimento, centrati rispettivamente sulle città di Livorno e di Piombino.

In prima istanza, è stato utilizzato un approccio di tipo statistico per l'elaborazione dei dati meteo registrati da stazioni a terra e dei dati di concentrazione misurati da centraline di qualità dell'aria. Questa analisi preliminare ha permesso di evidenziare alcune caratteristiche dei principali inquinanti monitorati nelle aree di studio.

Per quanto riguarda i valori relativi ad NO ed NO₂, si può notare che gli andamenti del “giorno medio” sono molto simili: questo fa ipotizzare che non si realizzino le condizioni di accumulo di NO e la conseguente trasformazione in NO₂ a seguito di reazioni fotochimiche. E' probabile che il forte vento, caratteristico dei siti, contribuisca in modo determinante a ripulire l'aria. Un discorso analogo vale per il caso del CO.

Relativamente all'SO₂, si può dedurre che c'è una forte dipendenza dei valori di concentrazione dalla posizione delle centraline, che presentano situazioni diverse sia negli andamenti, che nei valori rilevati. Non risulta quindi facile fare considerazioni che si possano estendere alle intere aree di Livorno e di Piombino, data la forte dipendenza spaziale dei valori misurati, ed è quindi indispensabile un approccio di tipo modellistico.

La *cluster analysis* è stata condotta elaborando i dati di stazioni meteo e chimiche rappresentative per le città di Livorno e di Piombino. Sono così stati individuati i principali regimi anemologici per il periodo estivo ed invernale ed esaminata la correlazione con le concentrazioni di alcuni inquinanti (SO₂ ed NO₂).

I risultati confermano l'instaurarsi in estate di regimi di brezza ben definiti in quanto a valori di direzione, intensità e incidenza nell'arco della giornata, comuni ad entrambi i siti costieri. Il regime invernale presenta per i due siti valori più elevati di velocità del vento, che però non riducono significativamente le concentrazioni dell'SO₂.

Confrontando gli andamenti stagionali, si può osservare che, nell'area di Livorno, nel periodo invernale i venti presentano un'intensità mediamente maggiore di quella estiva. Esiste inoltre una marcata differenza dei livelli di concentrazione dell'NO₂, di cui si registrano valori mediamente più alti nel periodo invernale.

Nell'area di Piombino, il confronto stagionale tra le concentrazioni di SO₂ ed NO₂ non mostra differenze apprezzabili tra inverno ed estate.

Il corpo centrale del lavoro è costituito dalle elaborazioni modellistiche eseguite per mezzo del modello meteorologico MINERVE e dei modelli diffusionali SPRAY ed HERMES.

In termini temporali, lo studio è stato condotto definendo i due scenari maggiormente rappresentativi delle problematiche allo studio: il “giorno tipico”, cioè quello meteorologicamente più frequente, e il “giorno peggiore”, cioè quello in presenza del quale più alte sono le probabilità che insorgano episodi acuti d'inquinamento. La stagione considerata è stata l'inverno.

L'applicazione della modellistica meteorologica, condotta utilizzando il modello MINERVE, è stata incentrata sulla ricostruzione dei campi tridimensionali di vento e temperatura all'interno delle due aree di studio. Di tali campi tridimensionali, sono stati visualizzati e studiati solamente quelli superficiali, cioè a 10 m di altezza dal suolo.

Nel corso del tipico giorno invernale, il regime anemologico nell'area di studio di Livorno è caratterizzato dall'instaurarsi della brezza di terra (direzione Ovest) per l'intera mattinata fino all'incirca alle h. 14:00, dopodiché ricorrono condizioni di brezza di mare (direzione Est); queste hanno tuttavia breve durata, nel senso che già nel tardo pomeriggio (~h. 18:00) e per tutto il resto della sera e della notte si ripresentano condizioni di brezza di terra (direzione Ovest). L'intensità dei venti è sistematicamente maggiore in mare aperto che non sulla terraferma, soprattutto per l'effetto della

rugosità del terreno di cui il modello tiene conto. In generale, poi, i venti della zona di Livorno appaiono più intensi sia di quelli della zona di Pisa che della zona di Cecina, soprattutto nel corso della mattinata.

Anche il giorno “peggiore” nell’area di studio di Livorno è governato dall’alternarsi della brezza di terra e di mare, per quanto il fenomeno si presenti meno definito a causa del fatto che i venti risultano più deboli un po’ ovunque. Le direzioni prevalenti delle correnti sono Sudovest durante la mattina, Sud-Sudest nel primo pomeriggio, Est nella fase centrale del pomeriggio ed Ovest di sera. Anche in questo caso, la zona di Livorno appare esposta ai venti più intensi.

Durante il tipico giorno invernale, l’area di studio di Piombino è dominata da venti sostanzialmente poco intensi, soprattutto se tale andamento viene confrontato con quello dell’area di Livorno. Ciò ricorre non solo lungo la fascia costiera e l’entroterra montuoso, ma anche in mare aperto, dove pure l’intensità dei venti si presenta relativamente più alta. Anche nel caso del dominio di Piombino, l’azione di irraggiamento solare combinata con l’interazione terra-mare determina il ciclico fenomeno dell’inversione di direzione delle correnti d’aria, una volta dirette da terra verso il mare (direzione Sudovest), e l’altra dal mare verso terra (direzione Nordovest).

Nel corso del giorno “peggiore”, i venti si presentano deboli in tutto il dominio spaziale di Piombino, soprattutto durante le ore notturne e del mattino; solo nel corso del pomeriggio si evidenziano venti di una certa intensità, sia lungo la striscia di terra del Golfo di Follonica, che soprattutto in mare aperto. Il fenomeno mostra però breve durata, nel senso che al calar del sole la loro attenuazione appare evidente. Le direzioni prevalenti delle correnti sono Sud-Sudovest durante la mattina, Ovest-Nordovest durante il pomeriggio e la sera

In linea di massima, il campo di temperatura a 10 metri dal suolo segue sostanzialmente l’andamento altimetrico del terreno in tutti i casi di studio esaminati per i due siti di riferimento. Le isoterme si sovrappongono alle curve di livello del terreno soprattutto nelle ore serali e notturne, ossia in assenza dell’azione di irraggiamento solare, mentre nel corso della giornata alcune zone collinari dell’entroterra – probabilmente perché poste orograficamente al riparo dai venti – mostrano temperature superiori a quelle che si trovano alla quota del mare. Naturalmente – per la definizione stessa degli scenari meteorologici –, il campo di temperatura mostra in generale valori più alti durante il giorno tipico rispetto a quello “peggiore”.

Lo studio della qualità dell’aria nelle due aree è stato condotto innestando sulla modellistica meteorologica precedentemente illustrata (MINERVE) quella diffusionale, costituita da due differenti modelli: uno di tipo lagrangiano, SPRAY, l’altro di tipo euleriano, HERMES. L’applicazione di tali modelli ha richiesto in ingresso l’introduzione di tutte le informazioni relative alle sorgenti d’inquinamento atmosferico presenti all’interno delle due aree di studio. Il presente caso-studio è stato condotto prendendo in esame le emissioni derivanti dalle grandi sorgenti puntiformi, cioè i camini dei maggiori complessi industriali operanti nelle due zone, e come specie gassosa si è fatto riferimento agli ossidi di zolfo (SO_x).

Il risultato finale è rappresentato dalle isosuperfici di concentrazione degli SO_x nelle tipiche condizioni atmosferiche ed in quelle in cui più alta risulta la probabilità che si verifichino gli episodi acuti d’inquinamento, nel periodo invernale.

Al riguardo occorre osservare che, data l’approssimazione da cui risultano inevitabilmente affetti tutti i dati forniti in ingresso, i risultati ottenuti dovranno essere intesi soprattutto allo scopo di fornire valutazioni qualitative e di massima. Una mappatura rigorosa del territorio in termini di qualità dell’aria non può infatti essere ottenuta se non considerando la totalità di tutte le fonti d’inquinamento, oltre che i contributi di concentrazione al contorno. Disponendo di un numero considerevole – ma soprattutto rappresentativo – di stazioni di misura delle concentrazioni inquinanti, sarebbe inoltre possibile la calibrazione accurata dei suddetti modelli di dispersione, il che consentirebbe di utilizzarne i risultati anche in termini quantitativi e non solo qualitativi.

Nell’area di studio di Livorno il maggior impatto in atmosfera è dovuto agli impianti termoelettrici di Livorno, alle raffinerie di Collesalveti, e agli stabilimenti di Rosignano Solvay. L’altezza media dei loro camini si aggira sugli 80 m, anche se alcune ciminiere presentano un’altezza decisamente inferiore (~20m). Decisamente trascurabile risulta invece l’apporto delle sorgenti limitrofe a Pisa.

Nell'area di studio di Piombino, il carico inquinante maggiore è senz'altro quello dovuto all'impianto di produzione termoelettrica ubicato in località Torre del Sale, ed in minore agli impianti vicini a Piombino. Pressoché irrilevante appare invece il contributo dovuto alle sorgenti della zona compresa tra Scarlino e Follonica. L'altezza media delle ciminiere degli impianti termoelettrici si aggira sui 200 m, mentre quella dei camini degli altri impianti è nettamente inferiore (20÷40 m).

Le stime di concentrazione prodotte dal modello HERMES forniscono risultati apprezzabilmente diversi da quelli ottenuti applicando il modello SPRAY, segnatamente per i valori più alti che caratterizzano le isosuperfici di concentrazione degli SO_x. La diffusione in verticale ricostruita da HERMES appare ridotta, mostrandosi al contrario particolarmente sviluppata in orizzontale: ciò è spiegabile considerando che, a differenza di SPRAY, HERMES opera una trattazione particolarmente semplificata della turbolenza atmosferica, la quale – soprattutto in direzione verticale – risulta assai poco sviluppata, tale quindi da determinare delle consistenti ricadute al suolo degli inquinanti rilasciati in atmosfera.

Durante il tipico giorno invernale, nell'area di studio di Livorno, per effetto della brezza di terra, le quantità di SO_x rilasciate dalle maggiori sorgenti industriali tendono a disperdersi in mare aperto per buona parte della giornata. Le condizioni più critiche per i centri abitati si presentano invece nel corso del pomeriggio, quando l'insorgere della brezza di mare rispinge verso la costa le stesse consistenti masse d'inquinante precedentemente allontanate verso il mare. La notevole estensione spaziale raggiunta dal fenomeno arriva ad interessare l'intera piana dell'Arno compresa tra Livorno e Pisa fino a Pontedera da una parte, e l'intero entroterra alle spalle di Rosignano e Cecina dall'altra.

Nel corso del giorno "peggiore", lo scenario di qualità dell'aria nell'area di studio di Livorno non si discosta di molto, in termini qualitativi, da quanto accade durante il giorno tipico. Per la maggior parte della giornata, le masse d'inquinante emesse dai principali camini industriali presenti vengono sospinte al largo della costa. Anche in questo caso, le condizioni più critiche vengono raggiunte nel corso del pomeriggio, ancora una volta a causa della brezza di mare. Il fatto che tuttavia, rispetto al giorno tipico, i venti risultino più deboli e la turbolenza atmosferica meno sviluppata rappresenta un ostacolo alla dispersione degli inquinanti, la cui permanenza nelle vicinanze delle sorgenti risulta assai più prolungata nel tempo. Rispetto al caso del giorno tipico, si hanno concentrazioni localmente più alte, ma circoscritte ad un'area geografica più limitata, e precisamente a quella del comprensorio di Livorno e a quella della spianata che comprende Rosignano Marittimo.

Le condizioni di qualità dell'aria nel dominio spaziale di Piombino appaiono nel complesso migliori rispetto a quelle del sito di Livorno, e ciò sia nel corso del tipico giorno invernale, che in quello più critico. L'altezza dei camini che emettono i tassi di SO_x più alti è decisamente superiore a quella degli impianti dell'area di Livorno, il che favorisce il trasporto a grande distanza degli inquinanti, e al tempo stesso riduce le ricadute nelle immediate vicinanze delle sorgenti.

In presenza delle condizioni atmosferiche che d'inverno ricorrono con maggior frequenza, nel corso della mattina le masse d'inquinante rilasciate in atmosfera dai grossi impianti di produzione di Piombino e Torre del Sale si disperdono in direzione Sudovest, interessando quindi il Canale di Piombino, e quindi il versante nordorientale dell'Isola d'Elba. Nelle fasi successive della giornata il regime dei venti muta progressivamente direzione, spirando infine decisamente verso Nordovest: per quanto le masse d'inquinante vengano sospinte in mare aperto, i centri abitati posti immediatamente sottovento alle sorgenti (Piombino, Venturina, S. Vincenzo) vengono ad esserne direttamente investite, accusando livelli di concentrazione piuttosto rilevanti.

Durante le prime ore del giorno "peggiore", le quote di SO_x emesse dalle sorgenti industriali si disperdono in direzione Sud, senza quindi interessare direttamente alcuna zona abitata. Nella tarda mattinata e durante il primo pomeriggio i venti risultano diretti verso Ovest-Sudovest, con andamento che tuttavia interessa solo marginalmente le coste dell'Isola d'Elba; decisamente più penalizzata si presenta invece l'area urbana di Piombino. Nel corso del tardo pomeriggio e della sera gli inquinanti vengono sospinti in direzione Nord-Nordovest, investendo quindi – come nel corso del giorno tipico – più direttamente le zone costiere di Venturina e S. Vincenzo.