

**Valutazione del trasporto e della diffusione degli inquinanti atmosferici
mediante il modello ISC**

1. DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

La valutazione della distribuzione delle concentrazioni al suolo imputabili alle emissioni dell'impianto e' stata condotta utilizzando il programma di calcolo ISC (Industrial Source Complex) messo a punto dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente americana (U.S. EPA, 1987). Il programma e' costituito da un algoritmo derivato dal modello gaussiano di trasporto e diffusione che descrive la concentrazione $C(x,y)$ del generico inquinante al suolo tramite la seguente formulazione:

$$C(x,y) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \sum_{l=1}^{\infty} \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{H+2lH_m}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{-H+2lH_m}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \right\} \quad (1)$$

ove:

$C(x,y)$ = concentrazione al suolo ($\mu\text{g m}^{-3}$)
 Q = portata dell'emissione inquinante (g s^{-1})
 u = velocita' del vento alla bocca del camino (m s^{-1})
 σ_y = deviazione standard della distribuzione orizzontale della concentrazione: indice della dispersione orizzontale dell'inquinante (m);

- σ_z = deviazione standard della distribuzione verticale della concentrazione: indice della dispersione verticale dell'inquinante (m);
- H = altezza effettiva della sorgente emissiva (m);
- Hm = altezza dello strato di mescolamento atmosferico all'interno del quale avviene la diffusione (m);
- x = distanza dalla sorgente misurata in direzione parallela a quella di provenienza del vento (m);
- y = distanza misurata in direzione trasversale a quella di provenienza del vento (m).

I coefficienti di dispersione y e z risultano dipendenti dalla turbolenza atmosferica e dalla distanza sottovento alla sorgente. La dispersione risulta anche influenzata, tramite la turbolenza meccanica generata dalla presenza di zone edificate, dalla tipologia del sito di localizzazione dell'emissione. Il programma dispone pertanto di due distinte procedure di valutazione dei coefficienti di dispersione. Per le aree rurali, o comunque poco edificate, viene utilizzata la formulazione di Pasquill-Gifford, nella quale la dipendenza dei coefficienti con la distanza risulta funzione della turbolenza dell'atmosfera descritta in termini delle 6 categorie di stabilità di Pasquill. Per le aree urbane, interessate da elevate densità di zone edificate, il programma utilizza le formulazioni di Briggs, nelle quali la dipendenza dei coefficienti con la distanza è ancora descritta tramite correlazioni dipendenti dalle

categorie di stabilita' di Pasquill e ricavate da risultati sperimentali di dispersione in aree urbane.

L'altezza effettiva dell'emissione e' data dalla somma dell'altezza geometrica della sorgente e dell'innalzamento che il pennacchio subisce per effetto della spinta di galleggiamento dovuta sia alla differenza di temperatura tra emissione ed atmosfera esterna che all'energia cinetica posseduta dall'emissione. L'innalzamento dipende dalla stabilita' dell'atmosfera e viene valutato dal programma utilizzando le formulazioni di Briggs, che ne forniscono il valore in funzione della velocita' di uscita dell'emissione, della sua temperatura e della stabilita' atmosferica in termini di categorie di Pasquill.

Nell'equazione (1) si tiene conto della diffusione in atmosfera non omogenea lungo la coordinata verticale ("trapping") nella quale l'emissione diffonde in uno strato instabile o neutro, detto strato di mescolamento, sormontato da uno strato piu' stabile che, fungendo da "tappo", limita la dispersione verticale dell'inquinante. Il modello simula tale situazione tramite il metodo delle riflessioni multiple, di cui la sommatoria a secondo membro della (1) costituisce l'espressione matematica, considerando il suolo e la base dello strato stabile superiore perfettamente riflettenti. La procedura di calcolo delineata viene applicata alle categorie instabili o neutre (A,B,C,D): per le categorie stabili (E ed F), in cui l'atmosfera puo' considerarsi

omogenea lungo lo sviluppo verticale che interessa la diffusione, la sommatoria non viene calcolata.

Il modello prende in considerazione anche l'effetto di trascinamento al suolo del pennacchio indotto dalla presenza di edifici sottovento alla sorgente di emissione. Il fenomeno, definito come "downwash" nella terminologia anglosassone, e' conseguenza della turbolenza meccanica generata dalla presenza dell'edificio nella zona sottovento adiacente l'edificio stesso, e determina un incremento della concentrazione massima al suolo ed un avvicinamento della sua localizzazione al punto di emissione. La possibilita' che il fenomeno si verifichi e la sua entita' sono dipendenti dalla distanza tra l'emissione e gli edifici circostanti e dalle dimensioni relative degli edifici stessi rispetto all'altezza della sorgente. Il modello richiede pertanto le dimensioni (altezza e proiezione della larghezza in ognuna delle direzioni di provenienza del vento) dell'edificio che possiede l'altezza maggiore tra quelli posizionati entro un raggio di $5 \cdot L$ dalla sorgente, ove L rappresenta la dimensione inferiore tra l'altezza e larghezza dell'edificio, e verifica se il "downwash" avviene o meno. In caso affermativo, il trascinamento al suolo del pennacchio viene simulato incrementandone la dispersione verticale ed attenuandone l'innalzamento, utilizzando nelle corrispondenti equazioni di valutazione coefficienti correttivi i cui valori dipendono dalle dimensioni dell'edificio.

Il modello valuta la dispersione da sorgenti singolo o multiple, al suolo o in quota, e tratta sia emissioni puntuali che aerali.

Per quel che riguarda i tempi di interazione delle concentrazioni risultanti, il modello e' utilizzabile in due distinte versioni. Nella versione "a tempo breve" (ISCST = Industrial Source Complex Short Term) vengono fornite come risultato le concentrazioni su base oraria: i dati meteorologici richiesti (velocita' e direzione del vento, categorie di stabilita' di Pasquill, altezza dello strato di mescolamento, temperatura ambientale) vanno di conseguenza forniti su base temporale oraria per ognuno dei giorni dell'anno da elaborare.

Nella versione climatologica (ISCLT = Industrial Source Complex Long Term) la concentrazione viene calcolata su base media annuale, utilizzando la seguente espressione:

$$C(x) = \sum_{s,o,v} f(S,O,v) \quad (2)$$

ove $C(x,S,O,v)$ e' la concentrazione media, nel settore O di provenienza del vento, alla distanza x dalla sorgente per la classe di stabilita' S e la velocita' del vento v , mentre $f(S,O,v)$ e' la frequenza assoluta rappresentativa della frazione di tempo nell'anno in cui si verifica la combinazione (S,O,v) . Il programma valuta la concentrazione media in ogni settore O con un'equazione sempre ricavata dal modello gaussiano, ipotizzando una distribuzione orizzontale

uniforme dell'inquinante in ognuno degli n settori in cui e' suddivisa la rosa dei venti (usualmente, n=16):

$$C(x, S, O, v) = Q \left[(2\pi)^{-1/2} v \sigma z (2\pi x/n)^{-1} \exp[-0.5(H/\sigma z)^2] + \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \left(\exp[-0.5((H+2iHm)/\sigma z)^2] + \exp[-0.5((-H+2iHm)/\sigma z)^2] \right) \right]$$

1

(3)

I dati meteorologici risultano pertanto richiesti in termini di frequenze congiunte con cui si verificano le diverse combinazioni di velocita' del vento, direzione di provenienza del vento e categorie di stabilita'. Per avere significato climatologico, i dati devono essere ricavati sulla base di osservazioni pluriennali (almeno 5 anni di dati).

2. CONDIZIONI DI APPLICAZIONE DEL MODELLO

La distribuzione delle concentrazioni al suolo e' stata valutata per un totale di 240 ricettori su un reticolo circolare di 16 km di diametro, costituito da 15 circonferenze concentriche e da 16 raggi coincidenti con le direzioni della rosa dei venti. Le circonferenze, centrate in corrispondenza di uno dei due camini, distano da un minimo di 400 m, nell'area interessata dai valori piu' elevati di concentrazione, ad un massimo di 1 km nelle zone piu' lontane dalla sorgente.

Il modello e' stato applicato nella versione climatologica a lungo termine per aree rurali (ISCLT), utilizzando le frequenze congiunte velocita'-direzione del vento-stabilita' atmosferica (Tab. A4.1) per la zona di localizzazione dell'impianto. I valori sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati meteorologici rilevati dall'Aeronautica Militare nella stazione di Cagliari-Elmas, e definiscono le frazioni di tempo in un anno con cui si verificano le 480 distinte combinazioni velocita' - direzione - stabilita'. Le calme di vento, che nei dati originali non posseggono provenienza e che comprendono i rilevamenti con velocita' inferiore a $0,5 \text{ m s}^{-1}$, sono state distribuite nelle 16 direzioni della rosa assegnando loro una velocita' di $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ed una frequenza, per ogni direzione, pari a quella dei rilevamenti della classe di velocita' del vento piu' bassa ($1-2 \text{ m s}^{-1}$).

Tab. A4.1 - Frequenze congiunte stabilita' atmosferica - direzione e velocita' del vento.

Stazione di Cagliari-Elmas.

STABILITA A

Direz.	Vento (m/s)					
	<0,5	1-2	2,5-3,5	4-6	6,5-11,5	>12
N	0.00012	0.00007	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
NNE	0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NE	0.00004	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ENE	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
E	0.00004	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ESE	0.00004	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
SE	0.00053	0.00033	0.00042	0.00000	0.00000	0.00000
SSE	0.00129	0.00082	0.00103	0.00000	0.00000	0.00000
S	0.00122	0.00077	0.00085	0.00000	0.00000	0.00000
SSO	0.00060	0.00038	0.00021	0.00000	0.00000	0.00000
SO	0.00006	0.00004	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
OSO	0.00024	0.00015	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
O	0.00061	0.00038	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
ONO	0.00116	0.00073	0.00016	0.00000	0.00000	0.00000
NO	0.00142	0.00090	0.00055	0.00000	0.00000	0.00000
NNO	0.00035	0.00022	0.00019	0.00000	0.00000	0.00000

STABILITA B

Direz.	Vento (m/s)					
	<0,5	1-2	2,5-3,5	4-6	6,5-11,5	>12
N	0.00103	0.00107	0.00042	0.00011	0.00000	0.00000
NNE	0.00043	0.00044	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000
NE	0.00007	0.00008	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ENE	0.00007	0.00008	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
E	0.00010	0.00010	0.00007	0.00001	0.00000	0.00000
ESE	0.00034	0.00035	0.00024	0.00012	0.00000	0.00000
SE	0.00073	0.00076	0.00275	0.00186	0.00000	0.00000
SSE	0.00158	0.00163	0.00514	0.00299	0.00000	0.00000
S	0.00188	0.00195	0.00439	0.00236	0.00000	0.00000
SSO	0.00099	0.00102	0.00099	0.00048	0.00000	0.00000
SO	0.00030	0.00031	0.00008	0.00007	0.00000	0.00000
OSO	0.00044	0.00046	0.00008	0.00004	0.00000	0.00000
O	0.00094	0.00097	0.00058	0.00015	0.00000	0.00000
ONO	0.00281	0.00290	0.00134	0.00053	0.00000	0.00000
NO	0.00604	0.00624	0.00319	0.00097	0.00000	0.00000
NNO	0.00319	0.00330	0.00156	0.00067	0.00000	0.00000

STABILITA C

Direz.	Vento (m/s)					
	<0,5	1-2	2,5-3,5	4-6	6,5-11,5	>12
N	0.00000	0.00035	0.00153	0.00123	0.00040	0.00002
NNE	0.00000	0.00012	0.00028	0.00017	0.00001	0.00000
NE	0.00000	0.00002	0.00004	0.00001	0.00000	0.00000
ENE	0.00000	0.00002	0.00001	0.00008	0.00000	0.00000
E	0.00000	0.00004	0.00009	0.00028	0.00000	0.00000
ESE	0.00000	0.00007	0.00030	0.00110	0.00051	0.00002
SE	0.00000	0.00019	0.00140	0.00648	0.00267	0.00002
SSE	0.00000	0.00039	0.00145	0.00888	0.00376	0.00001
S	0.00000	0.00034	0.00119	0.00722	0.00290	0.00001
SSO	0.00000	0.00010	0.00068	0.00146	0.00037	0.00000
SO	0.00000	0.00004	0.00005	0.00013	0.00003	0.00000
OSO	0.00000	0.00001	0.00020	0.00036	0.00016	0.00000
O	0.00000	0.00024	0.00092	0.00131	0.00083	0.00009
ONO	0.00000	0.00114	0.00356	0.00315	0.00132	0.00013
NO	0.00000	0.00253	0.00792	0.00844	0.00521	0.00072
NNO	0.00000	0.00139	0.00503	0.00567	0.00334	0.00016

STABILITA D

Direz.	Vento (m/s)					
	<0,5	1-2	2,5-3,5	4-6	6,5-11,5	>12
N	0.00286	0.00262	0.00253	0.00551	0.00340	0.00009
NNE	0.00158	0.00144	0.00135	0.00145	0.00053	0.00000
NE	0.00103	0.00095	0.00072	0.00082	0.00060	0.00002
ENE	0.00108	0.00099	0.00095	0.00222	0.00173	0.00009
E	0.00182	0.00167	0.00167	0.00488	0.00344	0.00009
ESE	0.00158	0.00144	0.00217	0.00866	0.01011	0.00014
SE	0.00197	0.00180	0.00298	0.01822	0.01331	0.00027
SSE	0.00256	0.00235	0.00275	0.01286	0.01002	0.00018
S	0.00177	0.00162	0.00235	0.00965	0.00799	0.00014
SSO	0.00123	0.00113	0.00108	0.00312	0.00213	0.00001
SO	0.00054	0.00050	0.00050	0.00109	0.00110	0.00005
OSO	0.00079	0.00072	0.00045	0.00267	0.00371	0.00023
O	0.00197	0.00180	0.00199	0.01029	0.01458	0.00126
ONO	0.00527	0.00483	0.00609	0.01881	0.02174	0.00243
NO	0.01078	0.00987	0.01078	0.03233	0.04316	0.00573
NNO	0.00637	0.00583	0.00577	0.02065	0.02075	0.00135

STABILITA E

Direz.	Vento (m/s)					
	<0,5	1-2	2,5-3,5	4-6	6,5-11,5	>12
N	0.00000	0.00060	0.00616	0.00276	0.00000	0.00000
NNE	0.00000	0.00052	0.00229	0.00070	0.00000	0.00000
NE	0.00000	0.00038	0.00079	0.00014	0.00000	0.00000
ENE	0.00000	0.00028	0.00160	0.00018	0.00000	0.00000
E	0.00000	0.00045	0.00370	0.00057	0.00000	0.00000
ESE	0.00000	0.00087	0.00430	0.00168	0.00000	0.00000
SE	0.00000	0.00088	0.00897	0.00364	0.00000	0.00000
SSE	0.00000	0.00065	0.00528	0.00287	0.00000	0.00000
S	0.00000	0.00034	0.00300	0.00172	0.00000	0.00000
SSO	0.00000	0.00025	0.00121	0.00048	0.00000	0.00000
SO	0.00000	0.00020	0.00042	0.00007	0.00000	0.00000
OSO	0.00000	0.00017	0.00083	0.00028	0.00000	0.00000
O	0.00000	0.00055	0.00360	0.00137	0.00000	0.00000
ONO	0.00000	0.00169	0.01166	0.00372	0.00000	0.00000
NO	0.00000	0.00223	0.02256	0.00891	0.00000	0.00000
NNO	0.00000	0.00155	0.01550	0.00731	0.00000	0.00000

STABILITA F

Direz.	Vento (m/s)					
	<0,5	1-2	2,5-3,5	4-6	6,5-11,5	>12
N	0.00843	0.00747	0.00228	0.00000	0.00000	0.00000
NNE	0.00469	0.00415	0.00100	0.00000	0.00000	0.00000
NE	0.00185	0.00164	0.00032	0.00000	0.00000	0.00000
ENE	0.00226	0.00200	0.00030	0.00000	0.00000	0.00000
E	0.00344	0.00304	0.00079	0.00000	0.00000	0.00000
ESE	0.00404	0.00357	0.00089	0.00000	0.00000	0.00000
SE	0.00582	0.00515	0.00194	0.00000	0.00000	0.00000
SSE	0.00394	0.00349	0.00117	0.00000	0.00000	0.00000
S	0.00260	0.00230	0.00077	0.00000	0.00000	0.00000
SSO	0.00137	0.00121	0.00030	0.00000	0.00000	0.00000
SO	0.00096	0.00085	0.00011	0.00000	0.00000	0.00000
OSO	0.00094	0.00083	0.00006	0.00000	0.00000	0.00000
O	0.00305	0.00270	0.00053	0.00000	0.00000	0.00000
ONO	0.01069	0.00947	0.00277	0.00000	0.00000	0.00000
NO	0.02583	0.02287	0.00710	0.00000	0.00000	0.00000
NNO	0.01920	0.01700	0.00549	0.00000	0.00000	0.00000

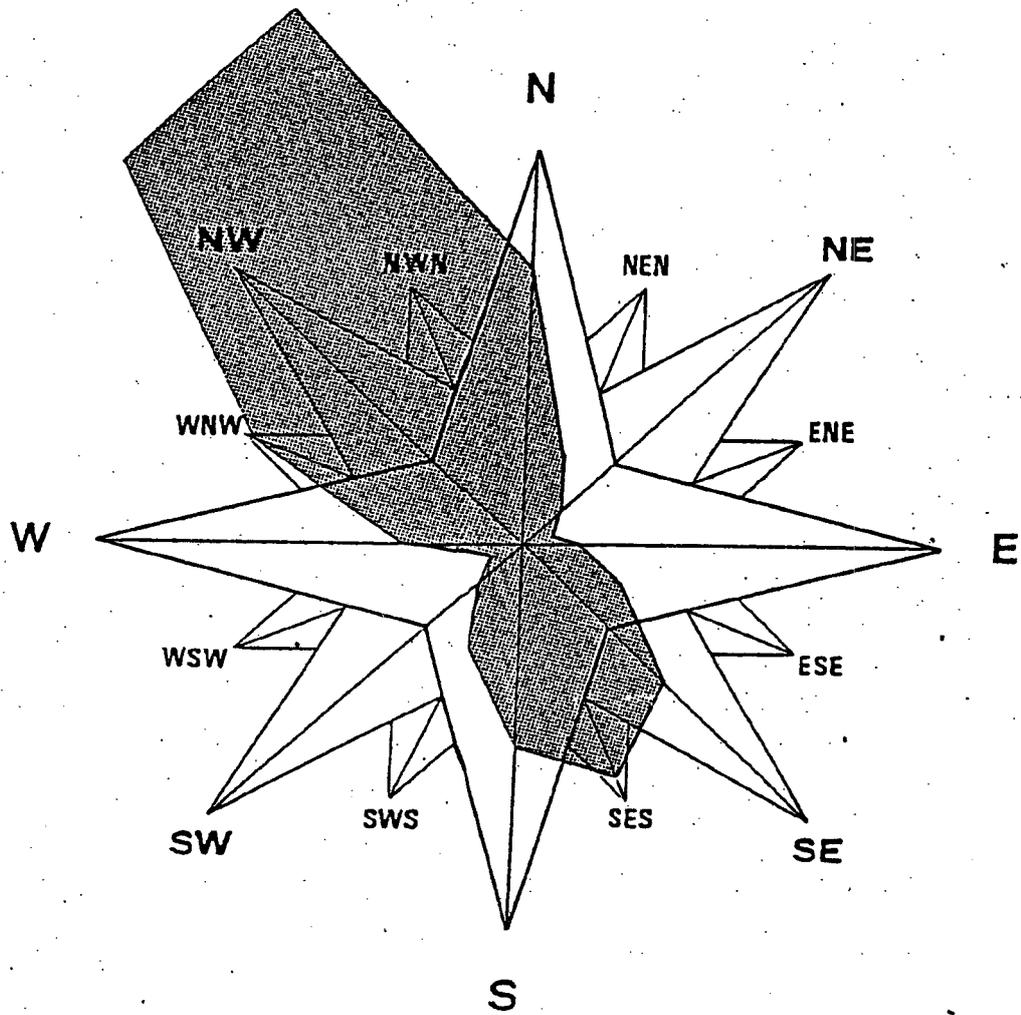


Fig. A4.2

ROSA DEI VENTI - STAZIONE CAGLIARI-ELMAS

La figura A5.2 riporta la rosa dei venti relativa alla stazione di Cagliari-Elmas.

Per l'altezza dello strato di mescolamento, di cui il modello richiede il valor medio annuale dei massimi pomeridiani (ore 14), non si dispone di dati rilevati in loco: tale parametro, pertanto, non e' stato introdotto nella valutazione, anche in considerazione del fatto che il notevole innalzamento del pennacchio porta sicuramente l'emissione al di sopra dei valori dello strato prevedibili per l'area.

Nel modello non si tiene conto del fenomeno del "downwash": la zona immediatamente adiacente l'emissione non e' difatti interessata dalla presenza di edifici in grado di determinare effetti di questo tipo.

I dati di input alle emissioni previste vengono per comodita' di lettura riportati di seguito:

Portata totale fumi	1.056.960 x 2	Nmc/h
Temperatura dei fumi	510	°C
Diametro camini	6,5	m
Altezza dei camini	18	m

Per quanto riguarda la concentrazione degli inquinanti nei fumi, sono stati utilizzati i valori attesi, ovvero:

NO2	500	mg/Nmc
SO2	150	mg/Nmc

Assunte come coordinate 0,0 quelle di uno dei due camini,
l'altro camino ha coordinate 18 m in direzione Est e 31,5 m
in direzione Nord.

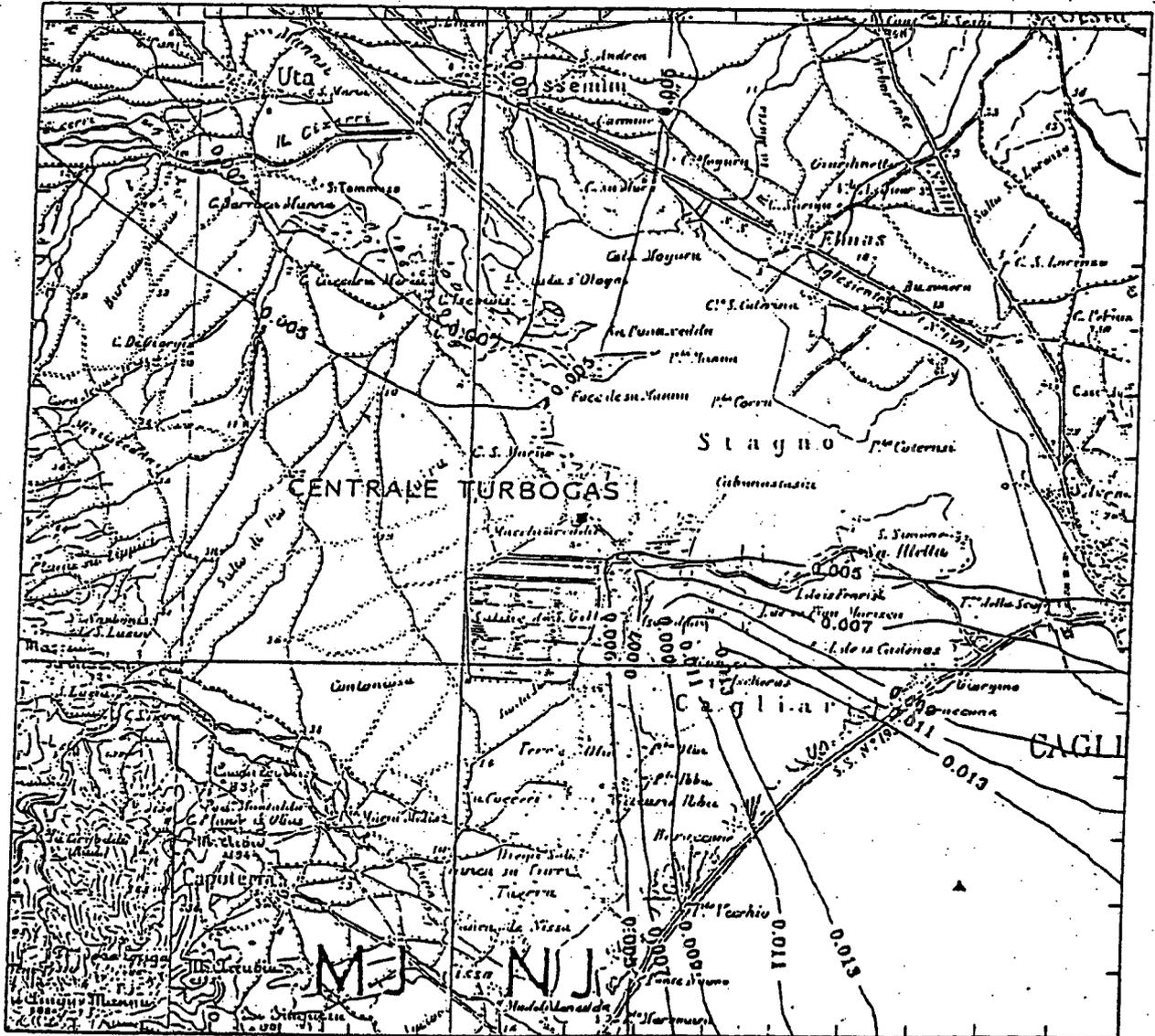
3. RISULTATI DELL'ELABORAZIONE

Le figure A4.3 ed A4.4 riportano le mappe di inquinamento fornite dal programma.

Le concentrazioni calcolate sono medie annuali basate su di un funzionamento di 1000 ore/anno dei due gruppi turbogas in parallelo.

Come si desume da tali figure, la zona di massima ricaduta e' posizionata nella direzione dei venti piu' frequenti, e le concentrazioni degli inquinanti previste in tale zona sono:

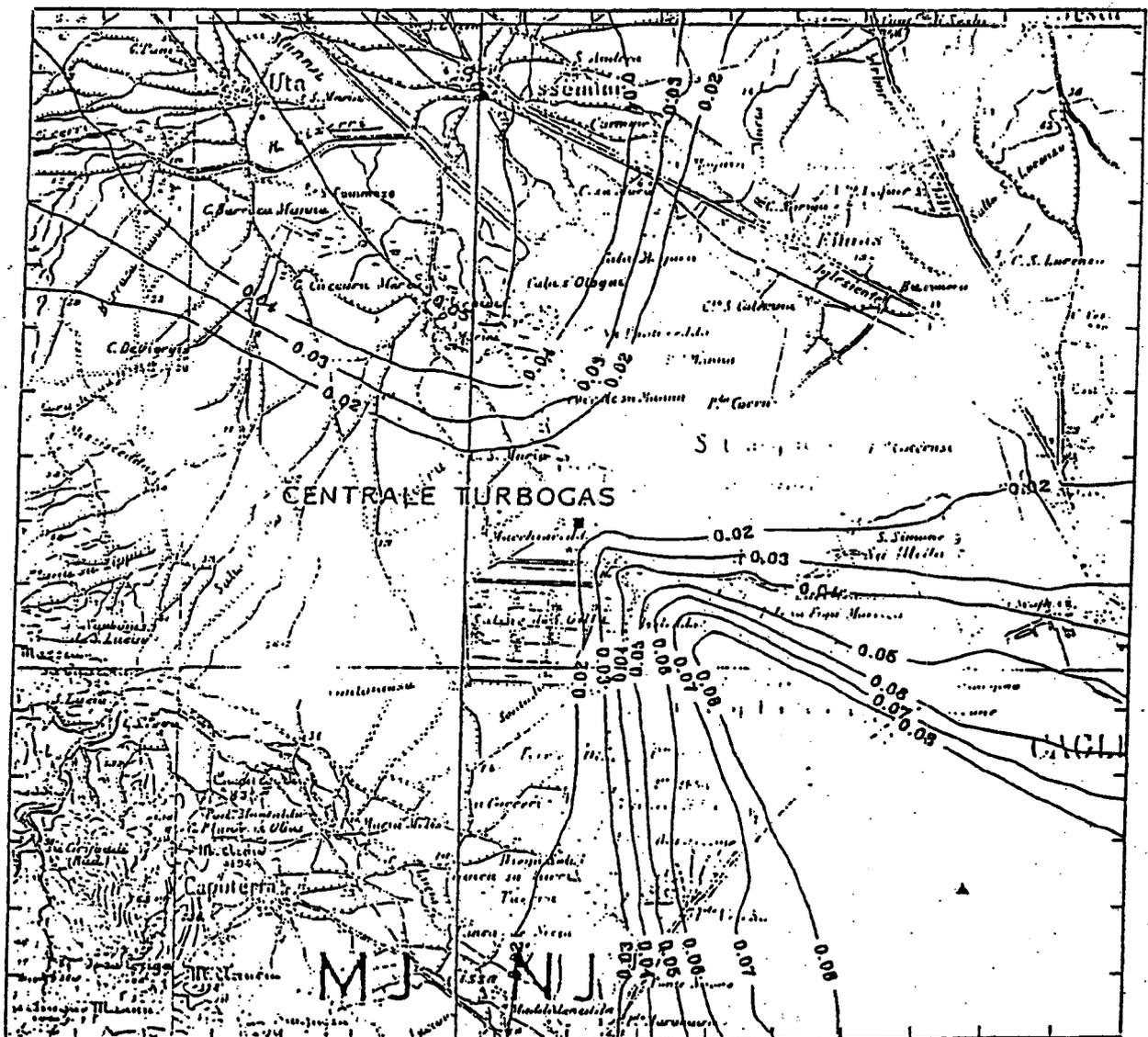
- SO ₂	0,018 $\mu\text{g}/\text{mc}$
- NO _x	0,12 $\mu\text{g}/\text{mc}$



CONCENTRAZIONE MASSIMA $0.018 \mu\text{g m}^{-3}$

Fig. A4.3

Mappa delle concentrazioni medie annuali di ricaduta al suolo dell' SO_2



CONCENTRAZIONE MASSIMA $0,12 \mu\text{g m}^{-3}$

Fig. A4.4

Mappa delle concentrazioni medie annuali di ricaduta al suolo dell' NO_x