

Scuola di Scienze

Corso di Laurea Magistrale in Fisica

**STUDIO DELLE RELAZIONI
TRA CONCENTRAZIONE DI OZONO
E TEMPERATURA DELL'ARIA
PER L'ELABORAZIONE
DI SCENARI FUTURI**

Relatore:

Prof. Ennio Tosi

Presentata da:

Irene Chiesa

Correlatore:

Giovanni Bonafè

Sessione II

Anno Accademico 2012/2013

Introduzione

Poche sono le tematiche che riescono ad attirare l'attenzione e a toccare la sensibilità, non solo della comunità scientifica ma anche dell'intera collettività, più del cambiamento climatico e della qualità dell'aria. Questo lavoro nasce dall'intento di cercare un legame tra i due temi, ed in particolare di indagare su come il primo può influire sul secondo.

Sono svariati i fattori che andrebbero presi in considerazione per valutare da una parte l'entità del cambiamento climatico in corso e in previsione, e dall'altra la tendenza della qualità dell'aria e la sua incidenza sull'intero ecosistema. Tra questi elementi sono stati selezionati due parametri notevolmente rappresentativi e apparentemente connessi tra loro: la temperatura e la concentrazione di ozono. E' proprio sulla ricerca della loro correlazione che si fonda questa tesi di Laurea Magistrale, una correlazione che verrà rintracciata sui dati osservati, per poi essere in seguito utilizzata allo scopo di elaborare proiezioni di evoluzioni future.

Lo studio, che verrà svolto sui valori massimi giornalieri del solo periodo estivo, si concentrerà su un'area piuttosto ristretta della provincia di Parma, selezionata all'interno dell' Emilia Romagna grazie alla buona disponibilità di dati, sia di temperatura che di ozono. In questa zona si colloca infatti la stazione di rilevamento della concentrazione di ozono con la serie temporale più lunga, Cittadella, verificata essere rappresentativa della situazione

regionale.

Sulla base di questa scelta sono poi state individuate, a breve distanza, due stazioni di misura della temperatura, poste a San Pancrazio e a Gainago, che si prestassero al calcolo della correlazione sia col dato di ozono di Cittadella, sia col dato di temperatura di San Secondo Parmense, ottenuto applicando la tecnica di *downscaling* statistico.

Alla luce dei risultati trovati relativamente alla correlazione tra l'andamento della temperatura e quello della concentrazione di ozono, l'analisi proseguirà allo scopo di dare indicazioni su ciò che si potrà osservare nel prossimo trentennio climatologico.

Verrà in particolare elaborato uno scenario climatico di variazione della temperatura massima a San Secondo Parmense per il periodo 2021-2050 rispetto al trentennio 1961-1990: le anomalie stagionali, trovate mediante la tecnica di regionalizzazione statistica applicata alle simulazioni di alcuni modelli climatici, saranno poi date in ingresso ad un generatore climatico in grado di produrre serie sintetiche giornaliere relative al clima locale.

Un modello appositamente ideato per questo lavoro sfrutterà le informazioni trovate sul futuro andamento della temperatura per la costruzione di un set di concentrazioni di ozono previste per lo stesso trentennio futuro. Le caratteristiche statistiche di queste distribuzioni saranno infine confrontate con le caratteristiche di quelle ricostruite per i periodi 1961-1990 e 2001-2012 sulla base dei dati di temperatura osservati.

In questo modo sarà possibile valutare se la situazione attuale sia rimasta simile a quella del trentennio passato, o se piuttosto il cambiamento climatico abbia già avuto un' influenza tale da anticipare le proiezioni future di ozono di almeno un decennio.

Indice

Introduzione	4
1 Aspetti generali	15
1.1 Caratteristiche dell'Emilia Romagna	16
1.1.1 Inquadramento territoriale e geopolitico	16
1.1.2 Qualità dell'aria	17
1.1.3 Caratteristiche meteorologiche	19
1.1.4 Aspetti climatici del periodo estivo	23
1.2 L'inquinamento da ozono	31
1.2.1 L'ozono troposferico	32
1.2.2 Formazione di ozono in troposfera per reazione chimica	32
1.2.3 I precursori dell'ozono	36
1.2.4 Meccanismi di rimozione	40
1.2.5 Distribuzione temporale della concentrazione di ozono .	41
1.2.6 Dipendenza dalle condizioni meteorologiche	43
1.2.7 Definizione delle soglie	44
2 Analisi dei dati di ozono e delle relazioni con la meteorologia	47
2.1 Correlazione spaziale tra i dati di ozono	47
2.1.1 Scelta delle stazioni	48

2.1.2	Scelta della stazione di Cittadella	52
2.2	Relazioni tra meteorologia e ozono	60
2.2.1	Temperatura e ozono in Europa	60
2.2.2	Temperatura e ozono in Emilia Romagna	65
3	Scenari di cambiamento climatico	69
3.1	I modelli climatici e le tecniche di downscaling	69
3.1.1	I Modelli Climatici Globali	71
3.1.2	Il <i>Downscaling</i> Statistico	74
3.1.3	Il <i>Downscaling</i> Dinamico	76
3.1.4	I Modelli Climatici Regionali	76
3.2	Elaborazione delle anomalie stagionali di temperatura massi- ma a scala locale	77
3.2.1	Il modello di regionalizzazione statistico	79
3.2.2	Scenario emissivo A1B	86
3.3	Proiezioni stagionali di temperatura massima per il punto 1411 (2021-2050)	89
3.4	Elaborazione delle serie sintetiche di temperatura massima . .	95
3.4.1	Il generatore climatico (<i>Weather Generator</i>)	95
3.4.2	Risultati	96
4	Scenari di concentrazione di ozono	97
4.1	Schema di lavoro	98
4.1.1	Preparazione dei dataset	98
4.1.2	Calibrazione - validazione	101
4.1.3	Proiezione di ozono	107
4.2	Risultati	110
4.2.1	Il complesso quadro in cui si colloca il modello	115

Conclusioni	125
A L'ozono in Europa	127
A.1 I precursori dell'ozono	128
A.2 Evoluzione dell'ozono in Europa	129
A.2.1 Trend di inquinamento estivo da ozono in Europa . . .	130
A.2.2 Inquinamento da ozono nell'estate 2012	132
B Conseguenze dell'inquinamento da ozono	137
B.1 Stato attuale delle conoscenze	137
B.1.1 Effetti sulla salute umana	138
B.1.2 Effetti sulla vegetazione	141
B.1.3 Effetti sui materiali	142
B.2 Possibile evoluzione futura	144
Ringraziamenti	147

Elenco delle figure

1.1	Temperatura media estiva nel periodo 1961-1990 [Fonte: Arpa].	25
1.2	Temperatura media estiva nel periodo 1991-2008 [Fonte: Arpa].	26
1.3	Variazione della temperatura media estiva 1991-2008 rispetto a 1961-1990 [Fonte: Arpa].	27
1.4	Temperatura massima estiva nel periodo 1961-1990 [Fonte: Arpa].	28
1.5	Temperatura massima estiva nel periodo 1991-2008 [Fonte: Arpa].	29
1.6	Variazione della temperatura massima estiva 1991-2008 rispetto a 1961-1990 [Fonte: Arpa].	30
1.7	Schema dei processi di formazione e rimozione dell'ozono troposferico [6].	35
1.8	Isolinee della concentrazione di ozono in funzione della concentrazione dei precursori NO_x e VOC [Fonte: American Chemical Society].	40
1.9	Standard di qualità dell'aria per l'ozono [Fonte: Direttiva EU,2008c].	45
2.1	Stazioni della rete di monitoraggio della qualità dell'aria in Emilia Romagna, attualmente in attività [Fonte: Arpa].	49

2.2	Mappa della regione, con le aree definite dalla zonizzazione, le stazioni di monitoraggio in attività e la localizzazione delle 12 stazioni usate per lo studio di correlazione [Fonte: Arpa]. . . .	51
2.3	Trend di ozono in varie stazioni dell'Emilia Romagna, dal 2001 al 2012 [8].	55
2.4	Autocorrelazione tra i dati di ozono di Cittadella al variare del lag temporale.	58
2.5	Distribuzione spaziale dei superamenti della soglia di informazione registrati dalle stazioni rurali e urbane nell'estate 2003 [10].	62
2.6	Anomalie di temperatura massima giornaliera registrate in Europa nell'estate del 2003, rispetto alla temperatura estiva media del trentennio 1961-1990 [Fonte: EEA].	63
2.7	Numero totale di ore con una concentrazione di ozono superiore a $180\mu g/m^3$, in Francia, Repubblica Ceca e UE, e temperatura media di Repubblica Ceca ed Europa occidentale, nel periodo maggio-agosto 2003 [10].	64
2.8	Mappa delle località utilizzate per lo studio di correlazione. . .	68
3.1	Esempio di funzionamento delle tecniche di <i>downscaling</i> [Fonte: The University Corporation for Atmospheric Research]. . .	71
3.2	Illustrazione schematica del principio operativo di un GCM [14].	73
3.3	Aumento della risoluzione spaziale dei GCM con la successione dei report IPCC: 1990 (FAR), 1996 (SAR), 2001 (TAR), 2007 (AR4); [15].	73
3.4	Schema dell'aumento dei processi inclusi nei modelli climatici; [15].	74
3.5	Modello statistico di <i>downscaling</i> [20].	81

3.6	Temperatura massima media estiva, osservata e stimata tramite DS, nel periodo 1960-2002 usato per la validazione del modello.	85
3.7	Scenari di emissioni di gas serra e proiezioni di temperatura superficiale fino al 2100 [27].	87
3.8	Proiezioni di riscaldamento globale superficiale e di innalzamento del livello del mare, per la fine del 21° secolo [27]. . . .	88
3.9	Mappa dei cambiamenti di temperatura media estiva per il trentennio 2021-2050, rispetto al 1961-1990, elaborata utilizzando secondo lo scenario A1B [11].	89
3.10	Proiezioni di cambiamento climatico della temperatura massima estiva (anomalia) per il punto di griglia 1411, per il periodo 2021-2050, scenario A1B.	90
3.11	Pdf della anomalia di temperatura massima estiva: confronto tra l'osservato nel 1961-1990 (linea tratteggiata nera), l'osservato nel 1991-2008 (linea tratteggiata verde) e le proiezioni di cambiamento climatico dei singoli modelli per 2021-2050, per il punto 1411, scenario A1B.	93
3.12	Pdf della anomalia di temperatura massima estiva: confronto tra l'osservato nel 1961-1990 (linea tratteggiata nera), l'osservato nel 1991-2008 (linea tratteggiata verde) e la proiezione di cambiamento climatico elaborata dall' <i>Ensemble Mean</i> per il 2021-2050, per il punto 1411, scenario A1B.	94
4.1	<i>Scatter plot</i> dei valori massimi giornalieri di temperatura (San Pancrazio) e concentrazione di ozono (Cittadella) da maggio a settembre sul periodo 2001-2012.	99
4.2	Schema di lavoro.	100

4.3	<i>Scatter plot</i> tra i valori di temperatura di San Pancrazio e San Secondo Parmense, con retta di tendenza, sul periodo 2001-2008.	101
4.4	Boxplot dell'ozono nelle classi di temperatura.	102
4.5	Funzione di densità di probabilità dei massimi di ozono per il dataset di validazione, osservata e prevista dal modello.	105
4.6	<i>QQ-plot</i> .	106
4.7	Distribuzione della concentrazione di ozono ricostruita per il trentennio 1961-1990 (linea tratteggiata), confrontata con quella ricostruita per il periodo 2001-2012 (linea nera continua).	108
4.8	Distribuzioni delle concentrazioni di ozono previste per il trentennio 2021-2050 (linee tratteggiate colorate), confrontate con la distribuzione ricostruita per il periodo 2001-2012 (linea nera continua).	109
4.9	Rappresentazione schematica delle interazioni tra clima, ecosistema e ozono troposferico [6].	116
A.1	Trend delle emissioni di NO_x , $NM VOC$, CO e CH_4 dal 1990 al 2010, nei Paesi EEA-32 e EU-27. Sono inoltre mostrati i limiti delle emissioni di NO_x e $NM VOC$ fissati per gli EU-27 da raggiungere entro il 2020 [33], [34].	129
A.2	Media regionale del numero di superamenti estivi per stazione e media dei massimi giornalieri di temperatura nelle quattro città rappresentative [36].	131
A.3	Numero di giorni in cui la concentrazione di ozono ha superato la soglia di informazione, nell'estate 2012 [36].	134
A.4	Numero di giorni in cui la concentrazione di ozono ha superato l'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana, nell'estate 2012 [36].	135

A.5 Calcolo indicativo del TV: numero medio di giorni estivi, nel triennio 2010-2012, in cui la soglia LTO è stata superata [36]. . 136

Capitolo 1

Aspetti generali

Per affrontare con maggiore consapevolezza il tema centrale di questo lavoro è necessario introdurre alcune informazioni preliminari riguardanti i due parametri in esame, la temperatura e la concentrazione di ozono. La prima parte di questo capitolo sarà quindi dedicata all'illustrazione di alcuni aspetti della regione Emilia Romagna, quadro geografico in cui si colloca l'analisi: verranno esposte le più recenti informazioni sulla qualità dell'aria, si descriveranno le caratteristiche meteorologiche generali, e si porrà infine l'attenzione sul cambiamento dei livelli di temperatura estiva riscontrato rispetto al trentennio climatologico passato. Nella seconda parte del capitolo sarà invece trattato il tema dell'inquinamento da ozono, dai meccanismi di formazione, trasporto e rimozione, fino all'introduzione della tematica che farà da filo conduttore dell'intero lavoro, ovvero la relazione tra questo inquinante e la temperatura.

1.1 Caratteristiche dell'Emilia Romagna

1.1.1 Inquadramento territoriale e geopolitico

L'Emilia Romagna copre una superficie pari a 22124Km^2 ed è abitata da più di quattro milioni di persone. La regione è occupata per la parte settentrionale dalla Pianura Padana e per la parte meridionale dall'Appennino tosco-emiliano, orientato lungo un asse allungato in direzione diagonale da ovest-nord ovest a est-sud est, da cui si dipanano gruppi montuosi paralleli a spina di pesce che degradano in rilievi collinari. L'entroterra è percorso da diversi fiumi, tributari di destra del Po, e nella parte orientale le coste romagnole si sviluppano per circa 120 Km.

La regione Emilia Romagna è inserita nel bacino padano-adriatico e occupa la porzione sud orientale della Pianura Padana, caratterizzata dal territorio del bacino idrografico del fiume Po. Quest'ultimo è separato dall'Europa centrale dalla grande catena montuosa delle Alpi, è bagnato dal mar Adriatico sul lato orientale, ed è chiuso a sud dalla catena appenninica. In generale quindi, il bacino padano, chiuso dalle montagne su tre lati, rappresenta dal punto di vista della qualità dell'aria una sorta di recipiente, nel quale le emissioni di inquinanti si distribuiscono, ma faticano a disperdersi.

Dal punto di vista geopolitico è da segnalare la particolare configurazione del settore trasporti, che vede in Bologna, capoluogo di regione, un nodo di primaria importanza a livello nazionale, sia autostradale che ferroviario, come cerniera tra il nord e il sud.

E' inoltre importante rilevare, nell'ambito delle attività produttive, la distribuzione sul territorio di distretti caratterizzati da una certa specializzazione nelle produzioni industriali: così si trova intorno a Modena una particolare concentrazione di aziende dedite alla produzione di ceramiche da

arredamento e materiali da costruzione, mentre a Ferrara e Ravenna si trovano due dei cinque principali distretti nazionali per la chimica di base; le province di Ravenna e Piacenza sono in prima linea nell'industria energetica, mentre Parma è il cuore dell'industria alimentare e lattiero-casearia. Importante è anche il settore agrozootecnico che vede i punti di maggiore pressione per le emissioni in atmosfera, in particolare ad azione climalterante, nei poli di Modena e Reggio Emilia per gli allevamenti di suini e Forlì-Cesena per quelli avicoli.

1.1.2 Qualità dell'aria

Le problematiche legate alla qualità dell'aria nel bacino padano sono ben note, dovute alla concomitanza di fattori quali l'alto grado di urbanizzazione e l'elevata densità di attività produttive, oltre ad un'orografia e una meteorologia che non favoriscono la dispersione degli inquinanti [1].

Dalla lettura dei dati rilevati attraverso la rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria emerge negli ultimi anni una situazione in sensibile miglioramento per alcuni inquinanti primari quali monossido di carbonio e biossido di zolfo. Per tali sostanze infatti sono stati riscontrati valori di concentrazione molto bassi, al limite della sensibilità strumentale, senza peraltro presentare significative variazioni nel corso del tempo. Anche alcuni degli inquinanti recenti, quali metalli pesanti e benzo(a)pirene, sono al momento sotto controllo; la situazione del benzene ha visto un progressivo miglioramento, probabilmente correlabile con le sempre migliori tecnologie di abbattimento degli inquinanti sui veicoli a motore. Si sottolinea, tuttavia, come molti degli inquinanti primari presenti in atmosfera, anche in concentrazioni inferiori al limite, rappresentino comunque i precursori di fenomeni di inquinamento secondario.

Maggiore attenzione richiedono alcuni inquinanti che presentano tuttora criticità, quali: il particolato fine (PM_{10}), l'ozono e il biossido di azoto.

Per quanto riguarda il PM_{10} , i valori limite, annuale e giornaliero, sono sistematicamente superati nelle zone di pianura e nell'agglomerato di Bologna, fin dalla loro entrata in vigore nel 2005. Dall'analisi dell'andamento pluriennale (2001-2012) risulta che le situazioni di superamento del limite annuale in Emilia Romagna sono in progressiva diminuzione, anche se gli ultimi due anni hanno mostrato un andamento opposto che conferma la situazione di criticità.

Relativamente al biossido di azoto si è registrata una generale tendenza alla diminuzione delle concentrazioni medie annuali, con superamenti limitati generalmente ad alcune situazioni locali e dovute al traffico. La concentrazione di fondo di questo inquinante, seppur inferiore ai limiti, risulta comunque significativa, dato l'importante ruolo del biossido di azoto nei processi di produzione del particolato secondario e dell'ozono.

Resta invece elevata la criticità dell'ozono. Il livello di protezione della salute risulta sistematicamente superato su gran parte del territorio regionale, con valori massimi registrati nei mesi estivi nelle zone suburbane e rurali. L'analisi dei trend di concentrazione rilevata dalle stazioni di monitoraggio mostra una situazione sostanzialmente costante nel tempo e piuttosto omogenea su tutto il territorio regionale.

Le criticità relative alla qualità dell'aria in regione sono sicuramente conseguenza di un sistema insediativo e produttivo altamente diffuso che, favorendo una sempre maggiore necessità di mobilità, rende il traffico veicolare un ulteriore elemento di rilievo come fonte di emissione di inquinanti atmosferici. A tutto ciò si somma il fatto che la Pianura Padana e quindi la stessa regione Emilia Romagna sono caratterizzate, particolarmente nella stagione

invernale, da uno scarso rimescolamento degli strati d'aria più bassi, con limitata azione diluente sulla concentrazione degli inquinanti. Tale situazione trae origine da cause sia orografiche, come le catene montuose che la circondano in gran parte, sia meteorologiche, ad esempio le frequenti inversioni termiche e la scarsa ventosità.

Nell'ambito della strategia tematica sull'inquinamento atmosferico, sostenuta dal programma Aria pulita per l'Europa (CAFE), l'Unione europea ha predisposto un radicale aggiornamento del quadro normativo, con l'approvazione della Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio 2008/50/CE del 21 maggio 2008, che incorpora gli ultimi sviluppi in campo scientifico e sanitario e le esperienze più recenti degli stati membri. Lo stato italiano ha recepito questa direttiva mediante il DLgs 155/2010, che costituisce un punto di riferimento per molte azioni intraprese dall'Emilia Romagna. La Regione, in accordo con le Province, e col supporto tecnico di Arpa, ha attuato negli ultimi anni un processo di ristrutturazione della rete, in termini di numero di stazioni, di inquinanti monitorati e posizionamento dei siti, allo scopo di rendere tale rete conforme ai criteri europei.

1.1.3 Caratteristiche meteorologiche

Un aspetto importante nell'affrontare la problematica dell'ozono troposferico è rappresentato dalla definizione delle caratteristiche climatiche e dall'individuazione delle principali situazioni meteorologiche che si presentano nell'area in esame. Infatti se da un lato la produzione dell'ozono vicino al suolo è il prodotto secondario di reazioni chimiche che coinvolgono altri inquinanti primari, dall'altro la sua variabilità spatio-temporale sul territorio è funzione sia della localizzazione delle sorgenti che del suo trasporto a seguito delle particolari circolazioni atmosferiche.

Situazioni meteorologiche rilevanti nel BPA

La presenza, nel territorio indicato con il termine Bacino Padano-Adriatico (o BPA), di un'orografia rilevante come l'arco alpino, rappresenta un fattore di interazione con la forzatura a scala sinottica, fino a determinare delle circolazioni a scala sub-sinottica e a mesoscala tipiche della regione.

Tra queste va ricordata la ciclogenesi sottovento alle Alpi che si crea a seguito dell'interazione tra le Alpi e un'onda ciclonica che transita sull'Europa centro-occidentale [2]. Questo fenomeno risulta più frequente in primavera e soprattutto in autunno, contribuendo in misura notevole all'elevata piovosità riscontrata nel BPA in queste due stagioni; lo spostamento dal golfo ligure verso levante delle depressioni bariche, infatti, determina precipitazioni che risultano più intense nell'area centro-orientale del bacino, e per quanto riguarda il territorio emiliano-romagnolo i valori massimi si presentano sui rilievi appenninici dovuti all'innalzamento della massa d'aria umida proveniente dal settore orientale del bacino. Talvolta nelle situazioni di ciclogenesi sottovento si osservano dei casi di foehn alpino nelle zone a ridosso delle Alpi occidentali, ovvero una elevata intensità del vento unita all'abbassamento rapido dei valori di umidità relativa e l'aumento della temperatura vicino al suolo. La ciclogenesi può anche determinare delle altre circolazioni a mesoscala tipiche del bacino Padano-Adriatico, come la bora nell'area di Trieste e dei venti forti in prossimità del suolo nella parte orientale del bacino.

Tra le altre configurazioni meteorologiche rilevanti ai fini della definizione del clima del BPA vanno citate le depressioni mediterranee e il transito dei sistemi frontali a ridosso dell'arco alpino. In particolare, considerando il campo di precipitazione, le correnti di scirocco associate allo spostamento verso levante delle depressioni mediterranee apportano piogge più intense sul golfo ligure e nell'area delle Alpi Occidentali, mentre nel secondo caso le

piogge sono più frequenti a ridosso dell'arco alpino centrale. Nelle situazioni associate alle depressioni di origine mediterranea si notano con una certa frequenza delle situazioni di foehn nella parte sud-orientale del bacino, prodotte dall'interazione dei flussi meridionali con la catena appenninica; la differenza tra l'altezza media della barriera alpina rispetto agli Appennini fa sì che il foehn alpino risulti in genere più intenso di quello appenninico.

Un'altra configurazione meteorologica sinottica che determina situazioni di tempo perturbato nel BPA è il cosiddetto blocco, definito dalla permanenza per diverse giornate di una struttura di massimo nel geopotenziale a più livelli in troposfera posizionato tra l'Europa Occidentale e l'Oceano Atlantico (blocco euro-atlantico); in questa situazione le correnti nella media troposfera, che solitamente sono occidentali, tendono a provenire da nord lungo i meridiani, apportando spesso condizioni di cattivo tempo. Nel periodo invernale la presenza di una vasta area anticiclonica stabile sul nord Italia determina nei bassi strati della Pianura Padana delle condizioni di inversione termica che talvolta persistono anche nelle ore centrali della giornata, a cui si associano valori elevati di umidità relativa producendo le condizioni meteorologiche necessarie per la formazione della nebbia.

Le configurazioni appena descritte si riscontrano principalmente nelle stagioni di transizione e nel periodo invernale; nei mesi estivi il segnale a scala sinottica è più debole e quindi prevale una fenomenologia tipica di scale spazio-temporali più piccole. Le situazioni di tempo perturbato sono caratterizzate da un'intensa attività temporalesca che raggiunge la massima frequenza di eventi nel periodo maggio-settembre. Sempre nel periodo estivo risulta molto frequente la situazione meteorologica di tempo stabile chiamata calma sinottica, definita dalla presenza di un campo anticiclonico consolidato nella bassa e media troposfera.

Le analisi ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) dimostrano come la Pianura Padana sia, tra le zone pianeggianti d'Europa, una delle zone meno ventose, con velocità del vento mediamente inferiori ai 2 m/s . All'interno del quadro complessivo vengono evidenziate come zone particolarmente critiche la zona centrale della pianura, il nord-est e la regione subalpina occidentale; le zone costiere adriatiche e la regione appenninica e subappenninica appaiono leggermente meno critiche (velocità media maggiore di 2 m/s).

Le condizioni di rimescolamento verticale vengono descritte dall'altezza di rimescolamento che è proporzionale alla turbolenza dell'atmosfera, generata sia da fattori di natura meccanica (venti) che termodinamici. In generale la turbolenza meccanica della Pianura Padana risulta, come già sottolineato, abbastanza debole, e il rimescolamento è quindi dominato dalla turbolenza termica, molto più intensa in estate.

L'analisi delle rose dei venti nelle aree urbane mostra inoltre che le direzioni del vento più frequenti sono da ovest e da est e che la direzione occidentale tende ad essere associata a velocità del vento particolarmente bassa: in queste condizioni, l'Emilia Romagna è interessata da aria particolarmente inquinata proveniente dalle aree fortemente urbanizzate e industrializzate della Lombardia e del Piemonte. I venti da est sono spesso associati a una migliore qualità dell'aria, specialmente negli agglomerati del settore orientale della regione. Sono invece relativamente rare le giornate in cui il vento proviene da Sud-Ovest, portando aria più pulita dalle vallate appenniniche su tutta l'Emilia Romagna.

Questo porta alla individuazione nel territorio pianeggiante regionale di due aree meteorologiche, est e ovest, che hanno una separazione variabile nord sud lungo il territorio di confine tra le province di Modena e Bologna,

e che talvolta giunge a comprendere nell'area orientale anche il comune di Bologna. La zona costiera ha un clima abbastanza specifico ma che insiste su una superficie ridotta del territorio regionale.

1.1.4 Aspetti climatici del periodo estivo

Poichè, com'è noto, gli episodi critici per i livelli di ozono troposferico si verificano nei mesi estivi, in questo paragrafo si concentrerà l'attenzione sui principali aspetti meteoclimatici dell'Emilia Romagna nella stagione estiva.

Andamento della temperatura estiva

Il Servizio Idro-Meteo-Clima della Regione Emilia Romagna (Arpa-Simc) ha messo a disposizione, per la prima volta nel 2009, un atlante idroclimatico impostato per evidenziare le dinamiche territoriali in atto. L'Atlante comprende tavole dei valori medi delle principali variabili idroclimatiche (precipitazioni, temperatura, copertura del cielo, ventosità, livello idrometrico e portata dei fiumi) che si riferiscono a due periodi distinti, il trentennio 1961-1990, assunto a riferimento climatico di base secondo le convenzioni dell'Omm (Organizzazione meteorologica mondiale), e l'arco dei diciotto anni successivi compresi tra il 1991 e il 2008, che costituiscono una porzione rilevante e maggioritaria dell'attuale trentennio climatologico, che si concluderà nel 2020 [3].

Dal confronto dei valori nei due periodi è possibile verificare direttamente l'ampiezza del cambiamento climatico in corso nella regione; inoltre, siccome i cambiamenti si manifestano con intensità differente nelle diverse stagioni, oltre alle tavole annuali sono state prodotte tavole stagionali. Tra queste verranno selezionate, per questo studio, quelle relative alla stagione estiva.

Le principali tendenze climatiche regionali che appaiono dall'esame dell'Atlante sono relative a un aumento generalizzato delle temperature, che

risultano cresciute in media di circa $1.1^{\circ}C$, rispetto al periodo 1961-1990. Nelle figure 1.1, 1.2 e 1.3 sono mostrate rispettivamente le mappe di temperatura media estiva tra il 1961 e il 1990, tra il 1991 e il 2008, e la variazione di temperatura media estiva tra i due periodi. Dall'ultima mappa appare chiaro come l'aumento di temperatura riguardi la quasi totalità del territorio dell'Emilia-Romagna, con ampie aree dove la variazione ha raggiunto, e talvolta superato, i $2^{\circ}C$.

Le successive tre figure (1.4, 1.5 e 1.6) mostrano analogamente le mappe di temperatura massima estiva tra il 1961 e il 1990, tra il 1991 e il 2008, e la variazione tra i due periodi. Anche in questo caso l'ultima immagine è quella che meglio si presta a una rapida e chiara interpretazione: l'aumento della temperatura massima estiva tra i due periodi presi in considerazione interessa tutta la regione (fatta eccezione per una piccola zona sull'Appennino parmense), con variazioni anche di $3^{\circ}C$ registrate nel piacentino e nel forlivese.

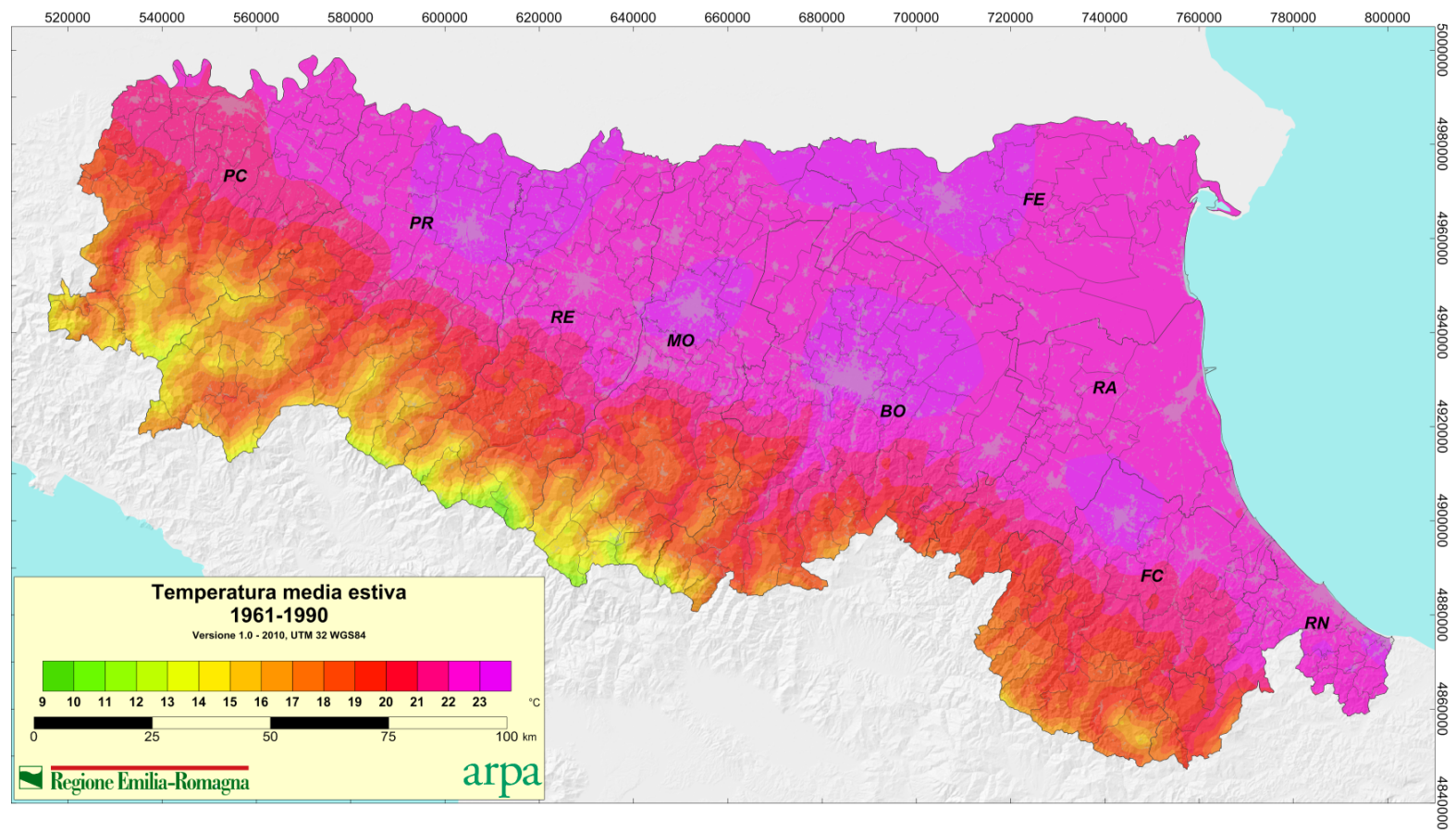


Figura 1.1: Temperatura media estiva nel periodo 1961-1990 [Fonte: Arpa].

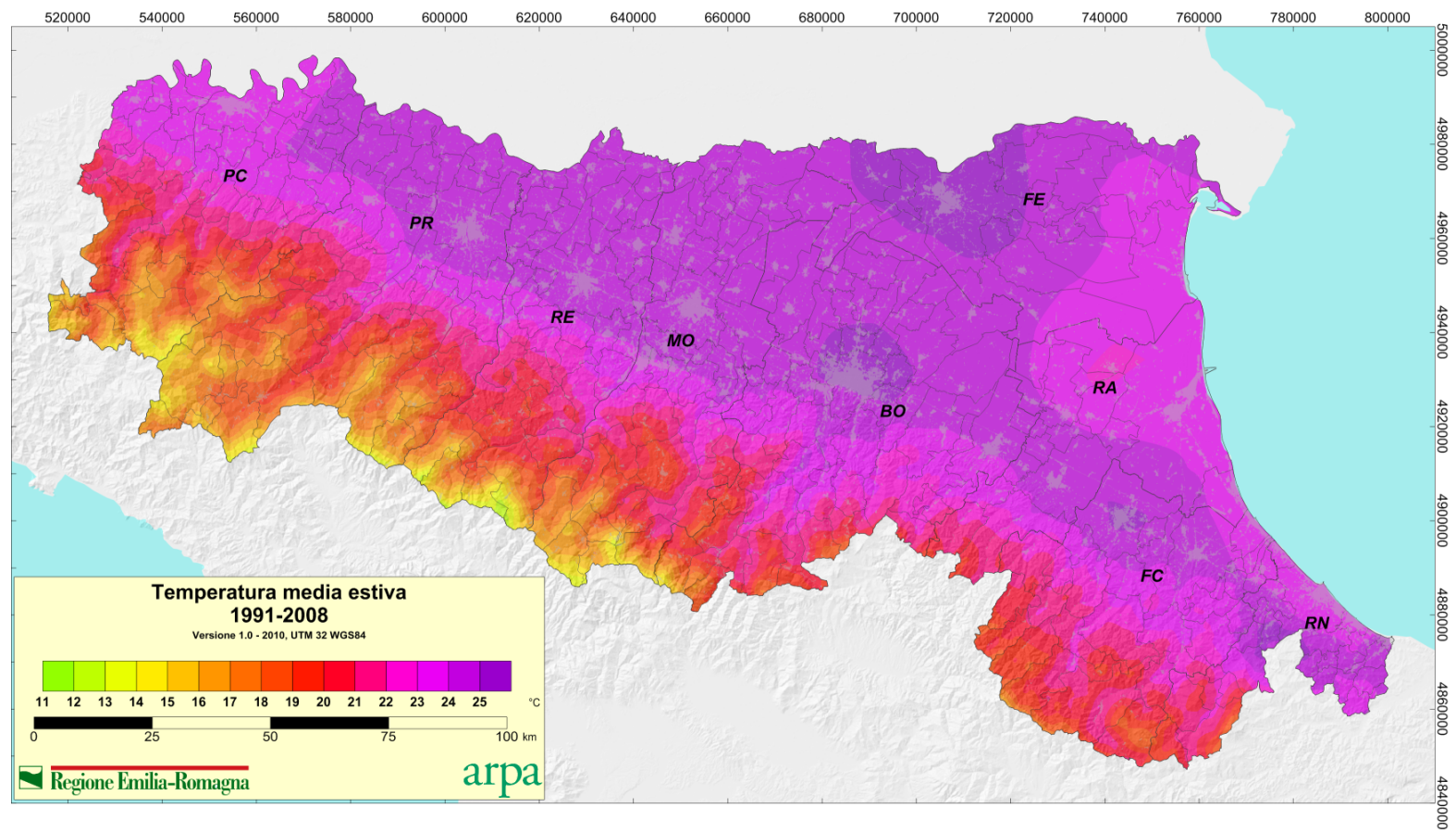


Figura 1.2: Temperatura media estiva nel periodo 1991-2008 [Fonte: Arpa].

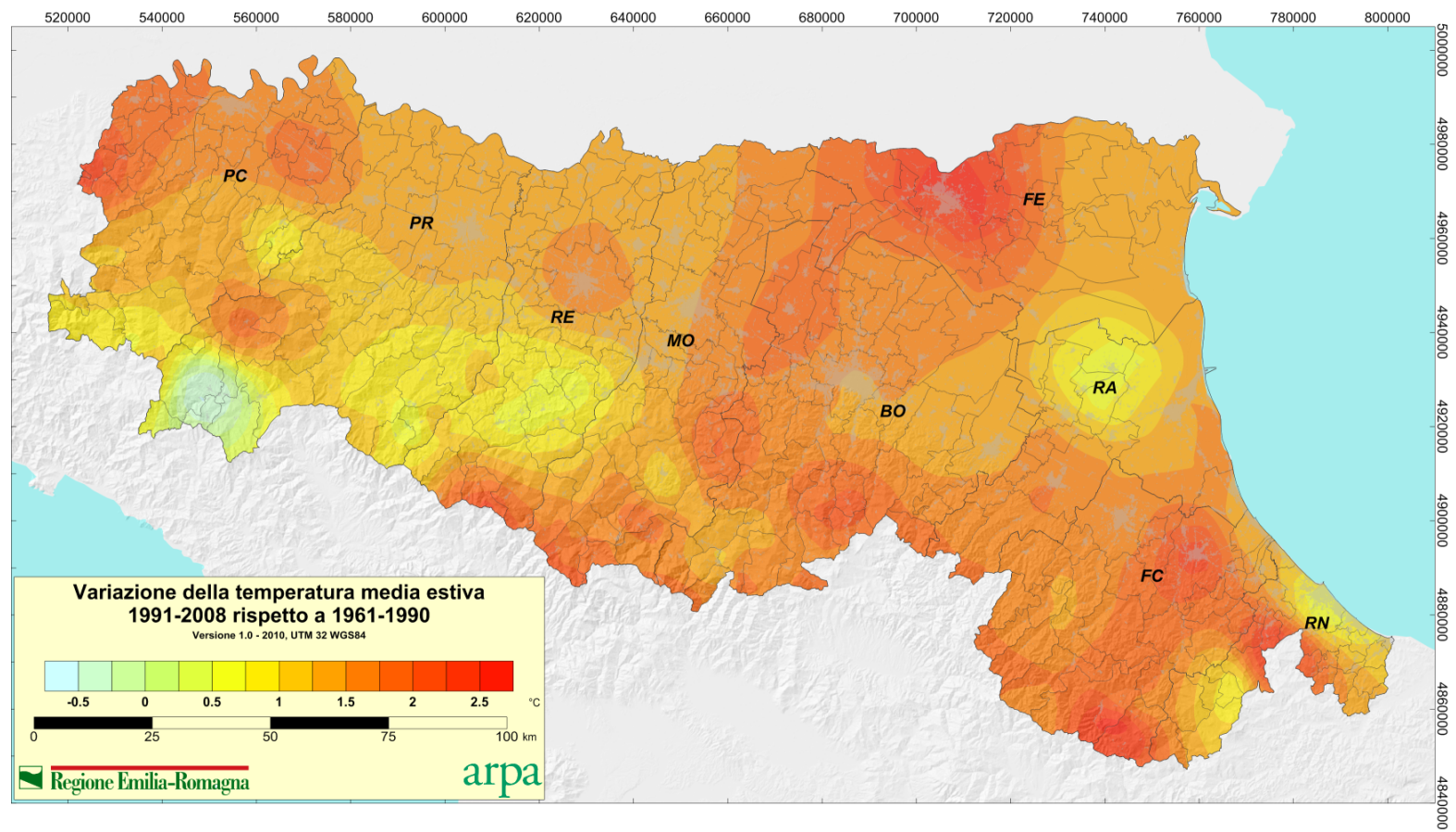


Figura 1.3: Variazione della temperatura media estiva 1991-2008 rispetto a 1961-1990 [Fonte: Arpa].

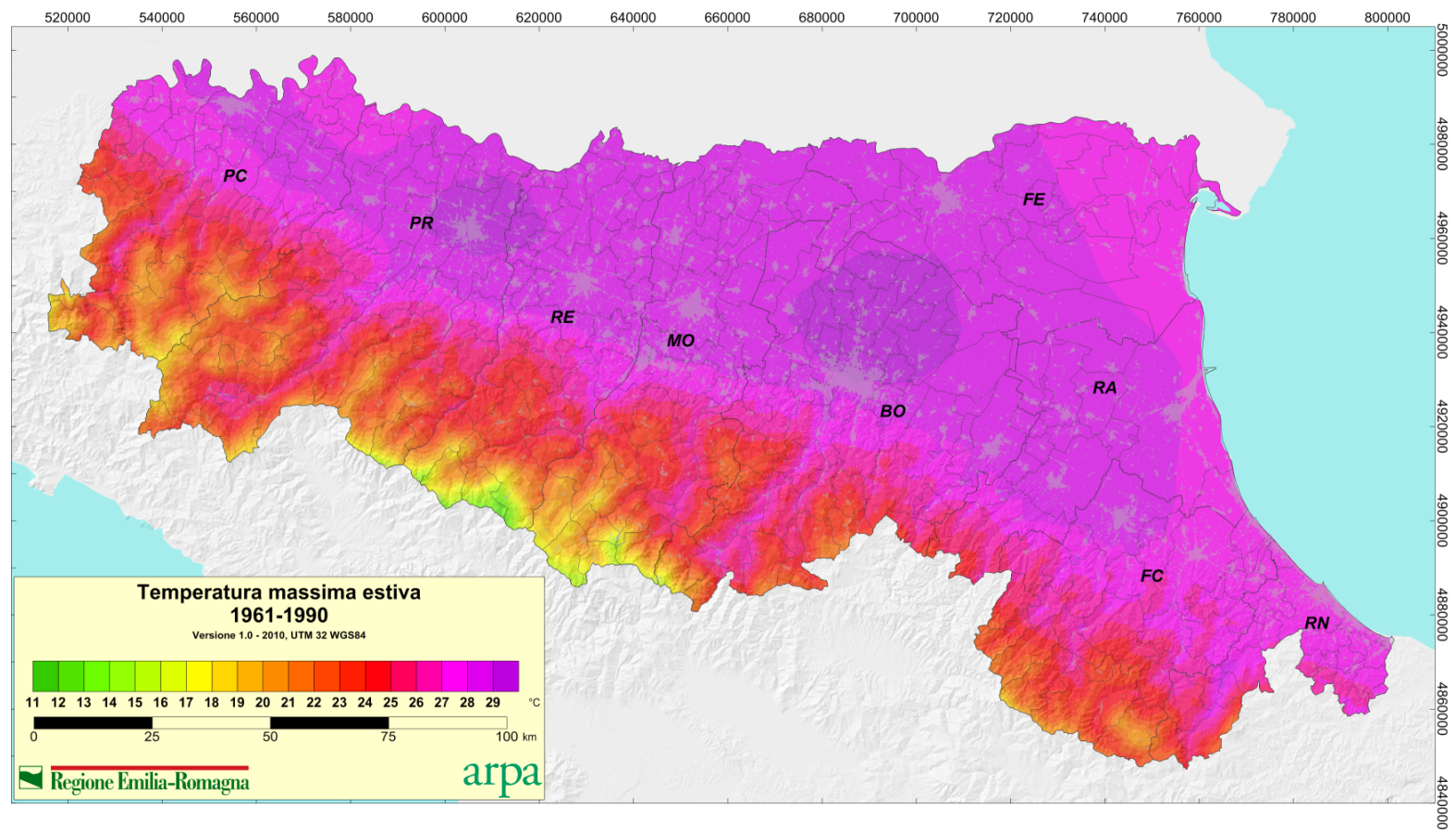


Figura 1.4: Temperatura massima estiva nel periodo 1961-1990 [Fonte: Arpa].

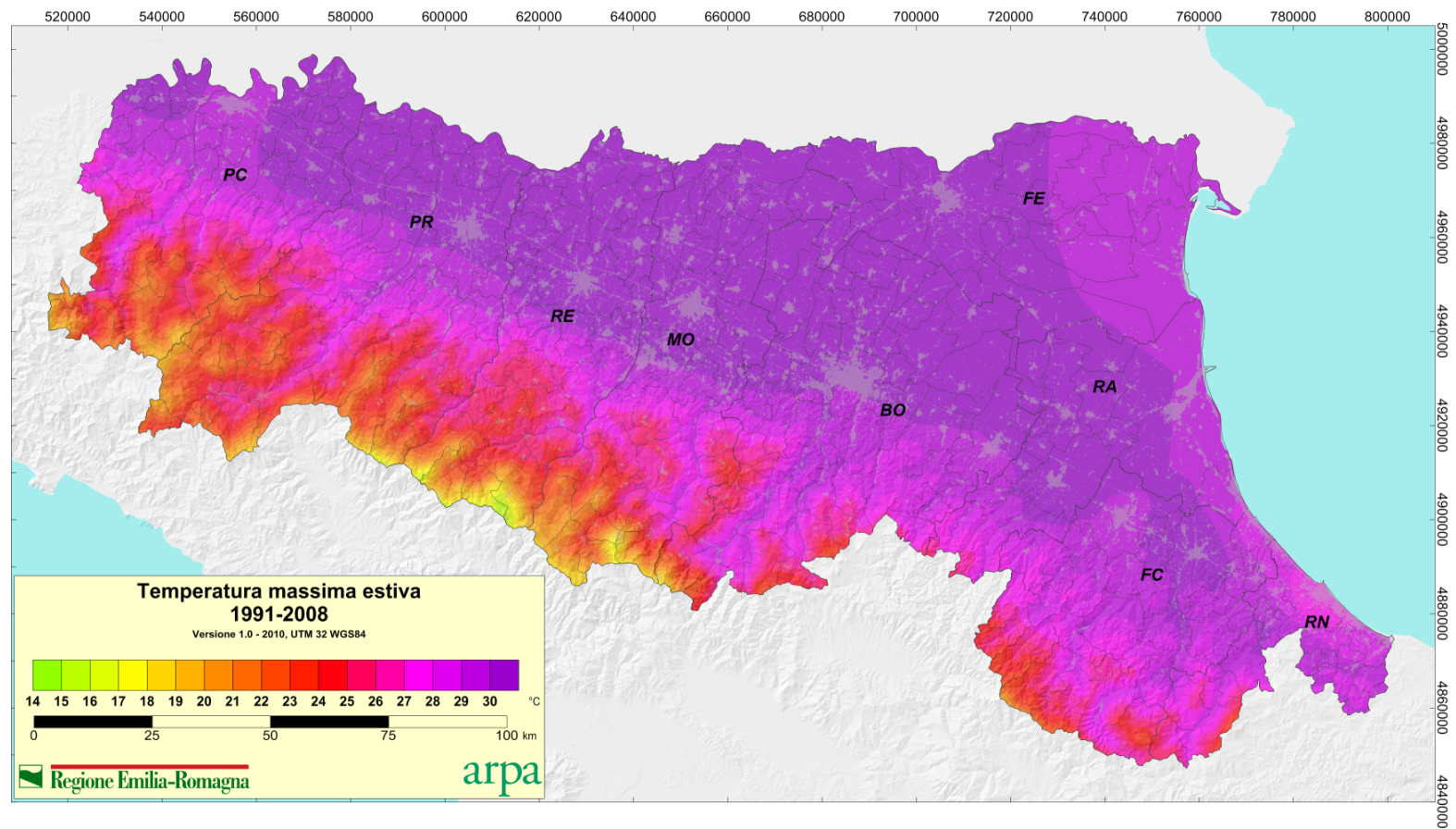


Figura 1.5: Temperatura massima estiva nel periodo 1991-2008 [Fonte: Arpa].

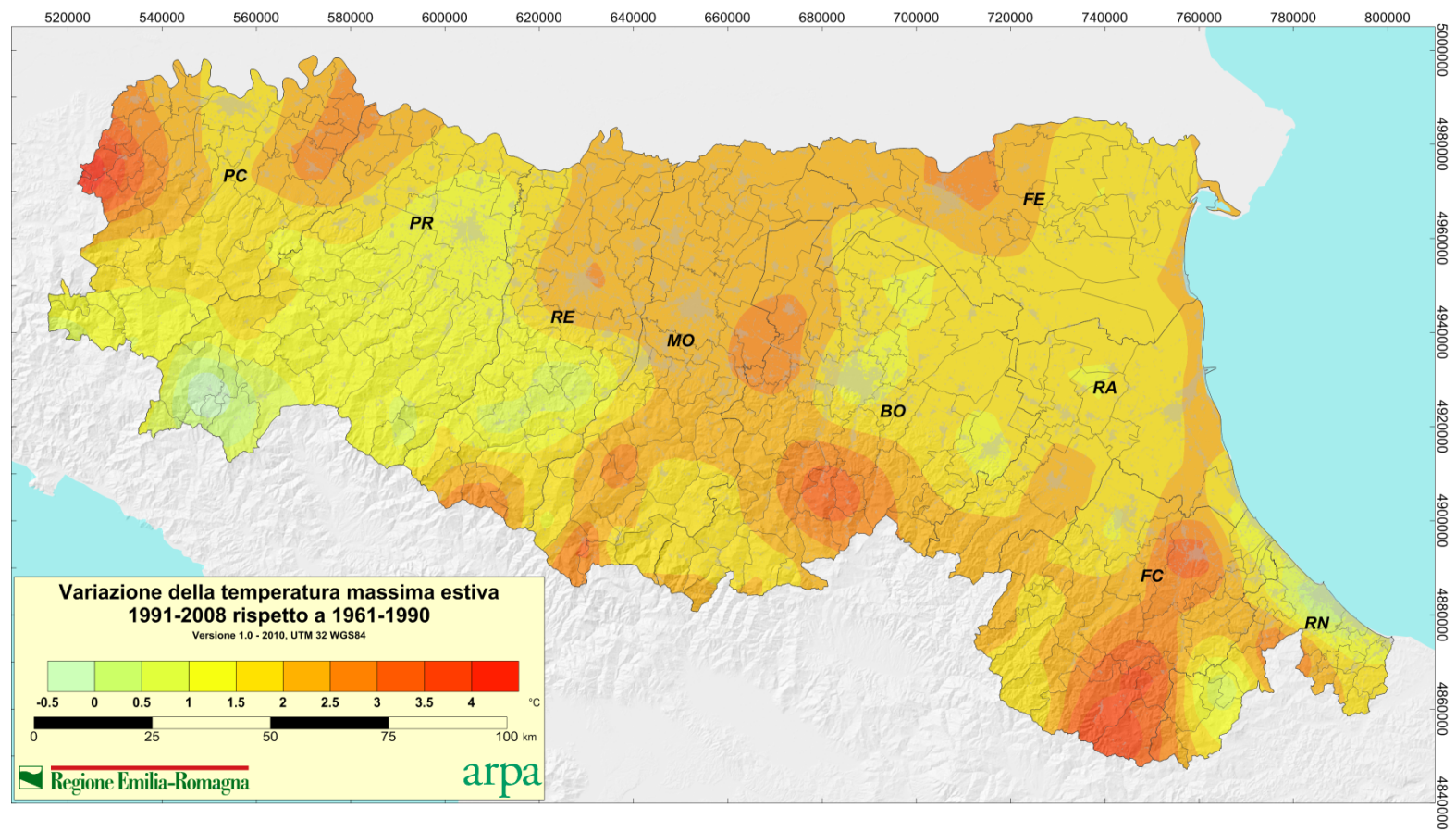


Figura 1.6: Variazione della temperatura massima estiva 1991-2008 rispetto a 1961-1990 [Fonte: Arpa].

1.2 L'inquinamento da ozono

L'ozono è un componente gassoso di grande importanza in atmosfera, protagonista di due fenomeni sempre più al centro delle tematiche fondamentali e prioritarie dell'ambiente globale, sia per i problemi che riguardano il clima e i cambiamenti climatici, sia per quanto riguarda la protezione sanitaria della popolazione: la riduzione della fascia di ozono stratosferico e l'aumento della concentrazione di ozono troposferico.

La presenza di ozono nella stratosfera, in elevata concentrazione, svolge un'importantissima funzione protettiva per la salute umana e l'ambiente in cui viviamo, in quanto assorbe la radiazione ultravioletta a maggiore energia che avrebbe effetti mutagenetici sui tessuti viventi di piante e animali. Questo spiega la crescente preoccupazione per il fenomeno definito buco dell'ozono, ovvero una riduzione della fascia protettiva di ozono e la conseguente diminuzione della sua azione filtrante nei confronti delle radiazioni solari potenzialmente pericolose.

Nella troposfera invece, ovvero lo strato di atmosfera che va dalla superficie terrestre fino a 10-15 km d'altezza, alte concentrazioni di ozono risultano nocive per la salute dell'uomo, per la vita degli ecosistemi e per la conservazione dei materiali. Occorre quindi avere ben chiara la differenza tra questi due fenomeni, in cui l'ozono assume nel primo caso il ruolo di semplice composto naturale stratosferico, e nell'altro di inquinante e principale tracciante dell'inquinamento fotochimico.

In questo lavoro verrà completamente tralasciata la problematica relativa all'ozono stratosferico e verrà trattato unicamente il fenomeno dell'aumento della concentrazione di ozono troposferico, fenomeno che ha assunto ormai dimensione planetaria.

1.2.1 L'ozono troposferico

Nella troposfera hanno luogo tutti i processi chimici e biologici che regolano la vita sulla terra e la maggior parte dei processi meteorologici. L'ozono troposferico è di origine sia antropica che naturale, ed è un inquinante di tipo secondario, in quanto non viene emesso direttamente da una o più sorgenti, bensì è prodotto per effetto della radiazione solare in presenza di composti generalmente definiti precursori. Eventi particolari che portano ad un aumento della concentrazione di ozono non riconducibili direttamente ai meccanismi chimico-fisici che verranno descritti in seguito, nè imputabili all'intervento dell'uomo, sono:

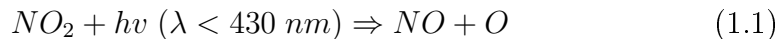
- episodi di intrusione stratosferica, ovvero trasporto verso il basso di aria stratosferica causato da particolari condizioni meteorologiche come forti scambi verticali;
- fenomeni elettrici atmosferici.

Ad eccezione dei casi appena citati, ciò che va principalmente considerato nell'analisi della produzione di ozono in troposfera è l'immissione in troposfera dei precursori, essenzialmente schematizzabili in due grandi categorie, ossidi di azoto e composti organici volatili, che reagendo con l'ossigeno e altre specie chimiche già presenti, daranno origine ad ozono e ad altri prodotti dello smog fotochimico [4] [5].

1.2.2 Formazione di ozono in troposfera per reazione chimica

La produzione di ozono in troposfera per reazione chimica ha inizio con la fotolisi del biossido di azoto (NO_2), la scissione cioè di questa molecola da parte

di radiazione solare di lunghezza d'onda inferiore a 430 nm , in monossido di azoto (NO) e ossigeno atomico (O):



seguita dalla combinazione dell'ossigeno atomico con ossigeno molecolare (O_2):



L'ozono prodotto da questa reazione reagisce però quasi immediatamente con l'ossido di azoto formatosi nella reazione (1.1), per riprodurre il biossido di azoto di partenza:



Essendo queste tre reazioni molto rapide, si stabilisce in atmosfera, in condizioni diurne e di poca turbolenza, uno stato fotostazionario in cui coesistono le tre specie; di notte, quando l'attività fotochimica è nulla, si ha anche la formazione di NO_3 .

Dal ciclo di reazioni appena considerate però, non si ottiene una produzione netta di ozono, bensì un equilibrio in cui le concentrazioni delle tre specie variano di poco; inoltre, poichè le emissioni di NO nei centri urbani sono elevate, la concentrazione di ozono dovrebbe risultare decisamente bassa.

I dati delle reti di rilevamento urbane dimostrano invece che le concentrazioni di ozono subiscono un aumento durante la giornata e che raggiungono alti valori, soprattutto nei mesi estivi in condizione di forte irraggiamento solare, con temperature elevate e in condizioni di quasi totale assenza di vento. Ciò si spiega con il verificarsi di reazioni chimiche che coinvolgono i composti organici volatili (VOC). Tra questi vanno citati gli idrocarburi quali alcani, alcheni e alchini, gli idrocarburi aromatici quali benzene, toluene e gli xileni, e i composti carbonilici quali aldeidi e chetoni.

L'importanza di questi composti risiede nel fatto che interagiscono facilmente con O , $-OH$ e O_3 , dando origine a specie molto reattive chiamate radicali perossilchilici, convenzionalmente indicati come RO_2 . Il monossido di azoto reagisce con questi composti secondo la reazione generale:



In questo ciclo catalitico di conversione dell' NO in NO_2 , competitivo rispetto alla reazione (1.3), si ha quindi produzione di una molecola di biossido di azoto senza la distruzione di una molecola di ozono che, di conseguenza, si accumulerà maggiormente in atmosfera.

Le specie che controllano la produzione di ozono troposferico sono quindi gli ossidi di azoto, (NO_x : NO e NO_2) e i composti organici volatili (VOC). I prodotti secondari di questo ciclo di formazione sono le aldeidi, principalmente formica ed acetica, il perossido di idrogeno (H_2O_2), i perossidi organici, e gli acilnitrati, una classe di composti dei quali il perossiacetilnitrato (PAN) risulta essere il più importante in atmosfera.

In figura 1.7 è mostrata una rappresentazione schematica delle sorgenti e dei pozzi di ozono troposferico. Sono inoltre inclusi i flussi globali annuali, calcolati usando un modello globale di chimica e trasporto, per dare un'idea del peso dei singoli termini; tra questi sono inclusi lo scambio tra stratosfera e troposfera, la produzione e la rimozione chimica in troposfera, e il processo di deposizione sulla superficie terrestre.

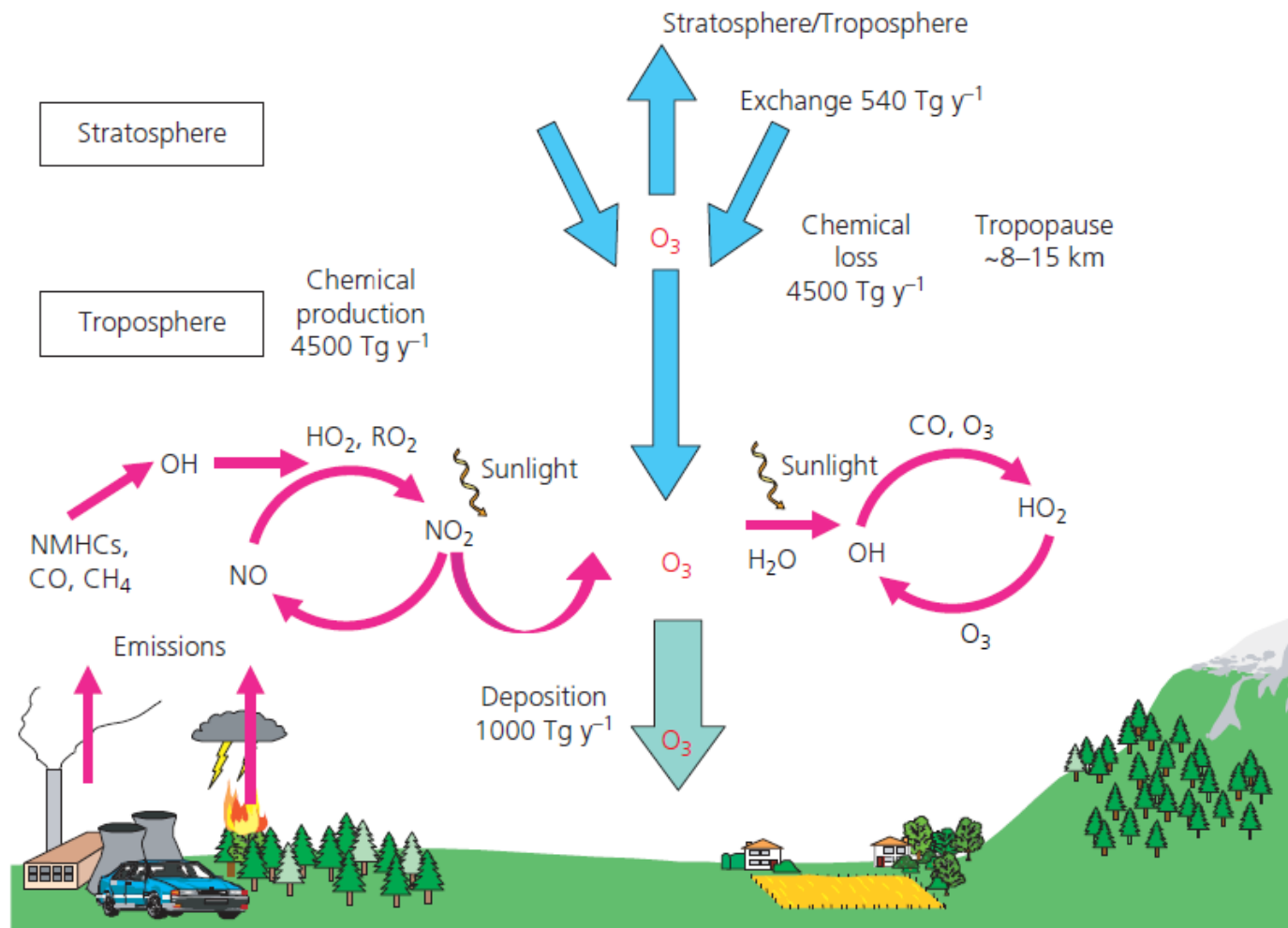


Figura 1.7: Schema dei processi di formazione e rimozione dell'ozono troposferico [6].

1.2.3 I precursori dell'ozono

Come già illustrato, la presenza di ozono in atmosfera si deve alle reazioni che avvengono tra i composti precursori; relativamente alla loro produzione è importante la distinzione tra un'origine biogenica e una antropogenica.

Sorgenti di ossidi di azoto

La produzione di ossidi di azoto è legata ai processi di combustione, sia naturali che artificiali. L'azoto e l'ossigeno reagiscono tra loro, ad alte temperature, formando monossido di azoto che a sua volta, ossidandosi, forma biossido di azoto secondo le relazioni seguenti:



Le sorgenti di NO_x con maggiore influenza sullo stato della qualità dell'aria sono quelle di origine antropica, come il traffico degli autoveicoli, gli impianti termoelettrici, gli altri impianti di grosse dimensioni in cui sono presenti processi di combustione, alcuni impianti industriali e il riscaldamento domestico.

La principale fonte naturale di ossidi di azoto è costituita dall'azione batterica nei processi di decomposizione organica anaerobica che riduce i nitrati a nitriti. Questi ultimi, in ambiente acido, formano acido nitroso che, essendo instabile, libera ossidi di azoto. Anche i fulmini, gli incendi e le eruzioni vulcaniche producono un notevole quantitativo di NO_x , di un ordine di grandezza superiore a quello derivante dalle sorgenti antropiche, ma la distribuzione di tali sorgenti in vaste aree fa sì che la loro influenza sulla qualità dell'aria risulti decisamente limitata.

Sorgenti di composti organici volatili

I VOC (Volatile Organic Compound) sono sostanze che includono composti chimici caratterizzati da molecole con gruppi funzionali diversi, con comportamenti fisici e chimici diversi, ma caratterizzati da un certo livello di volatilità. Si classificano come VOC sia gli idrocarburi contenenti carbonio e idrogeno come unici elementi (suddivisi in alifatici e aromatici) sia composti contenenti ossigeno, cloro o altri elementi tra il carbonio e l'idrogeno, come gli aldeidi, eteri, alcoli, esteri, clorofluorocarburi e idroclorofluorocarburi.

Possono essere suddivisi in categorie in base all'origine: composti antropogenici (come benzene, toluene, metano, etano...) e composti biogenici (BVOC) che comprendono principalmente i terpeni e l'isoprene.

Le sorgenti antropiche predominanti di VOC sono il traffico veicolare e la produzione, lo stoccaggio e l'impiego di solventi organici; gli altri processi industriali, il riscaldamento domestico e la produzione di energia, rappresentano sorgenti di secondaria importanza. Risulta in ogni caso difficile indicare un tipo di sorgente come emettitrice di un determinato composto in concentrazioni note a causa dell'enorme quantità di sostanze organiche liberate in atmosfera. Non tutte queste inoltre giocano il medesimo ruolo nella formazione degli ossidanti fotochimici poichè, a causa della diversa reattività, hanno tempi di residenza diversi.

Non secondario è il ruolo delle sorgenti naturali. Si possono innanzitutto distinguere due contributi alla concentrazione totale di composti organici biogenici: uno dato dagli idrocarburi alifatici e aromatici e l'altro dal terpene ed i suoi derivati. I primi vengono emessi dalla fermentazione enterica negli animali, dai rifiuti domestici, dalle zone umide della terra e da una serie di altri processi biogeochimici, alcuni dei quali ancora sconosciuti. Le fonti principali di emissioni in atmosfera di terpene e suoi derivati sono invece le

foreste, in misura dipendente dal tipo di vegetazione e dal clima.

I composti non metanici prodotti dalle piante sono oltre 400 (compresi aldeidi, chetoni, acidi organici, alcoli, alcani, isoprene e derivati del terpene), ma le conoscenze sull'andamento delle emissioni e sul comportamento si limitano soprattutto all'isoprene e alle specie del monoterpene. Per queste ultime non è ancora del tutto chiaro il meccanismo di formazione: si pensa comunque sia correlato alla fotosintesi e non alla fotorespirazione. Le emissioni di monoterpene dipendono fortemente dalla temperatura ma non dall'intensità della luce, come si evince dal fatto che continuano anche durante le ore notturne. La produzione di isoprene invece è dipendente da entrambi i fattori e si riduce praticamente a zero durante la notte. Da ciò si può iniziare a comprendere come tali fenomeni abbiano andamenti stagionali con valori di picco nei mesi estivi. In questo contesto assume un ruolo determinante la diversa reattività dei vari composti, che può essere enormemente diversa da specie a specie, esprimibile in termini di "potenziale di creazione di ozono fotochimico" (POCP); il valore di riferimento è quello della molecola di etilene il cui POCP è posto uguale a 100. I composti che risultano avere una maggiore importanza negli episodi di formazione dell'ozono sono gli idrocarburi insaturi (etilene, propilene, butilene), l'isoprene ed α - e β - pinene, e le aldeidi.

Relazione con la produzione di ozono

Si è visto finora che la produzione di ozono è principalmente influenzata da due gruppi di sostanze: gli ossidi di azoto e i composti organici volatili. La relazione tra la loro concentrazione e la produzione di ozono troposferico è molto complessa da valutare, data la natura altamente non lineare, ma la sua comprensione e corretta definizione è fondamentale in quanto sta alla base di

una buona strategia di intervento per ridurre le concentrazioni di inquinanti fotochimici.

La complessa serie di reazioni chimiche interessate alla produzione di ozono, notevolmente semplificate in precedenza, introduce elementi di non linearità nella relazione sorgenti di precursori/concentrazione di ozono in atmosfera, diversamente da quanto vale per inquinanti primari non soggetti a reazioni chimiche, per i quali a una data riduzione percentuale delle sorgenti di inquinamento deve corrispondere un'analoga riduzione della concentrazione dello specifico inquinante. Non è detto quindi che ad una determinata riduzione delle emissioni di precursori corrisponda una equivalente riduzione della concentrazione di ozono.

Un modo conveniente di illustrare la relazione esistente tra la concentrazione di ozono e quella di VOC e NO_x è dato dalle funzioni isoplete, ovvero linee di uguale concentrazione di ozono in funzione di diverse concentrazioni di ossidi di azoto e di composti organici volatili. In figura 1.8 ne è riportato un esempio, ottenuto da numerose simulazioni modellistiche dei livelli massimi di ozono raggiunto per irraggiamento di una miscela di NO_x e VOC.

La forma delle isoplete non è comunque generale, ma varia in funzione dei molteplici fattori che influenzano la formazione di ozono e che possono potenzialmente concorrere a determinare episodi con alti livelli di inquinamento fotochimico. Da quanto mostrato risulta chiaro quanto complessa sia la valutazione delle misure da perseguire nel controllo delle sorgenti di NO_x e VOC, necessarie per ottenere significative riduzioni della concentrazione di ozono. Per prevedere i possibili effetti dei piani di riduzione delle emissioni di precursori sui livelli di concentrazione di ozono troposferico vengono usati modelli numerici combinati chimico-meteorologici che sono stati sviluppati nei centri di ricerca di diversi paesi e sono tuttora in costante aggiornamen-

to, in funzione dell'avanzamento della ricerca sul fenomeno dell'inquinamento fotochimico.

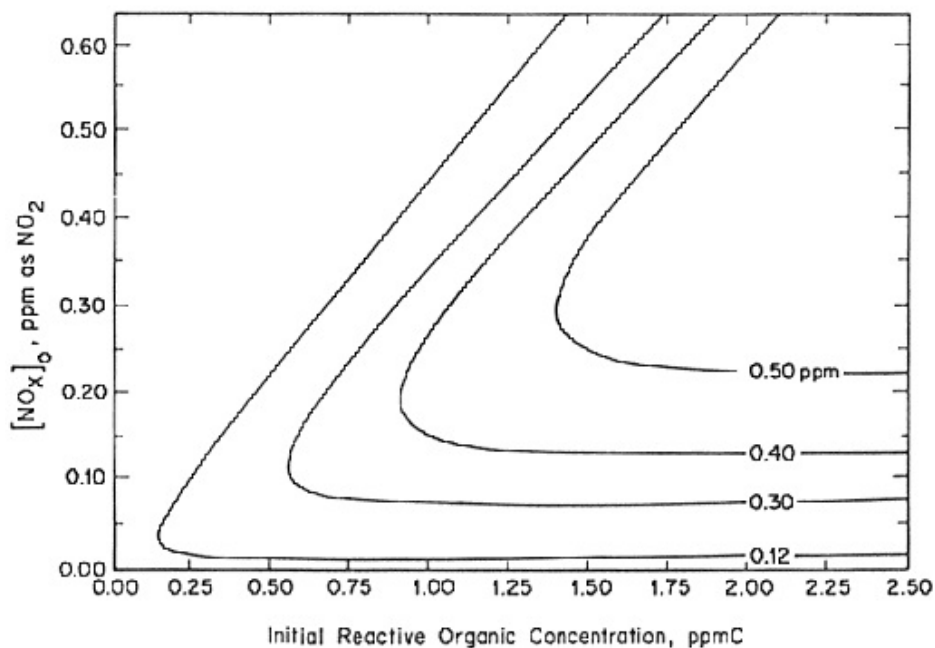


Figura 1.8: Isolinee della concentrazione di ozono in funzione della concentrazione dei precursori NO_x e VOC [Fonte: American Chemical Society].

1.2.4 Meccanismi di rimozione

Così come la produzione di ozono, anche la sua rimozione è fortemente legata al ciclo di irraggiamento solare e alla presenza o meno di quei composti con cui interagisce.

Sia nelle ore diurne che in quelle notturne si distinguono due scenari, urbano e rurale, che nel contesto della rimozione notturna appaiono ancora più distinti. Nel primo si assiste a una progressiva diminuzione delle concentrazioni di ozono dovuta al fatto che, non essendoci luce solare, viene a

mancare la produzione di ossigeno atomico per fotodissociazione per cui non si ha formazione di nuovo ozono; l'immissione in atmosfera di ossidi di azoto invece continua, seppur in quantità decisamente inferiori, per cui prende il sopravvento la reazione di conversione (1.3) finchè la quasi totalità di ozono è rimossa dall'atmosfera urbana. In ambiente rurale invece, la quasi totale assenza di sorgenti di NO fa sì che le concentrazioni di ozono rimangano costanti dopo una diminuzione nelle prime ore notturne, dovuta all'esaurimento degli ossidi di azoto trasportati dalla città.

Di estrema importanza sono una serie di meccanismi che non rientrano nel caso appena descritto e avvengono nell'arco di tutta la giornata, anche se più marcati nelle ore diurne: si tratta dei processi di deposizione secca e deposizione umida, entrambi molto influenti sulla concentrazione e il tempo di residenza dell'ozono; alcuni esempi sono le reazioni di ossidazione sulle foglie delle piante per deposizione secca, e le piogge acide e le nebbie per quella umida.

1.2.5 Distribuzione temporale della concentrazione di ozono

Il ruolo svolto dalla radiazione solare nei meccanismi di formazione dell'ozono troposferico spiega l'andamento temporale della sua concentrazione al suolo, caratterizzato da una forte componente stagionale e da una componente giornaliera.

Il ciclo diurno è determinato in gran parte dall'andamento dell'intensità della radiazione solare: in condizioni usuali, ovvero di insolazione crescente fino a mezzogiorno e calante per il resto della giornata, si avrà un tasso costante di crescita fino alle ore 14-15, con uno sfasamento rispetto al massimo di radiazione solare incidente di un paio d'ore, per poi avere una diminuzione

graduale fino a valori bassi nelle ore notturne. Il pronunciato picco nel primo pomeriggio è dovuto sia alla produzione fotochimica di ozono durante le ore diurne, sia ad un efficace rimescolamento dell'atmosfera che trasporta verso il basso l'ozono formatosi nella troposfera libera. Durante le ore notturne l'atmosfera si trova invece in condizioni di maggiore stabilità e le frequenti condizioni di inversione termica prevengono lo scambio fra gli strati di aria più prossimi al suolo e la troposfera libera; è in queste condizioni che si verifica la diminuzione notturna della concentrazione di ozono dovuta principalmente alla deposizione al suolo e alle reazioni di rimozione già illustrate.

Il mattino, a seguito del nuovo riscaldamento solare, lo strato di inversione è distrutto e ha nuovamente luogo il rimescolamento della troposfera che porta all'aumento della concentrazione di ozono. Quello appena descritto non è chiaramente l'unico andamento diurno che si conosca, ma è quello caratteristico delle zone non esposte a rilevanti fenomeni di trasporto. Il tipico massimo giornaliero è più o meno pronunciato a seconda delle zone prese in considerazione: nelle regioni remote marine e nelle aree in alta quota, ad esempio, il picco giornaliero tende a diminuire di intensità, fino quasi a scomparire in alcuni casi, dove la concentrazione di ozono resta praticamente costante durante l'intero arco della giornata.

Oltre al ciclo giornaliero appare evidente anche un marcato andamento stagionale della concentrazione di ozono, correlato con le variazioni stagionali dei processi meteorologici e principalmente col ciclo stagionale dell'irraggiamento solare: si avranno pertanto minimi di concentrazione durante i mesi invernali e massimi durante la stagione estiva.

E' proprio nelle condizioni di stabilità atmosferica estiva, dovuta a regimi anticiclonici persistenti, che tendono a manifestarsi i cosiddetti episodi di smog fotochimico: si tratta infatti della condizione privilegiata per la

formazione e l'accumulo di inquinanti, tra i quali l'ozono, che si accumula progressivamente con picchi massimi diurni di intensità crescente, fino a raggiungere e superare i limiti di riferimento.

1.2.6 Dipendenza dalle condizioni meteorologiche

Sia i termini di trasporto che di produzione e rimozione dell'ozono, e di conseguenza le problematiche relative all'inquinamento fotochimico, sono fortemente influenzati dalle condizioni atmosferiche. Data la complessità dei meccanismi di produzione e rimozione, la concentrazione di ozono risulta infatti dipendere non solo dall'irraggiamento solare, ma anche da altre variabili meteorologiche quali la temperatura dell'aria, la direzione e la velocità del vento, le condizioni di stabilità atmosferica e l'altezza dello strato di rimescolamento.

Come già illustrato la quantità di radiazione solare che raggiunge la troposfera determina gli andamenti giornalieri e stagionali, fornendo l'energia necessaria per guidare i processi fotochimici; pertanto la concentrazione di ozono tende a crescere all'aumentare dell'irraggiamento solare.

La velocità del vento determina tra le altre cose l'accumulo o meno degli inquinanti primari e secondari, specie nei centri urbani ed industrializzati; episodi di alti valori di concentrazione si verificano generalmente con velocità del vento compresa nell'intervallo $1 - 5 \text{ ms}^{-1}$. I venti ed i sistemi meteorologici distribuiscono inoltre l'ozono e i suoi precursori su aree estese, facendo sì che le variazioni spaziali di ozono siano molto più graduali che per altri inquinanti primari. Gli episodi di ozono vengono quindi in genere osservati contemporaneamente su vaste aree, e le massime concentrazioni attese sono nelle aree suburbane sottovoce agli agglomerati urbani.

Il trasporto è quindi responsabile sia degli effetti di accumulo che di dispersione di inquinanti: le masse d'aria ricche di inquinanti primari possono essere trasportate per centinaia di chilometri lontano dalle sorgenti, provocando così elevate concentrazioni in zone apparentemente non interessate a problemi di inquinamento, come quelle montane o rurali.

Al termine del capitolo 4 verranno illustrati un po' più nel dettaglio i molteplici legami esistenti tra il clima, l'ecosistema e la concentrazione di ozono, in modo da dare un'idea del complesso quadro in cui si colloca l'oggetto di questo studio, ovvero l'analisi della relazione tra l'ozono e la sola temperatura massima.

1.2.7 Definizione delle soglie

Per indicare il livello di gravità della situazione a cui sono sottoposti la popolazione e l'ambiente, sono state definite a livello europeo alcune soglie di riferimento per la concentrazione di ozono.

- Soglia di informazione: concentrazione media in un'ora di $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Soglia di allerta: concentrazione media in un'ora di $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Episodio di ozono: periodo che può andare da un paio di giorni a un paio di settimane caratterizzato da quotidiani superamenti delle soglie fissate per proteggere la salute umana.

In figura 1.9 sono riportati gli obiettivi fissati dalla direttiva sulla qualità dell'aria del 2008 (EU, 2008c), con valori limite di concentrazione di ozono per la protezione della salute umana e della vegetazione.

Per quanto riguarda la salute umana il limite di concentrazione per una esposizione media di otto ore è pari a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il numero di superamenti a

Objective	Period	Target or threshold value	Number of allowed exceedances
Human health	Daily maximum 8-hour mean	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (*)	25 days per year averaged over three years
Vegetation	AOT40 accumulated over May-July	18 000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).h averaged over five years	
LTO health	Daily maximum 8-hour mean	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
LTO vegetation	AOT40 accumulated over May-July	6 000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).h	
Information	One hour	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Alert (*)	One hour	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Note: (*) To be measured over three consecutive hours.

(*) Target value to be met by 1 January 2010.

Source: EU, 2008c.

Figura 1.9: Standard di qualità dell'aria per l'ozono [Fonte: Direttiva EU,2008c].

cui gli stati membri devono sottostare, a partire dall'1 gennaio 2010, è di 25 giorni all'anno per ogni stazione di monitoraggio, determinabili da una media su tre anni a partire dal 2010. L'obiettivo a lungo termine (LTO) consiste nel puntare a non superare mai la soglia di sicurezza. In caso di superamento delle soglie di informazione e di allerta, rispettivamente fissate a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo Stato responsabile è tenuto a ideare ed applicare un piano di azione a breve termine, in accordo con la direttiva.

L'Unione Europea ha inoltre come obiettivo la salvaguardia della vegetazione, sottoposta alle alte concentrazioni di ozono che vengono raggiunte durante la stagione vegetativa, tra maggio e luglio. Il valore monitorato è l'AOT40 (Accumulated exposure Over Threshold), calcolato come la somma dei valori orari di ozono oltre i $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nelle ore diurne, nei mesi di più intensa attività vegetativa. La soglia di riferimento per il 2010 era $18000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ all'ora, mentre l'LTO è fissato a $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ all'ora.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha ritenuto opportuno, alla luce di più recenti studi sulla correlazione tra mortalità e concentrazioni di ozono inferiori a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, abbassare la soglia di protezione della salute umana a

$100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media su otto ore).

L'appendice B sarà dedicata all'illustrazione degli effetti dell'esposizione all'inquinamento da ozono sulla salute umana, sulla vegetazione e sui materiali. Verranno inoltre mostrati i risultati di alcuni studi sul possibile peggioramento di tali effetti nel caso di un aumento globale della concentrazione di O_3 .

Capitolo 2

Analisi dei dati di ozono e delle relazioni con la meteorologia

Nella prima parte di questo capitolo verranno illustrati alcuni risultati ottenuti dall'analisi dei dati di concentrazione di ozono registrati dalle stazioni della rete regionale di monitoraggio in Emilia Romagna. Tali informazioni saranno utili, nell'ambito di questo lavoro di tesi, per giustificare la scelta della stazione di Cittadella (PR) come stazione su cui effettuare i successivi studi, in quanto rappresentativa della regione. La seconda parte sarà invece dedicata all'analisi della correlazione tra questo parametro di qualità dell'aria e la variabile meteorologica da cui sembra dipendere maggiormente, la temperatura dell'aria.

2.1 Correlazione spaziale tra i dati di ozono

Come accennato in precedenza, poichè i venti e i sistemi meteorologici distribuiscono l'ozono e i suoi precursori su aree estese, le variazioni spaziali dell'ozono tendono a essere più gradualmente che per altri inquinanti primari.

Per questo motivo dall'analisi dei dati delle varie stazioni di monitoraggio ci si aspetta una situazione abbastanza omogenea, nonostante una certa differenziazione ipotizzabile fra la zona ovest e quella est, che effettivamente presenta valori meno elevati. Un'analisi di correlazione spaziale tra le stazioni è ciò che serve per confermare questa tesi e per giustificare quindi la scelta di una sola stazione per il proseguimento dello studio.

2.1.1 Scelta delle stazioni

La storia del monitoraggio dell'ozono ha un inizio piuttosto recente, che in Emilia Romagna si può far risalire alla metà degli anni novanta.

Le prime stazioni di qualità dell'aria che sono state dedicate anche alla misura di questo inquinante sono le stazioni di Cittadella (Parma, 1993), San Lazzaro (Reggio Emilia, 1994) e Parco Bucci (Faenza, 1995). Attualmente si contano 32 stazioni di misura di ozono, in attività al 2013, tra le 47 totali della rete di monitoraggio regionale di qualità dell'aria (figura 2.1).

Per l'analisi di correlazione spaziale sono state selezionate le uniche 12 stazioni che mostrano una certa continuità di funzionamento nel periodo tra il 2001 e il 2012, alcune delle quali non più appartenenti alla rete di monitoraggio ma utili allo scopo grazie alla serie storica sufficientemente lunga. La tabella 2.1 mostra alcune caratteristiche delle stazioni prese in considerazione, la cui ubicazione è mostrata in figura 2.2.

In quest'ultima immagine è inoltre mostrata la zonizzazione della regione effettuata nel 2010 come richiesto dal decreto legislativo 155/2010. In base ad un'analisi che tiene conto di criteri come ad esempio il tipo di territorio, l'urbanizzazione e la qualità dell'aria, la Regione è stata suddivisa in quattro zone il più possibile omogenee: l'agglomerato di Bologna, l'Appennino, la Pianura Ovest e la Pianura Est [7].

Prov.	Comune	Nome Stazione	Tipo di stazione	PM10	PM2.5	NOX	CO	BTX	O3	SO2
PC	Piacenza	Giordani - Farnese	traffico	X		X	X	X		
PC	Piacenza	Montecuccio	fondo urbano	X	X	X			X	
PC	Lugagnano Val d'Arda	Lugagnano	fondo suburbano	X		X			X	
PC	Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	fondo remoto	X		X			X	
PC	Besenzone	Besenzone	fondo rurale		X	X			X	
PR	Parma	Montebello	traffico	X		X	X	X		
PR	Parma	Cittadella	fondo urbano	X	X	X			X	
PR	Colomo	Saragat	fondo suburbano	X		X			X	
PR	Langhirano	Badia	fondo rurale	X	X	X			X	
RE	Reggio Emilia	San Lazzaro	fondo urbano	X	X	X			X	
RE	Reggio Emilia	Timavo	traffico	X		X	X	X		
RE	Castellarano	Castellarano	fondo residenziale	X	X	X			X	
RE	Guastalla	San Rocco	fondo rurale	X	X	X			X	
RE	Villa Minozzo	Febbio	fondo remoto	X		X			X	
MO	Modena	Giardini	traffico	X		X	X	X		
MO	Modena	Parco Ferrari	fondo urbano	X	X	X			X	
MO	Carpi	Carpi 2	fondo suburbano	X		X			X	
MO	Fiorano Modenese	Circ. San Francesco	traffico	X		X	X	X		
MO	Sassuolo	Parco Edilcarani	fondo residenziale	X		X				
MO	Mirandola	Gavello	fondo rurale		X	X			X	
BO	Bologna	Via Chiarini	fondo suburbano	X		X			X	
BO	Porretta Terme	Porretta Terme	fondo remoto	X	X	X			X	
BO	Bologna	Giardini Margherita	fondo urbano	X	X	X			X	
BO	Bologna	Porta San Felice	Traffico	X	X	X	X	X		
BO	Imola	de Amicis	traffico	X		X	X	X		
BO	Molinella	San Pietro Capofiume	fondo rurale	X	X	X			X	
BO	San Lazzaro di Savena	San Lazzaro	Traffico	X		X				
FE	Ferrara	Isonzo	traffico	X		X	X	X		
FE	Ferrara	Villa Fulvia	fondo urbano	X	X	X			X	
FE	Cento	Cento	fondo suburbano	X		X			X	
FE	Jolanda di Savoia	Gherardi	fondo rurale	X	X	X			X	
FE	Ostellato	Ostellato	fondo rurale		X	X			X	
RA	Ravenna	Caorle	fondo residenziale	X		X				X
RA	Ravenna	Zalamella	traffico	X		X	X	X		
RA	Faenza	Parco Bucci	fondo urbano	X	X	X			X	
RA	Cervia	Delta Cervia	fondo suburbano	X		X			X	
RA	Alfonsine	Ballirana	fondo rurale		X	X			X	
FC	Forlì	Parco Resistenza	fondo urbano	X	X	X			X	
FC	Forlì	Roma	traffico	X		X	X	X		
FC	Cesena	Franchini Angeloni	fondo residenziale	X		X				
FC	Savignano sul Rubicone	Savignano	fondo suburbano	X		X			X	
FC	Sogliano	Savignano di Rigo	fondo remoto	X		X			X	
RN	Rimini	Flaminia	traffico	X		X	X	X		
RN	Rimini	Marecchia	fondo urbano	X	X	X			X	
RN	Verrucchio	Verucchio	fondo suburbano	X		X			X	
RN	Mondaino	Mondaino	fondo remoto	X		X			X	
RN	S.Clemente (*)	S. Clemente	fondo rurale		X	X			X	

(*) stazioni da riposizionare in base al programma di valutazione

Legenda

PM10, PM2.5: particolato

NOx: Ossidi di azoto

CO: Monossido di carbonio

BTX: Benzene, Toluene, Xileni

O3: Ozono

SO2: Anidride solforosa

Figura 2.1: Stazioni della rete di monitoraggio della qualità dell'aria in Emilia Romagna, attualmente in attività [Fonte: Arpa].

	Provincia	Codice	Tipo	Lat.	Long.	Elev.	Stato
Cittadella	PR	2000003	fondo urbana	44.48	10.19	60	attiva
San Lazzaro	RE	3000007	fondo urbana	44.41	10.39	55	attiva
Maranello	MO	4000016	fondo suburbana	44.31	10.52	110	non attiva
Giardini Margherita	BO	7000014	fondo urbana	44.29	11.21	43	attiva
San Pietro Capofiume	BO	7000027	fondo rurale	44.39	11.37	11	attiva
Parco Resistenza	FC	6000010	fondo urbana	44.12	12.04	29	attiva
Gherardi	FE	8000007	fondo rurale	44.50	11.57	-2	attiva
Mizzana	FE	8000004	industriale suburbana	44.85	11.58	7	non attiva
Parco Bucci	RA	9000018	fondo urbana	44.17	11.52	35	attiva
N. Rocca Brancaleone	RA	9000015	traffico urbana	44.42	12.20	4	non attiva
S.A.P.I.R.	RA	9000011	industriale suburbana	44.44	12.25	4	non attiva
Marina di Ravenna	RA	9000005	traffico urbana	44.48	12.28	4	non attiva

Tabella 2.1: Elenco delle stazioni utilizzate per lo studio di correlazione spaziale. (L'informazione sullo stato di attività al 2013 si riferisce alla misura di ozono)

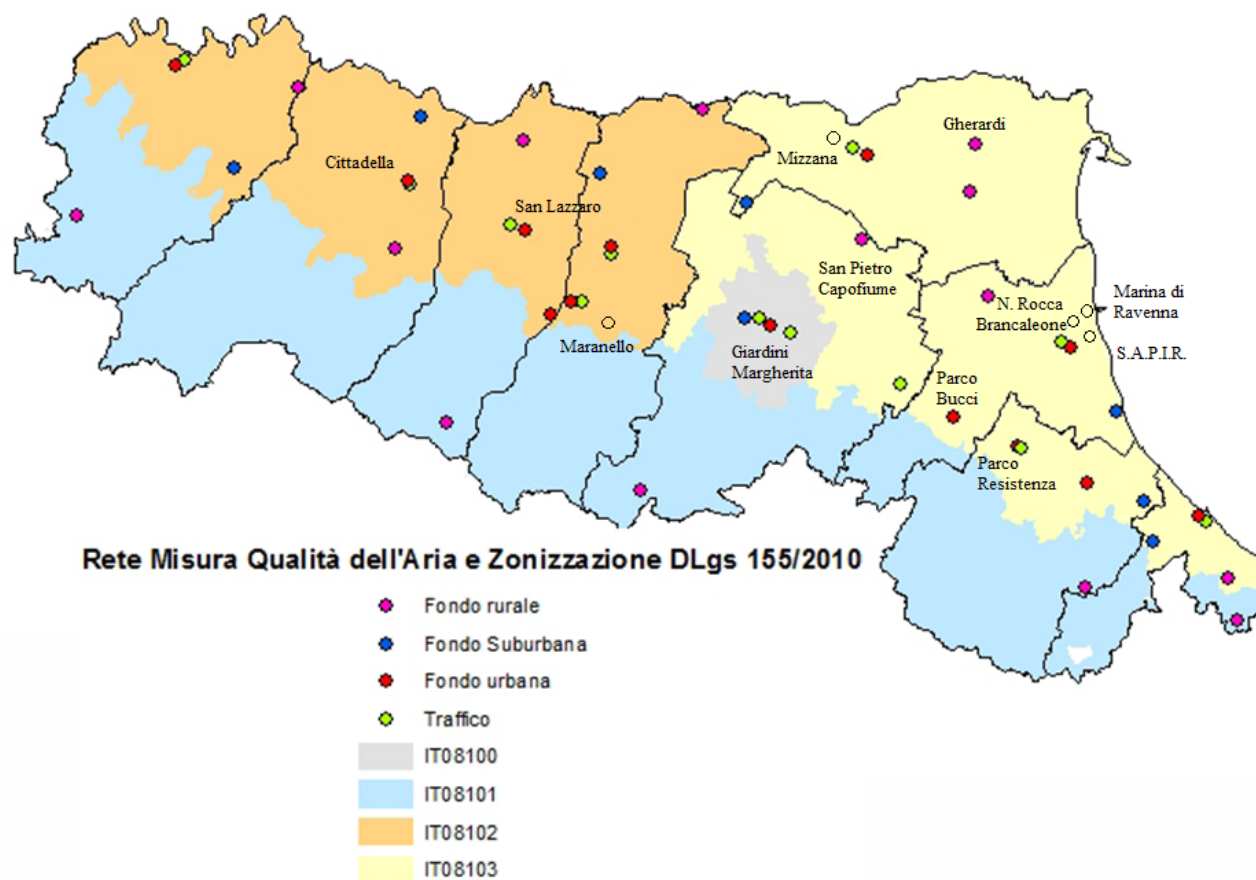


Figura 2.2: Mappa della regione, con le aree definite dalla zonizzazione, le stazioni di monitoraggio in attività e la localizzazione delle 12 stazioni usate per lo studio di correlazione [Fonte: Arpa].

2.1.2 Scelta della stazione di Cittadella

La scelta della stazione di Cittadella come stazione da utilizzare per l'analisi delle correlazioni tra gli andamenti della concentrazione di ozono e della temperatura come indicatore climatico, è apparsa subito conveniente data la lunghezza della serie storica delle misure effettuate; Cittadella è infatti la prima stazione della regione dove, nel maggio 1993, è stata messa in atto la misura della concentrazione di ozono. Tale vantaggio va però affiancato alla rappresentatività della stazione in rapporto all'intera regione.

Un primo indizio del fatto che la stazione di Cittadella possa effettivamente essere presa come riferimento significativo si trova nell'analisi degli andamenti di concentrazione di ozono registrati da varie stazioni sparse per il territorio (figura 2.3).

Ciò che si nota complessivamente è l'assenza di un trend regionale significativo di concentrazione di ozono nei dodici anni presi in esame: solo in una stazione si è registrato un andamento negativo, e in tre un andamento positivo. Scendendo nel dettaglio della classificazione delle stazioni considerate, va sottolineato inoltre che le tre stazioni che mostrano un andamento positivo sono tutte collocate in posizioni tali da subire l'influenza delle aree circostanti: le stazioni Bologna (FE) e Zanardi (BO) si trovano in zone di traffico nell'area urbana, e la stazione S.A.P.I.R. (RA) è all'interno della zona industriale e portuale di Ravenna. La stazione Marecchia, dove invece si è registrato un andamento negativo della concentrazione di ozono, si trova all'interno di un'area verde, alle porte di Rimini, a circa un chilometro dal mare. Per quanto riguarda le restanti stazioni, in alcune il pallino centrale suggerisce la presenza di un trend che però l'intero intervallo di confidenza non conferma, mentre in altre il trend è molto vicino all'ipotesi nulla. Tra queste ultime si colloca Cittadella, una stazione di fondo urbana, posta in un

parco all'interno di una zona residenziale, che può quindi essere considerata rappresentativa di una situazione regionale che, come evidenziato da questo grafico, mostra una tendenza media vicina allo zero.

Correlazione di Pearson

Una ulteriore e più potente prova della rappresentatività della stazione Cittadella si trova nello studio della correlazione spaziale tra i dati di ozono misurati dalle dodici stazioni (tabella 2.2). Per questo studio, come per tutti i successivi, sono stati selezionati i dati relativi al periodo estivo, più precisamente da maggio a settembre, per dare rilevanza al periodo dell'anno in cui l'ozono di norma raggiunge i livelli più elevati e in modo da evitare che la correlazione subisse l'influenza del forte ciclo stagionale dell'ozono. La correlazione è stata calcolata prendendo in considerazione i massimi giornalieri registrati da ogni stazione, per i quali è stato calcolato l'indice di Pearson.

Date due matrici numeriche (nel caso in questione due serie temporali di dati giornalieri di ozono) il coefficiente di correlazione restituito esprime la linearità tra la loro covarianza e il prodotto delle rispettive deviazioni standard, come espresso dalla seguente formula:

$$Corr(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (2.1)$$

Questo coefficiente di correlazione assume sempre valori nell'intervallo $[-1, +1]$; in particolare una correlazione pari a -1 o $+1$ indica una perfetta relazione lineare tra i valori di x e y , rispettivamente negativa o positiva, mentre un valore pari allo zero indica una totale scorrelazione tra le due matrici di dati considerate [9].

Nella tabella 2.3 sono inoltre riportate le correlazioni calcolate utilizzando i valori massimi giornalieri della media mobile sulle 8 ore, significativi in

quanto regolati anch'essi dalle normative attuali. In tutte le analisi che seguiranno verranno comunque presi in considerazione i valori massimi giornalieri del dato orario, altrettanto rappresentativi delle condizioni di concentrazione di ozono.

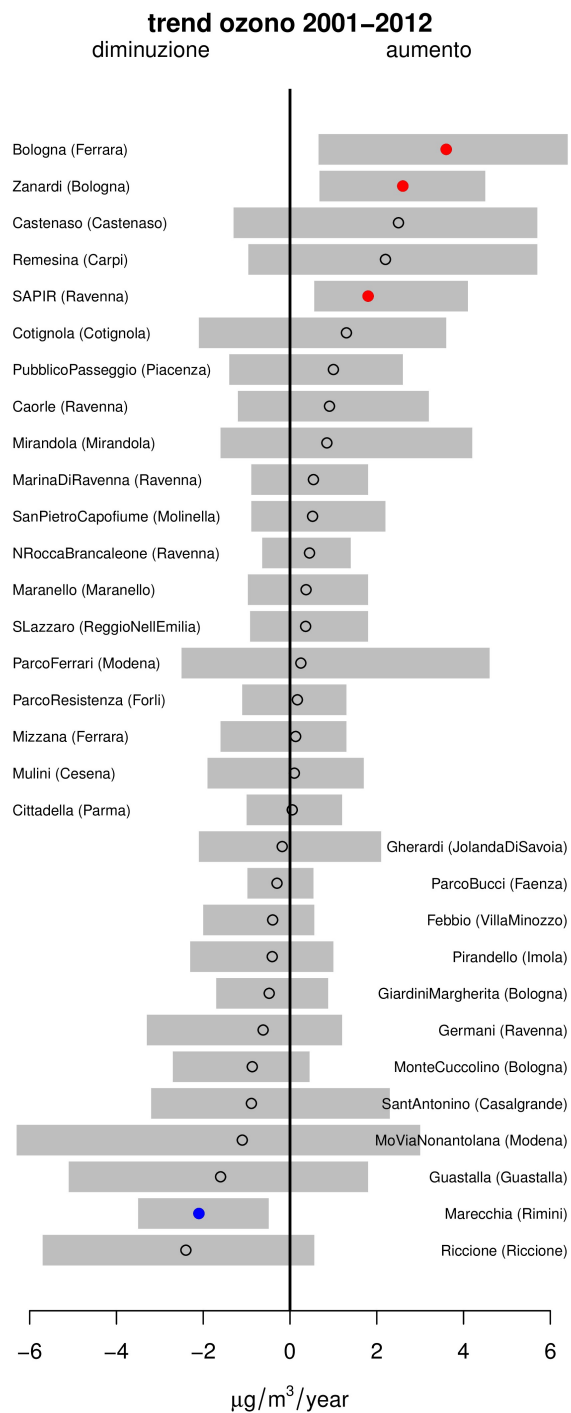


Figura 2.3: Trend di ozono in varie stazioni dell'Emilia Romagna, dal 2001 al 2012 [8].

	Citt.	S. Lazz.	Mar.	P. Res.	G. Mar.	S.P.C.	Miz.	Gher.	M. di R.	S.A.P.	N.R.B.	P.B.
Citt.	1	0.86	0.77	0.61	0.73	0.73	0.74	0.58	0.60	0.39	0.67	0.76
S. Lazz.	0.86	1	0.79	0.62	0.78	0.74	0.73	0.60	0.66	0.49	0.74	0.75
Mar.	0.77	0.79	1	0.58	0.71	0.67	0.68	0.58	0.61	0.40	0.65	0.69
P. Res.	0.61	0.62	0.58	1	0.57	0.56	0.57	0.49	0.51	0.39	0.71	0.66
G. Mar.	0.73	0.78	0.71	0.57	1	0.70	0.66	0.62	0.63	0.43	0.70	0.74
S. P. C.	0.73	0.74	0.67	0.56	0.70	1	0.74	0.57	0.60	0.53	0.72	0.72
Miz.	0.74	0.73	0.68	0.57	0.66	0.74	1	0.63	0.60	0.41	0.71	0.73
Gher.	0.58	0.60	0.58	0.49	0.62	0.57	0.63	1	0.65	0.34	0.63	0.61
M. di R.	0.60	0.66	0.61	0.51	0.63	0.60	0.60	0.65	1	0.53	0.77	0.60
S.A.P.	0.39	0.49	0.40	0.39	0.43	0.53	0.41	0.34	0.53	1	0.64	0.49
N. R. B.	0.67	0.74	0.65	0.71	0.70	0.72	0.71	0.63	0.77	0.64	1	0.76
P. B.	0.76	0.75	0.69	0.66	0.74	0.72	0.73	0.61	0.60	0.49	0.76	1

Tabella 2.2: Correlazione di Pearson tra i valori massimi giornalieri di ozono delle stazioni considerate.

	Citt.	S. Lazz.	Mar.	P. Res.	G. Mar.	S.P.C.	Miz.	Gher.	M. di R.	S.A.P.	N.R.B.	P.B.
Citt.	1	0.87	0.75	0.75	0.73	0.75	0.77	0.64	0.61	0.40	0.71	0.76
S. Lazz.	0.87	1	0.76	0.76	0.77	0.75	0.76	0.76	0.67	0.51	0.77	0.76
Mar.	0.75	0.76	1	0.66	0.67	0.65	0.66	0.72	0.60	0.39	0.65	0.67
P. Res.	0.75	0.76	0.66	1	0.69	0.70	0.72	0.65	0.66	0.46	0.78	0.80
G. Mar.	0.73	0.77	0.67	0.69	1	0.70	0.66	0.66	0.62	0.41	0.71	0.74
S. P. C.	0.75	0.75	0.65	0.70	0.70	1	0.76	0.64	0.60	0.53	0.75	0.73
Miz.	0.77	0.76	0.66	0.72	0.66	0.76	1	0.66	0.63	0.45	0.75	0.75
Gher.	0.64	0.76	0.72	0.65	0.66	0.64	0.66	1	0.70	0.43	0.72	0.67
M. di R.	0.61	0.67	0.60	0.66	0.62	0.60	0.63	0.70	1	0.50	0.77	0.60
S.A.P.	0.40	0.51	0.39	0.46	0.41	0.54	0.45	0.43	0.50	1	0.61	0.48
N. R. B.	0.71	0.77	0.65	0.78	0.71	0.75	0.75	0.72	0.77	0.61	1	0.78
P. B.	0.76	0.76	0.67	0.80	0.74	0.73	0.75	0.67	0.60	0.48	0.78	1

Tabella 2.3: Correlazione di Pearson tra i valori massimi giornalieri di ozono della media mobile su 8 ore.

Correlazione temporale tra i dati di Cittadella

Il passaggio successivo è verificare l'indipendenza dei dati usati, e per fare questo è necessario valutare la correlazione temporale dei valori di concentrazione di ozono misurati dalla stazione considerata. La figura 2.4 mostra la correlazione delle misure effettuate dalla stazione Cittadella al variare del lag temporale, da cui si può affermare che dopo il terzo giorno tali misure risultano scorrelate.

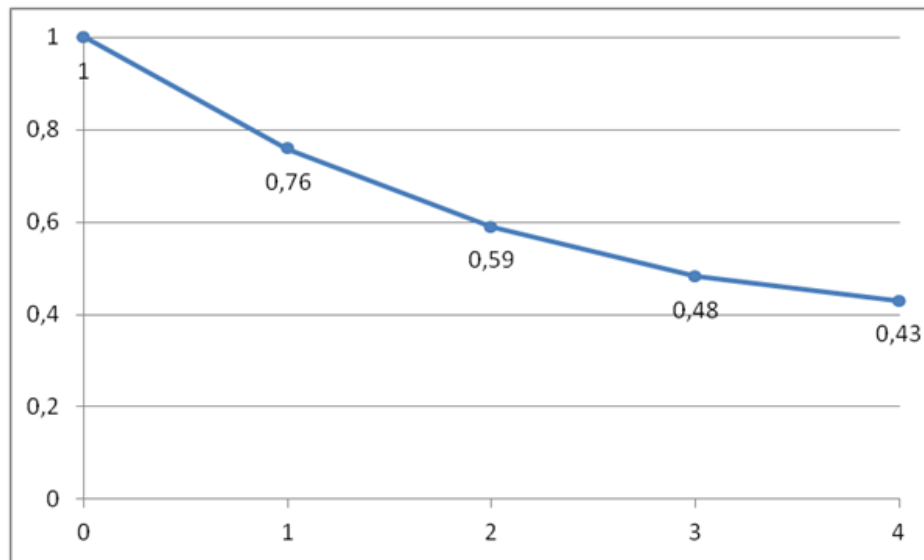


Figura 2.4: Autocorrelazione tra i dati di ozono di Cittadella al variare del lag temporale.

Significatività della correlazione spaziale

Sebbene osservando i dati riportati in tabella 2.2 si possa già ipotizzare una elevata correlazione tra i dati di ozono delle varie stazioni, è conveniente applicare un test di significatività per confermare tale ipotesi. La grande quantità di dati indipendenti a disposizione, il totale (1836) diviso per 3 come

giustificato nel paragrafo precedente, fa sì che tutte le correlazioni al di sopra di 0.2 siano significative (secondo le tabelle riportate in [9]).

Ciò significa che tutte le correlazioni trovate sui dati di ozono misurati nelle stazioni in esame, sia i massimi giornalieri sul dato orario sia quelli sulla media mobile, sono significative. Fatta eccezione per la stazione S.A.P.I.R., posizionata in una zona industriale e quindi probabilmente soggetta ad alterazioni, i dati di tutte le altre stazioni risultano ben correlati, con coefficienti che quasi sempre superano il valore 0.6.

Ai fini di questo studio si può quindi concludere che la distribuzione di ozono in Emilia Romagna è effettivamente omogenea, e che di conseguenza la stazione di Cittadella può essere presa in considerazione come rappresentativa dell'intera regione.

2.2 Relazioni tra meteorologia e ozono

Come illustrato nel capitolo introduttivo, le problematiche relative all'inquinamento fotochimico sono fortemente influenzate dalle condizioni atmosferiche; la concentrazione di ozono risulta infatti dipendere in modo significativo dall'irraggiamento solare e in misura minore anche da altre variabili meteorologiche. La dipendenza dalla radiazione solare, necessaria per innescare i complessi meccanismi di produzione dell'ozono, suggerisce in particolare una correlazione tra concentrazione di questo inquinante e la temperatura dell'aria.

2.2.1 Temperatura e ozono in Europa

Numerosi studi effettuati a livello europeo hanno dimostrato che i superamenti delle soglie di ozono fissate dalle normative si verificano principalmente in corrispondenza dei periodi caratterizzati da elevate temperature.

Il report elaborato dall' EEA a seguito dell'estate eccezionale del 2003 ne porta evidenze [10]. L'ozono a livello del suolo si è rivelato uno degli inquinanti su cui è stata posta maggiore attenzione durante l'estate del 2003, quando parallelamente si registravano valori di temperatura tra i più elevati degli ultimi secoli. Le soglie fissate dalla legislatura per la protezione della salute umana e per la prevenzione di danni all'intero ecosistema, sono state superate con una frequenza superiore rispetto alla media. Si sono verificati episodi di elevate concentrazioni di ozono eccezionalmente duraturi ed estesi, principalmente nella prima metà di agosto, apparentemente associati alle temperature straordinariamente calde registrate in quasi tutto il continente. Un'analisi sui precedenti dodici anni ha mostrato come il numero di superamenti delle soglie di informazione e allerta in buona parte dei Paesi

dell'Unione Europea nell'estate del 2003 sia stato maggiore di tutte le precedenti. La distribuzione spaziale delle eccedenze osservate (figura 2.5) si è rivelata molto più estesa rispetto al passato, con le aree più interessate localizzate tra la Germania sud-occidentale, la Svizzera, la Francia, il Belgio, la Spagna centrale e il nord e centro Italia.

L'aumento di superamenti delle soglie nel corso degli anni non può essere giustificato dalla variazione delle emissioni dei precursori dell'ozono, che hanno al contrario registrato un calo di circa il 30 % tra il 1990 e il 2000. L'ipotesi più fondata è quindi che esista una stretta correlazione tra l'aumento della concentrazione di questo inquinante a livello del suolo e l'innalzamento delle temperature che si sta registrando negli ultimi decenni.

Per una migliore analisi in figura 2.6 è riportata anche la mappa delle anomalie di temperatura massima giornaliera registrate nei mesi estivi del 2003, rispetto al trentennio di riferimento 1961-1990. Già ad un primo sguardo generale si nota come le aree in cui si è registrato un maggiore aumento di temperatura corrispondono a quelle interessate dal numero più elevato di superamenti; si ponga attenzione ad esempio sull'area centrale della Germania, sul nord e centro Italia, e sulla Francia orientale.

Questo aspetto appare ben visibile anche in figura 2.7, in cui è mostrato il trend del numero di ore di superamento della soglia di informazione nel decennio 1993-2003, in correlazione all'andamento della temperatura media estiva, in due Paesi specifici, Francia e Repubblica Ceca, rappresentativi rispettivamente di zone interessate o meno dall'aumento del numero di superamenti e dall'innalzamento delle temperature, e più in generale nell'area UE-15.

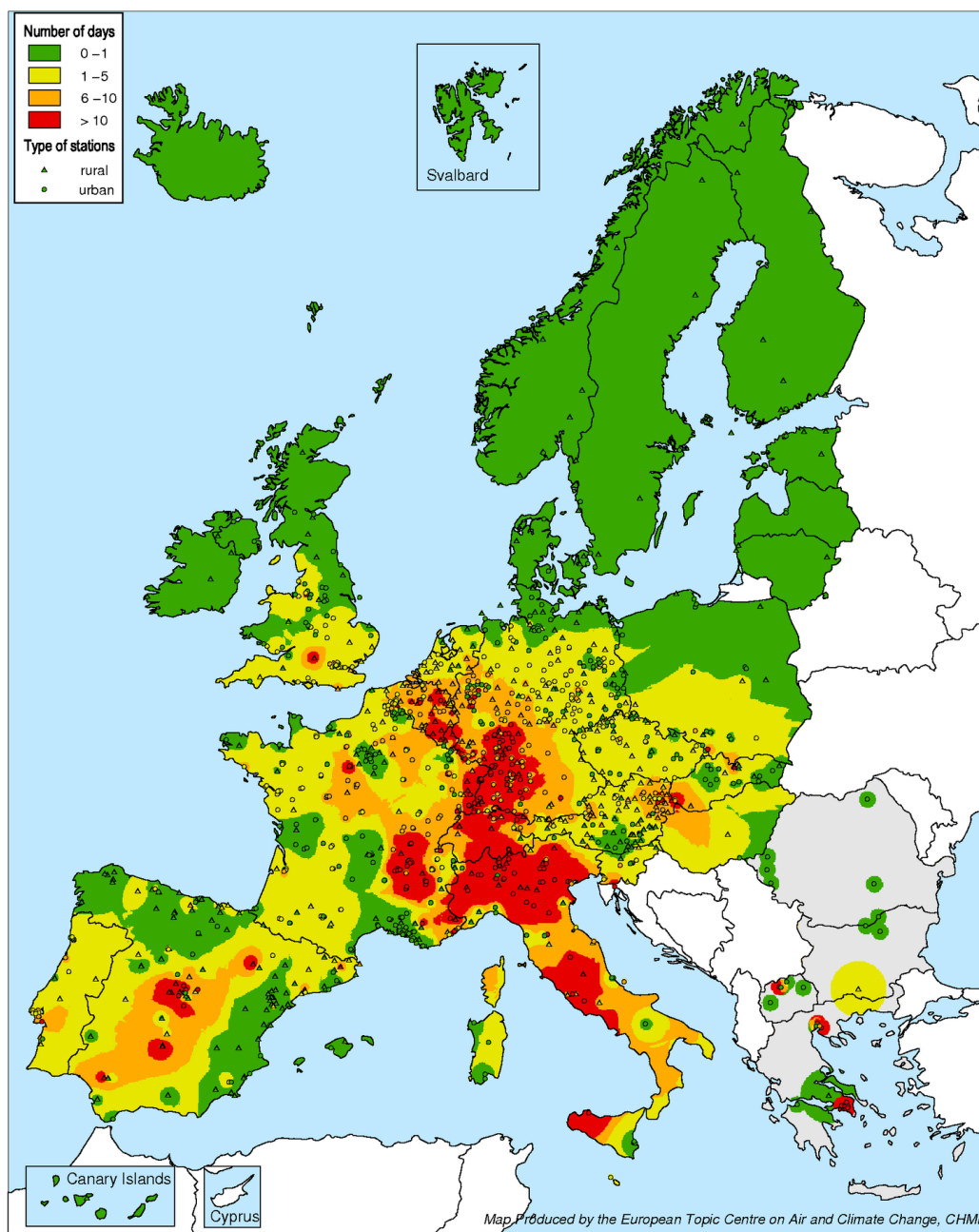


Figura 2.5: Distribuzione spaziale dei superamenti della soglia di informazione registrati dalle stazioni rurali e urbane nell'estate 2003 [10].

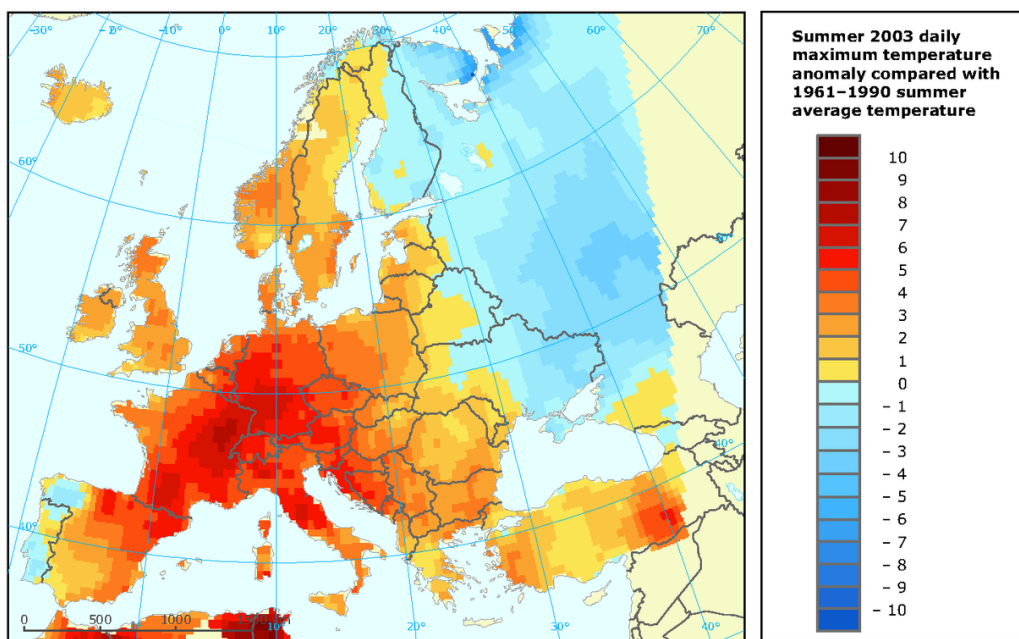


Figura 2.6: Anomalie di temperatura massima giornaliera registrate in Europa nell'estate del 2003, rispetto alla temperatura estiva media del trentennio 1961-1990 [Fonte: EEA].

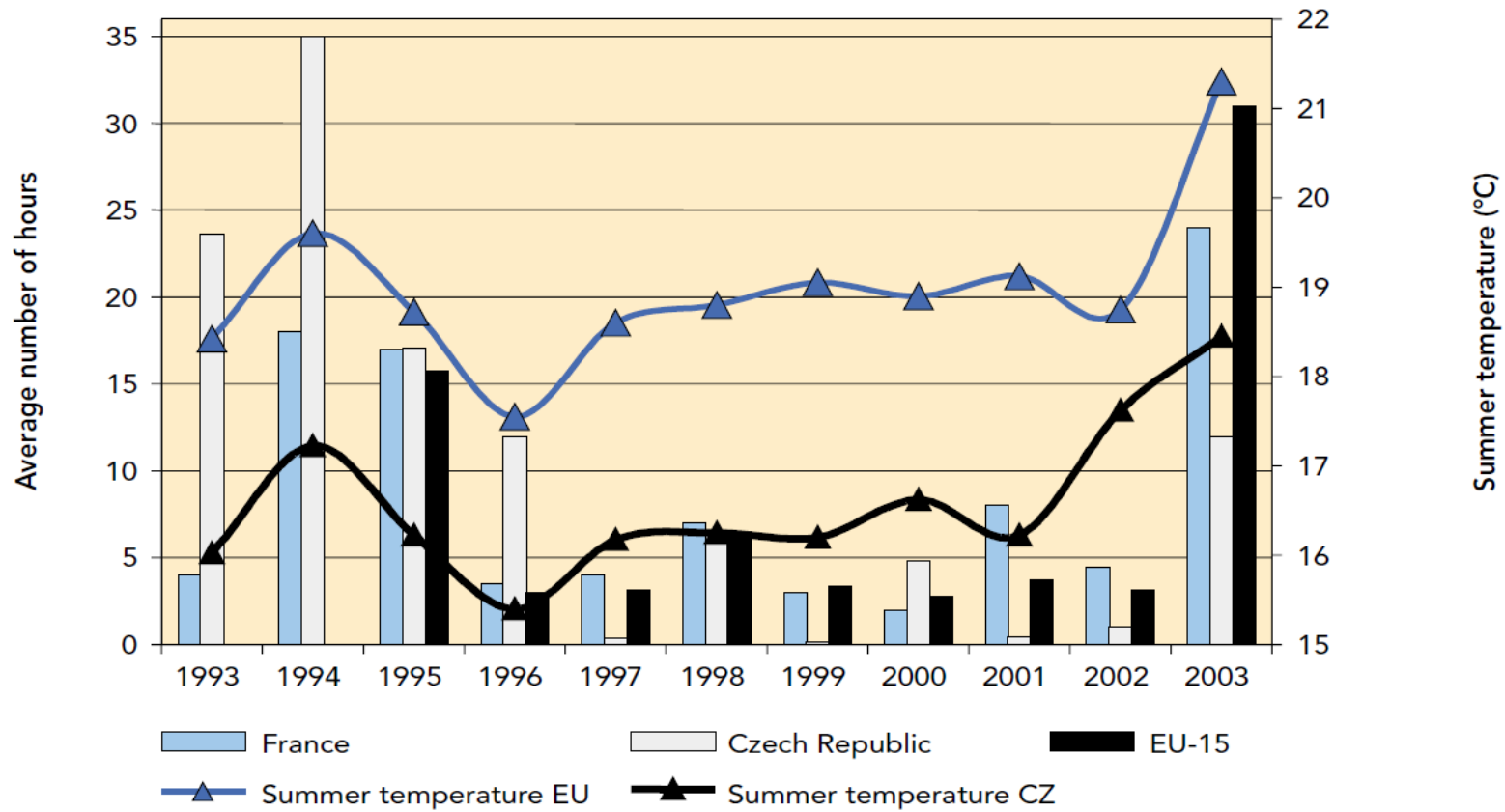


Figura 2.7: Numero totale di ore con una concentrazione di ozono superiore a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in Francia, Repubblica Ceca e UE, e temperatura media di Repubblica Ceca ed Europa occidentale, nel periodo maggio-agosto 2003 [10].

2.2.2 Temperatura e ozono in Emilia Romagna

Verranno qui di seguito presentati i risultati dello studio di correlazione tra i dati di ozono e di temperatura relativi ad una zona del parmense già dimostrata essere rappresentativa, per il dato di ozono, dell'intera regione. Per quanto riguarda i dati meteorologici sono state utilizzate due differenti fonti: il database del Servizio IdroMeteorologico di Arpa Emilia Romagna, accessibile grazie al sistema Dexter, in cui sono contenuti i dati osservati, e il data set CRA-CMA (Centro di Ricerche per l'Agricoltura - Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura), ex UCEA, che fornisce invece i dati ottenuti tramite tecniche di downscaling statistico.

Analisi dei dati

In tabella 2.4 sono riassunte le caratteristiche dei quattro punti presi in esame per questa analisi di correlazione, la cui posizione è riportata in figura 2.8.

Partendo dalla scelta della stazione di monitoraggio dell'ozono, Cittadella, per i motivi già illustrati nella precedente sezione del capitolo, sono state selezionate all'interno della rete regionale di stazioni meteorologiche, le due stazioni che meglio rispondevano a requisiti di vicinanza, somiglianza di tipologia del territorio e durata della serie storica di dati acquisiti. San Pancrazio, in particolare, è la stazione che meglio si presta al calcolo della correlazione tra il dato di ozono e quello di temperatura, data appunto la vicinanza all'area urbana di Parma ed il duraturo periodo di attività comune.

La scelta della stazione di Gainago è invece stata fatta con l'intento di confrontare il dato di temperatura osservato con quello proveniente dal downscaling. Questa stazione si presta infatti meglio a un confronto con il punto di griglia posto in corrispondenza di San Secondo Parmense, selezionato tra i

vari punti all'interno delle aree rappresentative del territorio italiano oggetto di studio del progetto *Agroscenari* [11].

Sebbene la correlazione tra ozono e temperatura verrà calcolata sulla base dei dati osservati a San Pancrazio, è fondamentale effettuare questa sorta di validazione dei dati provenienti da interpolazione, in quanto è proprio per San Secondo Parmense che verranno elaborati gli scenari di cambiamento climatico della temperatura per il trentennio 2021-2050, nel modo che verrà illustrato dettagliatamente nel corso del capitolo 3.

In tabella 2.5 sono riportati i risultati dei calcoli di correlazione di Pearson effettuati tra i dati appena descritti, sempre sui mesi da maggio a settembre. I coefficienti trovati mostrano una elevatissima correlazione tra i vari set di dati di temperatura, sia per quanto riguarda il confronto tra le due stazioni meteorologiche, sia per quello tra i dati osservati da ciascuna delle due e i dati da downscaling. Questo risultato consente di guardare all'ultimo coefficiente riportato in tabella, quello tra il dato di temperatura osservato e il dato di concentrazione di ozono, come un valore di correlazione non tanto specifico solo dei due siti messi a confronto, bensì generalizzabile all'intera area considerata.

Data la rappresentatività ormai dimostrata di Cittadella per quanto riguarda la concentrazione di ozono in regione, e dato l'andamento delle temperature di questa area della provincia di Parma, generalmente in linea col restante territorio regionale, si può affermare che un valore di correlazione pari a 0.75 può essere considerato rappresentativo del legame tra i due parametri per l'intera Emilia Romagna.

	Parametro	Tipo di stazione	Tipo di dato
Cittadella	O_3^{max}	monitoraggio qualità dell'aria	osservato
San Pancrazio	T_{max}	stazione agrometeorologica	osservato
Gainago	T_{max}	stazione agrometeorologica	osservato
San Secondo Parmense	T_{max}	punto di griglia	da downscaling

Tabella 2.4: Caratterizzazione delle località utilizzate per la correlazione tra ozono e temperatura.

	Parametri	Periodo comune	N dati	Correlazione
Gainago S. Pancrazio	$T_{oss} - T_{oss}$	09/08/01 - 30/09/12	1736	0.98
Gainago S. Secondo	$T_{oss} - T_{int}$	09/08/01 - 17/05/09	1111	0.97
S. Pancrazio S. Secondo	$T_{oss} - T_{int}$	01/05/01 - 17/05/09	1241	0.98
Cittadella S. Pancrazio	$O_3^{oss} - T_{oss}$	01/05/01 - 30/09/12	1836	0.75

Tabella 2.5: Correlazione di Pearson tra i set di dati.



Figura 2.8: Mappa delle località utilizzate per lo studio di correlazione.

Capitolo 3

Scenari di cambiamento climatico

Sulla base dei risultati trovati relativamente alla correlazione tra l'andamento della temperatura e quello della concentrazione di ozono negli ultimi anni, l'analisi delle relazioni tra questa variabile meteorologica e questo indicatore di qualità dell'aria può proseguire allo scopo di dare un'indicazione su quanto ci si può aspettare di osservare nei futuri decenni. Verrà in particolare elaborato uno scenario climatico di variazione delle temperature massime a scala locale per il periodo 2021-2050 rispetto agli anni 1961-1990, utilizzando la tecnica di *downscaling* statistico sviluppata da ARPA-SIMC ed applicata alle simulazioni del progetto ENSEMBLES (scenario A1B). In questo modo si porranno le basi per la valutazione del futuro possibile andamento della concentrazione di ozono, illustrato nel capitolo successivo.

3.1 I modelli climatici e le tecniche di *downscaling*

La comprensione del funzionamento del clima non si può raggiungere analizzando le singole cause in un laboratorio reale. Attualmente i modelli cli-

matici rappresentano il laboratorio virtuale in cui i diversi fattori capaci di alterare le condizioni climatiche vengono pesati e integrati: essi consentono di ricostruire in modo soddisfacente il clima passato, di ottenere importanti informazioni sulle cause del recente cambiamento climatico, e di ipotizzarne approssimativamente l'evoluzione futura [12]. Tale metodologia si è sviluppata per ovviare alle difficoltà di rappresentare la complessità dell'argomento trattato: basti pensare ai molteplici e così diversi sottosistemi che costituiscono il sistema climatico (l'atmosfera, gli oceani, i ghiacci, la vegetazione, il suolo...); ogni cambiamento in ognuno di questi influisce sugli altri e ne riceve feedback. La dinamica e le leggi che governano i singoli sottosistemi sono ormai conosciute piuttosto bene; tuttavia la complessità delle loro interazioni non è gestibile nella realtà sperimentale. I computer si sono rivelati i laboratori virtuali migliori dove immettere le conoscenze teoriche dei sottosistemi, dei fenomeni e dei processi conosciuti, e dove valutare in maniera integrata i cambiamenti indotti da cause considerate esterne al sistema climatico.

Sono stati quindi sviluppati dei modelli climatici, *Global Climate Models* (GCMs) e *Regional Climate Models* (RCMs), che simulano nel computer il comportamento del clima, facendo evolvere nel tempo del modello il valore delle varie grandezze di interesse. Nei prossimi paragrafi verranno descritte le caratteristiche delle due principali classi di modelli climatici, la cui fondamentale differenza sta nella scala spaziale della modellizzazione, da cui deriva una netta diversificazione di utilizzo.

Verranno inoltre illustrate le due tecniche di *downscaling* (abbassamento di scala) sviluppate negli ultimi decenni per migliorare le informazioni sulle condizioni atmosferiche a scala locale a partire dalla variabilità atmosferica a scala regionale fornita dai GCM (figura 3.1). L'attenzione verrà posta principalmente sul metodo di *downscaling* statistico, utilizzato in questo lavoro

di tesi per ottenere informazioni sui cambiamenti climatici futuri nell'area di interesse.

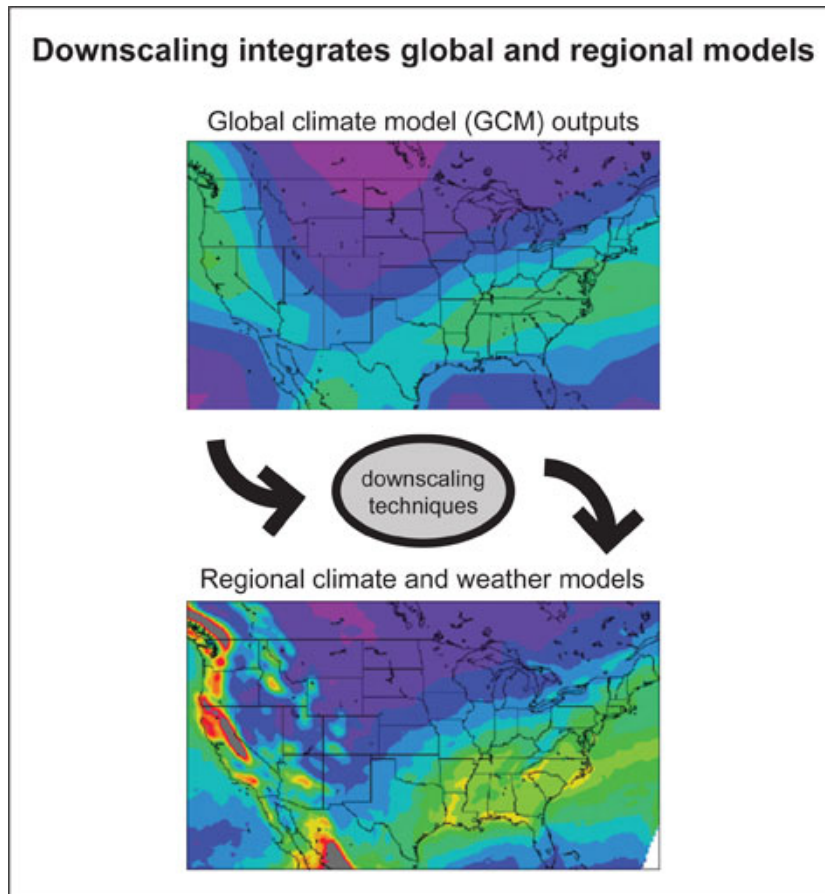


Figura 3.1: Esempio di funzionamento delle tecniche di *downscaling* [Fonte: The University Corporation for Atmospheric Research].

3.1.1 I Modelli Climatici Globali

I GCM (*Global Climate Models*) rappresentano attualmente i migliori strumenti per simulare il clima a livello globale, incorporando i principi fondamentali di fisica, chimica e biologia in un modello matematico. La complessità di un modello climatico può variare dal semplice modello di bilancio

energetico ai più dettagliati modelli che richiedono i più grandi e potenti computer e le più sofisticate tecniche numeriche. Le equazioni non lineari e parzialmente differenziali che ne sono alla base devono essere semplificate e risolte numericamente per poter essere utilizzate dal modello, e vengono quindi discretizzate nello spazio e nel tempo. L'intero sistema terrestre è scomposto in una griglia tridimensionale nei cui punti vengono calcolati i valori delle variabili meteorologiche di interesse. Il passo temporale del modello, ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra un set di soluzioni e il set successivo, è funzione della risoluzione spaziale, che va da circa 500 km a circa 110 km nei modelli più recenti: più fine è la griglia di punti e più breve è l'intervallo tra ogni calcolo. Anche la risoluzione verticale è importante per la qualità delle simulazioni atmosferiche: i livelli in cui è suddivisa l'atmosfera vanno dai 10 ai 20, fino a raggiungere talvolta i 30 sopra gli oceani, e non sono equispaziati, bensì sempre più ravvicinati man mano che ci si avvicina alla superficie, dove hanno luogo cambiamenti più rapidi e c'è quindi bisogno di una risoluzione migliore. Il numero totale di punti di griglia è di un ordine di grandezza che va da 10^4 a 10^6 [13]. Un'illustrazione schematica del principio di funzionamento di un GCM è riportata in figura 3.2.

Negli ultimi decenni sono stati fatti notevoli progressi nel campo dei modelli climatici, allo scopo di raggiungere una sempre più veritiera rappresentazione del sistema climatico e dei suoi cambiamenti. Un primo miglioramento si nota nell'aumento della risoluzione spaziale utilizzata nei modelli: la figura 3.3 ne mostra l'evoluzione con la successione dei report IPCC.

Un altro esempio dell'evoluzione di questo campo sta nella sempre maggiore complessità dei modelli (figura 3.4). Nel corso degli ultimi anni sempre più processi vi sono stati integrati; i più sofisticati, complessi, e quindi onerosi dal punto di vista di calcolo, rappresentano in modo piuttosto dettagliato

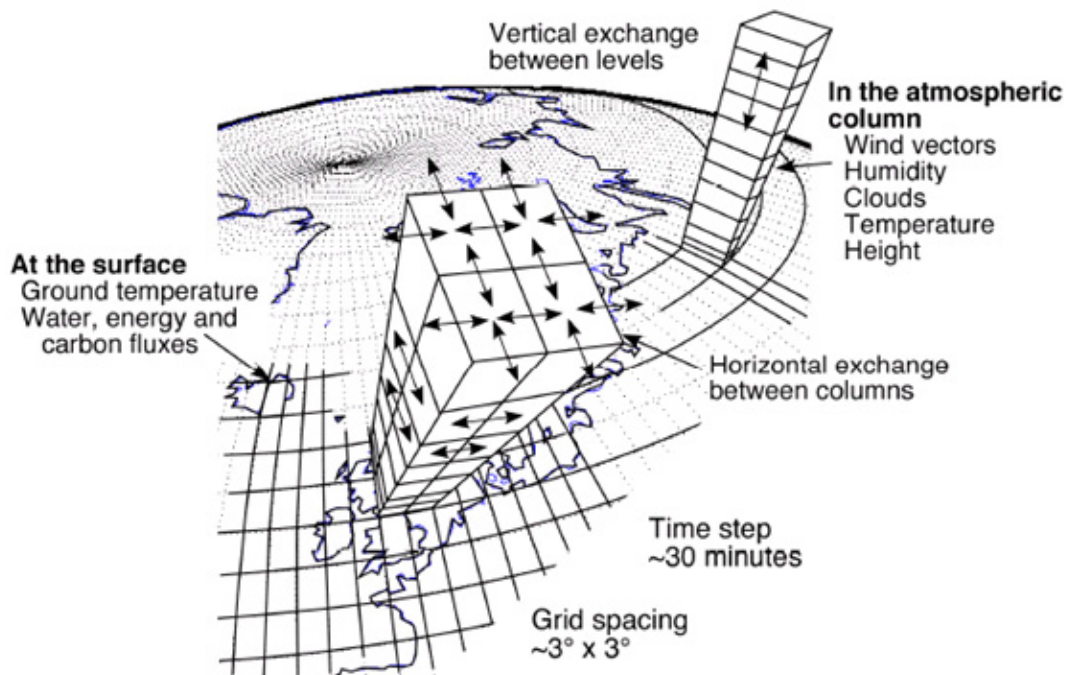


Figura 3.2: Illustrazione schematica del principio operativo di un GCM [14].

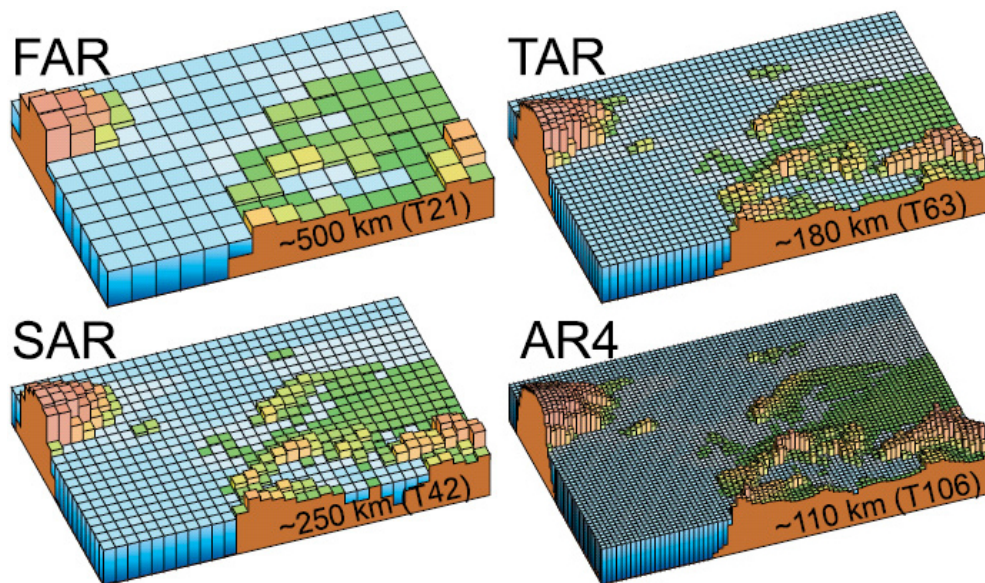


Figura 3.3: Aumento della risoluzione spaziale dei GCM con la successione dei report IPCC: 1990 (FAR), 1996 (SAR), 2001 (TAR), 2007 (AR4); [15].

le cinque componenti naturali del sistema climatico terrestre: la biosfera, l'idrosfera, la criosfera, l'atmosfera e la geosfera.

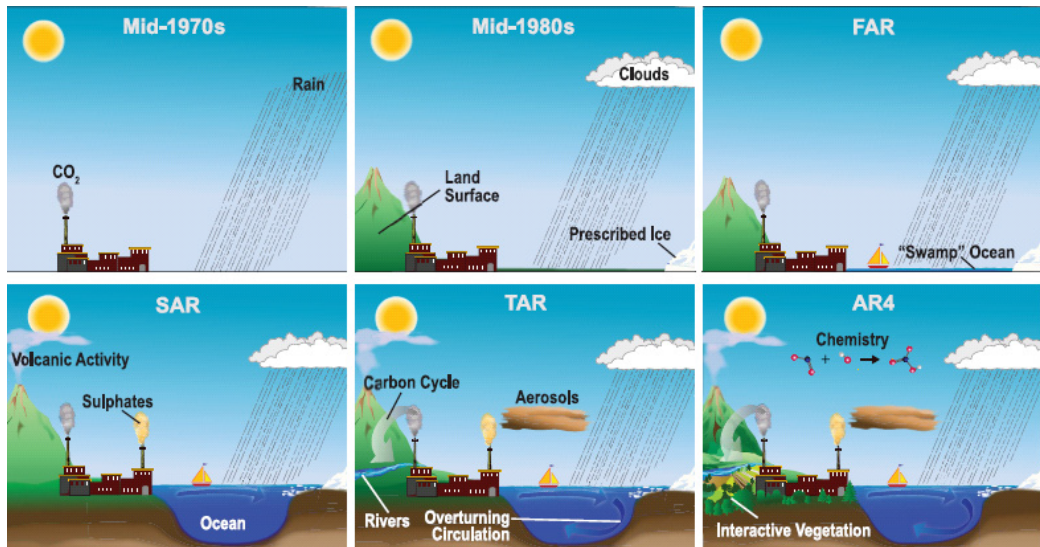


Figura 3.4: Schema dell'aumento dei processi inclusi nei modelli climatici; [15].

Attualmente i più avanzati modelli climatici globali sono i cosiddetti AOGCM, *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*, che combinano appunto i processi atmosferici e oceanici e le interazioni fra loro.

3.1.2 Il *Downscaling* Statistico

Come appena illustrato i modelli climatici globali operano a una risoluzione spaziale tale da non riuscire a mettere in luce importanti dettagli a scale inferiori; non possono pertanto essere utilizzati per studi climatici a impatto locale. Il *downscaling* statistico è uno dei due metodi messi a punto per superare questo problema. Questa tecnica si basa sull'applicazione di relazioni identificate nel clima osservato, tra la larga scala e scale inferiori, agli

output dei modelli climatici globali, in modo da ottenere uno scenario di cambiamento climatico a scala locale [16].

L'opportunità di ottenere scenari a distanza di decenni o addirittura secoli è dovuta a un dispendio computazionale inferiore rispetto a quello richiesto dal metodo dinamico, che di conseguenza si limita a previsioni a più breve scadenza.

Per come è stato definito appare chiaro un primo limite di questo metodo: il *downscaling* statistico è infatti basato su una grossa assunzione, ovvero che le relazioni osservate tra i campi a larga scala e quelli a scala locale persistano anche in un clima alterato. Un ulteriore svantaggio sta nella necessità di avere lunghe serie temporali di dati osservati, controllati dal punto di vista della qualità e dell'omogeneità, per inizializzare il modello.

Numerosi sono però i vantaggi dell'utilizzo di questa tecnica. Uno dei principali è la capacità di produrre informazioni a scala locale, per esempio per una specifica stazione o per un punto di griglia, facendo così aumentare il numero di applicazioni possibili e la disponibilità di strumenti utilizzabili dalla comunità. Inoltre l'utilizzo del *downscaling* statistico applicato a un denso network di stazioni è risultato estremamente utile per aree caratterizzate da complesse topografie [17].

Tra i vantaggi va inoltre sottolineata la possibilità di usare i risultati di una serie di GCM anziché di un singolo modello soltanto: la scelta di un *ensemble* di simulazioni di vari modelli è una delle possibili soluzioni per tentare di ridurre o quantificare parte delle incertezze insite in questo tipo di tecnica. Le sorgenti di errore, varie e complesse, possono essere le seguenti: le concentrazioni atmosferiche future di gas serra e aerosol, la scelta del GCM da usare per guidare il modello regionale o utilizzato per costruire le proiezioni di cambiamento climatico in combinazione con le tecniche di *downscaling*

statistico, lo schema di *downscaling* statistico stesso.

3.1.3 Il *Downscaling* Dinamico

Questa tecnica comporta invece l'innesto di un modello regionale a griglia fine, tipicamente 20-50 km, entro il modello globale [18]. Piuttosto che usare equazioni per portare le proiezioni a scala globale ad un livello regionale, il *downscaling* dinamico comporta l'utilizzo di modelli numerici per rappresentare come gli schemi globali influiscono sulle condizioni meteorologiche locali.

L'elevato livello di dettagli coinvolti rende il calcolo particolarmente oneroso, e ciò rende praticamente impossibile la produzione di simulazioni a distanza di vari decenni facendo uso di più di un GCM o di più scenari emissivi. Questa caratteristica giustifica la scelta di molti ricercatori, impegnati nella produzione di proiezioni di possibili impatti climatici a scala regionale, del metodo di *downscaling* statistico.

3.1.4 I Modelli Climatici Regionali

Il *downscaling* dinamico si ottiene quindi tramite l'utilizzo di modelli ad area limitata ad alta risoluzione, i cosiddetti RCM (Regional Climate Models): una volta inizializzati con le condizioni al contorno fornite dai GCM, essi sono in grado di fornire informazioni a scala locale, riuscendo a coprire aree selezionate con risoluzioni spaziali molto più alte rispetto ai GCM (fino a 25 km) e a risolvere quindi, grazie a una griglia di punti più fine, quei processi altrimenti non rappresentati. Questi modelli rivestono un ruolo di grande importanza per la progettazione delle politiche regionali di controllo: solo valutando quale potrebbe essere il reale impatto dei cambiamenti climatici sulle specifiche regioni è possibile giustificarne la messa in atto. Inoltre, la

comprensione dei processi climatici a livello regionale è una parte cruciale della ricerca a scala globale: processi che agiscono a scala locale o regionale possono infatti contribuire con un certo impatto sul clima dell'intero pianeta. Wang et al. [19] hanno menzionato alcuni vantaggi per sottolineare l'utilità di questi modelli :

- Interazioni terra-atmosfera: gli RCM risolvono molto meglio la eterogeneità della superficie terrestre e ne rappresentano meglio i processi di feedback con l'atmosfera;
- Effetti della topografia: il clima regionale è forzato e regolato dall'orografia, che perciò deve essere adeguatamente risolta;
- Effetti del cambiamento dell'utilizzo della terra: gli RCM ad alta risoluzione sono capaci di incorporare anche i cambiamenti di uso del terreno, tipicamente molto irregolari.

Per queste ed altre capacità i modelli climatici regionali sono quindi utili per migliorare le informazioni che si avrebbero utilizzando solo le simulazioni dei modelli globali.

3.2 Elaborazione delle anomalie stagionali di temperatura massima a scala locale

Come già sottolineato all'inizio di questo capitolo, gli strumenti utilizzati dalla comunità scientifica internazionale per valutare l'intensità e la probabilità del verificarsi di cambiamenti climatici a grande scala sono i modelli numerici accoppiati oceano - atmosfera (AOGCM). Risulta inoltre ormai

chiaro come i valori numerici direttamente prodotti da tali modelli climatici abbiano un modesto utilizzo se non ulteriormente trattati.

Nasce quindi la necessità di impiegare strategie per adattare quei valori numerici delle simulazioni, così come vengono prodotti direttamente dai modelli climatici, alla realtà dell'eterogeneità climatica regionale e locale del territorio in esame.

In questa sezione verranno illustrati i passaggi che hanno consentito la generazione di proiezioni climatiche per le temperature massime sul periodo 2021-2050, rispetto al periodo climatico di riferimento 1961-1990, per l'area della Val Padana già descritta nei capitoli precedenti.

Le simulazioni sono state elaborate all'interno del progetto *Agroscenari* [11], sviluppato in due fasi: nella prima sono state elaborate anomalie stagionali di scenario di cambiamento climatico per il trentennio 2021-2050 mediante tecniche di regionalizzazione statistica applicate alle proiezioni di modelli climatici globali accoppiati oceano - atmosfera [20], disponibili all'interno del progetto europeo ENSEMBLES [21]; nella seconda fase le proiezioni climatiche stagionali del periodo 2021-2050 di temperatura massima sono state utilizzate come dati in ingresso per un *weather generator* in grado di produrre serie sintetiche giornaliere relative al clima locale.

L'area presa in considerazione per questo lavoro di tesi è una delle sei zone rappresentative del territorio italiano oggetto di studio del progetto *Agroscenari* (Val Padana, Faentino, Marche, Beneventano, Destra Sele e Oristano). Il data set di riferimento è quello CRA-CMA, ex UCEA, che copre l'intero territorio nazionale con una griglia di 30 km di lato; la cella oggetto di questa analisi è la 1411, collocata in corrispondenza di San Secondo Parmense. Lo scenario emissivo considerato, che verrà dettagliato in seguito, è A1B.

3.2.1 Il modello di regionalizzazione statistico

Il modello utilizzato consiste in una regressione statistica multivariata basata sull'analisi di correlazione canonica (CCA), applicata a scala regionale. Questo metodo permette di accoppiare grandezze fisiche a grande scala prevedibili dai modelli globali (predittori) con grandezze a scala locale (predittandi), tali per cui sia massima la correlazione tra le loro serie temporali [22].

Per impostare il modello di *downscaling* statistico a scala locale sono quindi stati utilizzati:

predittori: grandezze dei campi in quota dedotti dalla rianalisi ERA40 del centro meteorologico europeo (ECMWF), sul periodo 1958-2002: Temperature 850hPa (T850), Mean Sea Level Pressure (MSLP), Geopotential height 500hPa (Z500);

predittandi: dati stagionali del grigliato CRA-CMA di Analisi Oggettiva, di temperatura minima, massima e di precipitazione (1958-2002).

Per ogni punto di griglia, grandezza e stagione è stato costruito e validato il modello statistico. Questa tecnica di DS si basa sull'identificazione di una relazione statistica tra le coppie di strutture tra predittori e predittandi. La riduzione e quantificazione dell'incertezza è trattata nella fase di set-up del modello di DS, utilizzando vari predittori definiti su aree diverse e su periodi diversi [20].

In modo da ridurre il rumore dei campi coinvolti, prima di applicare la CCA, i data set sono filtrati utilizzando la tecnica delle EOF (Empirical Orthogonal Functions), in modo da selezionare solo quelli che spiegano la maggior parte della varianza osservata [23].

Mediante una regressione multivariata, basata sulla CCA applicata ai campi predittori-predittandi filtrati, vengono identificati i campi a larga scala che sono meglio correlati ai pattern a scala locale [24].

Nella fase di validazione poi, l'abilità (*skill*) del modello di *downscaling* viene quantificata, a livello di stazione, in termini di coefficiente di correlazione di Spearman, di BIAS e di RMSE tra le serie osservate e downscalate del predittando.

Allo schema di *downscaling* selezionato sono poi applicate le proiezioni dei campi in quota, sul periodo 2021-2050, dedotte dai modelli globali del progetto ENSEMBLES, in modo da ottenere gli scenari climatici a scala locale nei punti di griglia delle aree di studio. A differenza del progetto di riferimento, nell'ambito del quale sono stati elaborati scenari di cambiamento climatico per le tre variabili meteorologiche, nel presente lavoro è stata presa in considerazione la sola proiezione di temperatura massima, il cui predittore rivelatosi migliore nel confronto col dato osservato è la T850.

I modelli climatici AOGCM coinvolti sono quelli forniti dai seguenti gruppi di ricerca:

- INGV-CMCC (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia), modello INGV-SINTERX-G
- FUB (*Freie Universitaet Berlin*, Germania), modello EGMAM
- METOHC (*Met Office Hadley Centre*, Inghilterra), modello METOHC-HADGEM1
- IPSL (*Institute Pierre Somon Laplace*, Francia), modello IPSL-CM4

- MPIMET (*Max Plank Institute*, Germania), modello ECHAM5-MPI-OM

Tenendo conto del fatto che i modelli climatici globali coinvolti hanno caratteristiche diverse è stata creata inoltre la media d'insieme (*Ensemble Mean*) per ogni grandezza e stagione.

La figura 3.5 illustra schematicamente la tecnica di *downscaling* statistico utilizzata.

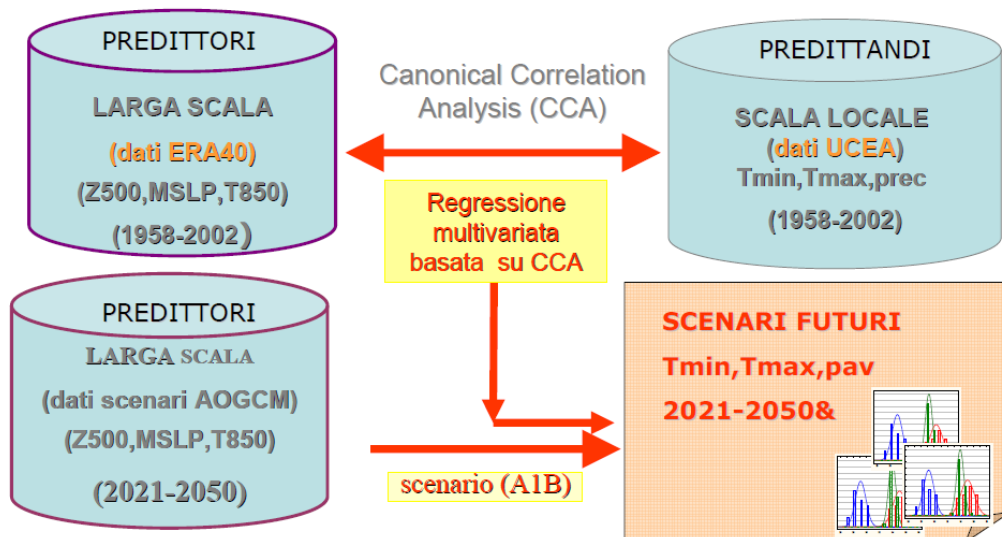


Figura 3.5: Modello statistico di *downscaling* [20].

Fase di filtraggio

Lo spazio delle fasi con cui si identificano i dati climatici si può pensare come suddiviso in due sottospazi, quello del segnale e quello del rumore: il primo è caratterizzato da pochi pattern caratteristici e si suppone che rappresenti le dinamiche del processo considerato, il secondo è invece multi dimensionale e contiene tutti i processi irrilevanti per il primo.

Il metodo per effettuare la separazione dello spazio delle fasi nei due sottospazi, introdotto per i dati atmosferici nel 1956 da Lorenz, è l' *Empirical Orthogonal Function analysis*. Un set di dati caratterizzato da un alto numero di variabili viene trasformato in un nuovo set che ne contiene un numero molto minore, ma che comunque rappresenta una larga frazione della variabilità dei dati originali. Date N osservazioni temporali di un campo definito da M elementi (con $N > M$), si cercano delle funzioni spaziali i cui elementi, dipendenti dagli elementi di partenza, contengano la maggior parte dell'informazione del dataset originale, potendone così isolare i gradi di libertà più significativi. Come generalmente accade per i dati di campi atmosferici, possono esistere sostanziali correlazioni spazio-temporali tra le variabili, e l'informazione risulta quindi ridondante; le nuove funzioni ottenute tramite la scomposizione in EOF vanno invece a costituire una rappresentazione compatta dei dati originali, oltre ad avere la fondamentale caratteristica di essere indipendenti (ortogonali) tra loro.

La scomposizione in EOF si basa sull'analisi della matrice di varianza-covarianza ($M \times M$) costituita, sulla diagonale, dalle varianze degli elementi del campo dato, e fuori dalla diagonale dalle loro covarianze relative. Va ricordato che prima di sviluppare l'analisi si deve rimuovere il ciclo annuale dai dati, per individuare la variabilità su scale temporali diverse dalla annuale. La prima EOF spiega la maggior parte della varianza, ovvero il pattern che si presenta più frequentemente; la seconda è quella realizzata sotto il vincolo di ortogonalità con la prima; la terza è vincolata allo stesso modo alle precedenti, e così via.

Importante è la possibilità di troncare questa scomposizione, poichè le EOF sono costruite in maniera tale da risultare via via sempre meno significative, spiegando frazioni di varianza sempre minori. Tipicamente utiliz-

zando le prime 3-10 EOF si è in grado di ricostruire la quasi totalità della varianza del campo originario, mentre quelle successive possono essere trascurate in quanto rappresentative della piccola parte di varianza riconducibile al rumore.

Una buona scelta del numero di EOF da utilizzare per l'analisi di correlazione canonica e del numero di pattern di CCA usati nel modello di regressione influisce su una buona performance del modello.

Analisi di Correlazione Canonica

La CCA è un metodo statistico per trovare pattern coerenti spazialmente in diversi campi di dati che abbiano la più grande correlazione temporale possibile: si tratta di un metodo lineare multivariato in grado di fornire le coppie di pattern a larga scala e a scala locale che vengono poi utilizzate in uno schema di *downscaling* statistico.

In un precedente lavoro, volto all'elaborazione di proiezioni future di temperatura superficiale nel nord Italia (Tomozeiu et al., 2013, [25]), sono stati cercati i pattern spaziali che dessero la massima correlazione temporale tra un predittore selezionato tra MSLP, Z500 e T850, derivati dalle rianalisi ERA40, e il predittando di interesse per questo lavoro di tesi, ovvero il campo di temperatura massima estiva.

La scelta del predittore e del suo dominio è di fondamentale importanza per la costruzione dello schema di *downscaling* statistico, in quanto ne riduce l'incertezza e ne aumenta la capacità. Per quanto riguarda la finestra spaziale per esempio, la scelta deve essere fatta attentamente in quanto, se troppo grande può portare a una sottostima del predittando, ma d'altro canto deve essere sufficientemente ampia da contenere la scala spaziale del predittore stesso.

Il risultato ottenuto, usando BIAS, RMSE e coefficiente di correlazione di Spearman come indici di performance, mostra che il predittore migliore per la temperatura massima estiva nel nord Italia è la T850, definita per l'area: $12.5^{\circ}W - 30^{\circ}E$ e $30^{\circ}N - 55^{\circ}N$.

I dati dei due campi sono quindi stati filtrati tramite la tecnica delle EOF già descritta, ed è stato poi effettuato un test per valutare il numero di EOF da utilizzare nell'analisi di correlazione canonica. Da questo studio è risultato che per il predittore T850 devono essere utilizzate le prime 6 EOF, che spiegano in totale il 90 % della varianza, e per la temperatura massima estiva bastano le prime due, che spiegano l'89 % della varianza.

Le configurazioni spaziali e le serie temporali associate ai primi due pattern sono stati utilizzati come input nell'analisi CCA, in modo da identificare il legame tra la variabilità a larga scala e il clima locale. Un test ha dimostrato che le prime due configurazioni di CCA sono sufficienti in quanto presentano un'alto livello di correlazione, pari a 0.85.

Fase di validazione

La valutazione della capacità del modello di *downscaling* per questo lavoro è stata effettuata tramite una calibrazione-validazione con i dati osservati. Il periodo 1958-2002 è stato suddiviso in due omogenei sotto-intervalli, precisamente 1958-1978 insieme a 1996-2002, e 1979-1995, che sono stati alternativamente considerati come di fitting e di validazione. Le serie osservate e downscalate del predittando sono state quindi messe a confronto, e la capacità del modello è stata testata in termini di coefficiente di correlazione di Spearman, di BIAS e di errore quadratico medio (RMSE), calcolato tra l'indice osservato e simulato, rimuovendo il bias sul periodo di validazione. I coefficienti sono definiti come segue:

$$BIAS = \overline{[index_{model}]_{\text{verification period}}} - \overline{[index_{obs}]_{\text{verification period}}} \quad (3.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i \in \text{verification period}} [index_{model}(i) - index_{obs}(i) - BIAS]^2} \quad (3.2)$$

dove N è il numero di anni del periodo di verifica.

Nel grafico di figura 3.6 sono messe a confronto le curve che rappresentano i valori osservati e l'output del modello di *downscaling* per il punto di griglia 1411.

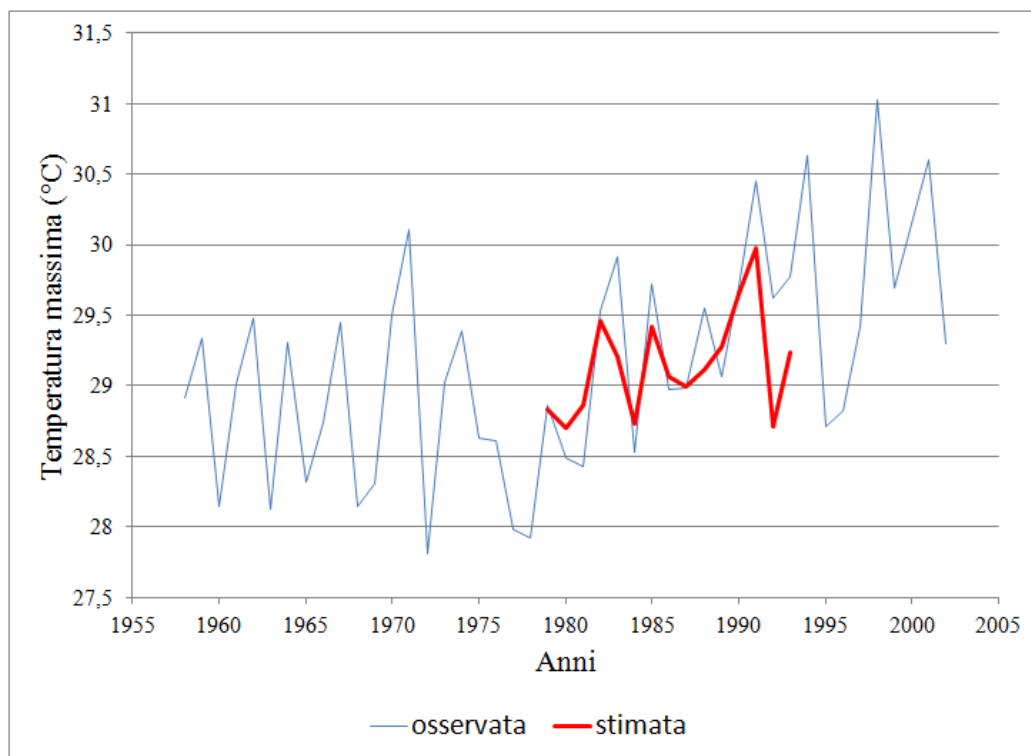


Figura 3.6: Temperatura massima media estiva, osservata e stimata tramite DS, nel periodo 1960-2002 usato per la validazione del modello.

Complessivamente si osserva che il modello riesce a cogliere la variabilità interannuale della temperatura massima estiva; analizzando più nel dettaglio le due serie temporali, osservata e simulata, si nota che in alcuni anni l'intensità dei valori estremi è sotto o sovrastimata. Ciò è spiegabile se si considera la ormai risaputa caratteristica dei modelli di *downscaling* statistico nel sottostimare generalmente la varianza della serie downscalata. Si può quindi concludere che il modello di *downscaling* utilizzato è in grado di riprodurre ragionevolmente bene il campo di temperatura massima estiva al suolo, per il punto di griglia di San Secondo Parmense.

3.2.2 Scenario emissivo A1B

Nel 1996 l'IPCC iniziò l'elaborazione di un nuovo set di scenari emissivi, descritto dal report SRES (Special Report on Emissions Scenarios), che rimpiazzassero i primi scenari IS92 [26]. Quattro diverse famiglie vennero sviluppate (A1, A2, B1, B2) per un totale di 40 scenari emissivi, in modo da coprire un elevato range delle principali forzanti demografiche, economiche e tecnologiche delle future emissioni di gas inquinanti.

In figura 3.7 sono riportati alcuni risultati elaborati sulla base di 6 scenari SRES. L'immagine a sinistra mostra l'andamento delle emissioni di gas serra previsto dai singoli scenari, nel caso di mancata applicazione di politiche di controllo. Nell'immagine a destra sono riportate le curve di riscaldamento globale medio superficiale secondo gli scenari A1, A1B e B1, come continuazione delle simulazioni eseguite per il ventesimo secolo, e rispetto al periodo 1980-1999; la curva rosa non si riferisce invece a uno scenario, bensì alle simulazioni dei modelli AOGCM elaborate assumendo che le concentrazioni atmosferiche si mantengano costanti sui valori dell'anno 2000. Le barre a

destra mostrano infine le migliori stime e i range associati, per i sei scenari SRES principali, per il periodo 2090-2099 [27].

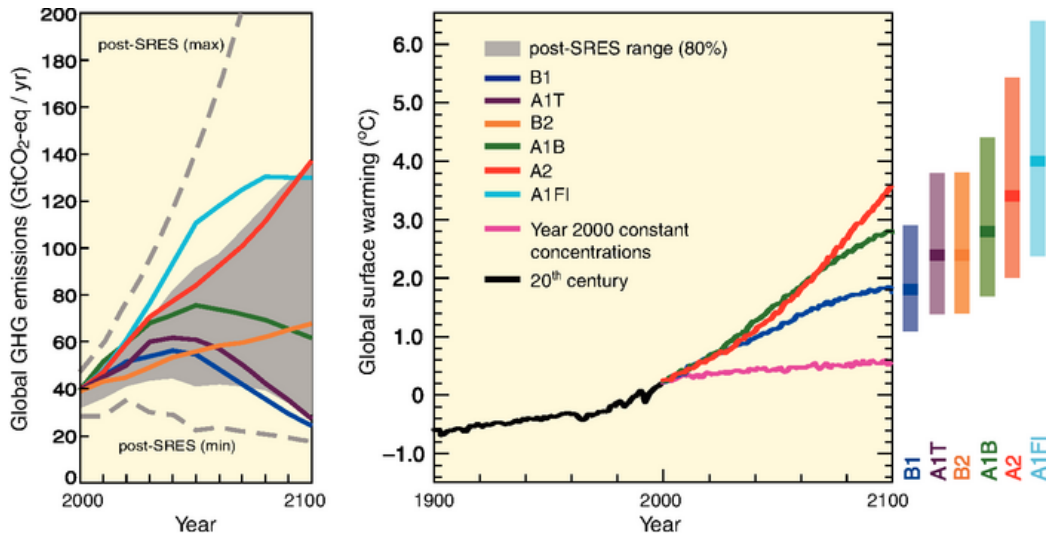


Figura 3.7: Scenari di emissioni di gas serra e proiezioni di temperatura superficiale fino al 2100 [27].

Le stime sull' aumento della temperatura globale previsto per la fine del ventunesimo secolo, con i relativi range di incertezza, sono ben riassunte dalla tabella di figura 3.8, in cui compaiono inoltre le previsioni su quanto potrà essere l'innalzamento del livello del mare.

La figura 3.9 mostra nel dettaglio la mappa del cambiamento della temperatura superficiale media estiva, a livello europeo, come previsto dalle proiezioni effettuate utilizzando l'*Ensemble Mean*, secondo lo scenario A1B, per il trentennio 2021-2050 rispetto al periodo 1961-1990.

La famiglia A1, di cui fa parte lo scenario A1B utilizzato per elaborare le proiezioni climatiche che verranno a breve illustrate, si propone di rappresentare un mondo caratterizzato da un rapido e soddisfacente sviluppo economico. Le principali dinamiche incluse sono: un alto tasso di investimento e innovazione nei campi dell'educazione, della tecnologia e delle istituzioni a

Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999) ^a		Sea Level Rise) (m at 2090-2099 relative to 1980-1999) Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
	Best estimate	Likely range	
Constant Year 2000 concentrations ^b	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Figura 3.8: Proiezioni di riscaldamento globale superficiale e di innalzamento del livello del mare, per la fine del 21° secolo [27].

livello nazionale e internazionale, una più elevata mobilità di persone, idee e tecnologia, un forte impegno per le soluzioni di mercato e per l'educazione al risparmio. Ci si avvierebbe verso la convergenza economica tra i paesi più e meno sviluppati, grazie a miglioramenti nella tecnologia dei trasporti e delle comunicazioni, a cambiamenti delle politiche nazionali sull'immigrazione, alla cooperazione internazionale nello sviluppo delle istituzioni per la crescita della produttività e della diffusione delle tecnologie.

I trend demografici ed economici risultano strettamente collegati negli scenari A1: è previsto un aumento della popolazione globale fino a 9 miliardi entro il 2050, per poi subire un calo a 7 miliardi verso fine secolo.

Vari gruppi di scenari all'interno di questa famiglia riflettono una certa incertezza riguardo a come avverrà lo sviluppo energetico e tecnologico in un mondo in così rapido mutamento. Il gruppo di cui fa parte lo scenario A1B assume un utilizzo bilanciato tra tutte le fonti energetiche, senza che nessuna di esse risulti nettamente dominante sulle altre.

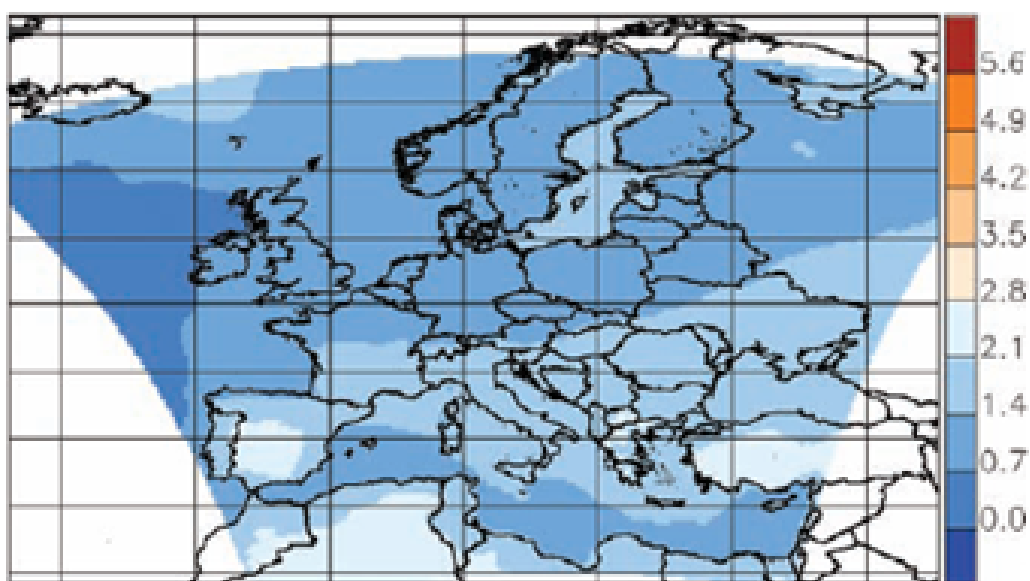


Figura 3.9: Mappa dei cambiamenti di temperatura media estiva per il trentennio 2021-2050, rispetto al 1961-1990, elaborata utilizzando secondo lo scenario A1B [11].

3.3 Proiezioni stagionali di temperatura massima per il punto 1411 (2021-2050)

Mediante la tecnica di regionalizzazione statistica descritta nei paragrafi precedenti, sono quindi state elaborate proiezioni climatiche stagionali di temperatura minima, massima, precipitazione cumulata e frequenza di giorni con precipitazione, per il trentennio 2021-2050, relative a San Secondo Parmense, rispetto al clima simulato per il periodo 1961-1990.

Gli scenari sono stati creati applicando lo schema di *downscaling* a ognuno dei modelli globali illustrati precedentemente e all' *Ensemble Mean*. Questi dati verranno poi utilizzati come input per il *weather generator* che produrrà le serie sintetiche giornaliere di queste variabili, relativamente al clima locale. Per effettuare questa operazione sono stati utilizzati appositi formati XML

(*eXtensible Markup Language*) che consentono di definire valori puntuali di anomalia stimati dai modelli globali per specifiche grandezze e definiti periodi. In accordo col tema di questo lavoro di tesi verranno qui riportati solo i risultati relativi alla temperatura massima estiva per il punto di griglia 1411.

Il grafico in figura 3.10 mette a confronto i valori di anomalia di temperatura massima estiva elaborati dai singoli modelli e dall' EM.

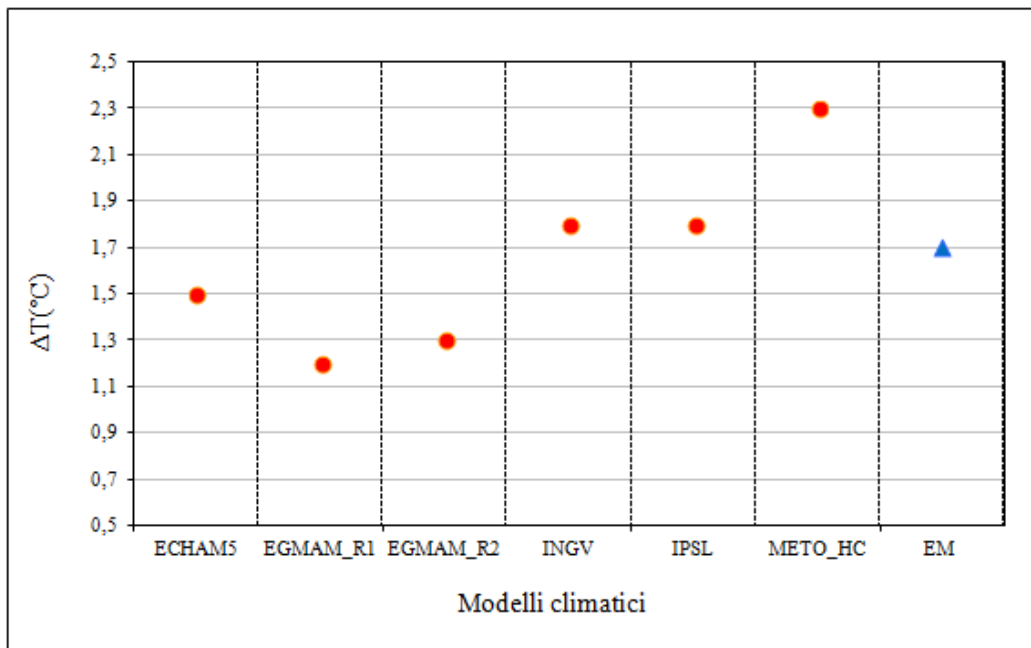


Figura 3.10: Proiezioni di cambiamento climatico della temperatura massima estiva (anomalia) per il punto di griglia 1411, per il periodo 2021-2050, scenario A1B.

I risultati possono in alternativa essere presentati in forma di PDF (Probability Density Function) dell'anomalia di temperatura, come illustrato nelle figure 3.11 e 3.12 dove compaiono le curve relative rispettivamente ai diversi modelli e all' *Ensemble Mean*, che ne considera la media, confrontate con quelle relative al trentennio 1961-1990 e al periodo 1991-2008. Questo metodo grafico permette di visualizzare le differenze tra le caratteristiche delle

funzioni gaussiane relative all'osservato e alla proiezione futura, per quanto riguarda sia il valor medio che la varianza.

Rispetto al trentennio 1961-1990, i modelli globali prevedono un aumento di temperatura massima estiva che, osservando i valori medi, varia da 1.2°C del modello EGMAM_R1 a 2.3°C del METO_HC. La varianza che più si avvicina a quella relativa al trentennio passato, pari a 0.63, è quella prevista dal modello EGMAM_R1, pari a 0.6, in un intervallo di deviazioni standard che va da 0.4 a 0.8. Il maggiore aumento di temperatura è quindi quello pronosticato dal modello inglese dell' Hadley Centre: la curva infatti indica un'anomalia di 2.3°C con la possibilità che possa superare i 4°C , come si osserva dalla coda della distribuzione. In figura 3.12 è riportata la curva generata utilizzando l' *Ensemble Mean*, dato dalla media d'insieme dei vari modelli globali, secondo cui l'anomalia di temperatura prevista è di 1.7°C con deviazione standard pari a 0.9.

Il confronto che si sta facendo sui dati relativi al punto di griglia 1411 dell'analisi UCEA assume un significato diverso se si considera che il trentennio passato che viene preso come riferimento è ormai poco rappresentativo della situazione attuale. La curva verde riportata nelle figure 3.11 e 3.12, proveniente dallo stesso dataset UCEA da cui deriva la curva relativa al trentennio di riferimento passato, rappresenta appunto l'anomalia della temperatura estiva tra il 1991 e il 2008, quanto di più vicino alla situazione attuale si potesse utilizzare per rendere significativo il confronto. Come appare evidente qui, e come già illustrato dalle mappe riportate nel capitolo 1 (figure 1.4 e 1.7), le temperature estive hanno già subito una variazione che, nella zona del parmense considerata, è di circa 1.5°C .

Ciò significa che il clima del trentennio climatico in corso sembra ormai distinguersi in modo più significativo da quello del periodo 1961-1990 piut-

tosto che dal trentennio futuro, dimostrando che il cambiamento climatico previsto per il periodo 2021-2050 è effettivamente già in atto, con almeno un decennio di anticipo.

L'aumento di temperatura rispetto al periodo 1961-1990 previsto da alcuni modelli, in particolare da ECHAM e EGMAM, sembra quindi essersi già verificato, il che porta a concludere che la situazione climatica del periodo futuro potrà essere caratterizzata da temperature simili a quelle attuali, come indicato da questi due modelli, o più elevate da 1 a 3°C, come suggerito dai restanti.

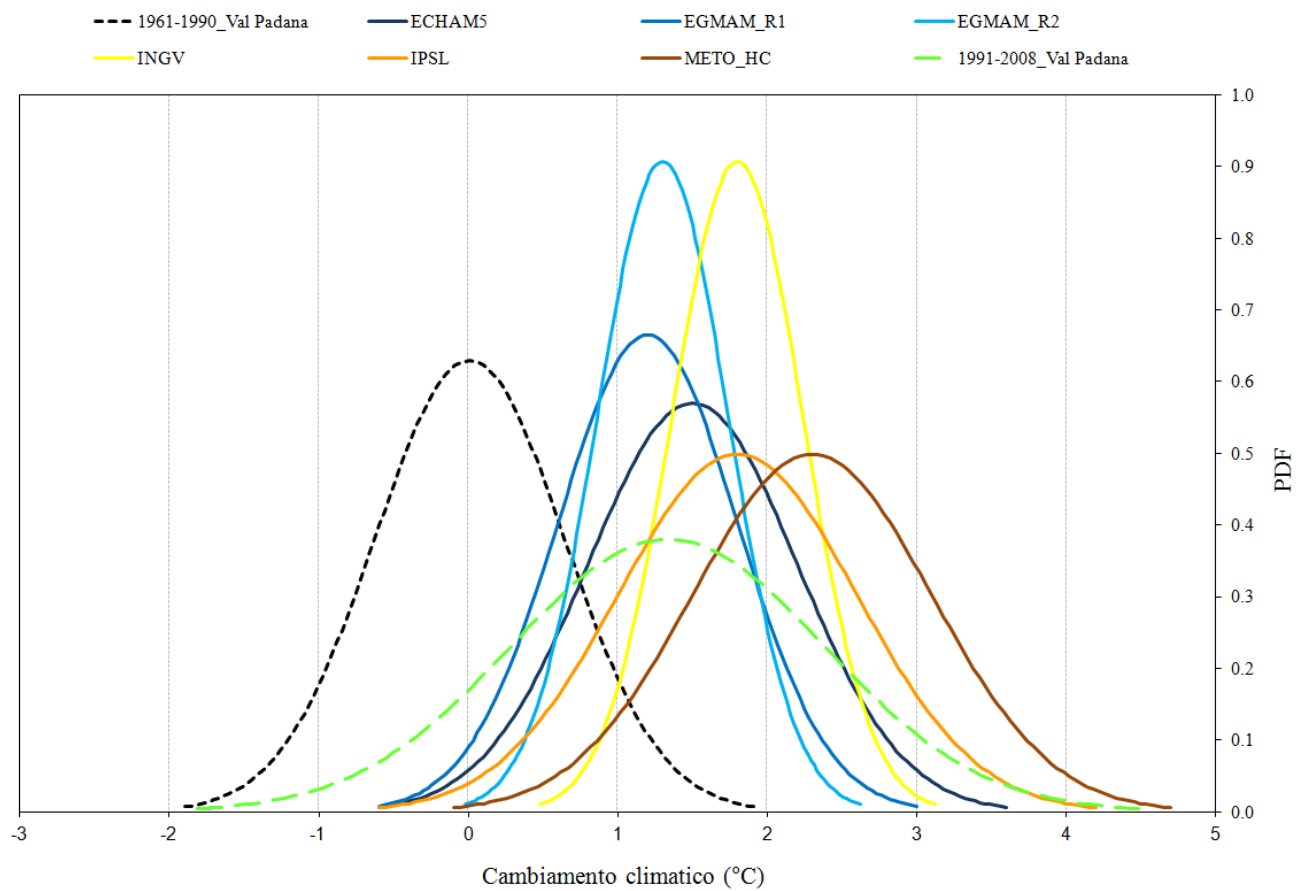


Figura 3.11: Pdf della anomalia di temperatura massima estiva: confronto tra l'osservato nel 1961-1990 (linea tratteggiata nera), l'osservato nel 1991-2008 (linea tratteggiata verde) e le proiezioni di cambiamento climatico dei singoli modelli per 2021-2050, per il punto 1411, scenario A1B.

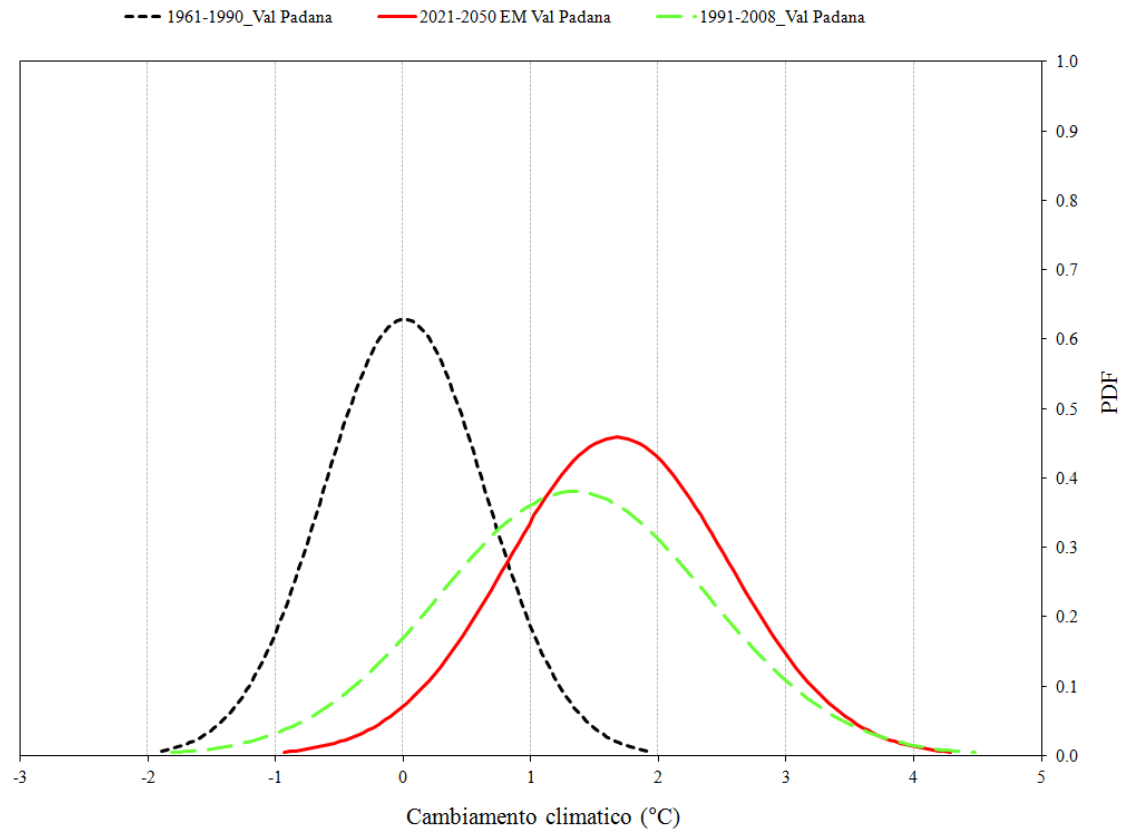


Figura 3.12: Pdf della anomalia di temperatura massima estiva: confronto tra l'osservato nel 1961-1990 (linea tratteggiata nera), l'osservato nel 1991-2008 (linea tratteggiata verde) e la proiezione di cambiamento climatico elaborata dall' *Ensemble Mean* per il 2021-2050, per il punto 1411, scenario A1B.

3.4 Elaborazione delle serie sintetiche di temperatura massima

Le anomalie previste tramite la tecnica di regionalizzazione statistica applicata alle simulazioni dei modelli globali, insieme al clima locale di riferimento, verranno a questo punto utilizzate in ingresso da un generatore climatico, che produrrà le serie sintetiche della grandezza meteorologica giornaliera per lo scenario futuro locale.

3.4.1 Il generatore climatico (*Weather Generator*)

Dati meteorologici giornalieri sono richiesti per molteplici applicazioni, e risulta particolarmente utile la possibilità di generare serie sintetiche delle variabili di interesse con le stesse caratteristiche statistiche della meteorologia locale.

Con questo scopo è stato sviluppato un modello di simulazione chiamato *Weather Generator* puntuale, capace di generare valori giornalieri di precipitazione, temperatura massima, minima e di radiazione solare relativi ad un luogo dato [28]. Il miglior approccio conosciuto per sviluppare un WG è stato studiato e messo a punto da Richardson (1981), e i modelli che si basano sul suo approccio sono spesso definiti "Richardson type".

Il processo di generazione di serie temporali sintetiche delle variabili meteorologiche avviene generalmente in due passaggi successivi: inizialmente avviene la modellizzazione delle precipitazioni giornaliere, indipendentemente dalle altre variabili; di seguito sono generati i valori di temperatura massima, minima e di radiazione solare, in accordo con l'occorrenza di giorni piovosi o non, in precedenza generati. In questo modo si cerca di rispettare le variazioni nei valori delle variabili e di preservarne le correlazioni reciproche.

Il numero di serie prodotte dev'essere abbastanza ampio affinché l'insieme di tutte le serie sintetiche generate sia coerente con il clima della zona in esame e sia il meno possibile soggetto alla aleatorietà del generatore numerico. I dati prodotti dal WG devono rispettare le proprietà statistiche dei dati reali, in particolare la distribuzione gaussiana delle temperature mensili e la distribuzione gamma delle precipitazioni.

3.4.2 Risultati

Sulla base delle anomalie stagionali elaborate tramite la tecnica di *downscaling* statistico e del clima locale di riferimento, il WG è quindi in grado di riprodurre dati climatici giornalieri per un periodo di n-anni e per una data località, in questo caso San Secondo Parmense (punto di gliglia 1411).

Per ognuno dei modelli globali elencati nel paragrafo 3.2.1 sono prodotte 50 ripetizioni di un ipotetico anno appartenente al trentennio 2021-2050, e per ogni giorno sono forniti dati simulati di temperatura massima, minima e quantità di precipitazione.

Per quanto riguarda la temperatura massima, unico parametro che viene preso in considerazione in questo lavoro, è stato verificato che venisse ben riprodotta la reale persistenza dei dati: la correlazione tra un valore di temperatura e quelli dei giorni seguenti corrisponde alla correlazione che si registra sui dati osservati, pari a circa 0.95 con il giorno successivo, fino ad arrivare a circa 0.90 col valore di quattro giorni dopo.

Uno scenario di cambiamento climatico, più precisamente della temperatura massima estiva, per il periodo 2021-2050 e per la zona scelta per questo lavoro è quindi pronto. Nel prossimo capitolo verrà illustrato il metodo con cui, sulla base di quanto trovato finora, verranno elaborati gli scenari di concentrazione di ozono per lo stesso trentennio e per la stessa località.

Capitolo 4

Scenari di concentrazione di ozono

Obiettivo ultimo e principale di questo lavoro di tesi è l'elaborazione di uno scenario che rappresenti il possibile stato di concentrazione di ozono superficiale nel trentennio 2021-2050 in un'area della Pianura Padana, sulla base di uno scenario di cambiamento climatico per la temperatura massima estiva e supponendo che si mantenga il legame tra i due parametri trovato studiando i dati osservati.

Questo capitolo sarà inizialmente dedicato alla spiegazione del programma creato appositamente per questo lavoro, per poi concludersi con i risultati ottenuti, l'illustrazione dei punti deboli della tecnica usata e dei possibili miglioramenti da apportare per una sempre più verosimile proiezione futura. Va infatti ancora una volta sottolineato quanto questo lavoro sia incentrato in particolare sulla dipendenza della concentrazione di ozono dalla temperatura dell'aria, e quanto invece vengano tralasciati altri complessi aspetti che insieme incidono sulla distribuzione di questo componente atmosferico.

4.1 Schema di lavoro

Il programma creato per l'elaborazione degli scenari di ozono si articola in più fasi, riassunte nel diagramma di figura 4.2.

4.1.1 Preparazione dei dataset

Inizialmente è stato preparato il dataset storico di ozono e temperatura, rispettivamente con i dati di Cittadella e San Pancrazio, selezionando i valori massimi giornalieri dei mesi da maggio a settembre per il periodo di misura comune 2001-2012. In figura 4.1 è riportato il grafico di dispersione delle due variabili, in cui si osserva la loro dipendenza lineare.

Lo scenario di cambiamento climatico, sulla base del quale verrà creata la proiezione di concentrazione di ozono, si riferisce invece a San Secondo Parmense, punto di griglia 1411 dell'interpolazione UCEA. Come illustrato nel capitolo 2, esiste un'elevata correlazione (0.98) tra i dati di temperatura di San Pancrazio e quelli di San Secondo; nonostante questo si è scelto di apportare una correzione al dataset di San Secondo in modo che i risultati di ozono che seguiranno siano direttamente confrontabili.

In figura 4.3 si osserva lo *scatter plot* tra i dati di temperatura delle due località nel periodo comune 2001-2008 e per i mesi da maggio a settembre, con la retta di correlazione lineare che indica una differenza sistematica di circa $0.4^{\circ}C$ di cui appunto si vuole tener conto. Analizzando i dati si trova infatti che il valor medio di temperatura massima giornaliera registrata a San Pancrazio è $28.0^{\circ}C$, leggermente superiore al valore $27.2^{\circ}C$ relativo a San Secondo Parmense. Una possibile motivazione di questa differenza sta nella posizione delle due località rispetto a Parma: San Pancrazio si trova a pochi chilometri dalla città e potrebbe risentire delle temperature solitamente

più elevate che caratterizzano l'ambiente urbano; San Secondo si trova invece in una zona rurale nella pianura a nord di Parma, a circa 15 Km di distanza.

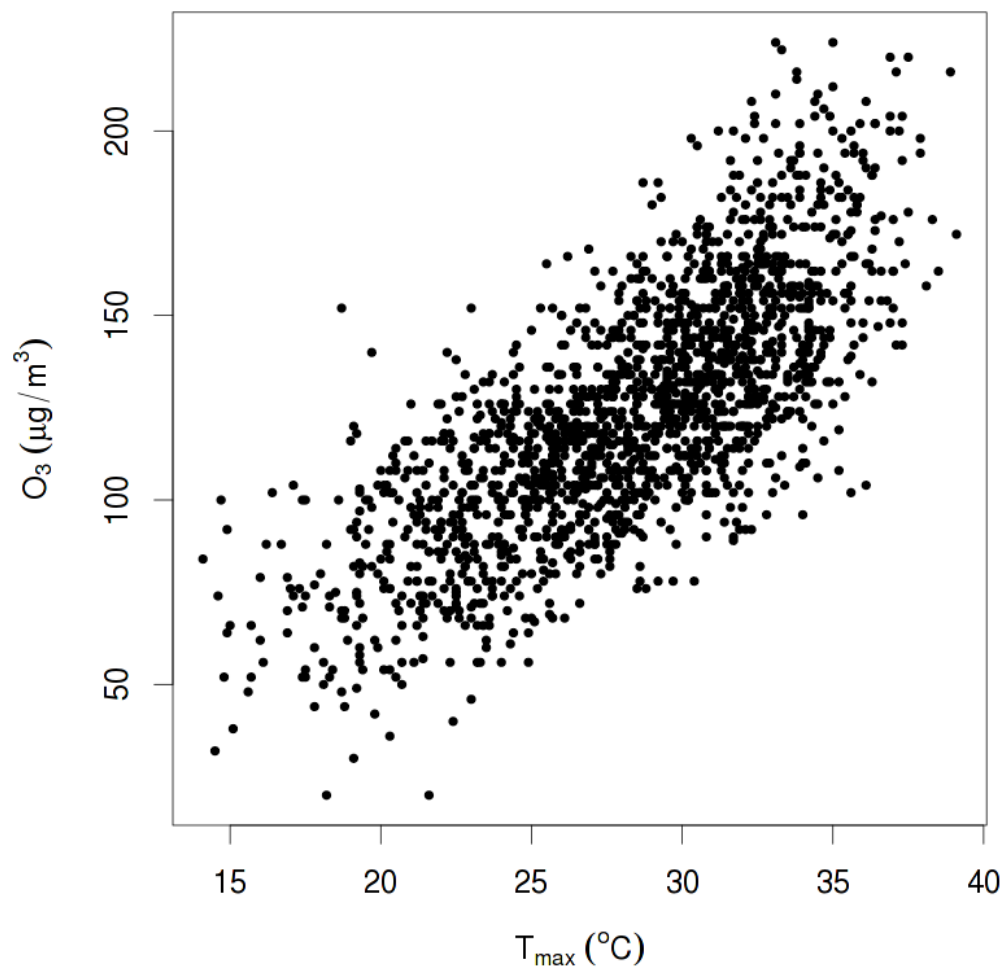


Figura 4.1: *Scatter plot* dei valori massimi giornalieri di temperatura (San Pancrazio) e concentrazione di ozono (Cittadella) da maggio a settembre sul periodo 2001-2012.

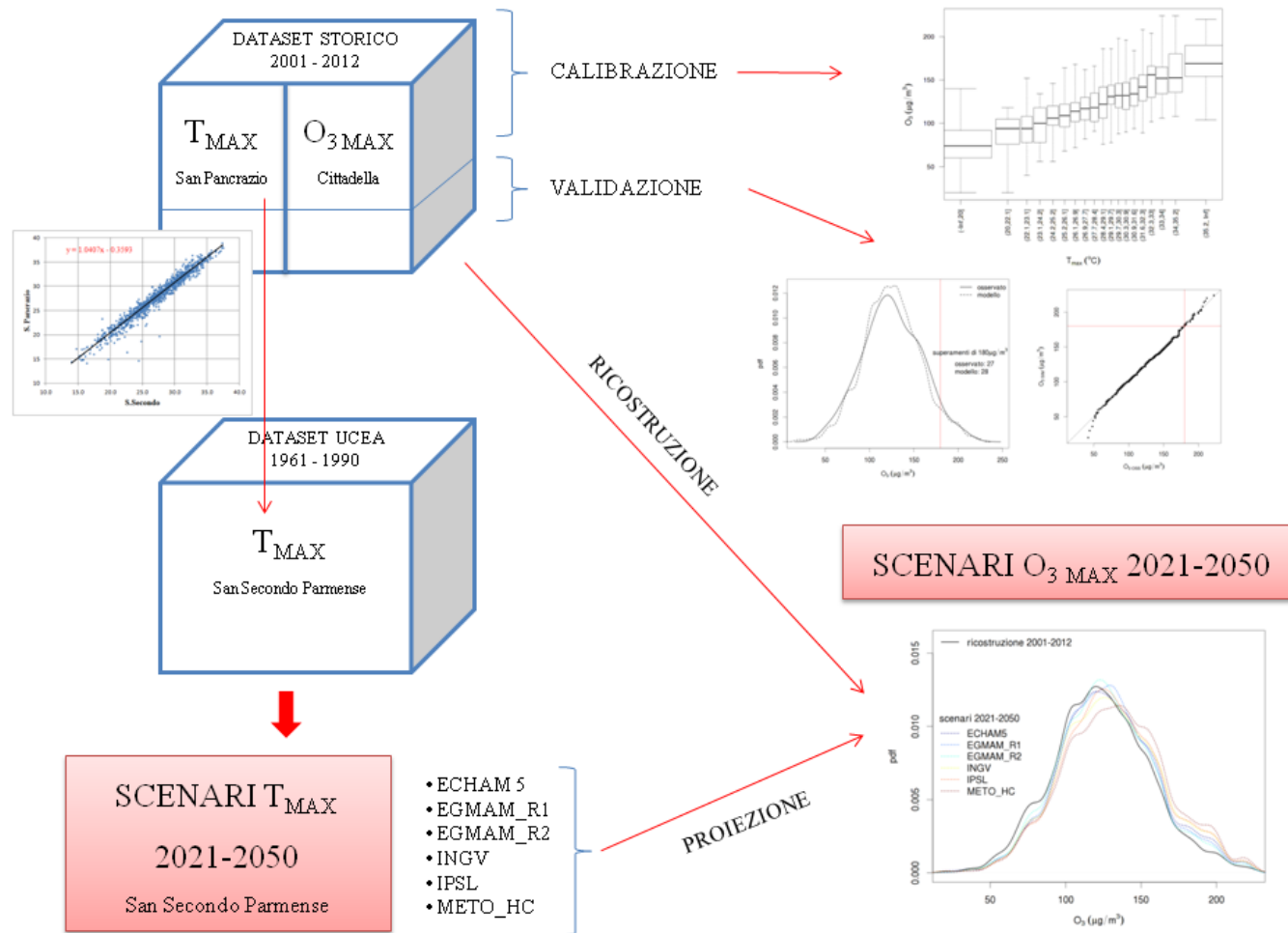


Figura 4.2: Schema di lavoro.

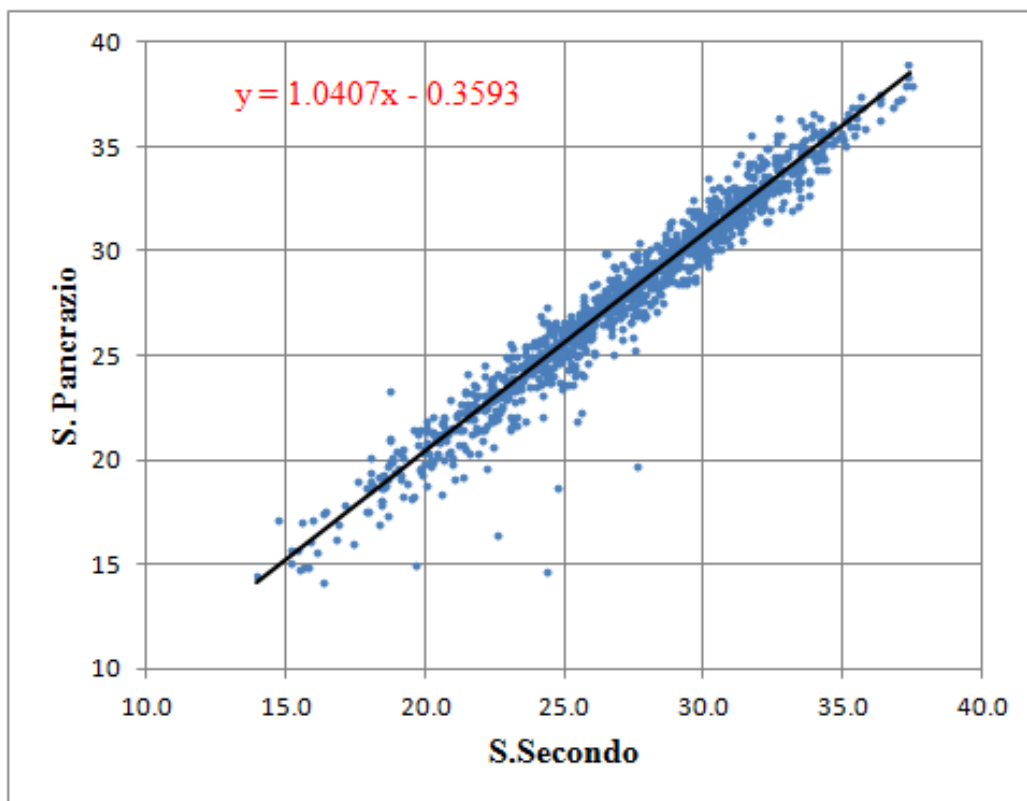


Figura 4.3: *Scatter plot* tra i valori di temperatura di San Pancrazio e San Secondo Parmense, con retta di tendenza, sul periodo 2001-2008.

4.1.2 Calibrazione - validazione

I dati storici a disposizione (1738 coppie di valori) sono stati suddivisi con un campionamento casuale in due dataset, uno di calibrazione che ne contiene il 70 % e uno di validazione col restante 30 %. Si è quindi operato sul dataset di calibrazione suddividendo l'intervallo totale di temperature registrate in 20 classi definite dai percentili; di queste, la prima e l'ultima sono aperte a più e meno infinito in modo che le stesse classi possano poi essere utilizzate per lo scenario futuro, che potrebbe prevedere temperature maggiori o minori dei valori estremi osservati nel dataset storico.

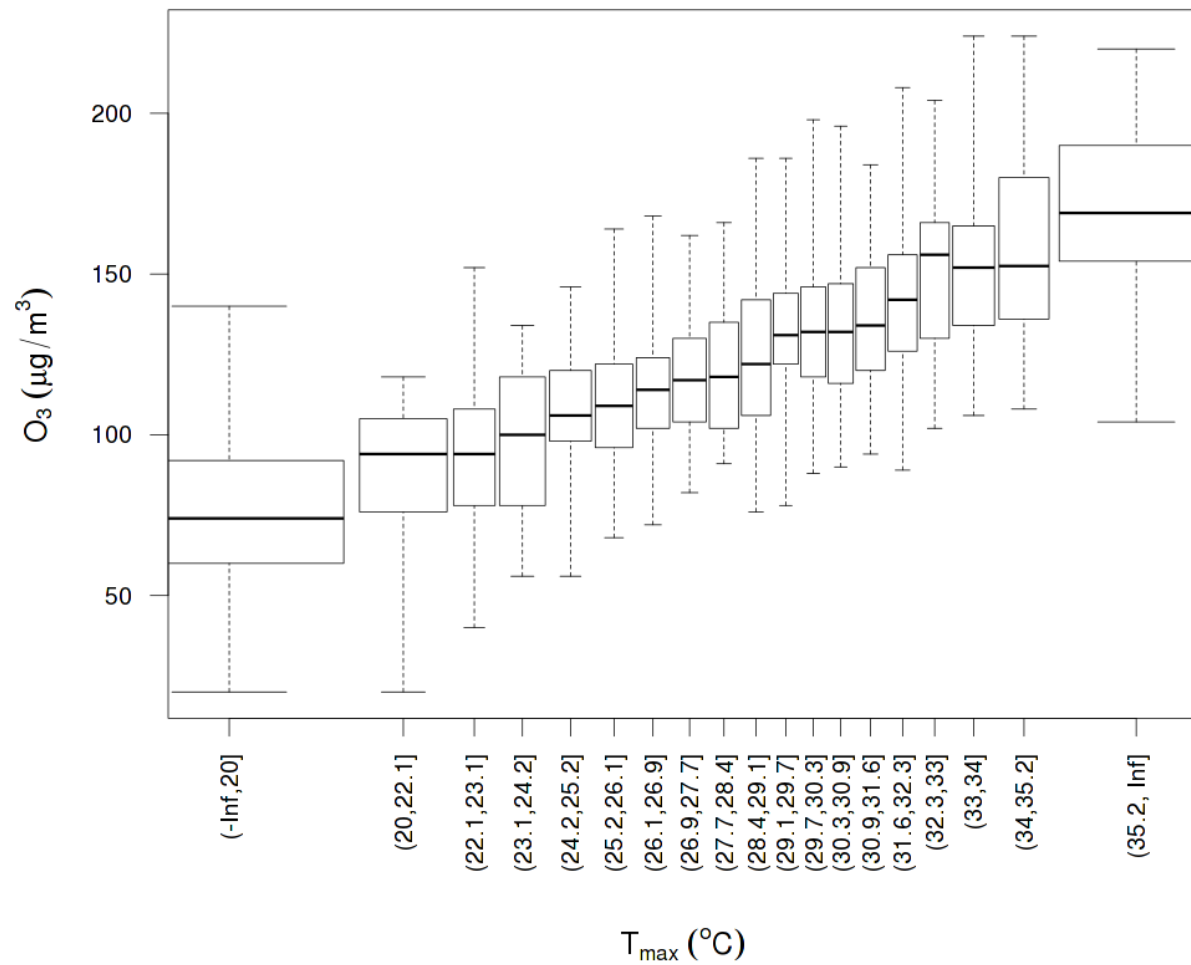


Figura 4.4: Boxplot dell'ozono nelle classi di temperatura.

In figura 4.4 è descritta la distribuzione dei valori di ozono registrati a Cittadella tra il 2001 e il 2012 nelle varie classi di temperatura. Ciò che si osserva è un'ulteriore dimostrazione della dipendenza della concentrazione di ozono dalla temperatura: a parte un leggero flesso in corrispondenza delle classi di temperatura più centrali, complessivamente si riscontrano concentrazioni crescenti distribuite nelle classi via via più calde.

La scelta del numero di percentili da usare per la suddivisione della temperatura in classi è stata dettata dal tentativo di ottenere, successivamente, curve di distribuzione sufficientemente lisce: un numero troppo piccolo di classi avrebbe infatti generato curve "a gradini".

I dati finora utilizzati appartengono al dataset storico di calibrazione. Per passare alla fase di validazione e successivamente di proiezione futura di concentrazione di ozono è stato applicato il modello appena calibrato ai due restanti dataset, di validazione e degli scenari.

L'obiettivo è prevedere la distribuzione di probabilità f dei massimi giornalieri della concentrazione di ozono in un determinato periodo; si è applicato perciò un modello probabilistico, non deterministico. Questo modello si ispira al metodo di campionamento casuale stratificato, una procedura di campionamento probabilistico.

Il primo passaggio consiste nella suddivisione della popolazione, dalla quale si intende estrarre il campione, in sottopopolazioni dette "strati": in questo caso la stratificazione dei dati di ozono è stata fatta sulla base della classificazione dei corrispondenti dati di temperatura, precedentemente descritta.

Successivamente si estrae, mediante una procedura di campionamento casuale semplice, il campione relativo a ciascuno strato C_i , ottenendo in

questo modo il campione globale:

$$C = \bigcup_{i=1}^n C_i \quad (4.1)$$

Ciascun campione C_i ha una numerosità m_i proporzionale alla frequenza della corrispondente classe di temperatura nel periodo sul quale si formula la previsione. Pertanto in uno scenario climatico caratterizzato dall'aumento delle temperature, la numerosità dei campioni di ozono corrispondenti a temperature superiori alla media sarà maggiore rispetto alla numerosità dei campioni di ozono corrispondenti a temperature inferiori alla media.

Rispetto ad un campionamento casuale semplice, il campionamento stratificato dà maggiore sicurezza di rappresentare tutte le parti di una popolazione statistica in quanto vengono maggiormente sfruttate le informazioni disponibili; da questo deriva la capacità di generare stime più accurate [29].

In primo luogo il modello è stato applicato quindi al dataset di validazione per poter confrontare il dato di ozono osservato con l'output del modello, mettendo a confronto le pdf che indicano la densità di frequenza con cui i massimi di ozono si presentano (figura 4.5).

La bassa numerosità del dataset di validazione, composto da poco più di 500 valori da suddividere in 20 classi, renderebbe il processo di validazione troppo sensibile a questa casualità; è stato quindi inserito un fattore per riscalare la numerosità dei campioni e rendere in questo modo più stabile il modello.

Nel grafico è stata inoltre inserita una riga in corrispondenza del valore di concentrazione $180\mu g/m^3$ per mettere a confronto i superamenti della soglia di informazione, osservati e previsti dal modello.

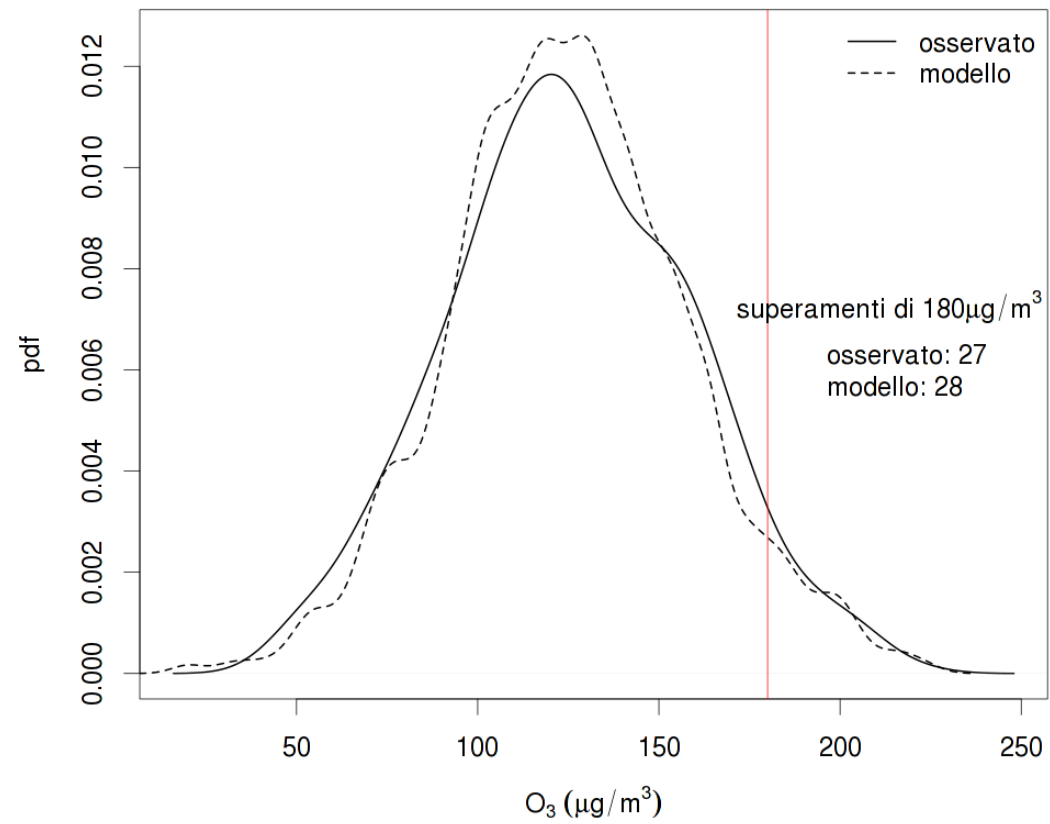


Figura 4.5: Funzione di densità di probabilità dei massimi di ozono per il dataset di validazione, osservata e prevista dal modello.

Un modo alternativo per illustrare questo confronto è tramite il *QQ plot* (*Quantile-Quantile plot*), ovvero la rappresentazione grafica dei quantili delle due distribuzioni (figura 4.6). Sugli assi cartesiani sono espressi i valori di concentrazione di ozono; ciò significa che per ogni punto tracciato sul grafico il quantile è lo stesso per entrambi i set di dati.

Il fatto che siano per la maggiorparte collocati sulla diagonale del grafico suggerisce un buon accordo tra l'osservato e quanto prodotto dal modello, almeno fino al percentile corrispondente a $180\mu\text{g}/\text{m}^3$.

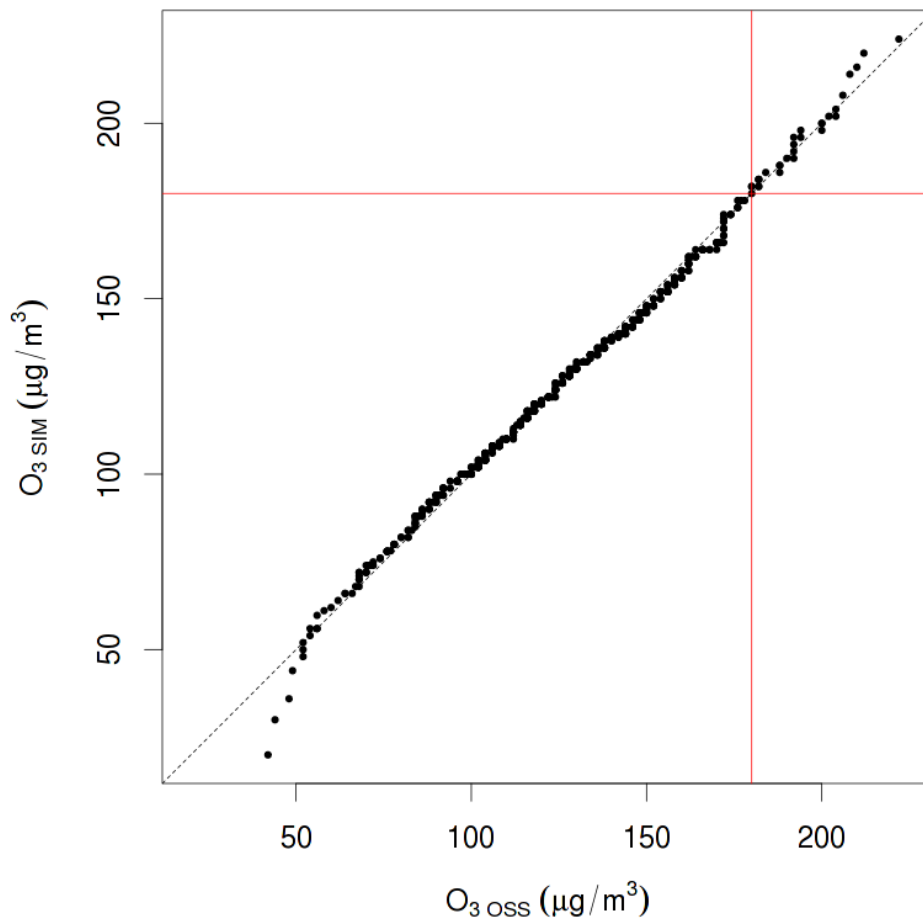


Figura 4.6: *QQ-plot*.

4.1.3 Proiezione di ozono

Una volta validato, il modello previsionale è stato applicato ai dati di temperatura osservati a San Pancrazio (2001-2012), al dataset storico UCEA (1961-1990) e alle proiezioni di temperatura elaborate dai vari modelli globali (2021-2050).

La prima scelta è stata fatta con l'intento di mettere a confronto il dato di ozono misurato a Cittadella con la ricostruzione fatta applicando il modello al dataset di temperatura osservata a San Pancrazio, per il periodo 2001-2012; si tratta di una sorta di ulteriore validazione e di un modo per poi rendere direttamente confrontabili le curve di densità di probabilità che verranno in seguito mostrate.

Nel secondo caso l'obiettivo è invece quello di ricostruire la distribuzione delle concentrazioni di ozono relative al periodo 1961-1990, di cui non si hanno misurazioni.

Il modello è stato infine applicato agli scenari di temperatura prodotti, per giungere all'elaborazione degli scenari di concentrazione di ozono per il trentennio 2021-2050.

Nelle figure 4.7 e 4.8 sono mostrati i risultati dell'analisi appena descritta: nella prima sono messe a confronto le funzioni di distribuzione relative al trentennio passato e agli ultimi 12 anni, nella seconda il confronto è fatto tra quello che si può definire presente e la serie di scenari futuri elaborati.

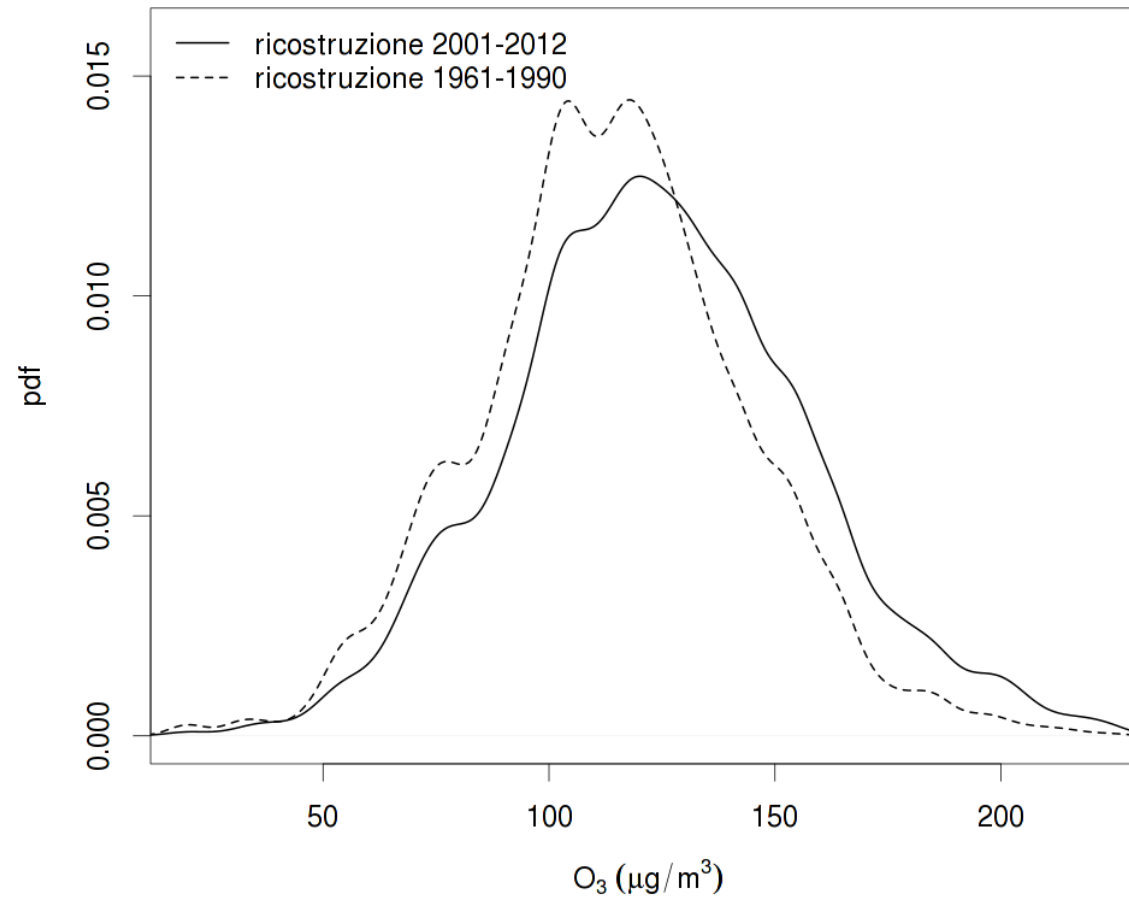


Figura 4.7: Distribuzione della concentrazione di ozono ricostruita per il trentennio 1961-1990 (linea tratteggiata), confrontata con quella ricostruita per il periodo 2001-2012 (linea nera continua).

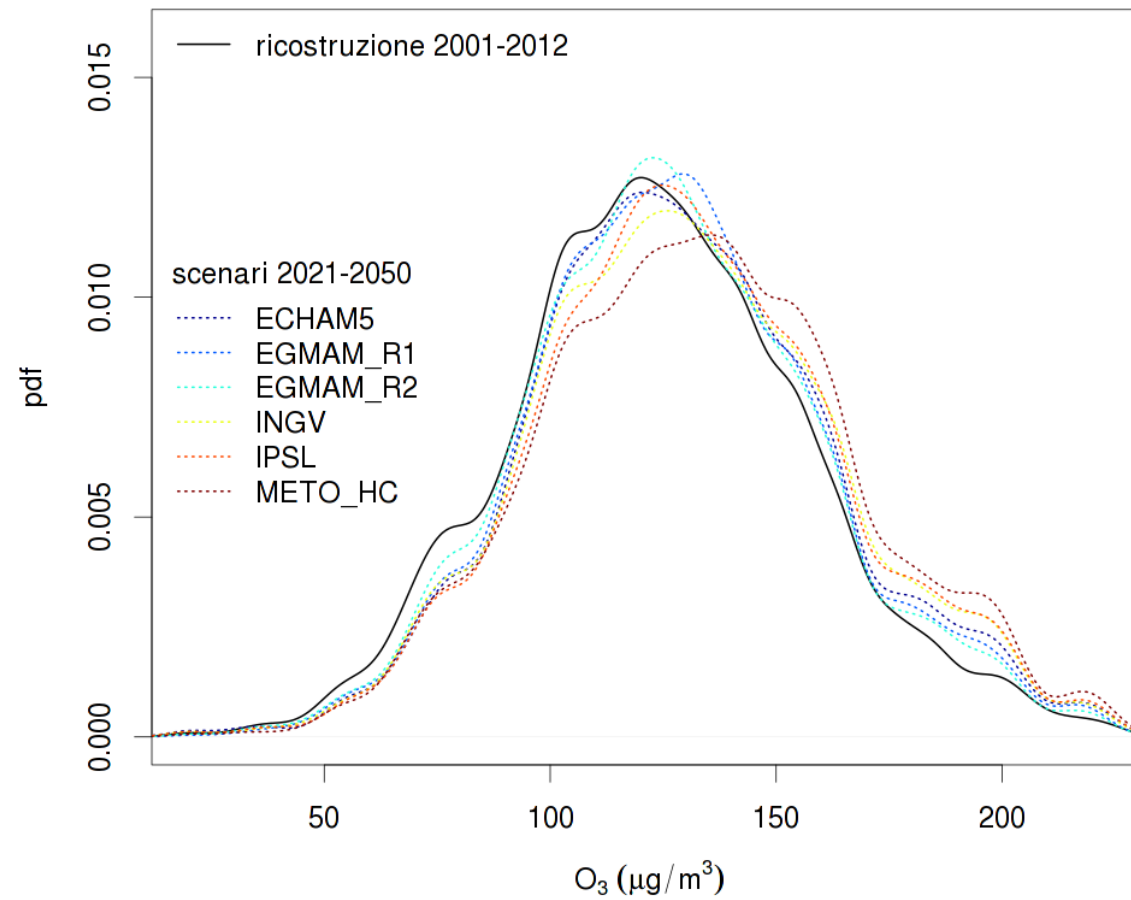


Figura 4.8: Distribuzioni delle concentrazioni di ozono previste per il trentennio 2021-2050 (linee tratteggiate colorate), confrontate con la distribuzione ricostruita per il periodo 2001-2012 (linea nera continua).

4.2 Risultati

Ciò che appare a una prima osservazione del grafico di figura 4.7 è un netto distacco tra la curva che rappresenta la ricostruzione dell'ozono nel trentennio 1961-1990 e quella relativa agli ultimi 12 anni. La differenza è invece inferiore se a confronto si mettono la curva del presente e le curve relative agli scenari futuri.

La prima conclusione a cui si giunge è una conseguenza di quanto già trovato nell'analisi fatta nel capitolo precedente riguardo l'andamento della temperatura: così come i dati di temperatura relativi al punto 1411 dell'analisi UCEA, anche la concentrazione di ozono, ricostruita proprio su questi, ha già subito una evidente variazione dal periodo 1961-1990 ad oggi.

La funzione di distribuzione della concentrazione osservata dal 2001 al 2012 si colloca infatti molto più vicina agli scenari futuri piuttosto che alla distribuzione passata. Risulta in particolare molto simile alle proiezioni elaborate sulla base dei due run del modello EGMAM, quello che fra tutti, come già osservato nel capitolo precedente, prevede il cambiamento climatico minore. Nonostante l'apparente somiglianza dovuta al maggiore distacco esistente rispetto al passato, osservando nel complesso le curve di scenario si nota come la distribuzione delle concentrazioni di ozono sia sensibilmente diversa dalla situazione recente, a maggior ragione se si considerano gli scenari elaborati sui modelli METO_HC, IPSL e INGV, che prevedono la variazione maggiore.

Per un'analisi più approfondita, in tabella 4.1 sono riportati alcuni indici che illustrano più in dettaglio le diverse distribuzioni, ottenuti applicando il metodo Montecarlo sulle simulazioni elaborate precedentemente; lo stesso metodo consente inoltre di valutare la loro significatività e quella delle loro differenze. Sul totale dei circa 10000 numeri simulati per ogni scenario il

modello campiona n estati, cioè n insiemi di 153 numeri; su ognuna delle estati costruite calcola il valor medio, la deviazione standard, il numero di superamenti della soglia di informazione, 50° e 90° percentile, facendo poi una media di tutti questi indicatori sulle n estati. Il procedimento è ripetuto 1000 volte, in modo da determinare la miglior stima e l'intervallo di confidenza di ogni indice statistico.

	MEDIA	DEV. ST.	N. SUP.	50° PERC	95° PERC
RIC 61-90	114± 2	29.7	3.0 ± 1.3	114± 3	162± 4
RIC 01-12	124 ± 3	32.7	7.8 ± 3.0	123± 4	180± 7
ECHAM5	129 ± 2	33.3	11.7 ± 2.5	127± 3	188± 5
EGMAM_R1	128 ± 2	32.6	10.3 ± 2.4	127± 3	186± 5
EGMAM_R2	127 ± 2	32.6	9.6 ± 2.4	126± 3	184± 5
INGV	130 ± 2	34.0	12.9 ± 2.6	129± 3	190± 4
IPSL	131 ± 2	33.8	13.1 ± 2.7	130± 2	190± 5
METO_HC	133 ± 2	34.5	14.9 ± 2.8	133± 3	193± 4

Tabella 4.1: Confronto tra le caratteristiche delle distribuzioni di concentrazione di ozono: ricostruzione 1961-1990, ricostruzione 2001-2012, scenari 2021-2050.

Osservando ad esempio i valori medi delle distribuzioni e gli intervalli di confidenza associati si ha la conferma di quanto già notato sui grafici: la concentrazione media di ozono ricostruita per il trentennio 1961-1990 è decisamente inferiore rispetto a quella ricostruita per il periodo 2001-2012; quest'ultima appare molto simile a quella relativa agli scenari prodotti dai modelli ECHAM5 e EGMAM, ma notevolmente più bassa rispetto ai modelli INGV, IPSL e METO_HC.

Oltre al valor medio e alla varianza, un indice particolarmente significativo ai fini della salvaguardia della salute umana, è il numero medio di giorni all'anno in cui si registra il superamento della soglia di informazione ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Anche in questo caso l'intervallo di confidenza aiuta ad individuare tre gruppi di distribuzioni piuttosto distinte tra loro. Il primo è composto dalla sola distribuzione relativa al trentennio passato, per la quale il numero di superamenti simulati, che va da 1.8 a 4.5, è nettamente inferiore a quello prodotto per tutte le altre distribuzioni; il secondo gruppo è invece composto dalla distribuzione ricostruita per il presente e da quelle relative ai modelli ECHAM5 e EGMAM, in quanto osservando complessivamente gli intervalli di confidenza non si registrano differenze particolarmente significative; le distribuzioni ottenute per i modelli INGV, IPSL e METO_HC formano infine un gruppo a sè stante, dati i valori decisamente più elevati.

In tabella sono inoltre riportati il 50° e il 95° percentile, per dare un'informazione sulla mediana e sulla coda destra delle distribuzioni.

Un ulteriore test di significatività è stato applicato ai valori medi delle distribuzioni, per verificare statisticamente quanto "diversi" fossero tra loro. Il metodo utile a questo scopo è il *Test t di Student* per campioni indipendenti, che è stato quindi applicato a tutte le coppie di distribuzioni [30].

In tabella 4.2 sono riportati i valori p dei test eseguiti. Il livello di significatività standard utilizzato per rigettare o meno l'ipotesi nulla, ovvero che le medie delle due concentrazioni coincidano, è 0.05. Valori inferiori indicano cioè che va ritenuta vera con più probabilità l'ipotesi alternativa, ovvero che siano significativamente diverse.

Osservando ciò che risulta, e per quanto detto finora, si può concludere che i valori medi delle distribuzioni della concentrazione di ozono relativa i vari casi, sono significativamente diversi fra loro: i valori p sono infatti

quasi tutti estremamente piccoli. Il distacco maggiore, come prevedibile, si osserva tra i valori medi della distribuzione relativa alla concentrazione di ozono ricostruita per il periodo 1961-1990 e quelli delle distribuzioni previste per il trentennio futuro. Valori più elevati, ma sempre nettamente inferiori al livello di significatività, si riscontrano quando sono messi a confronto i risultati dei modelli. L'unico valore p superiore a 0.05 è quello riguardante la coppia di modelli INGV e IPSL, il che suggerisce una piccola differenza tra le medie delle due distribuzioni, come d'altronde si evince dalla tabella 4.1, che può essere ritenuta non significativa.

	RIC 61-90	RIC 01-12	ECHAM5	EGMAM_R1	EGMAM_R2	INGV	IPSL	METO_HC
RIC 61-90	1							
RIC 01-12	$< 10^{-10}$	1						
ECHAM5	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	1					
EGMAM_R1	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	0.047	1				
EGMAM_R2	$< 10^{-10}$	8.910^{-9}	1.810^{-6}	0.0048	1			
INGV	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	0.0088	3.910^{-6}	$< 10^{-10}$	1		
IPSL	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	3.410^{-5}	7.010^{-10}	$< 10^{-10}$	0.13	1	
METO_HC	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	$< 10^{-10}$	1.110^{-9}	3.610^{-6}	1

Tabella 4.2: *p-value* del test di significatività applicato ai valori medi delle distribuzioni.

4.2.1 Il complesso quadro in cui si colloca il modello

Come già anticipato, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è la ricerca della correlazione tra il dato massimo giornaliero di concentrazione di ozono e quello di temperatura, come esempio di legame tra la qualità dell'aria e la meteorologia, per l'elaborazione di uno scenario di ozono.

Nel capitolo introduttivo sono stati illustrati i meccanismi di produzione, trasporto e rimozione di questo inquinante di tipo secondario, con un accenno a quelli che regolano la vita dei suoi precursori, gli ossidi di azoto e i composti organici volatili.

Uno dei requisiti fondamentali affinché abbiano avvio le reazioni per la formazione della molecola di ozono è la presenza dell'irraggiamento solare: è infatti grazie alla radiazione di lunghezza d'onda inferiore ai $430nm$ che avviene la fotolisi della molecola di biossido di azoto e viene liberato l'atomo di ossigeno utile alla formazione di ozono. Il legame con la presenza di radiazione solare porta a pensare che anche la temperatura dell'aria sia fortemente legata alla formazione di ozono, e questo lavoro ha riconfermato un'ipotesi già consolidata.

Sono però tanti altri i fattori che insieme determinano l'andamento della concentrazione di ozono, e per questo motivo uno scenario di concentrazione basato unicamente sulla futura tendenza della temperatura deve essere considerato come un'informazione indicativa.

La principale assunzione alla base del modello creato è che il legame trovato tra i due parametri sui dati osservati si mantenga identico in futuro. Ciò che viene quindi tralasciato è l'insieme di meccanismi che il cambiamento climatico potrebbe mettere in atto. Sono infatti svariati i *feedback* che questo avrebbe sulla composizione atmosferica in generale, per l'alterazione ad esempio dei processi di trasporto (vento, convezione, proprietà di rimescola-

mento del PBL, scambi tra troposfera e stratosfera), di rimozione (frequenza e quantità di precipitazioni, proprietà del terreno), e di emissione (biogenica o antropogenica) [31].

Per quanto riguarda l'ozono in particolare, i modi in cui il clima e l'ecosistema possono influenzarne la concentrazione sono vari e complessi (figura 4.9). In questo paragrafo verranno illustrati brevemente i principali processi che non sono stati inseriti nel modello previsionale creato per questo lavoro, per dare un'idea di quanto altro ancora andrebbe aggiunto per poter creare uno scenario più verosimile e di quante incertezze siano ancora insite nelle conoscenze attuali.

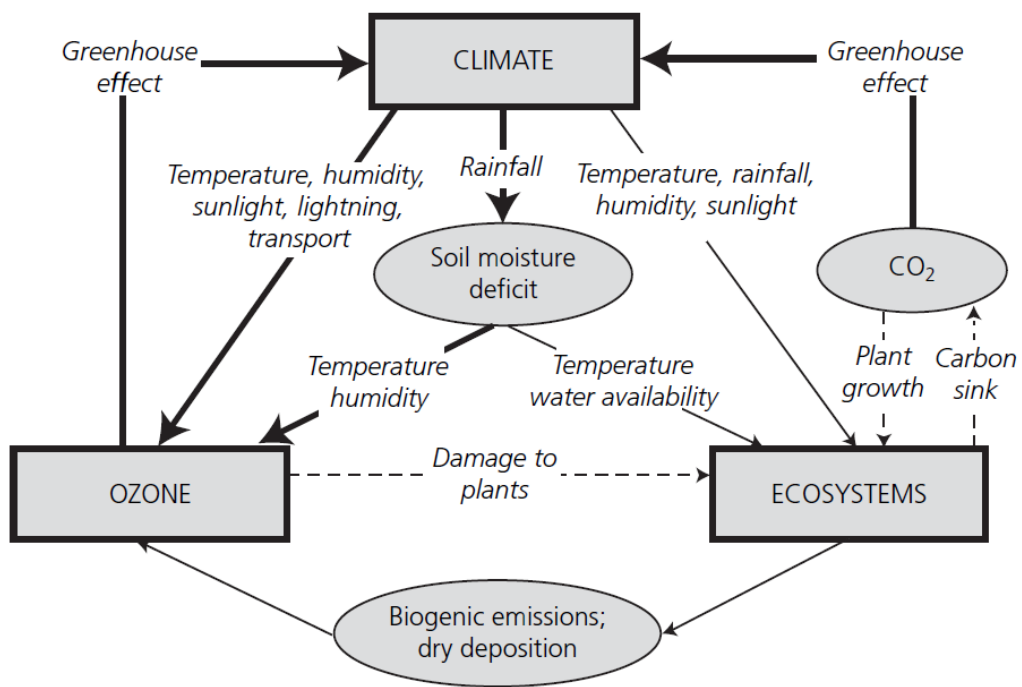


Figura 4.9: Rappresentazione schematica delle interazioni tra clima, ecosistema e ozono troposferico [6].

Effetti della meteorologia e del clima

Temperatura, umidità atmosferica e irraggiamento influenzano i livelli di ozono grazie al controllo che questi parametri esercitano sui processi fotochimici.

Il legame tra la temperatura e la concentrazione di ozono è stato ampiamente trattato in questo lavoro. Ciò che è necessario aggiungere è che, oltre ad accelerare di norma la produzione di ozono, temperature più elevate aumentano l'emissione di VOC biogenici, specialmente in estate, portando così ad un aumento della concentrazione di ozono nelle regioni ad elevata concentrazione di NO_x . Il vapore acqueo gioca un ruolo importante nella fotolisi della molecola di ozono che porta alla produzione di OH , a sua volta coinvolto nelle varie reazioni; l'umidità assoluta è quindi determinante per il livello di ozono in troposfera, e le attese variazioni di umidità atmosferica associate al riscaldamento globale avranno probabilmente un complesso *feedback* sulla concentrazione di ozono, portandola probabilmente ad un calo. Recenti studi riconoscono nell'umidità un importante *feedback* negativo sulla concentrazione di ozono.

Al contrario della temperatura, il potenziale cambiamento della quantità e della distribuzione delle precipitazioni è invece molto meno certo. Un'eventuale diminuzione di precipitazioni, previsto ad esempio per l'Europa meridionale, potrebbe alterare i meccanismi di rimozione, e il conseguente aumento del livello di irraggiamento solare potrebbe contribuire ad incentivare la produzione fotochimica di ozono. L'esaurimento delle riserve d'acqua nel suolo sarebbe determinante inoltre per la risposta che avrebbe la vegetazione e per i conseguenti effetti sulle emissioni biogeniche. La siccità potrebbe infine portare ad un aumento nella frequenza degli incendi e quindi nelle emissioni di NO_x , CO e $nmVOC$, con ancora un impatto sulla concentrazione di ozono. I cambiamenti nelle precipitazioni sono quindi un fattore determinante per

capire la possibile evoluzione della concentrazione di ozono in un clima modificato, ma resta per ora una delle principali fonti di incertezza delle proiezioni a livello regionale.

Anche il controllo del clima sul trasporto a lungo raggio (LRT) degli inquinanti è importante per definire i livelli di ozono. La misura in cui il cambiamento climatico potrà alterare i venti associati ai sistemi meteorologici e le correnti a getto resta incerta, lasciando aperta la possibilità che aumentino le traiettorie che attraversano aree con abbondanti emissioni di precursori di ozono.

Da non sottovalutare anche l'importanza della stratosfera come sorgente di ozono, grazie ai meccanismi di scambio con la troposfera. Questi sono regolati dalla circolazione Brewer-Dobson, un lento movimento circolare verticale caratterizzato da moto ascendente all'equatore e discendente al polo dell'emisfero invernale, e da alcuni cicloni particolarmente intensi che sono in grado di richiamare aria stratosferica in troposfera (*tropopause folding*). Quasi tutti i modelli climatici globali prevedono un aumento dei flussi di ozono dalla stratosfera a seguito del cambiamento climatico, dovuto ad un irrobustimento della circolazione di Brewer-Dobson e ad un raffreddamento della bassa stratosfera che rallenterebbe la distruzione di ozono. Questo porterebbe ad un aumento della concentrazione di ozono principalmente alle medie e alte latitudini.

Alcuni di questi processi sono ben noti e ben rappresentati nei modelli che accoppiano il clima e la chimica atmosferica; quelli che invece coinvolgono la biosfera, incluse le emissioni biogeniche e la deposizione secca, sono meno conosciuti e più difficilmente rappresentabili, ma possono essere altrettanto significativi.

La presenza di vegetazione ha un ruolo fondamentale nella determinazione

del livello di ozono al suolo, in quanto responsabile del principale meccanismo di rimozione sulla superficie terrestre o marina, la deposizione secca. Nell'ambiente terrestre, in cui il tasso di deposizione è maggiore, il processo avviene come risultato delle reazioni che avvengono sulle superfici esterne di vegetazione e suolo; il meccanismo dipende dall'apertura e chiusura degli stomi (legate alla risposta della pianta alla luce, alla temperatura, all'umidità e alla concentrazione di CO_2), dalla velocità del vento, dalla turbolenza e dalla presenza di acqua sulle superfici. In condizioni secche, la chiusura degli stomi per l'auto protezione dall'essiccazione riduce la deposizione secca, aumentando quindi la concentrazione di ozono a livello del suolo.

Il tipo di vegetazione determina invece l'emissione di *VOC* biogenici in atmosfera, in particolar modo di isoprene, il più importante precursore naturale dell'ozono, dato il maggiore tasso di emissione e l'elevata reattività con *OH*. Alcuni studi hanno dimostrato come la temperatura influenzi fortemente l'emissione di isoprene; pertanto il cambiamento delle condizioni climatiche previsto potrebbe aumentarne significativamente il tasso. In aggiunta alla temperatura, altri fattori influiscono sull'emissione di questo composto: i cambiamenti di copertura del suolo per esempio, sia dovuti a cause naturali che ad attività antropiche, possono farla aumentare o calare, a seconda della natura della nuova copertura del suolo. Altri studi hanno inoltre indagato sul cambiamento del tasso di emissione al variare della concentrazione di CO_2 nell'aria, senza però evidenziare effetti nettamente positivi o negativi. Il livello di incertezza nella stima del tasso di emissioni di isoprene è quindi molto elevato, e la potenziale importanza dei fattori citati non è ancora sufficientemente ben rappresentata nei modelli.

Anche la variabilità climatica su scale temporali interannuali può avere un'influenza sostanziale sui livelli di ozono, incidendo sulla produzione, sullo

scambio stratosfera-troposfera e sul trasporto a lungo raggio. Vari studi sono stati rivolti all'indagine su come i cambiamenti climatici possono influenzare questa variabilità e su quali sarebbero le implicazioni sulla concentrazione di ozono a scala regionale. La scarsità di prove finora raccolte fa sì che fenomeni climatici come ENSO (*El Nino Southern Oscillation*), che sembra avere una stretta relazione con gli scambi stratosfera-troposfera, e la NAO (*North Atlantic Oscillation*, che potrebbe invece influenzare il trasporto a lungo raggio degli inquinanti, non siano ancora inclusi nell'elaborazione di proiezioni di ozono.

Quanto illustrato finora giustifica il fatto che è tuttora poco chiaro quale sia il *feedback* climatico dominante sulla concentrazione di ozono a livello globale. Troppi processi entrano in gioco quando si considera l'interazione tra il clima e l'ozono, senza contare il possibile impatto che potrebbe avere a sua volta l'ozono, in quanto gas serra, sul cambiamento climatico, rendendo ancora più complicato il bilancio dei vari *feedback*. Le proiezioni future elaborate utilizzando i modelli più dettagliati esistenti al momento sono quindi inevitabilmente accompagnate da numerose incertezze, dovute alla tuttora limitata conoscenza di molti processi naturali e dalla non capacità di rappresentare sufficientemente bene tutti i tasselli che andrebbero considerati.

L'indicazione per la fine del ventunesimo secolo, che proviene dalla maggior parte dei modelli globali più dettagliati, descrive un impatto diversificato del cambiamento climatico sulla concentrazione di ozono: mentre sugli oceani ci si aspetta un calo di ozono, soprattutto ai tropici, sulla terra è previsto un aumento, in particolare nelle zone in cui le emissioni di ossidi di azoto rimarranno elevate; un'ulteriore conseguenza del cambiamento climatico sarà l'aumento del trasferimento di ozono dalla stratosfera alla troposfera [6].

Future emissioni antropogeniche

E' evidente che per una valutazione della futura concentrazione di ozono troposferico occorre inserire all'interno dei modelli previsionali informazioni sulle emissioni antropogeniche di precursori. La crescita demografica, lo sviluppo economico, il progresso tecnologico, le politiche di controllo, il cambiamento di utilizzo del suolo...sono fattori che ci si aspetta provochino un cambiamento significativo nell'emissione delle specie precursori.

In questo lavoro, l'indicazione su come queste forzanti incideranno in futuro è contenuta nello scenario A1B, sulla base del quale è stata creata la proiezione di cambiamento di temperatura (capitolo 3). Qui, come negli altri scenari elaborati dall'IPCC, si presta però particolare attenzione sulle emissioni di gas serra, dando invece poco peso ai precursori dell'ozono. Sarebbe quindi necessario affiancare allo scenario A1B un nuovo scenario, elaborato appositamente per tener conto dei possibili contributi che apporteranno specie come CO , NO_x e CH_4 alla futura concentrazione di ozono.

Conclusioni

La letteratura nell'ambito della ricerca sui cambiamenti del clima e della composizione atmosferica e sulle conseguenze che questi potranno portare, è ampia e svariata. La preparazione di questo lavoro di tesi, e quindi la consultazione di lavori precedenti, spesso di rilievo internazionale, ha evidenziato una quantità enorme di dati, di ipotesi, di dubbi e di domande ancora in sospeso. La spiegazione di una tale varietà di problemi che sembrano tuttora molto lontani dall'essere risolti, sta nella complessità insita in tutto quello che compone il sistema Terra-Atmosfera. Da questa complessità deriva quindi la contraddittorietà che spesso si riscontra nei risultati.

Il paragrafo finale dell'ultimo capitolo è stato scritto con l'obiettivo non di vanificare il senso di questo lavoro, bensì di far riflettere su come il fatto di mettere insieme tanti dettagli, fonti di altrettante incertezze, possa portare appunto a un quadro di possibili risultati talmente ampio da ridurne la significatività.

La scelta di considerare la sola temperatura come fattore da cui far dipendere la concentrazione di ozono deriva comunque dalla convinzione, dimostrata, che questa variabile meteorologica giochi in ogni caso un ruolo fondamentale.

L'esistenza della forte correlazione trovata tra i due parametri esaminando i dati osservati, ha motivato la prosecuzione del lavoro verso la creazione di un

modello probabilistico che elaborasse scenari di concentrazione di ozono sulla base di quelli di temperatura ricavati, col metodo di downscaling statistico, da alcuni modelli globali.

La prima valutazione su quanto previsto per il trentennio 2021-2050 è stata fatta, appunto, sull'evoluzione della temperatura: le anomalie stagionali previste per il punto di griglia di San Secondo Parmense sono state messe a confronto con l'anomalia già registrata negli ultimi anni rispetto ai dati simulati del trentennio di riferimento 1961-1990.

Ciò che risulta dal grafico che mostra le varie pdf delle anomalie, è una ormai maggiore somiglianza della situazione presente a quella futura piuttosto che a quella passata. Questo risultato, estendibile quanto meno alla regione Emilia Romagna, porta a concludere che il cambiamento di temperatura massima previsto da alcuni modelli, come i tedeschi ECHAM5 e EGMAM, si è già verificato, e quello previsto dai restanti considerati è già a metà strada dal possibile compimento. Il ventaglio entro il quale la temperatura probabilmente evolverà va quindi da un cambio quasi nullo ad un aumento da 1 a 3°C.

La seconda valutazione, la più rilevante ai fini di questo lavoro, è stata invece fatta sul cambiamento dei valori massimi giornalieri di ozono previsto, dal modello elaborato, per il prossimo trentennio climatologico nella zona del parmense considerata.

Il modello, ispirato al metodo di campionamento casuale stratificato, è stato sottoposto a validazione e poi applicato ai tre diversi dataset di temperatura: quello di San Pancrazio contenente i dati osservati dal 2001 al 2012, e quelli relativi a San Secondo Parmense, con i dati provenienti da interpolazione per i periodi 1961-1990 e 2021-2050. In questo modo sono state ottenute, per i vari set di dati di temperatura, le diverse distribuzioni dei

valori di concentrazione di ozono, che sono state analizzate e confrontate da un punto di vista statistico.

L'informazione apparsa subito più lampante alla vista delle curve di distribuzione è evidentemente riconducibile a quanto trovato per la temperatura: la situazione attuale dell'inquinamento da ozono a Cittadella è decisamente più critica rispetto a quella che il modello ha ricostruito, sulla base dei dati di temperatura, per il trentennio 1961-1990, quando la misurazione di questo inquinante non era ancora in atto. Questo primo confronto ha permesso di valutare in modo più significativo il successivo, quello tra la situazione degli ultimi anni e quella prevista applicando il modello agli scenari di temperatura per il 2021-2050. Il presente è paragonabile ad un limite inferiore del range di distribuzione di concentrazione previsto dal set di proiezioni: ciò significa che l'aumento di concentrazione che sarebbe dovuto verificarsi non prima di un altro decennio è ormai in atto, quantomeno secondo le proiezioni di temperatura dei modelli più ottimisti. Le distribuzioni provenienti dall'applicazione del modello a GCM quali INGV, IPSL e METO_HC hanno caratteristiche ancora significativamente diverse da quelle della distribuzione attuale.

Quello che potrà succedere a livello di inquinamento da ozono nel prossimo trentennio climatologico in Emilia Romagna dipende quindi da quale dei modelli si rivelerà il più veritiero: vanno infatti lasciate aperte le possibilità che tutto possa rimanere all'incirca allo stato attuale o che un ulteriore aumento di concentrazione di ozono si verificherà, andando ad aggravare una situazione già critica.

Appendice A

L'ozono in Europa

La zona oggetto di questo lavoro di tesi è stata selezionata in modo da risultare rappresentativa di buona parte della regione Emilia Romagna. Resta comunque un'area piuttosto limitata se osservata all'interno di un quadro più ampio come quello continentale. In questa appendice verrà illustrata brevemente la situazione europea relativamente ai trend di ozono e dei suoi precursori osservati negli ultimi anni.

Attualmente i livelli di concentrazione di ozono in Europa sono tre volte maggiori di quelli relativi all'era pre-industriale: ciò deriva verosimilmente dall'aumento di emissioni in atmosfera dei suoi precursori, NO_x e VOC , verificatosi dall'inizio del ventesimo secolo. A partire dal 1990 si è però registrato un calo di tali emissioni pari a circa il 30 %, principalmente dovuto alle operazioni messe in atto per raggiungere gli obiettivi sanciti dalle direttive europee per ridurre l'inquinamento dell'aria. Nonostante questo, un paragonabile calo delle concentrazioni di ozono non si è verificato, e ciò può essere giustificato con la complessità dei processi chimici di formazione dell'ozono nonché dei legami con le condizioni climatiche, il tutto illustrato nel capitolo precedente.

A.1 I precursori dell'ozono

L'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) offre un'ampia gamma di valutazioni che analizzano lo stato dell'ambiente e il suo andamento nei 38 paesi europei, adempiendo al mandato di aiutare la Comunità e i 32 Paesi membri a prendere decisioni fondate in merito al miglioramento dell'ambiente, integrando considerazioni di carattere ambientale nelle politiche economiche [32].

La figura A.1 dimostra come effettivamente nei Paesi UE le emissioni degli inquinanti primari responsabili della formazione di ozono troposferico siano state ridotte in modo significativo tra il 1990 e il 2010, grazie soprattutto all'attuazione di disposizioni come ad esempio la Direttiva NECD ¹ e il Protocollo di Gothenburg ².

¹La direttiva NECD (National Emission Ceilings Directive), entrata in vigore nella Comunità Europea nel 2001. La NECD ha fissato i limiti di emissione per quattro importanti inquinanti atmosferici (NO_x , $NMVOCS$, diossido di zolfo (SO_2) e ammoniaca (NO_3)) da raggiungere entro il 2010, con lo scopo di perfezionare la protezione dell'ambiente e della salute umana dai rischi ai quali l'acidificazione, l'eutrofizzazione e i livelli di ozono al suolo, li sottopongono.

²Il Protocollo di Gothenburg, presentato nel 1999 alla convention dell'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) sul trasporto a lungo raggio degli inquinanti (LRTAP). L'ultimo aggiornamento del Protocollo risale alla trentesima sessione della convention LRTAP tenutasi a Ginevra nel mese di maggio 2012. L'accordo internazionale raggiunto dall'Unione Europea definisce obiettivi ancora più ambiziosi rispetto a quelli fissati precedentemente sulle emissioni dei principali inquinanti da monitorare, tra i quali è stato per la prima volta incluso il black carbon.

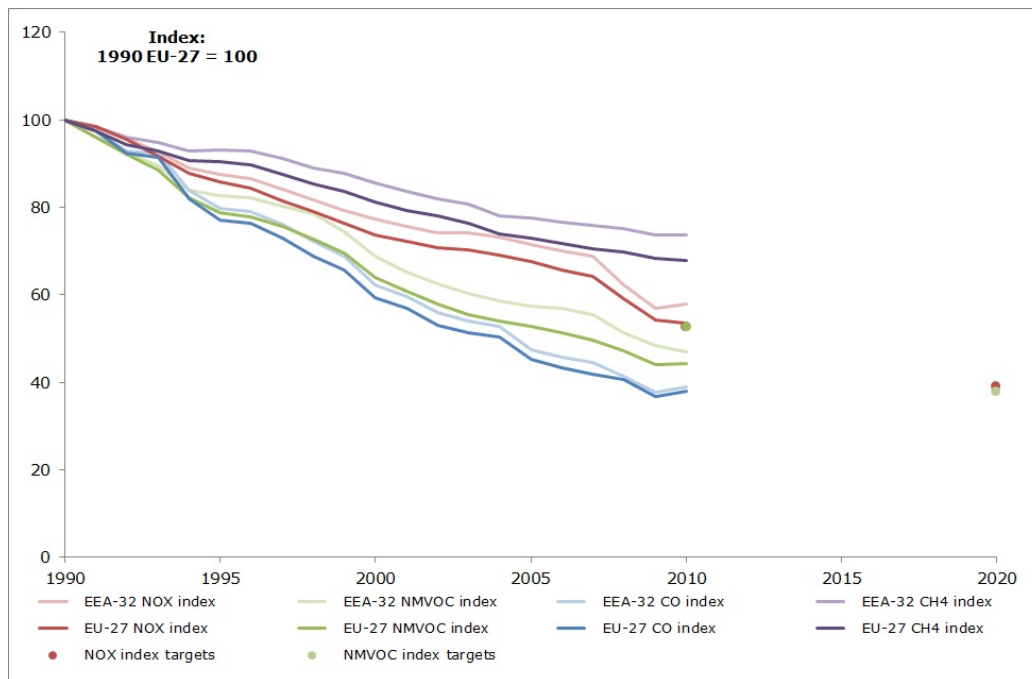


Figura A.1: Trend delle emissioni di NO_x , $NMVOC$, CO e CH_4 dal 1990 al 2010, nei Paesi EEA-32 e EU-27. Sono inoltre mostrati i limiti delle emissioni di NO_x e $NMVOC$ fissati per gli EU-27 da raggiungere entro il 2020 [33], [34].

A.2 Evoluzione dell'ozono in Europa

Nonostante i Paesi europei abbiano significativamente ridotto le emissioni antropogeniche dei precursori dell'ozono, le misure effettuate in aree sia urbane che rurali del continente non mostrano il trend calante che ci si sarebbe aspettati di osservare per la concentrazione di ozono a livello del suolo.

In questa sezione verranno illustrate alcune informazioni tratte dal database AirBase dell' EEA relativamente all'andamento delle concentrazioni di ozono in Europa dal 1997 al 2010, per poi poter valutare i dati dell'estate 2012 in un'ottica più ampia [35], [36].

A.2.1 Trend di inquinamento estivo da ozono in Europa

Per poter valutare il livello di inquinamento registrato in Europa durante l'estate 2012 è utile innanzi tutto analizzarne l'andamento negli anni precedenti, precisamente tra il 1997 e il 2010, utilizzando il database di qualità dell'aria AirBase dell'EEA. Prima del 1997 la copertura di dati di ozono in Europa era notevolmente inferiore, e pertanto non paragonabile a quella di AirBase. Il continente è stato suddiviso in quattro regioni (Europa settentrionale, Europa nord-occidentale, Europa centrale e orientale, Europa mediterranea), in modo da analizzare le variazioni nei trend di concentrazione di ozono anche in relazione alle differenze climatiche che contraddistinguono le varie zone. Nel grafico di figura A.2 è mostrato il numero medio di superamenti su periodi di un'ora e di otto ore (per ogni stazione che riportasse almeno un superamento), affiancato dai massimi di temperatura giornaliera, mediati sul periodo aprile-settembre per ogni anno, osservati in quattro capitali rappresentative di ognuna delle regioni considerate (Copenaghen, Parigi, Praga e Roma), in modo da dare un'idea della relazione tra le differenze climatiche e la frequenza di superamenti.

Episodi duraturi di alte concentrazioni di ozono su gran parte dell'Europa si sono registrati nel 2003 e nel 2006, mentre negli anni seguenti non sono stati osservati episodi simili. E' utile però sottolineare come la situazione del 2003 sia stata eccezionale sotto molti punti di vista: nella prima metà di agosto le condizioni meteorologiche sono state costantemente caratterizzate da alta pressione su tutta l'area sud-occidentale, accompagnata da temperature eccezionalmente elevate nella maggior parte del continente; a completare il quadro di per sé critico, furono registrate concentrazioni di ozono molto elevate per l'intero periodo.

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale del numero di superamenti

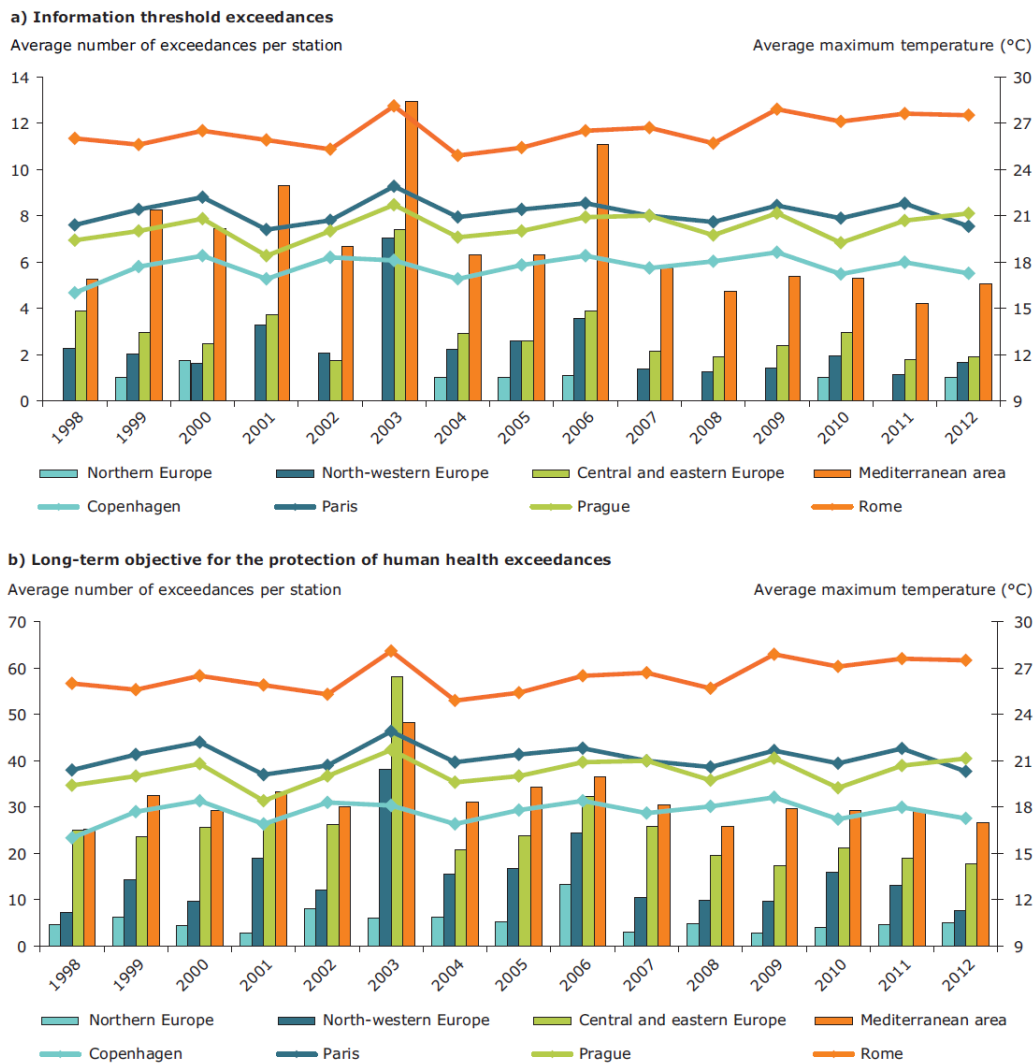


Figura A.2: Media regionale del numero di superamenti estivi per stazione e media dei massimi giornalieri di temperatura nelle quattro città rappresentative [36].

si ha che l'area Mediterranea è sicuramente quella più interessata da valori elevati, mentre numeri minori sono spesso osservati nel nord Europa. Tra il 1999 e il 2002 i superamenti sono stati di numero molto inferiore rispetto al 2003, così come nel 2004 e 2005, per poi subire un nuovo aumento nel 2006;

dal 2007 invece i livelli di ozono sono tornati ai loro valori più bassi e usuali. Dopo un lieve aumento nel 2010, nei due anni seguenti si è osservato un calo di superamenti della soglia di informazione, fino a valori paragonabili a quelli del 2008 e 2009 nella maggior parte del continente.

A.2.2 Inquinamento da ozono nell'estate 2012

In tabella A.1 sono ricordati i valori soglia (IT e AT), a lungo termine (LTO) e di riferimento (TV)³ per la protezione della salute umana, che i Paesi membri sono tenuti a rispettare in accordo con la Direttiva 2008/50/EC datata 11 giugno 2010 che ha sostituito le precedenti indicazioni.

	Level [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Averaging time
Information threshold (IT)	180	1 h
Alert threshold (AT)	240	1 h
Long-term objective (LTO)	120	8 h average, max daily
Target value (TV)	120	8 h average, max daily

Tabella A.1: Valori di riferimento per la protezione della salute umana [Fonti: direttive 2002/3/EC e 2008/50/EC].

Il report elaborato dall'EEA fornisce tabulati, grafici e informazioni geografiche sui superamenti delle soglie durante l'estate 2012, per ognuno dei 27 Paesi membri e per altri 12 Paesi europei, sulla base dei dati riportati da 2107 stazioni di monitoraggio dell'ozono sparse per il continente.

³Il *Target value* consiste nell'obiettivo di non superare la concentrazione di $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ più di 25 giorni all'anno, in una media su tre anni.

Distribuzione geografica dell'inquinamento

La distribuzione spaziale degli eccessi di ozono in Europa è stata trovata essere simile di anno in anno. Nel 2012 i livelli più elevati di ozono sono stati registrati principalmente nel nord Italia e nel sud della Francia; al contrario le aree settentrionale e nord-occidentale del continente non sono quasi state interessate da superamenti delle soglie.

La mappa in figura A.3 mostra il numero di giorni in cui è stata superata la soglia di informazione; la figura A.4 si riferisce invece ai superamenti dell'LTO. Entrambe le mappe, se confrontate con quelle dell'anno precedente, indicano una maggiore estensione dell'area interessata dai superamenti, soprattutto per il crescente impatto della zona più occidentale. In figura A.5 infine è riportata la mappa relativa al numero di giorni in cui il TV è stato superato; l'area interessata da questi superamenti copre gran parte dell'Europa, eccetto i Paesi baltici, l'Europa nord-occidentale e i Paesi balcanici. Come già sottolineato in precedenza, Italia settentrionale e Francia meridionale risultano invece le aree col maggior numero di superamenti dei livelli di ozono consentiti per la salvaguardia della salute umana. Va ricordato che il TV non è rispettato quando la soglia di LTO è superata, in una certa stazione, più di 25 volte all'anno, su una media di tre anni. Il 2010 è il primo dei tre anni che verranno usati per stabilire se i Paesi abbiano sottostato alle regole imposte, ed è l'unico sui cui dati è già stata fatta una completa validazione, al contrario di quelli relativi al 2011 e al 2012; la mappa mostra quindi i risultati di un calcolo indicativo per il triennio 2010-2012.

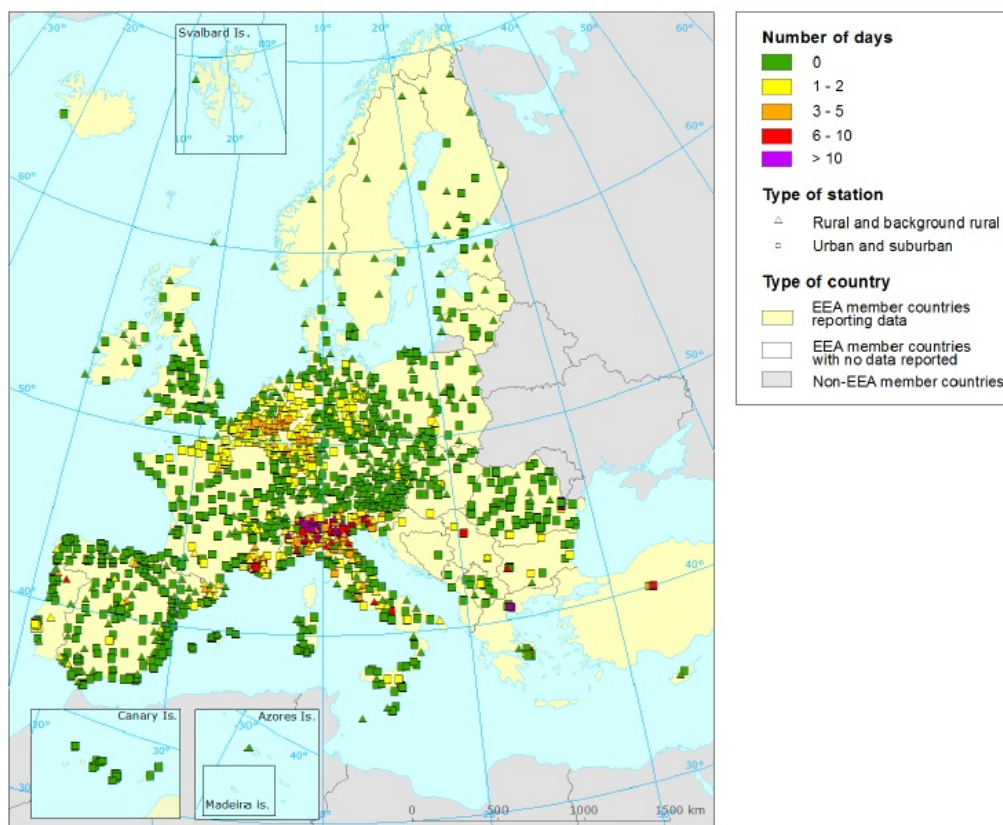


Figura A.3: Numero di giorni in cui la concentrazione di ozono ha superato la soglia di informazione, nell'estate 2012 [36].

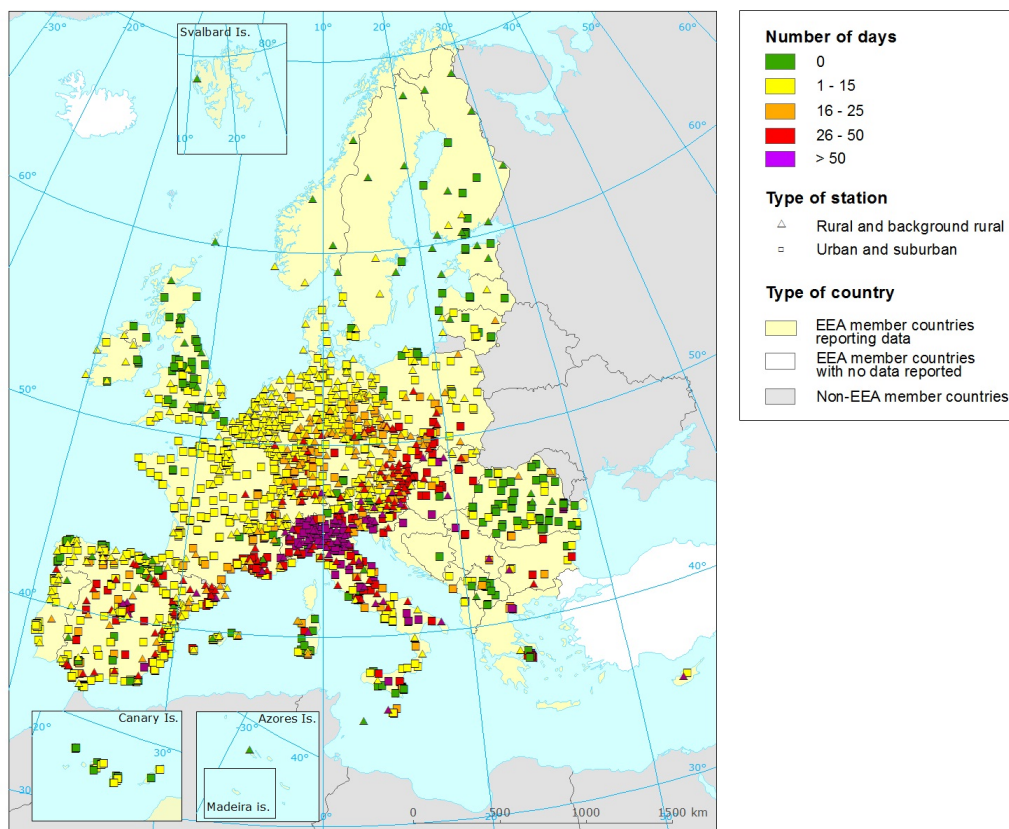


Figura A.4: Numero di giorni in cui la concentrazione di ozono ha superato l'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana, nell'estate 2012 [36].

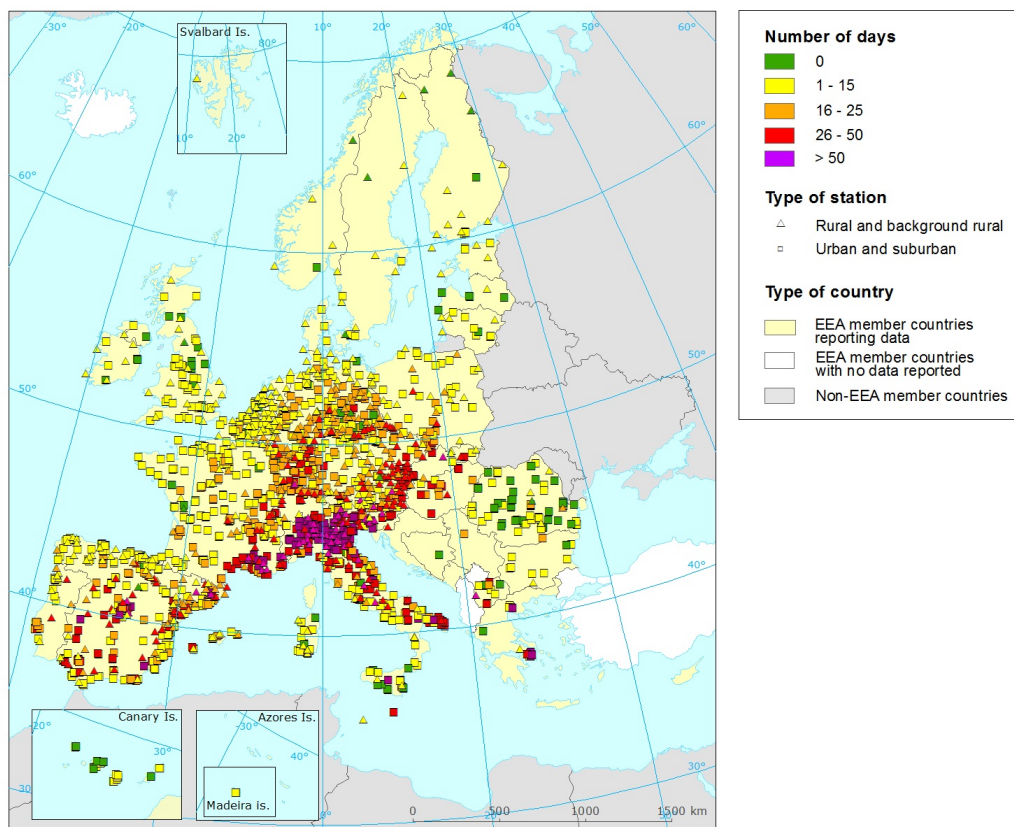


Figura A.5: Calcolo indicativo del TV: numero medio di giorni estivi, nel triennio 2010-2012, in cui la soglia LTO è stata superata [36].

Appendice B

Conseguenze dell'inquinamento da ozono

L'intero lavoro svolto finora è stato condotto con l'obiettivo di dare un'indicazione su quale potrebbe essere l'evoluzione della concentrazione di ozono in troposfera nei prossimi decenni. Ciò che ancora non è stato spiegato è quale sia il motivo della preoccupazione di un eventuale aumento di questo componente atmosferico, ovvero quali siano le conseguenze che l'ozono ha sull'intero sistema e che presumibilmente verrebbero accentuate. In questa appendice verranno quindi illustrati gli ormai risaputi effetti dannosi che l'ozono ha sulla salute umana, sulla vegetazione e sui materiali.

B.1 Stato attuale delle conoscenze

Lo studio degli effetti provocati dall'ozono si colloca all'interno del più generale studio sulle conseguenze dell'inquinamento atmosferico, definito come una complessa miscela data dagli effetti dei singoli inquinanti. Individuare l'esito dell'esposizione a uno solo di questi è un impegno che molti studi inter-

nazionali negli anni si sono assunti. Quantificare l'impatto dell'inquinamento sulla popolazione è infatti estremamente importante per l'applicazione di politiche di controllo adeguate. Per quanto riguarda l'ozono è ormai ben noto come quantità eccessive nell'aria possano causare significativi effetti dannosi alla salute umana e non solo. L'abbondante presenza di ozono nella bassa troposfera, e quindi nell'aria che si respira, può generare disturbi a uomini, animali, vegetazione e materiali, di entità che dipende dalla concentrazione nell'ambiente e dalla durata dell'esposizione.

B.1.1 Effetti sulla salute umana

La valutazione degli effetti dell'ozono sulla salute umana si basa su studi sperimentali o epidemiologici: le misure effettuate vengono poi inserite all'interno di modelli che calcolano un coefficiente di esposizione-risposta.

Per gli studi epidemiologici ci sono inoltre vari fattori che devono essere tenuti in considerazione per interpretare ed estrapolare gli effetti dell'ozono, primo fra tutti la concomitanza con effetti di altri inquinanti o della temperatura.

L'ozono è stato associato ad un ampio spettro di effetti dannosi sulla salute umana, molti dei quali relativi al sistema respiratorio con il quale la molecola entra più facilmente a contatto innescando una serie di complesse interazioni [6]. Data l'alta reattività dell'ozono, si pensa che la molecola non riesca a penetrare sotto la superficie liquida di rivestimento dei polmoni, bensì reagisca con gli antiossidanti che proteggono i polmoni dai danni dell'ossidazione. La conseguenza di tali reazioni è un danneggiamento della barriera protettiva dei polmoni che non riesce più ad essere efficace come dovrebbe.

Gli individui possono reagire in svariati modi all'esposizione all'ozono, in base a fattori come la durata dell'esposizione, l'entità della concentrazione e le caratteristiche specifiche di ogni organismo. Il range di effetti che si possono verificare va da trascurabili danni al tessuto polmonare fino a più gravi sintomi respiratori e ad aggravamento di malattie preesistenti, come asma o altre patologie croniche polmonari, tanto da dover ricorrere al ricovero e a condurre talvolta al decesso. In quest'ultimo caso il danno relativo all'ozono è molto probabilmente una concausa e non un fattore determinante alla morte dell'individuo.

Varie prove ormai identificano nei bambini, negli anziani e negli asmatici i soggetti più probabilmente vulnerabili agli effetti dell'ozono. L'età, una suscettibilità genetica e preesistenti patologie cardiorespiratorie sono infatti fattori chiave per prevedere la risposta dell'organismo all'esposizione a questo inquinante.

Molti studi sono stati fatti sugli effetti dell'esposizione, di breve o lunga durata, a livelli elevati di ozono. Qui di seguito sono illustrati alcuni risultati riportati nell'ambito del progetto REVIHAAP (*Review of evidence on health aspects of air pollution*) della WHO (*World Health Organization*) [37].

Esposizione di breve durata (acuta)

Brevi esposizioni a livelli elevati di ozono possono provocare effetti quali la riduzione delle funzioni polmonari fino al 10-15% (su adulti sani), sintomi respiratori e infiammazioni alle vie respiratorie, che nei casi meno gravi possono rientrare al termine del periodo di esposizione, mentre nei più gravi possono portare al ricovero o addirittura al decesso.

Una grossa complicazione nello studio degli effetti associati a brevi esposizioni sta nella stretta correlazione esistente tra i picchi concentrazione di

ozono e le elevate temperature. Le ondate di calore in particolare sono notoriamente associate ad un aumento della mortalità, e scindere gli effetti sulla salute provocati dall'ozono da quelli derivanti dalla temperatura è assai problematico. Per questo motivo nei modelli statistici viene inserito un termine di correzione per la temperatura, in modo da stimare l'effetto indipendente dell'ozono.

Secondo il report WHO, gli studi che portano più prove sugli effetti a breve termine dell'esposizione all'inquinamento da ozono sono i progetti APHENA (*Air pollution and health: a European and North American approach*), che esamina dati provenienti da 12 città in Canada, 90 negli Stati Uniti e 32 in Europa, e PAPA (*Public health and air pollution in Asia*), che coinvolge 6 grandi città asiatiche [38] [39].

Ciò che risulta da questi studi è, molto in sintesi, una correlazione positiva tra un aumento dei ricoveri e dei decessi (per cause respiratorie e cardiovascolari) di circa mezzo punto percentuale, in relazione ad un aumento della concentrazione massima giornaliera di ozono (dato orario) di $10\mu\text{g}/\text{m}^3$; questa stima rimane stabile anche tenendo in considerazione il contestuale effetto del PM_{10} . Seppur apparentemente piccolo, sono vari gli studi che rilevano questo aumento della suscettibilità a patologie e della mortalità: è un effetto che interessa tutta la popolazione e ha una frequenza non trascurabile durante il periodo estivo.

Esposizione a lungo termine (cronica)

Studi tossicologici eseguiti sugli animali mostrano che l'esposizione cronica all'inquinamento da ozono causa cambiamenti strutturali del tratto respiratorio, e studi di esposizione simulata suggeriscono che una tale esposizione potrebbe avere effetti cumulativi. Non è però ancora chiaro quale sia l'entità

e la durata della concentrazione di ozono necessaria per produrre analoghe conseguenze negli umani.

Gli effetti cronici sull'organismo umano possono essere studiati ad esempio monitorando nel tempo campioni di popolazione esposti e non ad elevate concentrazioni di O_3 , ma anche in questo caso, come per le brevi esposizioni, sono tante le fonti di incertezza per quanto riguarda la percentuale di responsabilità dell'ozono nei possibili effetti riscontrati.

Le prove che una lunga esposizione all'ozono sia associata ad una riduzione irreversibile delle funzioni polmonari sono tuttora inconsistenti; anche le implicazioni cliniche di questa riduzione non sono ancora chiare, in quanto i polmoni hanno una tale capacità che la riduzione non avrebbe probabilmente sintomi, eccezione fatta per i soggetti già affetti da patologie polmonari croniche.

Anche l'asma, una delle malattie respiratorie più diffuse soprattutto tra i bambini, sembra essere acuitizzata da situazioni critiche di inquinamento, compreso quello da ozono, ma in debole misura rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare.

Alcuni studi, eseguiti su vari campioni di persone negli Stati Uniti, hanno infine indagato sul potenziale calo dell'aspettativa di vita in relazione all'inquinamento da ozono, trovando solo una debole correlazione, insufficiente per confermare o rigettare l'ipotesi.

B.1.2 Effetti sulla vegetazione

Le piante sono i recettori più sensibili all'azione tossica dell'ozono: la prima percezione di una problematica ambientale relativa alla presenza di ossidanti atmosferici è infatti legata all'individuazione di anomalie nella vegetazione.

Nelle piante l'ozono segue il medesimo percorso di altri gas, penetrando nelle foglie attraverso gli stomi aperti; in soluzione acquosa, l'ozono rapidamente degrada in diversi derivati attivi dell'ossigeno, quali il perossido di idrogeno (H_2O_2), ed i radicali superossido ($-O_2^-$), e ossidrilico ($-OH$), nonché l'ossigeno monoatomico, che sono ritenuti i veri responsabili degli effetti tossici. L'ozono può provocare una grande varietà di sintomi: il colore e la distribuzione delle lesioni variano infatti ampiamente da specie a specie. In generale i sintomi visibili indotti dall'ozono sulle foglie consistono inizialmente in una clorosi diffusa, mentre stadi successivi sono spesso rappresentati dalla comparsa di necrosi puntiformi e da gravi ripercussioni sul metabolismo, specie sintetica.

In agricoltura, le coltivazioni in aree soggette ad elevate concentrazioni di ozono subiscono notevoli riduzioni nella resa dei prodotti. Le specie più sensibili sono risultate essere il tabacco, gli spinaci, l'erba medica, l'avena, l'orzo ed il noce; in queste piante è possibile notare la comparsa dei primi sintomi di sofferenza già a concentrazioni di $0.05 - 0.012 ppm$ di ozono.

Esistono anche indicazioni del contributo negativo dell'ozono al declino delle foreste, dovuto ad una riduzione dell'attività fotosintetica delle piante, principale responsabile della minor produzione di biomassa.

B.1.3 Effetti sui materiali

L'ozono può inoltre causare ingenti danni a materiali e monumenti, con gravi ricadute sul patrimonio artistico e con notevoli danni economici.

C'è una lunga serie di materiali la cui durata viene limitata dall'esposizione a elevate concentrazioni di ozono. Le gomme naturali ed artificiali subiscono in primo luogo uno stiramento dovuto alla rottura dei doppi legami delle catene polimeriche ed in seguito la frattura; la velocità di corrosione

all'aria di materiali metallici, quali rame e argento, risulta incrementata, sia a causa di un'azione diretta dell'ozono, ma soprattutto indiretta, tramite l'azione ossidante dell'ozono su altre specie che a loro volta possono agire direttamente sui materiali dando luogo a fenomeni di corrosione.

Anche alcune fibre tessili, sia naturali che sintetiche, sono sensibili all'attacco dell'ozono, come il cotone, il nylon, l'acrilico e il poliestere; gli effetti sono particolarmente accentuati in caso di alta umidità relativa, e generalmente risultano in un deterioramento delle proprietà meccaniche a causa di processi di depolimerizzazione e di idrolisi. Particolare attenzione è da rivolgere a quelle fibre tessili che vengono impiegate per la fabbricazione di manufatti utilizzati generalmente all'esterno, e per i quali è previsto un tempo di impiego sufficientemente lungo, come vele, tende, bandiere e tappezzerie; in questi casi l'attacco dell'ozono può diventare un problema, pertanto vengono comunemente utilizzate tecniche di protezione impregnando le fibre di resine acriliche o viniliche. Anche una certa riduzione del tempo di vita delle vernici sembra essere associato all'azione ossidante dell'ozono, con l'effetto combinato di ossigeno e luce ultravioletta.

Gli oggetti di valore storico e culturale che sono esposti agli agenti atmosferici sono relativamente insensibili all'attacco diretto da parte dell'ozono; il contributo dell'ozono alla degradazione di questi beni è indiretto ed essenzialmente da imputare al suo contributo nell'ossidazione di SO_2 a SO_3 e quindi nella formazione di acido solforico, uno dei processi che concorrono al fenomeno delle piogge acide, con tutte le sue conseguenze.

B.2 Possibile evoluzione futura

E' già stato ampiamente illustrato nei capitoli precedenti quanto l'ozono sia un inquinante strettamente legato al clima. Così come questo lavoro di tesi, anche tanti altri studi ipotizzano con buona probabilità che al cambiamento climatico sarà associato un aumento della concentrazione di ozono troposferico, legato in buona parte all'aumento di temperatura previsto. Immaginare quali potrebbero essere gli effetti di un acutizzarsi della situazione di inquinamento da ozono attuale è molto difficile, data soprattutto la quantità di fattori che entrerebbero in gioco in una tale stima e le relative incertezze.

Un esempio di studio elaborato per valutare le conseguenze sulla salute umana del cambiamento climatico nei suoi vari aspetti è illustrato nel report *Health Effects of Climate Change in the UK 2012*. In questo lavoro di ricerca, che utilizza un modello ad alta risoluzione spaziale, EMEP4UK, che copre il Regno Unito con un passo di griglia di 5 Km, vengono prodotte tre diverse simulazioni della concentrazione di ozono prevista per il 2030 per ognuno dei tre scenari emissivi considerati, appartenenti alle famiglie A2 e B2. Gli impatti sulla salute della popolazione sono stati calcolati per 12 regioni sparse per il Regno Unito. Gli elementi dell'indagine sono i decessi e i ricoveri prematuri imputabili all'ozono, che risultano soggetti ad aumento di vari punti percentuali, qualunque scenario venga preso in considerazione [40].

Ringraziamenti

Che sensazione strana essere arrivata in fondo.

Finalmente, mi viene da dire.

Ho aspettato tanto l'arrivo di questo momento, perchè non c'è nulla di più conclusivo dei ringraziamenti.

Vengono alla fine di un lungo percorso, vengono dopo le tante lezioni seguite, le tante ore passate a studiare, le tante ansie per i tanti esami...vengono alla fine di una tesi, il mio primo vero lavoro...e vengono giusto un pochino prima di una proclamazione che sancirà la fine ufficiale della mia vita universitaria, che però sento già arrivata.

Per la laurea triennale li avevo dimenticati, non avevo ringraziato nessuno...sicuramente non perchè non ci fossero persone a cui un grazie l'avrei dovuto, ma solo perchè non era ancora la fine.

Rimedierò adesso, al termine di questi anni che si sono rivelati intensi e faticosi, ma che proprio per questo mi riempiono di soddisfazione.

Non me ne voglia nessuno se prima di tutto desidero dedicare il mio grazie più sincero e potente alle due persone più importanti della mia vita.

E' a voi, babbo e mamma, che regalo la gioia che oggi provo per aver raggiunto questo successo.

Semplicemente per esserci, sempre.

E semplicemente per essere proprio voi.

E ora tanti, tanti, tanti grazie a tutti coloro che, in un modo o nell'altro, mi hanno accompagnata fin qui.

Grazie al professor Ennio Tosi, per aver accettato di seguirmi nel mio lavoro dandomi tanti preziosi consigli, e grazie al direttore del Servizio Idro-Meteo-Clima di ARPA Emilia Romagna, Carlo Cacciamani, e al Dirigente Responsabile di CTR Qualità dell'Aria, Marco Deserti, per avermi permesso di svolgerlo insieme al loro gruppo.

Grazie a tutti coloro che ho conosciuto durante questo percorso, perchè un po' alla volta mi hanno fatta sentire una di loro.

Un grazie enorme in particolare a Giovanni e Rodica. Grazie per la competenza, la disponibilità e la pazienza con cui mi avete sempre aiutata.

Grazie a quelle mura, grazie ad "Irnerio" e "Berti Pichat", grazie alle alette piccole, ai corridoi un po' tristi, alle lezioni del tardo pomeriggio che non finivano mai...è buffo come tutto mi dia nostalgia ora che è finito.

E come non ringraziare i miei compagni di studio, di banco, di chiacchiere e risate...i momenti con voi, Gabri e Massimo, saranno i ricordi più piacevoli degli ultimi tre anni di università.

Se tutto è andato sempre così bene lo devo anche a voi, zia Vilma e zia Anna, e a te, Alberto. Grazie per avermi dedicato i vostri pensieri più speciali ad ogni esame e grazie per riempirmi sempre di tanto prezioso affetto.

Mando poi un altro grazie, che voli lontano e attraversi l'oceano, per raggiungere l'altra metà della mia piccola famiglia. Grazie tio e tia, grazie primos e primitos...non avervi qui vicino non vi ha comunque mai resi lontani.

E un pensiero lo voglio dedicare anche a chi, purtroppo, negli ultimi anni è vissuto solo dentro di me. So che anche in questo giorno mi avresti sorriso con quegli occhioni azzurri, fiera di me, ripetendomi ancora una volta "*gente allegra il ciel l'aiuta*"...e quindi grazie anche a te, nonna.

Grazie alle mie amiche di sempre. Grazie, Vero e Greta, per essere le sorelle che non ho avuto, e grazie a voi, Fede, Michi, Vale e Vic. Grazie a tutte, perchè ci siete sempre state, e perchè non ho dubbi che sempre ci sarete.

E ora grazie a te, Alessio, perchè sei stato il mio regalo più bello.

Sei la mia energia, il mio sorriso e il pensiero più dolce di ogni mia giornata.

Infine, ancora una volta, grazie a voi.

Grazie, grazie, grazie.

Alla mia mamma e al mio babbo.

Bibliografia

- [1] Arpa, Regione Emilia-Romagna, *La qualità dell'aria in Emilia-Romagna, edizione 2013*, 2013
- [2] A. Buzzi, S. Tibaldi, *Cyclogenesis in the lee of the Alps: a case study*, Quart. J. R. Met. Soci. , 104, pp 271-287, 1978
- [3] Arpa Servizio Idro-Meteo-Clima, Regione Emilia-Romagna, *Atlante idroclimatico dell'Emilia-Romagna 1961-2008*, Edizione 2010
- [4] S. Cattani, M. Deserti, F. Fortezza, V. Poluzzi, *Ozono troposferico: stato delle conoscenze*
- [5] V. Poluzzi, M. Deserti, S. Fuzzi, *Ozono e Smog fotochimico*, 1998
- [6] The Royal Society, *Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications*, 2008, Science Policy Report 15/08
- [7] Regione Emilia-Romagna, Direzione Generale Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa, *Zonizzazione della regione Emilia-Romagna*, 2011
- [8] G. Bonafè, E. Minguzzi, A. Morgillo, *Come cambia l'aria. L'inquinamento dal 2001 a oggi*, 2013, Ecoscienza n.3/2013

- [9] H. T. Hayslett, *Statistics Made Simple*, 1981, Ed. Patrick Murphy, MSc, FIMA, p. 131-139
- [10] European Environment Agency, *Air pollution by ozone in Europe in summer 2003*, EEA Report, No 3/2003
- [11] www.agroscenari.it
- [12] A. Pasini, *I modelli climatici per capire il clima e i cambiamenti*, *Ecoscienza*, No 2/2012
- [13] D. L. Hartmann, *Global Physical Climatology*, Academic Press, 1994, p. 254-257
- [14] K. McGuffie, A. Henderson-Sellers, *A Climate Modelling Primer, Third Edition*, John Wiley and Sons, p. 296, 2005
- [15] R. Somerville et al., *Historical Overview of Climate Change*, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of IPCC*, 2007, Ed. Solomon et al., Cambridge University Press, p. 941-954
- [16] R. Huth, *Statistical downscaling of the daily temperature in Central Europe*, 2002, *J Clim* 15: 1731-1742
- [17] I. Hanssen-Bauer et al., *Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia*, 2005, *Climate Research* 29: 255-268
- [18] F. Giorgi, X. Bi *Updated regional precipitation and temperature changes for the 21st century from ensembles of recent AOGCM simulations*, 2005, *Geophys Res Lett* 32

- [19] Y. Wang et al., *Regional Climate Modeling: Progress, Challenges and Prospects*, 2004, in: *Journal of the Meteorological Society of Japan* p. 1599-1628
- [20] R. Tomozeiu, C. Cacciamani, V. Pavan, A. Morgillo, A. Busuioc, *Climate change scenarios for surface temperature in Emilia-Romagna (Italy) obtained using statistical downscaling models*. 2007, *Theoretical and Applied Climatology*, 90, p. 25-47
- [21] P. Van der Linden, J.F.B. Mitchell, *ENSEMBLES: Climate Change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*, 2009, Met Office Hadley Centre, UK, p. 160
- [22] Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, *Sfide ed opportunità dello sviluppo rurale per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici*, 2011, p. 39-46
- [23] H. von Storch, *Spatial Patterns: EOFs and CCA*, 1995, in: H. von Storch, A. Navarra, *Analysis of climate variability. Application of statistical techniques.*, Springer, p. 227-258
- [24] G. Villani, *Irrigazione e cambiamenti climatici*, 2010, Dottorato di ricerca in Ingegneria Agraria, Università di Bologna
- [25] R. Tomozeiu, G. Agrillo, C. Cacciamani, V. Pavan, *Statistically down-scaled climate change projections of surface temperature over Northern Italy for the periods 2021-2050 and 2070-2099*, 2013, *Natural Hazards*
- [26] N. Nakicenovic et al., *Special Report on Emissions Scenarios*, 2000, Intergovernmental Panel on Climate Change
- [27] IPCC, *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*

- [28] C. W. Richardson, D. A. Wright, *WGEN: a model for generating daily weather variables*, 1984, United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service
- [29] P. G. de Vries, *Sampling Theory for Forest Inventory*, 1986, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, capitolo 2
- [30] F. Crivellari, *Analisi statistica dei dati con R*, 2006, APOGEO srl, capitolo 6
- [31] Air Quality Expert Group, *Air Quality and Climate Change: A UK Perspective*, 2007, Department for the Environment, Food and Rural Affairs, capitolo 3
- [32] www.eea.europa.eu
- [33] *National emissions reported to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention)*, United Nations Economic Commission for Europe (Environment and Human Settlements Division, UNECE), 2012
- [34] *National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism*, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2012
- [35] European Environment Agency, *Air quality in Europe - Report 2012*, EEA Report, No 4/2012
- [36] European Environment Agency, *Air pollution by ozone across Europe during summer 2012*, EEA Report, No 3/2013

- [37] World Health Organization, *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project*, 2013, Regional Office for Europe of the WHO, p. 47-66
- [38] K. Katsouyanni et al., *Air pollution and health: a European and North American approach (APHENA)*, 2009, Boston, Health Effects Institute, Research Report 142
- [39] HEI, *Public health and air pollution in Asia (PAPA): coordinated studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality in two Indian cities*, 2011, Boston, Health Effects Institute, Research Report 157
- [40] S. Vardoulakis, C. Heaviside et al., *Health Effect of Climate Change in the UK 2012*, 2012, Health Protection Agency, Department of Health