



- C) Vetri
- D) Pietre
- E) Contatti elettrici
- F) Materiali polimerici.

Al fine di valutare il danno corrosivo, sono inoltre effettuate in continuo nelle varie stazioni di esposizione le seguenti misure:

- A) Gas: O_3 , NO, NO_2 , SO_2 , particolato.
- B) Nelle precipitazioni umide: mm, pH, conduttanza elettrica, NO_3^- , Cl^- , SO_4^{--} , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ .

L'Italia partecipa a questo Programma fin dalla sua costituzione, avvenuta nel

1986. La rete nazionale è composta di 4 stazioni.

Il Programma è ormai in grado di valutare quantitativamente la relazione dose-effetto dei più importanti inquinanti sulla maggior parte dei materiali esposti. Attualmente è in via di elaborazione una mappa delle zone a rischio dell'inquinamento atmosferico sui materiali studiati nei Paesi partecipanti al Programma. Questi elementi consentiranno anche una valutazione economica del danno.

Gli impatti sulle colture agrarie e sulla vegetazione

Parlare di impatto dell'inquinamento atmosferico sulle colture agrarie e sulla vegetazione significa focalizzare l'attenzione sulle emissioni antropiche o sulla formazione in atmosfera di inquinanti secondari. Oltre ai composti dello zolfo e dell'azoto che interessano ampie estensioni territoriali, in area mediterranea l'inquinante che si ritiene maggiormente fitotossico è l'ozono, un ossidante fotochimico risultato di reazioni tra ossidi di azoto e COV

SCHEDA 3

Foreste ed ecosistemi

Il Ministero delle politiche agricole e forestali (Corpo Forestale dello Stato), in base al Regolamento UE 1091/94, ha avviato dal 1995 il "Programma Nazionale Integrato per il Controllo degli Ecosistemi Forestali" (CON.ECO.FOR.), per studiare gli effetti dell'inquinamento atmosferico e dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi forestali. Il Programma si inquadra anche nell'ambito dell'attuazione della Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero (LRTAP UN-ECE), ratificata dall'Italia nel 1982 e delle Risoluzioni delle Conferenze dei Ministri sulla protezione delle foreste in Europa (Risoluzione 1, Strasburgo, 1990, Risoluzione H4, Helsinki, 1993).

Il Programma costituisce l'evoluzione delle indagini (cosiddette di 1° livello) condotte, già dal 1987, su di una rete europea costruita su una maglia 16x16 km, consistente attualmente in Italia in circa 260 punti di rilevamento distribuiti sul tutto il territorio nazionale. In questi punti sono effettuate annualmente valutazioni dello stato delle chiome degli alberi. Su una selezione di punti della stessa maglia sono state condotte, nel 1995-1996, indagini a carattere pedologico ed analisi del contenuto chimico delle foglie.

Il Programma CONECOFOR è attualmente basato su 27 aree permanenti, nel quadro dell'International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests; 10 aree sono anche classificate "biomonitoring sites", nel quadro dell'International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems.

Nelle aree permanenti sono svolte nove diverse indagini, avviate dal 1996: analisi geologica e geomorfologica (preliminare), analisi della vegetazione (ogni anno), analisi delle

condizioni delle chiome (ogni anno), analisi del contenuto chimico delle foglie (ogni due anni), analisi dei suoli (ogni 10 anni), analisi delle variazioni di accrescimento degli alberi (ogni 5 anni), analisi delle deposizioni atmosferiche (in continuo), analisi meteorologiche (in continuo), analisi degli inquinanti atmosferici (in continuo). Il Corpo Forestale dello Stato è il centro di coordinamento di sette istituti di ricerca, ognuno responsabile di ciascuna indagine.

Le aree permanenti, selezionate secondo quanto prescritto dal Regolamento UE 1091/94 in modo da comprendere i principali ecosistemi forestali del territorio italiano, sono distribuite su tutto il paese e comprendono ognuna superfici di 10-100 ha, al cui interno sono presenti due parcelle di analisi di 5.000 m². Le specie dominanti principali sono *Fagus sylvatica* (10 aree), *Quercus cerris* (5), *Picea abies* (6), *Quercus ilex* (4), *Quercus petraea* (1) e *Carpinus betulus* (1). Un esame dei primi quattro anni di attuazione del Programma CONECOFOR consente di affermare che si è pervenuti ad una descrizione dettagliata ed organica dei principali ecosistemi forestali presenti in Italia. Grazie al suddetto Programma, oggi è possibile conoscere con un buon grado di completezza le caratteristiche ecologiche di 16 diverse comunità forestali presenti sul territorio nazionale ed è stato dato un importante contributo all'insieme di informazioni che vengono e che verranno nei prossimi anni da tutti i programmi di controllo delle foreste europee. Tali indicazioni amplieranno le conoscenze sulle foreste, evidenziando, in particolare, i nessi di causa-effetto tra i vari fattori interagenti, consentendo una valutazione più approfondita degli interventi di salvaguardia di una importante risorsa economica e, soprattutto, ambientale.



(Composti Organici Volatili).

E' stato accertato che le concentrazioni ambientali di ozono registrate negli Stati Uniti ed in Europa sono sufficientemente alte da causare una diminuzione del raccolto nelle piante agrarie. Ne consegue l'esigenza di trovare una funzione dose/risposta sulle colture agrarie al fine di poter arrivare ad un'analisi costo/beneficio. Trovare precise relazioni risulta comunque difficile per la presenza di altri fattori che

influenzano tale risposta, quali il microclima e quelli biotici.

Dal 1987, la valutazione dell'impatto dell'inquinamento atmosferico su specie di interesse agrario è oggetto di ricerca del programma CP-Crops UN/ECE (International Cooperative Programme on Effects of air Pollution and other Stresses on Agricultural Crops).

In occasione dell'UN/ECE Workshop tenutosi a Kuopio (Finlandia) nel 1996, è stato definito l'AOT40 quale livello

critico che corrisponde alla "concentrazione di ozono troposferico nell'atmosfera che incide direttamente e negativamente su recettori quali piante ed ecosistemi". Il livello critico stabilito in ambito UN/ECE per le specie agrarie e seminaturali è pari ad un valore soglia (AOT40) di 3.000 ppb.h accumulati su tre mesi estivi, mentre per la vegetazione naturale il livello critico è stato posto a 10.000 ppb.h per un periodo di sei mesi da Aprile a

SCHEDA 4

Protocolli attuativi della Convenzione di Ginevra (aggiornamento rispetto alla Relazione sullo Stato dell'Ambiente del 1997)

Il Protocollo EMEP

E' il Protocollo sul finanziamento a lungo termine del programma cooperativo per il controllo e la valutazione del trasporto transfrontaliero degli inquinanti atmosferici in Europa (EMEP).

Il Protocollo di Helsinki sullo zolfo del 1985

Il Protocollo sulla riduzione delle emissioni di zolfo o dei loro flussi transfrontalieri prevedeva la riduzione, entro il 1993, delle emissioni nazionali di zolfo del 30% rispetto alle emissioni dichiarate nel 1980 dai Paesi firmatari. L'impegno di riduzione è stato rispettato.

Il Protocollo di Sofia sugli ossidi di azoto del 1988

Il Protocollo sulla riduzione delle emissioni degli ossidi di azoto o dei loro flussi transfrontalieri prevedeva la stabilizzazione, entro il 1994, delle emissioni nazionali di ossidi di azoto rispetto alle emissioni dichiarate nel 1987 dai Paesi firmatari (l'Italia si è inoltre assunta, mediante dichiarazione governativa, l'impegno di ridurre ulteriormente le emissioni di ossidi di azoto, entro il 1998, del 30% rispetto ai livelli di un anno a scelta nel periodo 1980-1986). L'impegno alla stabilizzazione delle emissioni è stato rispettato. Al momento della scrittura del presente testo, manca l'inventario delle emissioni per il 1998, perciò non è possibile verificare il rispetto della dichiarazione governativa *a latere*, che comunque non è legalmente vincolante.

Il Protocollo di Ginevra sui Composti Organici Volatili (COV) del 1991

Il Protocollo sulla riduzione delle emissioni dei composti organici volatili (COV) o dei loro flussi transfrontalieri prevede la riduzione, entro il 1999, delle emissioni nazionali dei composti organici volatili del 30% rispetto alle emissioni dichiarate nel 1990 dai Paesi firmatari.

Il Protocollo di Oslo su ulteriori riduzioni dello zolfo del 1994

Il Protocollo sull'ulteriore riduzione delle emissioni di zolfo o dei loro flussi transfrontalieri prevede per l'Italia la riduzione delle emissioni nazionali di zolfo del 65% entro il 2000 e del 73% entro il 2005 rispetto alle emissioni dichiarate nel 1980.

Il protocollo di Aarhus sui metalli pesanti del 1998

Il Protocollo sui metalli pesanti è stato firmato ad Aarhus il 24 Giugno 1998. Attualmente limitato a cadmio, piombo e mercurio, prevede la riduzione delle emissioni e misure di controllo sulle fonti fisse e sui prodotti.

Il Protocollo di Aarhus sugli inquinanti organici persistenti (POP) del 1998

Il Protocollo sugli inquinanti organici persistenti è stato firmato ad Aarhus il 24 Giugno 1998. Attualmente è limitato alle seguenti sedici sostanze: Aldrin, Clordano, Clordecone, DDT, Dieldrin, Endrin, Eptacloro, Esabromobifenile, Esaclorobenzene, Mirex PCB, Toxafene, Lindano, IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici), Diossine, Furani. Prevede la riduzione delle emissioni, misure restrittive su alcune sostanze, misure di controllo sulle fonti fisse e mobili.

Il Protocollo di Goteborg su acidificazione, eutrofizzazione ed ozono del 1999

Il Protocollo per l'abbattimento dell'acidificazione, dell'eutrofizzazione e dell'ozono al suolo è stato firmato a Goteborg il 1 dicembre 1999. Prevede riduzioni delle emissioni di zolfo, ossidi di azoto, composti organici volatili ed ammoniaca entro il 2010, misure di controllo sulle fonti fisse e mobili, sui prodotti contenenti COV e sull'ammoniaca.



Settembre L'analisi dei dati di ozono nell'ambito dell'ICP-Crops dal 1989 al 1997 mette in evidenza in Europa sia un trend spaziale nord-sud che un trend temporale della distribuzione di tale inquinante (tabella 8).

La percentuale dei siti partecipanti che ha mostrato un danno macroscopico nelle piante bioindicatrici utilizzate, è aumentata negli ultimi anni (Figura 15), coerentemente con l'andamento crescente dei valori di AOT40 riportati nella tabella precedente.

Le risposte

La difficoltà di risolvere il problema dell'inquinamento atmosferico su scala nazionale ha spinto la comunità internazionale ad affrontare il problema anche su scala sovranazionale.

Recentemente la Commissione Europea ha iniziato ad affrontare il problema dell'inquinamento atmosferico transfrontaliero, varando le strategie comunitarie che sono alla base di apposite direttive.

Nell'ambito della Commissione Economica per l'Europa delle Nazioni Unite (CEE-ONU), il 13 Novembre 1979 è stata firmata a Ginevra la Convenzione per proteggere l'ambiente e la salute

dall'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lunga distanza (Ministero dell'Ambiente – Relazione sullo Stato dell'Ambiente 1997).

Mentre per alcuni protocolli è ancora in corso il processo di ratifica, per altri, invece, il loro ingresso nel panorama legislativo nazionale ha avuto notevoli conseguenze.

Il protocollo su acidificazione, eutrofizzazione ed ozono

Tetti alle emissioni

L'obiettivo del protocollo è di ricondurre le deposizioni di ossidi di zolfo, ossidi di azoto ed ammoniaca al di sotto dei carichi critici di acidificazione ed eutrofizzazione, e le concentrazioni al suolo di ozono al di sotto dei livelli critici. A causa delle difficoltà di raggiungere questi obiettivi con le tecnologie attuali, sono stati introdotti degli obiettivi intermedi in grado di garantire comunque un notevole miglioramento delle condizioni ambientali in tutta Europa. Sono stati perciò sviluppati degli scenari di riferimento ed una serie di scenari di riduzione corrispondenti a differenti obiettivi ambientali. I tetti alle emissioni sono stati negoziati a partire da tali scenari. Il modello uti-

lizzato per sviluppare gli scenari è il modello di valutazione integrata RAINS sviluppato dallo International Institute for Applied System Analysis (IIASA).

I tetti che l'Italia dovrà rispettare sono riportati in tabella 9, insieme con le percentuali di riduzione e gli scenari di riferimento.

Come si vede l'Italia si è impegnata a conseguire ambiziose riduzioni delle emissioni, che richiederanno l'introduzione di ulteriori e significative misure di abbattimento delle emissioni oltre a quelle già previste od in programma.

Valori limite alle emissioni

Il Protocollo prevede l'introduzione obbligatoria di valori limite alle emissioni di SO_x, NO_x e COV per gli impianti nuovi ed esistenti considerati come principali categorie di fonti di emissione (i grandi impianti di combustione ed alcuni impianti industriali) e per le fonti mobili. I valori limite andranno applicati ai nuovi impianti entro un anno dall'entrata in vigore del Protocollo, ed agli impianti esistenti al massimo entro il 31 dicembre 2007.

I valori limite introdotti per i nuovi grandi impianti di combustione sono quelli contenuti nella proposta di revisione della direttiva approvata dal

TABELLA 9

Tetti di emissione per l'Italia stabiliti dal Protocollo su acidificazione, eutrofizzazione ed ozono

	Emissioni nel 1990 (kt)	Emissioni al 2010 (kt)	Percentuale di riduzione (%)	REF(*) (scenario di riferimento)	MFR(**) (massime riduzioni tecnicamente ottenibili)
SO _x	1.651	500	70	567	194
NO _x	1.938	1.000	48	1.130	396
COV	2.213	1.159	48	1.159	617
NH ₃	466	419	10	432	282

(*) REF: emissioni che si avrebbero al 2010 applicando la vigente e prevista legislazione nazionale e comunitaria.

(**) MFR (Maximum Feasible Reduction): emissioni che si avrebbero al 2010 applicando tutte le tecniche di abbattimento disponibili senza modificare gli scenari di sviluppo economico e di consumi energetici previsti per le prossime decadi.

FONTE: ENEA, 2000.



Consiglio UE e ora al secondo esame del Parlamento Europeo.

I valori limite introdotti per gli impianti di combustione esistenti sono quelli previsti dalla Direttiva 88/609 sui grandi impianti di combustione. Tali valori limite vanno estesi anche agli impianti autorizzati prima del 1989, attualmente non coperti da limiti alle emissioni. I valori limite agli impianti esistenti potranno non essere applicati se ciò risultasse tecnicamente o economicamente non realizzabile, previa opportuna documentazione.

Per quanto riguarda gli impianti industriali, i limiti introdotti si riferiscono a direttive comunitarie concernenti impianti di produzione di biossido di titanio e attività industriali che emettono COV dall'utilizzo di solventi (Direttiva 99/13). I limiti introdotti per la produzione e distribuzione di benzine sono più stringenti di quelli previsti dalla corrispondente direttiva comunitaria, e coincidono con i limiti previsti dalla legge italiana. Per tutti gli altri impianti i limiti introdotti, pur essendo raggiungibili dall'industria italiana, sono completamente nuovi.

Per quanto riguarda le nuove fonti mobili, i valori limite sono quelli previsti dalle normative comunitarie, con la

relativa tempistica.

Il Protocollo raccomanda inoltre alle Parti l'applicazione delle migliori tecniche disponibili agli impianti nuovi ed esistenti, considerati come principali categorie di fonti di emissione, ed alle fonti mobili.

Prodotti contenenti COV

Una delle principali fonti di emissione di COV è rappresentata dai prodotti per uso domestico, che contengono elevate percentuali di solventi. Il Protocollo prevede che tutte le Parti dovranno obbligatoriamente introdurre misure per ridurre le emissioni di COV associate con l'uso di questi prodotti. Si tratterà pertanto di introdurre limiti al contenuto di solventi in questi prodotti. La Commissione si è già impegnata a presentare una direttiva in tal senso.

Sarà difficile per l'Italia rispettare i limiti globali nazionali alle emissioni senza l'introduzione di misure sui prodotti. D'altro canto le conoscenze su tali prodotti sono assai frammentarie. Una conoscenza approfondita dei prodotti contenenti COV utilizzati in Italia, di eventuali sostituti e dei loro costi rappresenta sicuramente un elemento di criticità.

Ammoniaca

Il Protocollo di Göteborg affronta, per la prima volta in maniera dettagliata, gli aspetti connessi alle emissioni del settore agricoltura. Sulla base dell'inventario relativo al 1990, elaborato da ENEA con la collaborazione del Centro Ricerche sulla Produzione Animale (CRPA), le emissioni totali di ammoniaca in atmosfera ammontano a 464 kt/anno (1990). Alla zootecnia è attribuibile il 75% di tali emissioni. La fase emissiva a maggior incidenza risulta essere lo spandimento degli effluenti di allevamento (133,8 kt/anno), seguita dalle operazioni di governo dei ricoveri (111,5 kt/anno), dagli stoccaggi (87,9 kt/anno) e, infine, dal pascolo (11,3 kt/anno).

Il protocollo assegna al nostro Paese un tetto massimo di 419 kt/anno, valore che comporta una riduzione del 10% dei valori di ammoniaca emessi. Tale riduzione potrebbe essere così conseguita: secondo uno studio dello IASA, in assenza di interventi e prevalentemente in virtù della riduzione della consistenza zootecnica prevista per il prossimo decennio, si dovrebbe conseguire "naturalmente" una diminuzione di circa il 7%, valore percentuale che porta l'emissione a 432 kt/anno. Il restante 3% di riduzione può essere

SCHEDA 5

Categorie di attività industriali a cui applicare i limiti alle emissioni previsti dal protocollo su acidificazione, eutrofizzazione e ozono

SO_x

- Grandi impianti di combustione;
- Impianti Claus;
- Produzione di biossido di titanio.

NO_x

- Grandi impianti di combustione;
- Turbine;
- Produzione di cemento;
- Motori fissi (solo nuovi motori);
- Produzione e processamento di metalli (solo per gli impianti di sinterizzazione);
- Produzione di acido nitrico.

COV

- Produzione e distribuzione di benzina;
- Rivestimento adesivo;
- Stratificazione di legno e plastica;
- Attività di rivestimento nell'industria automobilistica;
- Attività di rivestimento in settori industriali;
- Verniciatura in continuo (coil coating);
- Pulitura a secco;
- Fabbricazione di preparati per rivestimenti, vernici, inchiostri e adesivi;
- Fabbricazione di prodotti farmaceutici;
- Stampa;
- Conversione di gomma naturale o sintetica;
- Pulizia di superfici;
- Estrazioni di olio vegetale e grasso animale e attività di raffinazione di olio vegetale;
- Finitura di veicoli;
- Impregnazione del legno.



ottenuto con diverse opzioni: ad esempio con un più razionale impiego dell'urea o con altre misure interessanti le discariche oppure le industrie dei fertilizzanti.

Tuttavia, anche se il traguardo assegnato potrebbe essere raggiunto con sforzo relativamente modesto, la zootecnia del nostro e degli altri Paesi firmatari della Convenzione dovrà comunque prendere una serie di misure obbligatorie per il contenimento delle emissioni ammoniacali. In sintesi:

- obbligo di riduzione delle emissioni di almeno il 30% durante lo spandimento dei liquami;
- obbligo di interrimento del letame e dei materiali solidi di origine zootecnica entro le 24 ore dallo spandimento;
- obbligo di copertura degli stoccaggi per gli allevamenti suinicoli di dimensioni superiori a 2.000 capi all'ingrasso e a 750 scrofe, e per gli allevamenti avicoli di più di 40.000 capi. Le scadenze di applicazione di questa norma saranno ravvicinate per gli allevamenti di nuova realizzazione, mentre saranno dilazionate nel tempo per gli allevamenti esistenti;
- per i nuovi ricoveri dovranno essere adottate tecniche di stabulazione che comportino una riduzione delle emis-

sioni ammoniacali di almeno il 20%.

Sarà obbligo del nostro Paese, infine, emanare un Codice di Buone Pratiche Agricole relativo al contenimento delle emissioni in atmosfera.

Tale codice affiancherà quello già esistente per il contenimento delle emissioni nelle acque e nel suolo. Il raggiungimento del tetto alle emissioni e l'introduzione obbligatoria delle misure di contenimento delle emissioni rappresentano quindi gli elementi di criticità.

Le strategie comunitarie

Per combattere gli effetti dell'inquinamento atmosferico transfrontaliero la Commissione Europea ha sviluppato delle strategie su acidificazione ed ozono.

Esse sono basate sullo stesso approccio metodologico utilizzato per il protocollo di Goteborg, limitandone però l'applicazione ai soli Paesi dell'Unione Europea, eventualmente con la possibile estensione ai cosiddetti Paesi di cui è prevista l'adesione alla UE.

L'obiettivo della strategia per l'acidificazione è stato definito in sede di Consiglio dei Ministri dell'ambiente dell'UE nell'azzeramento totale delle eccedenze dei carichi critici di acidificazione, con la ulteriore fissazione di un obiettivo inter-

medio, mentre non è stato definito un obiettivo per l'ozono. Sulla base di tali premesse, la Commissione Europea ha presentato una proposta di direttiva sui tetti nazionali alle emissioni (Direttiva NEC, National Emission Ceiling), su cui il Consiglio UE ha raggiunto una posizione negoziata, attualmente all'esame del Parlamento Europeo.

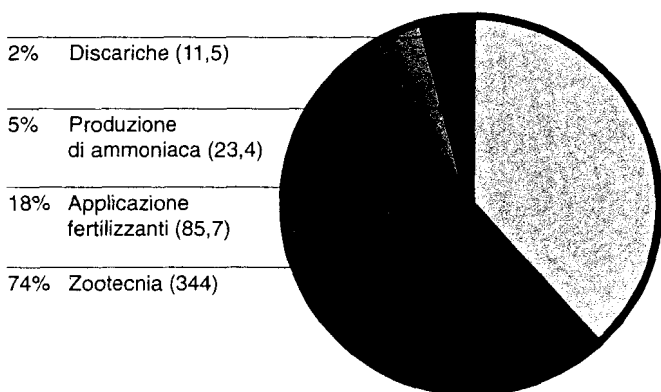
La realizzazione delle strategie richiede inoltre la revisione della direttiva sui combustibili, per la quale è stato raggiunto un accordo politico sulla proposta di revisione al Consiglio dei Ministri dell'ambiente del 16 giugno 1998, e della direttiva sui grandi impianti di combustione, affrontata pertanto contestualmente alla Direttiva NEC.

Altra importante Direttiva collegata alla strategia ozono e le cui conclusioni sono intrecciate alle conclusioni della Direttiva NEC è la "Direttiva Figlia" sulla qualità dell'aria relativa all'ozono, anch'essa ancora in discussione.

Il successo delle strategie comunitarie su acidificazione ed ozono è anche legato all'applicazione della Direttiva sulla prevenzione ed il controllo dell'inquinamento integrato (IPPC), della Direttiva solventi, della Direttiva sui motori diesel utilizzati in vari tipi di macchinari e del programma AUTO OIL.

FIGURA 16

Ripartizione delle emissioni totali di ammoniaca (kt/anno), 1990



FONTE: CRPA, 2000.



SCHEDA 6

Modelli di trasporto e trasformazione fotochimica dovuta all'insieme delle sorgenti nazionali sul territorio italiano

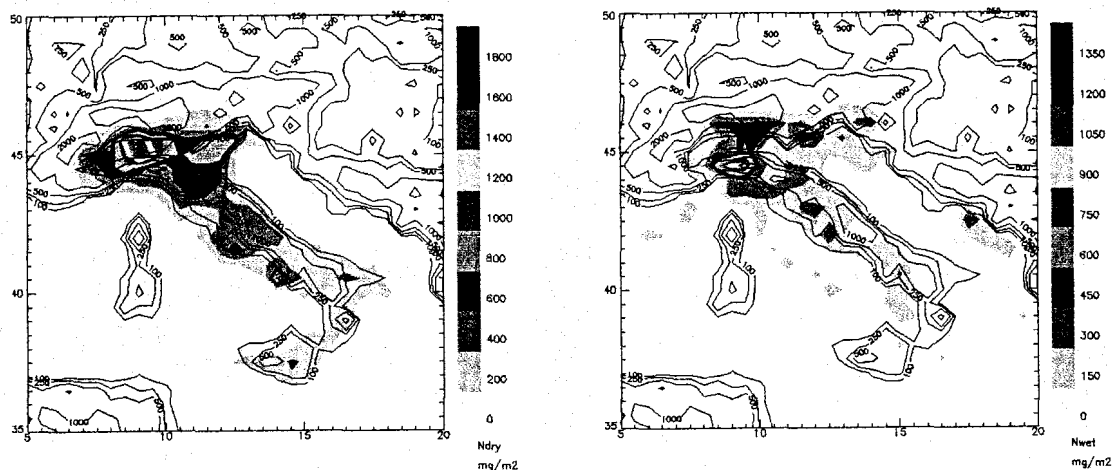
Gli strumenti modellistici sono sempre più utilizzati in ambito europeo come supporto alla messa a punto di strategie di controllo delle emissioni che incidono sui processi di acidificazione, eutrofizzazione e formazione dell'ozono troposferico. In particolare l'esperienza condotta da ENEL Ricerca (ora CESI) con l'Università di Brescia ha consentito di mettere a punto un

sistema modellistico in grado di calcolare sull'intero territorio italiano la distribuzione delle deposizioni totali (secche ed umide) di solfati, nitrati ed ammonio dovute all'insieme delle sorgenti nazionali.

I risultati ottenuti mediante l'applicazione di tale codice ed il successivo confronto, limitatamente al territorio italiano ed

FIGURA 1

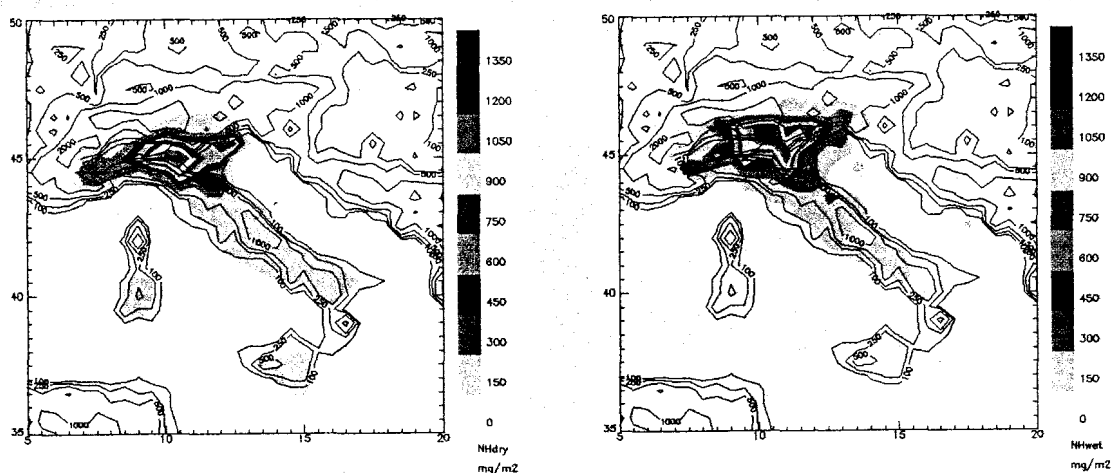
Stima delle deposizioni secche (sinistra) e umide (destra) di azoto ossidato (N) calcolate dal codice lagrangiano a scala nazionale (mg m^{-2}), 1994



FONTE: Elaborazione a cura di CESI - B.U. Ambiente, 2000

FIGURA 2

Stima delle deposizioni secche (sinistra) e umide (destra) di azoto ridotto (NH) calcolate dal codice lagrangiano a scala nazionale (mg m^{-2}), 1994



FONTE: Elaborazione a cura di CESI - B.U. Ambiente, 2000



all'anno 1994, con le analoghe stime effettuate con il modello EMEP (modello a scala europea), hanno evidenziato che le frazioni depositate sul suolo italiano calcolate da EMEP risultano inferiori.

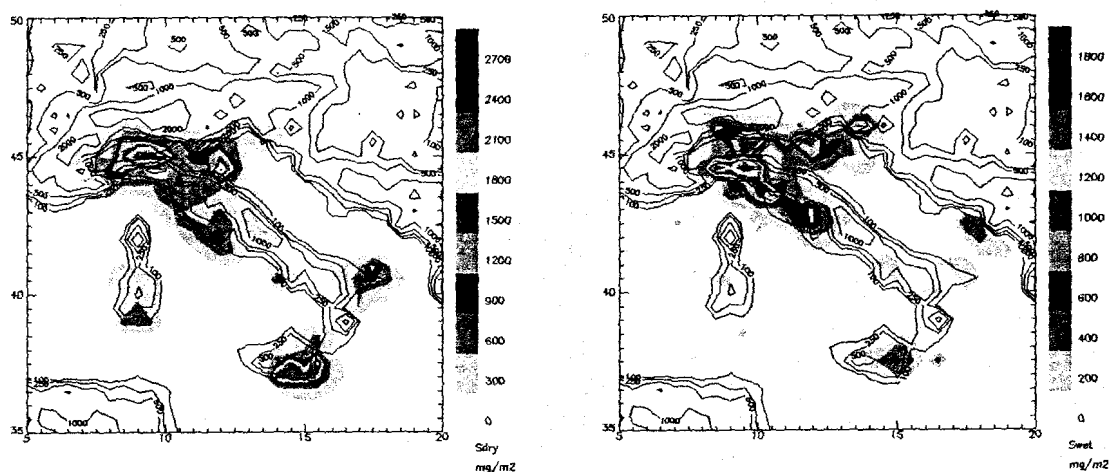
Tale risultato è stato attribuito alla maggiore risoluzione delle simulazioni effettuate con il codice a scala nazionale. Per quanto riguarda la formazione di ozono troposferico, i livelli elevati di concentrazione che si rilevano nelle nostre aree urbanizzate nei periodi primaverili - estivi, sono conseguenza di una combinazione di sostanze (principalmente

ossidi di azoto ed idrocarburi) emesse da diversi comparti produttivi e da sorgenti naturali, provenienti sia da sorgenti locali che remote.

Anche se ancora poche, esistono esperienze italiane di utilizzo della modellistica fotochimica per bacini particolarmente critici, come, ad esempio, l'area metropolitana di Milano: i risultati derivanti da queste prime applicazioni sono stati sicuramente incoraggianti ed hanno evidenziato, in particolare per quanto riguarda l'ozono, un buon accordo tra concentrazioni osservate e calcolate.

FIGURA 3

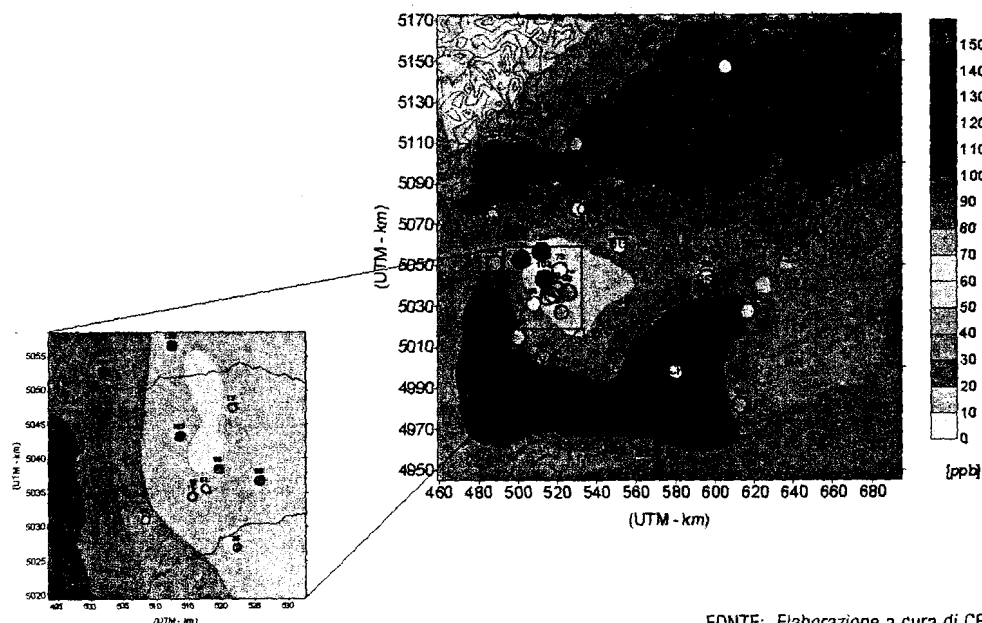
Stima delle deposizioni secche (sinistra) e umide (destra) di zolfo (S) calcolate dal codice lagrangiano a scala nazionale (mg m^{-2}), 1994



FONTE: Elaborazione a cura di CESI - B.U. Ambiente, 2000

FIGURA 4

Concentrazioni al suolo di Ozono simulate (isolinee) e misurate (cerchi): 4 giugno 1998 ore 16.00 - regione Lombardia e zoom su Milano.



FONTE: Elaborazione a cura di CESI - B.U. Ambiente, 2000



SCHEDA 7

Modellistica integrata e costi delle misure di abbattimento

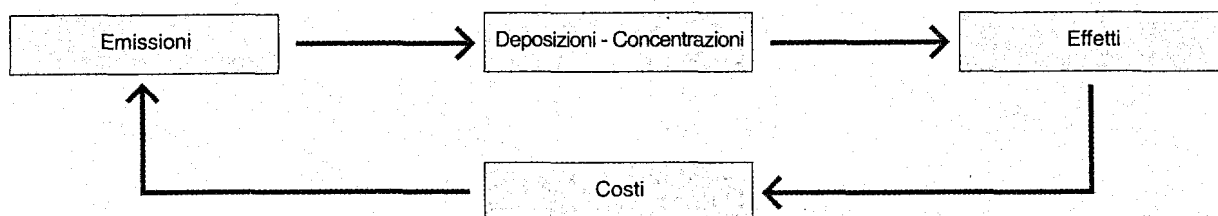
Un modello di valutazione integrata rappresenta uno strumento in grado di assistere i decisori politici nel valutare le opzioni per ridurre l'inquinamento, costruendo quadri di riferimento coerenti per l'analisi delle strategie di abbattimento. Un modello di valutazione integrato combina i risultati della ricer-

ca scientifica nei vari campi rilevanti per lo sviluppo di strategie (economia, tecnologia, scienze dell'atmosfera ed ecologia) con le basi di dati regionali.

Gli elementi che compongono un modello di valutazione integrato sono:

FIGURA 1

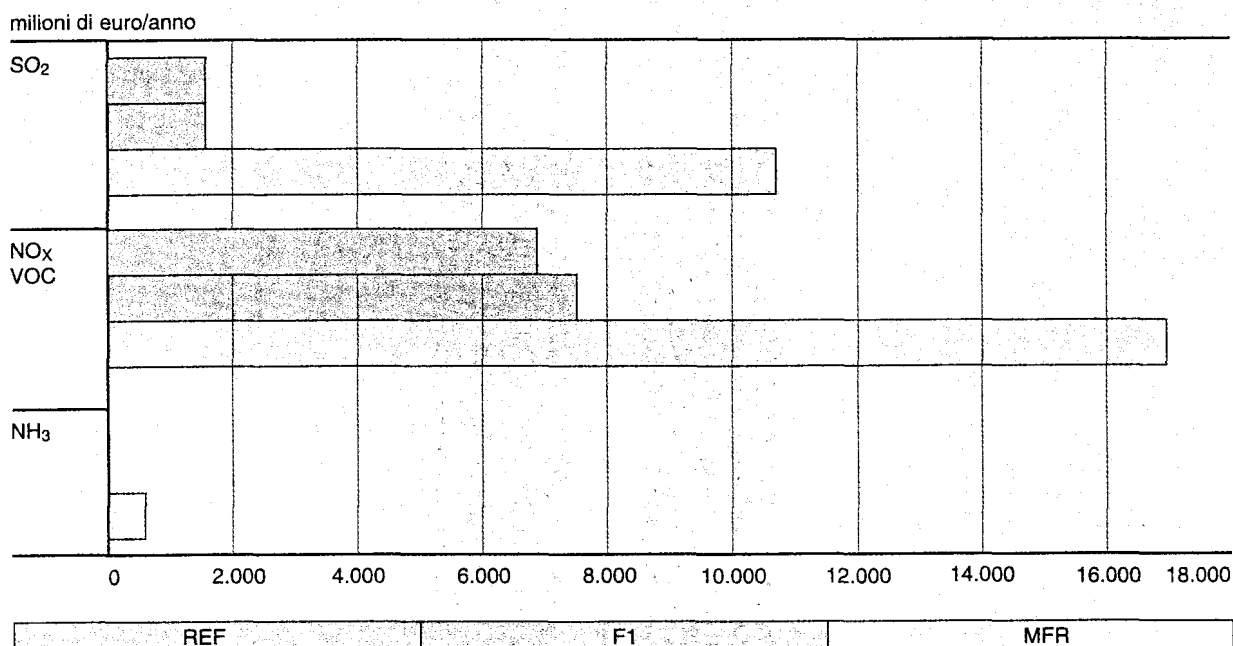
Schema operativo di un modello di valutazione integrata



Fonte: Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima Emissioni, 1999

FIGURA 2

Costi di abbattimento stimati dallo IIASA per l'Italia per l'anno 2010 secondo diversi scenari



Legenda REF Scenario di riferimento.

F1 Scenario di base per il negoziato dei tetti alle emissioni.

MFR Scenario corrispondente alle massime riduzioni tecnicamente fattibili.

Fonte: ENEA - ENEL, 1998.



1. quantificazione delle emissioni degli inquinanti
2. definizione dei livelli e carichi critici
3. modello di trasporto degli inquinanti in atmosfera e loro deposizione al suolo
4. valutazione delle strategie di abbattimento delle emissioni e relative curve dei costi

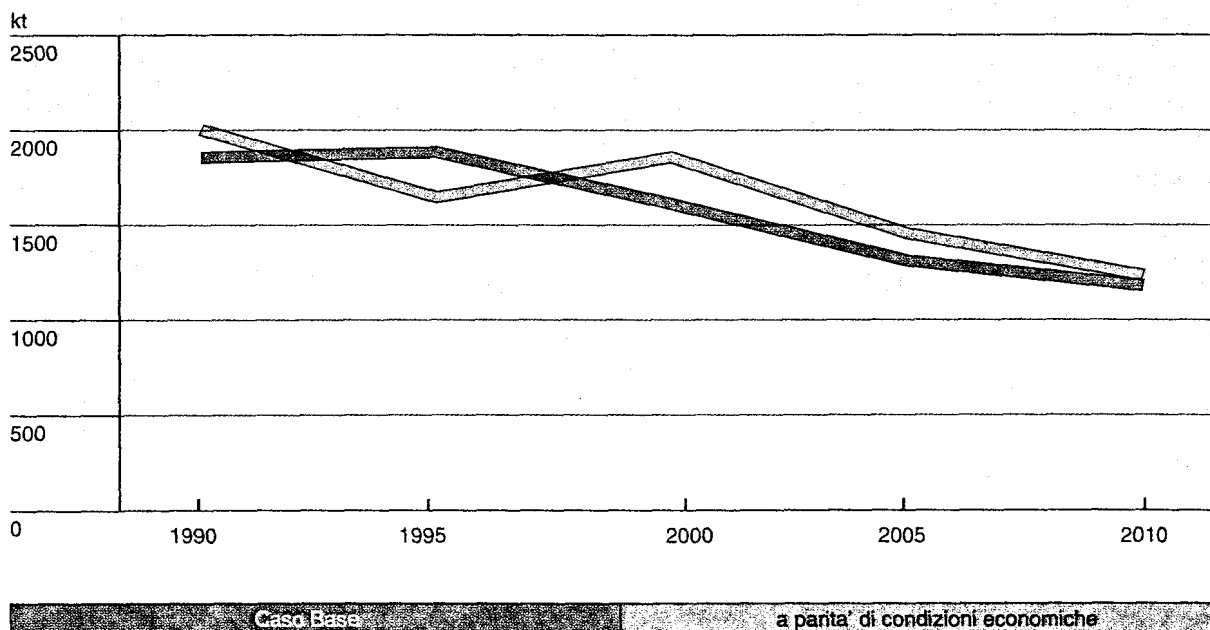
Si parte dalla definizione delle emissioni nazionali relative a vari inquinanti (attualmente si considerano SO₂, NH₃, NO_x e COV). Successivamente con un modello che simula il trasporto, la dispersione e le trasformazioni chimiche che avvengono in atmosfera, vengono calcolate le concentrazioni e le deposizioni che queste emissioni determinano su tutta l'Europa. Le concentrazioni vengono confrontate con soglie prefissate (livelli critici) per valutare gli effetti sulla popolazione o su diversi ecosistemi. Le deposizioni sono confrontate con i carichi critici che i vari recettori possono sopportare. In questo modo si ottiene un'analisi di scenario, cioè una valutazione in ogni griglia del dominio di calcolo della situazione ambientale che si produce a fronte di ogni inquinante

considerato. Se quest'analisi segnala una situazione non soddisfacente rispetto agli obiettivi impostati, o, in altre parole, se si hanno eccedenze delle deposizioni o delle concentrazioni rispetto ai valori di soglia dei carichi o dei livelli critici, si può procedere ad un'ottimizzazione, valutando i costi relativi alle tecnologie di abbattimento degli inquinanti e producendo un nuovo scenario emissivo. Si itera il processo finché non si raggiungono gli obiettivi prefissati, agendo su tecniche di abbattimento progressivamente più costose. Le procedure di ottimizzazione possono essere indirizzate a diversi obiettivi: minimizzazione dei costi equidistribuita sui vari Paesi oppure in base alla popolazione, oppure sull'intensità del danno ambientale, a seconda delle decisioni politiche imposte.

Non esiste al momento un modello di valutazione integrata per l'Italia. Il processo di revisione del protocollo di Göteborg e della Direttiva sui Tetti alle emissioni renderà indispensabile la predisposizione degli elementi che compongono il modello, necessaria ai fini di una attenta ed accurata verifica di tutti i dati di ingresso utilizzati per l'Italia nel modello RAINS. La partecipazione a queste attività rappresenta quindi per l'Italia un elemento di criticità ed un impegno prioritario per il prossimo futuro.

FIGURA 3

Emissioni di NO_x in Italia calcolate utilizzando il modello RAINS 7.2 ed i dati sulle tecnologie di abbattimento stimati dallo IIASA (kt), 1990 - 2010





Il problema dell'impoverimento dello strato di ozono stratosferico

Gli studi relativi all'ozono (3) stratosferico, al suo ruolo nell'equilibrio planetario e ai meccanismi di riduzione, hanno portato ad un quadro di conoscenze ben definito e sufficientemente consolidato (Ministero dell'ambiente - Relazione sullo Stato dell'Ambiente, 1997).

L'ozono stratosferico è il risultato di un'azione combinata tra radiazione solare ed ossigeno (nella forma atomica, O, e molecolare, O₂). La quantità di ozono è determinata dall'equilibrio tra processi di formazione, distruzione e trasporto (Ministero dell'ambiente - Relazione sullo Stato dell'Ambiente, 1997). L'esistenza di altre specie chimiche, di origine naturale ed antropica, e la varietà dei processi atmosferici rendono il fenomeno molto complesso.

Le osservazioni da satellite e da terra hanno permesso di valutare la distribuzione media dell'ozono colonnare (4) in

funzione della latitudine e della stagione. Si può notare che il valore minimo si trova nelle zone equatoriali, mentre i massimi sono situati alle latitudini medio-alte. Il valore massimo assoluto si verifica all'inizio della primavera alle alte latitudini. In estate si osserva una diminuzione dell'O₃ fino a raggiungere un minimo in autunno. All'equatore l'ozono colonnare ha un valore pressoché costante poiché l'attività fotochimica rimane invariata durante il corso dell'anno.

La differente distribuzione longitudinale, meno spiccata rispetto a quella latitudinale, è dovuta essenzialmente all'alternarsi di terre emerse e mari ed è più marcata nell'emisfero nord che in quello sud.

Dal 1985 si è acquisita la certezza che il ciclo stagionale del contenuto colonnare di ozono nella regione polare dell'Antartide presenta all'inizio della primavera (periodo settembre-ottobre) un brusco assottigliamento che dura per un paio di mesi. Questo fenomeno,

noto come "buco dell'ozono", scompare con il ritorno dell'ozono ai valori normali al progredire della stagione estiva. Negli ultimi anni sono stati raggiunti i valori minimi osservati della quantità di O₃ (100-120 DU)(5), pari a circa il 50% del contenuto normale, e si è assistito ad una estensione spaziale maggiore.

In figura 17 è riportata la variazione della dimensione del buco dell'ozono sull'Antartide dal 1980 al 1998

L'asse verticale riporta la dimensione del buco in milioni di chilometri quadrati, valutata usando le regioni dove l'ozono totale è inferiore a 220 DU. Per ogni anno il periodo considerato va dal 7 settembre al 13 ottobre (primavera antartica). Le barre verticali in corrispondenza di ogni punto danno il valore massimo e minimo della dimensione del buco. Sono segnalate anche le dimensioni del Nord America e dell'Antartide.

Le osservazioni effettuate dalle stazioni antartiche nel periodo fine agosto-settembre 2000 hanno riportato valori eccezionalmente bassi rispetto alla

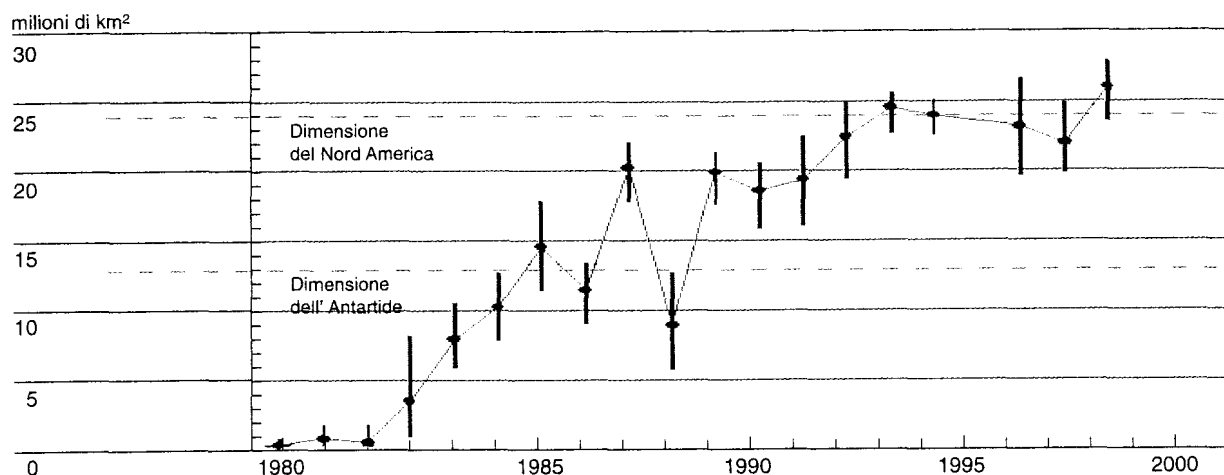
(3) Molecola formata da tre atomi di ossigeno (O₃).

(4) Ozono presente in una colonna d'aria che si estende dalla superficie fino all'apice dell'atmosfera, anche detto ozono totale.

(5) Il contenuto di ozono si misura in matm cm o unità Dobson (DU); uno spessore di 3 mm corrisponde a 300 matm cm, cioè a 300 DU.

FIGURA 17

Variazione della dimensione del buco dell'ozono sull'Antartide (milioni di km²), 1980-1998



FONTE: NASA Goddard Space Flight Center, 2000.



norma e in regioni non interessate dal fenomeno.

La spiegazione si basa sull'ipotesi che la persistenza di bassi valori di temperatura all'interno del vortice polare consente, nonostante le ridotte concentrazioni, la condensazione di goccioline di acqua ad alto contenuto di acido nitrico (HNO_3), normalmente presente in fase gassosa. Questo processo favorisce la formazione di nubi stratosferiche polari (Polar Stratospheric Clouds, PSC) in grado di convertire i composti del cloro da forme inerti a forme attive poiché la chimica eterogenea (6) viene incrementata. Lo scenario in cui i processi anzidetti sono favoriti è quello della lunga notte invernale, in cui l'atmosfera antartica funge da gigantesco e gelido "contenitore", isolato chimicamente e fisicamente.

Fattori di pressione

Le specie catalitiche che intervengono nelle reazioni di rimozione dell'ozono (competitori) sono: OH, H, NO $_x$ (NO e NO $_2$), Cl, ClO, Br e BrO. Le maggiori sorgenti di OH e H sono il vapor d'acqua ed il metano, mentre gli NO $_x$ derivano dalla immissione di N $_2$ O in atmosfera. I composti attivi del cloro sono il prodotto della fotodissociazione di composti organici del cloro e dei cloro-fluorocarburi (CFC o freon). In particolare, i composti CFC11, CFC12, CFC113, CFC114 e CFC115, inattivi in troposfera, giungono in stratosfera e qui vengono fotodissociati dando origine a composti del cloro. Il bromo, Br, e il BrO, derivano dagli halon. Questi ultimi composti trovano origine prevalentemente da attività industriali e risultano essere chimicamente molto stabili nelle condizioni esistenti in troposfera, mentre, quando trasportati nell'alta atmosfera, possono essere decomposti dalla radiazione solare e quindi partecipare alle reazioni catalitiche per la rimozione dell'ozono.

Inoltre è dimostrato che una nube di aerosol generata da una grande eruzione vulcanica può influenzare la

quantità di ozono in quanto la chimica eterogenea viene incrementata.

Dati sulla produzione dei competitori dell'ozono stratosferico sono riportati nello "Stato di attuazione e relative attività" di monitoraggio e controllo della Legge 549 del 28 dicembre 1993" riportato in Appendice della presente Relazione.

Stato

Osservazioni dell'ozono colonnare vengono effettuate da oltre un trentennio in varie stazioni sull'intero globo che fanno parte della rete "Global Ozone Observation System" (GOOS) istituita dall'International Ozone Commission in collaborazione con l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO). Le osservazioni da terra sono raccolte presso il World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC) in Canada.

Si possono distinguere diverse scale temporali di variazione nella quantità di ozono atmosferico:

- scala pluriennale: ciclo solare (circa 11 anni) consistente in una fluttuazione di circa 1-2%; oscillazione quasi biennale, QBO (7) (circa 2 anni), circa 2-4%;
- variazioni di ozono, di anno in anno, legate alla variabilità naturale intrinseca (40%) e a fenomeni casuali (per es. eruzioni vulcaniche). Queste ultime possono essere dell'ordine del 10%;
- variazioni legate ai sistemi meteorologici (periodo di qualche giorno), dell'ordine del 30-50% in tutte le stagioni. Il declino globale dell'ozono totale è stato ben documentato. Alle medie latitudini (35°-60°) dell'emisfero nord è stata osservata una graduale diminuzione dell'ozono stratosferico, a partire dal 1979, di circa il 5% ogni 10 anni. Tale tasso di diminuzione scende al 4% nel periodo 1994-1997. A livello stagionale, la diminuzione è valutabile nel 6% ogni 10 anni in inverno-primavera e nel 3% ogni 10 anni in estate-autunno. Alle medie latitudini dell'Emisfero Sud, è stata valutata una

perdita di ozono del 5% ogni 10 anni.

Nella fascia 60°-80°N, il trend durante l'inverno-primavera è stato maggiore del 7.5% ogni dieci anni.

Nelle zone equatoriali (10°N-10°S) e tra 10°-35°N, la diminuzione è stata osservata solo dell'1.8% ogni dieci anni a partire dal 1979, probabilmente causata dall'eruzione del Pinatubo avvenuta nel 1991.

Si notano anche differenze longitudinali: dal 1979, nel Nord America il trend negativo è stato valutato intorno al 4,4%, in Europa al 7% e in Siberia maggiore del 7,5% ogni dieci anni.

Le osservazioni globali hanno mostrato che il contenuto massimo delle sostanze antropiche nella bassa atmosfera, nocive per l'ozono, è stato raggiunto nel 1994 ed ora sta diminuendo lentamente. La quantità massima di cloro in stratosfera è stata probabilmente già raggiunta in prossimità dell'anno 2000. Il ritardo rispetto al 1994 è dovuto al tempo impiegato da queste sostanze per raggiungere la stratosfera.

I risultati dell'attività di sorveglianza dell'ozono totale

Per quanto riguarda l'Italia, la situazione è coerente con il comportamento dell'ozono alle medie latitudini.

In figura 18 è mostrato l'ozono totale sull'emisfero nord presente il 6 gennaio 1999. In tale figura viene evidenziata una vasta cella di bassi valori di ozono (tra 200 DU e 250 DU) collocata su gran parte del territorio italiano, con punte di minimo sull'Italia settentrionale. Il valore di ozono medio giornaliero registrato nello stesso giorno a Roma è stato di 230,3 DU, mentre a Ispra si è registrato il valore di 228,2 DU. La regione circumpolare appare in gran parte bianca per assenza di dati da satellite.

Nelle figure 19 e 20 sono riportati gli andamenti dell'ozono totale nel periodo gennaio 1992 - giugno 1999, relativi alle stazioni di Roma ed Ispra (VA). Al fine di investigare su eventuali fluttuazioni, vengono considerate come

(6) La chimica eterogenea, ovvero il complesso di reazioni che avvengono sulla superficie di particelle in sospensione nell'aria (aerosol) e che conducono ad una riduzione del contenuto di ozono, ha un ruolo importante nella stratosfera.

(7) La QBO, caratterizzata dall'alternarsi dei venti stratosferici nella fascia intertropicale da ovest e da est, con un ciclo di circa due anni, causa alle alte e medie latitudini anomalie positive di ozono se i venti sono di provenienza orientale o negative se i venti sono di provenienza occidentali.



serie di riferimento, per Roma, quelle relative alla stazione di Vigna di Valle, periodo 1957-1986, e per Ispra, dati satellitari TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) periodo 1979-1991.

Le figure riportano il valore osservato di ozono e, come indicatore della

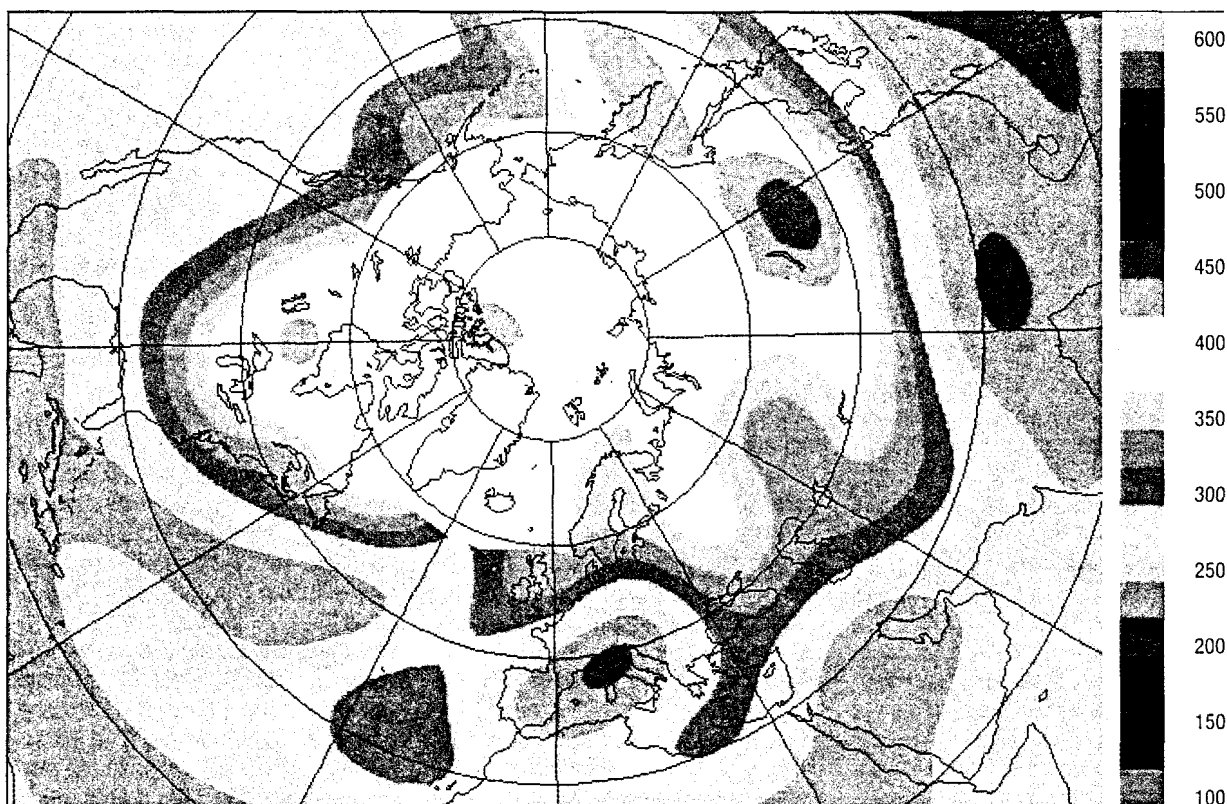
variabilità dell'ozono rispetto al valore medio, la fascia $\pm 2\text{stdv}$ (stdv = deviazione standard) per Roma e $\pm 1\text{stdv}$ per Ispra.

Nel corso dell'attività di sorveglianza sono stati rilevati alcuni comportamenti dei livelli di ozono al di sotto del

valore medio (una diminuzione compresa tra 8% e 10%) nei mesi di gennaio e febbraio 1992 e 1993. Una probabile causa di tale abbassamento è legata all'eruzione del Pinatubo per effetto dell'interazione tra aerosol e processi chimici eterogenei. Nel 1994

FIGURA 18

Ozono totale sull'emisfero Nord per il 6 gennaio 1999



Fonte: WMO LAP-AUTH-GR, 1999.



e 1996 il comportamento dell'ozono si è avvicinato a quello climatologico. Durante l'inverno 1995 l'ozono è stato al di sotto dei valori normali. Nel primo semestre del 1997 e del 1999 sono stati osservati un consistente numero di giorni con ozono al di sotto della

fascia di 2stdv. Il 1998, pur non presentando anomalie negative confrontabili con gli anni 1995, 1997 e 1999, è stato caratterizzato da frequenti situazioni di bassi valori di ozono.

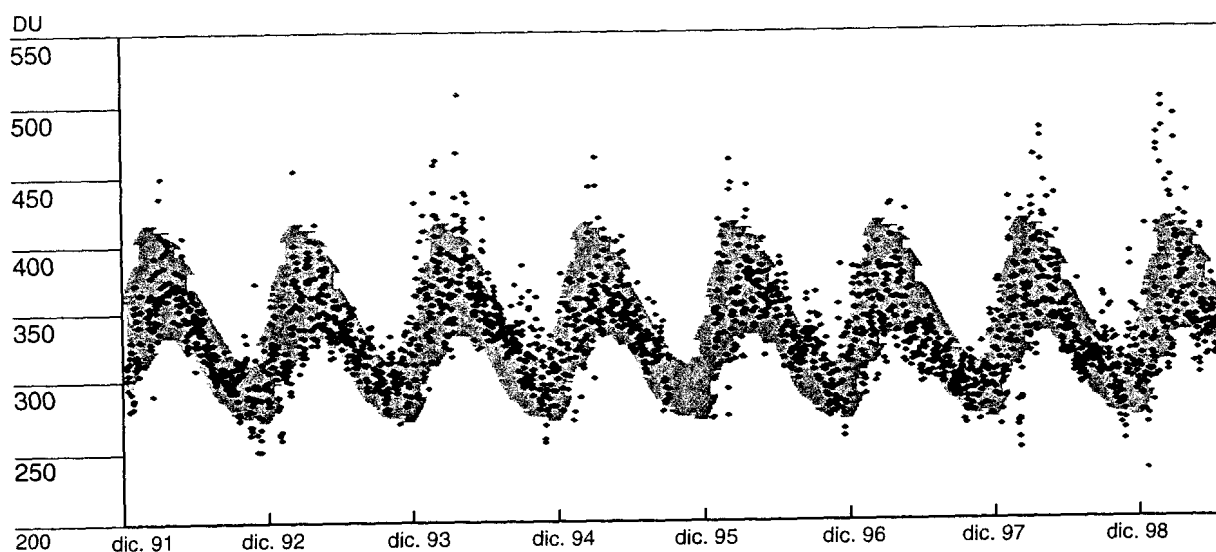
Impatto

La regione spettrale dell'ultravioletto si estende da 200nm (8) fino a 400nm e si usa suddividere in ultravioletto C (UV-C), ultravioletto B (UV-B) ed ultravioletto A (UV-A).

(8) nm = nanometro, unità di misura pari a 10^{-9} m = un miliardesimo di metro.

FIGURA 19

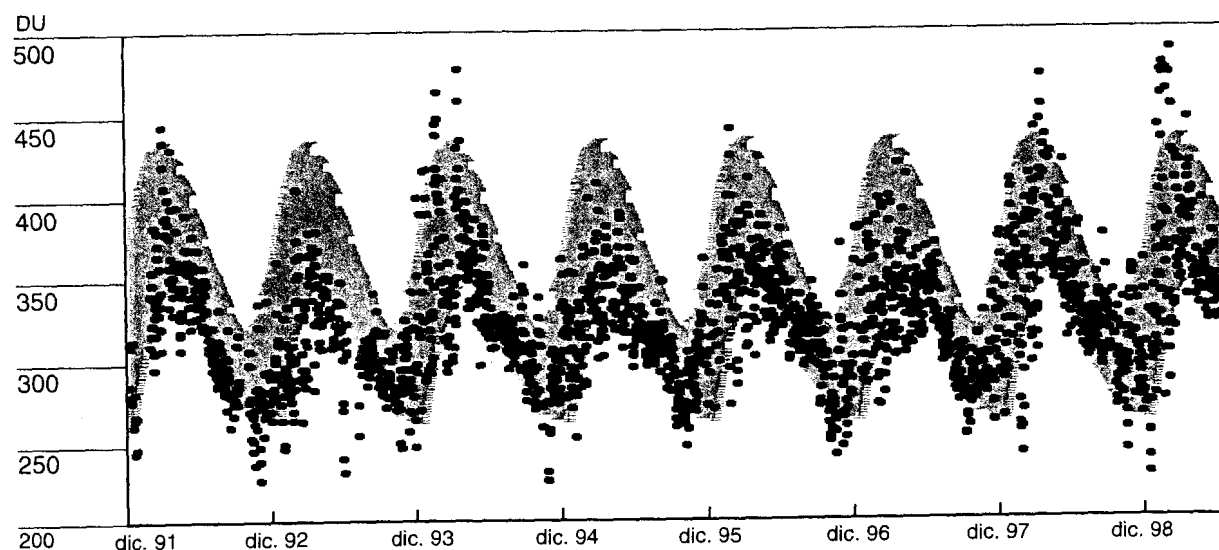
Ozono medio giornaliero a Roma (cerchi blu) e valori di riferimento climatologico (striscia verde di ampiezza 2 stdv) (DU), 1 gennaio 1992 - 30 giugno 1999



FONTE: Università di Roma "La Sapienza", 1999.

FIGURA 20

Ozono medio giornaliero a Ispra (cerchi blu) e valori di riferimento climatologico (striscia verde di ampiezza 2 stdv) (DU), 1 gennaio 1992 - 30 giugno 1999



FONTE: Joint Research Centre, Ispra (VA), 1999.



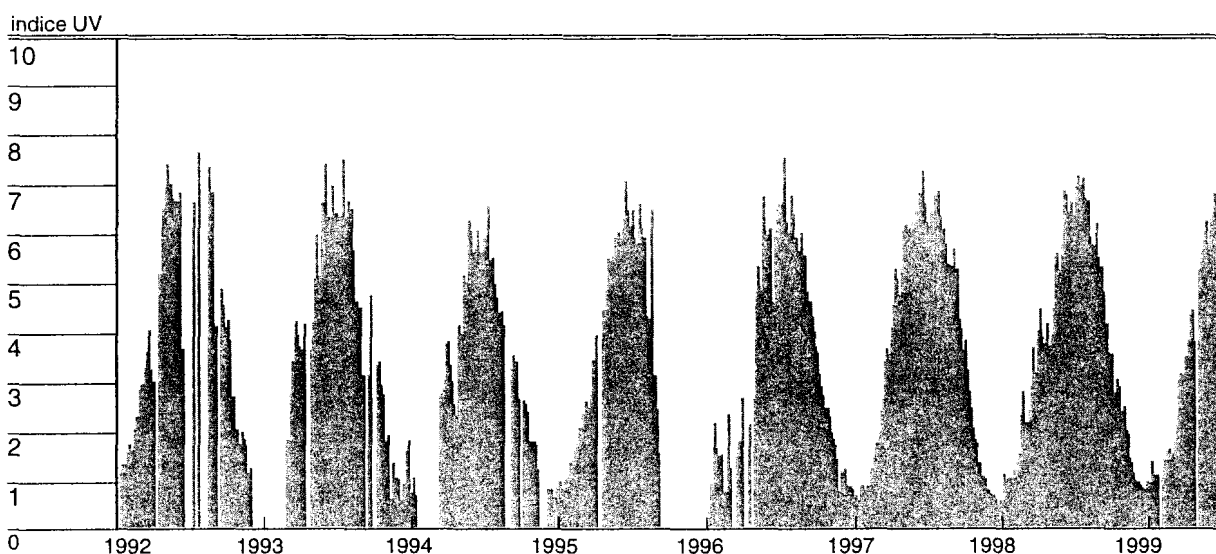
La radiazione ultravioletta rappresenta circa il 9% della radiazione solare all'apice dell'atmosfera, ma nel suo passaggio viene fortemente attenuata, con il risultato netto che meno dell'1% della radiazione solare al suolo è nell'UV-B e circa il 6-7% è nell'UV-A.

L'intensità della radiazione ultravioletta che raggiunge la superficie terrestre dipende dall'energia solare in arrivo e dalle proprietà di trasmissione dell'atmosfera. Infatti la variabilità della radiazione ultravioletta è determinata dagli effetti combinati di fattori geo-

metrici regolari (distanza Terra - Sole, latitudine, elevazione solare, quota), di fattori astrofisici (attività solare) e di fattori atmosferici (ozono, aerosol, nubi, altri gas minori). L'ozono è il fattore più importante che modula la quantità di radiazione ultravioletta in

FIGURA 21

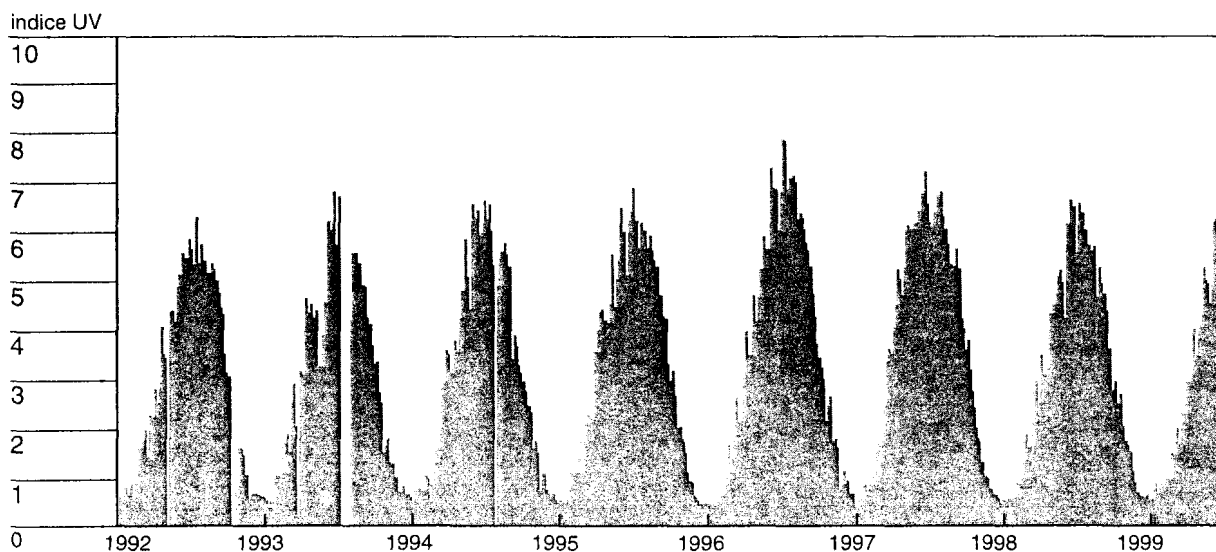
Indice ultravioletto (UVI) per Roma, 1 gennaio 1992 - 30 giugno 1999



Fonte: Università di Roma "La Sapienza", 1999.

FIGURA 22

Indice ultravioletto (UVI) per Ispra, 1 gennaio 1992 - 30 giugno 1999



Fonte: Joint Research Centre, Ispra (VA), 1999.



superficie. Studi teorici ed osservazioni indicano che una diminuzione del contenuto colonnare di ozono dell'1% può provocare un aumento intorno all'1,2% della radiazione ultravioletta al livello del suolo.

La correlazione tra ozono colonnare e radiazione UV-B è stata confermata e definita da numerose misure a terra. Aumenti di radiazione UV-B sono stati rilevati nel periodo 1989-1997 alle medie latitudini: 1,5% all'anno per la lunghezza d'onda di 300nm e 0,8% all'anno per quella di 305nm.

Vale la pena di tener presente che, oltre alla lenta tendenza dell'ozono alla diminuzione, si verificano apprezzabili variazioni dell'ozono totale a scala temporale di qualche giorno che hanno anche influenza sull'irradianza UV-B in superficie. Le proiezioni climatiche con modelli globali, nell'ipotesi di un previsto aumento di gas serra, indicano che, in alcune regioni del globo, tra cui il Mediterraneo, tenderà ad aumentare la frequenza di situazioni meteorologiche associate ad ozono colonnare più basso e quindi ad irradianza UV-B maggiore.

Le diminuzioni di ozono stratosferico, e

i conseguenti aumenti di radiazione ultravioletta, provocano a loro volta:

- in troposfera, aumento dell'attività fotochimica e quindi incremento della concentrazione di alcuni gas serra (ossidrilie OH, ozono troposferico, metano);

- in stratosfera, diminuzione della temperatura;

- in superficie, effetti, per la maggior parte nocivi, sugli esseri viventi, sia animali sia vegetali (la radiazione UV-B può interferire con il DNA ed altre molecole di importanza biologica).

Una valutazione del potenziale rischio all'esposizione alla radiazione UV-B è fornita dall'indice ultravioletto (UVI) (9) che quantifica l'intensità della radiazione UV-B che raggiunge la superficie. Generalmente gli indici possono variare nell'intervallo da 0 (assenza di radiazione) a 10 (valore estivo ai tropici). Nelle figure 21 e 22 sono riportati i valori dell'indice ultravioletto (gennaio 1992-giugno 1999) relativamente a Roma ed Ispra.

Risposte

Il rischio ozono, prontamente segnalato e sottolineato dalla comunità scientifica internazionale ai "decisioni" ed all'opinione pubblica dei vari Paesi, nonché alle istituzioni internazionali competenti, ha condotto alla predisposizione di accordi internazionali per l'adozione di strategie comuni atte a ridurre ed eliminare il rilascio in atmosfera di sostanze dannose per lo strato di ozono.

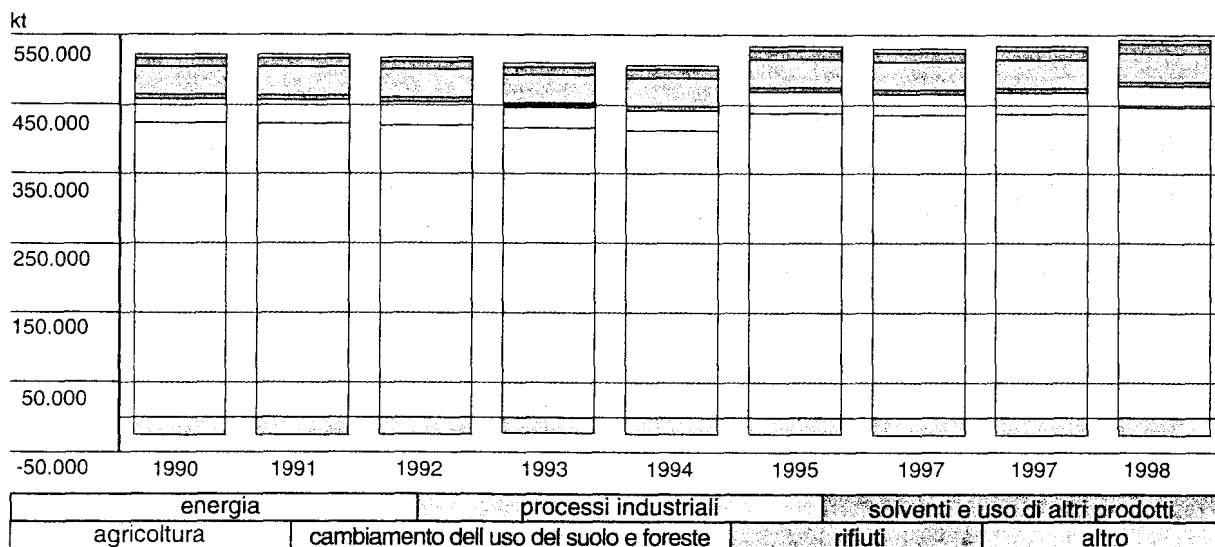
L'accordo principale è la Convenzione di Vienna per la protezione dello strato di ozono (1985), che ha per obiettivo la protezione della salute umana e dell'ambiente dagli effetti avversi che derivano o possono derivare dalle attività umane che modificano o possono modificare lo strato di ozono. L'Italia ha subito aderito a questa Convenzione.

Il Protocollo di Montreal alla Convenzione di Vienna contiene le misure per ridurre le quantità di sostanze nocive per l'ozono. Il Protocollo è stato firmato inizialmente da una trentina di Paesi, tra cui l'Italia, che da soli rappresentavano più del 75% della produzione mondiale di CFC. Al 28 novembre 2000 aderiscono al Protocollo 175

(9) L'indice ultravioletto è definito come il valore della radiazione ultravioletta dannosa alla pelle misurata alle ore 12.00 locali solari, normalizzata con un fattore di riferimento.

FIGURA 23

Emissioni totali di gas serra in Italia (kt di CO₂ equivalente), 1990 - 1998



FONTE: ANPA, 2000.



Paesi. Gli argomenti relativi alla Convenzione di Vienna, al Protocollo di Montreal, alla legislazione italiana sull'ozono stratosferico e al suo stato di attuazione sono trattati nello "Stato di attuazione e relative attività" di monitoraggio e controllo della Legge 549 del 28 dicembre 1993" riportato in Appendice della presente Relazione.

Si stima che senza queste decisioni restrittive si sarebbe raggiunto nel 2050 un carico di cloro equivalente pari a 17ppb. Di contro si ipotizza la ricostituzione dello strato di ozono, se non intervengono altre cause, entro i prossimi 50 anni.

Considerando che l'evoluzione dell'ozono stratosferico si esplica nel corso di decenni e che le misure di ozono e di radiazione ultravioletta sono estremamente complesse, sarebbe auspicabile, a livello nazionale, promuovere tutti i passi necessari a garantire la continuità nel lungo periodo degli attuali punti di osservazione. Solo con questa strategia si può riuscire a valu-

tare in mondo affidabile le deboli tendenze evolutive dell'ozono totale e verificare, nel corso del tempo, l'efficacia dei risultati degli accordi internazionali. L'obiettivo dovrebbe essere perseguito consolidando il più possibile, da un punto di vista istituzionale, le strutture che realizzano le misure, dotandole delle risorse necessarie all'aggiornamento delle apparecchiature ed alle calibrazioni. Considerazioni sulle scale di spazio coinvolte nei processi di impoverimento dell'ozono stratosferico sconsigliano decisamente l'incremento delle stazioni di misura sul territorio nazionale, mentre è necessario che l'attività di sorveglianza dell'ozono e della radiazione ultravioletta venga condotta con continuità e sistematicità da appropriate istituzioni scientifiche che siano in grado di proseguire la sperimentazione di interesse ambientale.

Cambiamenti climatici

Le conoscenze scientifiche sui cambiamenti climatici

Per clima (a livello globale) deve intendersi lo stato di equilibrio energetico tra il flusso totale di energia entrante sul nostro pianeta, che è quasi totalmente l'energia solare, ed il flusso totale di energia uscente dal nostro pianeta, che è in parte radiazione solare riflessa dall'atmosfera, dal suolo e dalle nubi, ed in parte energia emessa o irraggiata dalla Terra nel suo insieme.

Questo equilibrio viene minacciato, tra l'altro, anche dall'introduzione nel sistema di sostanze aggiuntive quali i gas-serra, che nel loro complesso aumentano la capacità termica del nostro pianeta, la capacità, cioè, di trattenere, sulla superficie terrestre, calore ed energia aggiuntiva. Pertanto, tutto il sistema tende a raggiungere nuovi equilibri e quindi il clima tende a cambiare.

TABELLA 10

Emissioni di gas-serra	1990	1991	1992	1993
Emissioni di CO ₂ nette	405.515,06	403.640,73	402.706,18	397.319,76
Emissioni di CO ₂ totali	431.129,33	429.494,27	427.790,06	420.690,22
CH ₄	39.889,13	40.130,88	38.433,35	38.331,50
N ₂ O	45.261,07	46.612,82	45.823,05	45.234,27
HFC	351,00	355,10	357,90	353,80
PFC	237,50	231,35	205,84	203,57
SF ₆	198,14	229,91	249,26	271,57
Totale (con emissioni nette di CO ₂)	491.451,90	491.200,78	487.775,58	481.714,46
Totale (con emissioni totali di CO ₂)	517.066,17	517.054,33	512.859,46	505.084,93

Categorie di emissione e di assorbimento dei gas-serra

Energia	421.593	420.479	417.843	414.064
Processi industriali	35.705	35.642	35.521	31.124
Solventi e uso di altri prodotti	1.998	1.974	1.894	1.918
Agricoltura	43.156	44.190	43.569	43.611
Cambiamenti dell'uso del suolo e foreste	-25.435	-25.818	-25.028	-23.249
Rifiuti	12.999	13.315	12.435	12.613
Altro	1.436	1.418	1.541	1.634