

INFLUENZA DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA FREQUENZA DELLE INVERSIONI TERMICHE IN PIANURA PADANA: TREND STORICO E PROIEZIONI

Stefano Caserini¹, Paolo Giani^{1*}, Federico Caspani¹,
Domenico Santoro¹, Carlo Cacciamani², Giovanni Lonati¹

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Milano.

² ARPA Emilia Romagna, Servizio Idro-Meteo-Clima, Bologna.

Sommario – Il lavoro presenta una valutazione delle variazioni della frequenza delle inversioni termiche e degli eventi di stagnazione nel bacino padano nel periodo 1950-2100, unendo l'analisi delle variazioni storiche, ricavate sulla base dei dati osservati nelle stazioni di San Pietro Capofiume e Milano Linate, con i risultati delle proiezioni disponibili per il modello climatico regionale CCLM 4-8-18 sviluppato dal CMCC nell'ambito del progetto Med-CORDEX. La presenza di situazioni di inversione termica dell'atmosfera, particolari condizioni meteorologiche in grado di influenzare pesantemente la capacità dell'atmosfera di disperdere gli inquinanti, è stata valutata con un metodo basato sul confronto tra il gradiente delle temperature fra il suolo e l'altezza geopotenziale a 850hPa ed un coefficiente funzione della pressione superficiale. Il metodo è stato tarato sulla base dei dati dei radiosondaggi della stazione di San Pietro Capofiume nel periodo 1987-2006, e validato su quelli di Milano Linate del periodo 1999-2012. L'analisi ha mostrato un aumento delle inversioni termiche pari a circa 1,2 giorni/anno nella stazione di San Pietro Capofiume nel periodo 1987-2006 e pari a 1,1 giorni/anno nella stazione di Milano Linate per il periodo 1999-2012. Per il futuro, considerando uno scenario ad emissione medio-basse (scenario RCP4.5) si stima un ulteriore aumento della frequenza delle inversioni termiche nel periodo 2010-2100 con un tasso di crescita pari a +1,2 giorni/decennio. In questo scenario, il decennio 2091-2100 sarà caratterizzato da annate con una media di 12 giornate all'anno di inversione termica in più (circa 10%) rispetto alla media 1986-2005, concentrate in particolare modo nel periodo estivo. Nell'ipotesi di uno scenario ad elevate emissioni (scenario RCP8.5), si stima invece un aumento della frequenza delle inversioni termiche più contenuto nel periodo 2010-2100, pari a +0,6 giorni/decennio. Le proiezioni modellistiche indicano che anche gli eventi di stagnazione, giornate caratterizzate da venti moderati e assenza di precipitazioni, sono destinati ad aumentare: per il decennio 2091-2100 è previsto un aumento pari a +13 giorni e +11 giorni rispetto alla media 1986-2005 rispettivamente negli scenari RCP4.5 e RCP8.5.

Parole chiave: Med-CORDEX, profilo termico verticale, inversioni termiche, qualità dell'aria, stabilità atmosferica.

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE FREQUENCY OF LAPSE RATE INVERSION AND STAGNATION EVENTS IN THE PO VALLEY: HISTORICAL TREND AND FUTURE PROJECTIONS

Abstract – This work analyzes the variation of the frequency of occurrence of days characterized by diurnal lapse rate inversion and by air stagnation events in the Po valley between 1950-2090, based on past observations at San Pietro Capofiume and Milano Linate and of future projection according to CCLM 4-8-19 regional climatic model (Med-CORDEX project). Lapse rate inversion, typically occurring during the cold season, strongly limits atmospheric dispersion, thus favoring the stagnation of the pollutants and leading to high-concentration events. For the period from 1987 to 2006, the analysis showed an increase in days characterized by lapse rate inversion approximately estimated in +1,2 days/year according to San Pietro Capofiume data, whereas a +1,1 days/year increase has been observed for Milano Linate data (period 1999-2012). For future estimates, a new model for the prediction of days with lapse rate inversion is presented. The model, based on the comparison of G850 (temperature gradient between ground level and standard geopotential height of 850hPa) and a coefficient dependent on surface pressure, has been developed based on radio sounding data from San Pietro Capofiume between 1987 and 2006 and validated on data from Milano Linate between 1999-2012. For future projections, considering a RCP4.5 medium emission scenario, it is estimated a further increase in frequency of lapse rate inversion in the period from 2010 to 2100 with a grow rate approximately equal to +1,2 days/decade. In this scenario, the years of the 2091-2100 decade will be characterized by an increase of 12 days (approximately 10%) with lapse rate inversion with respect to 1986-2005 average, concentrated especially in the warm period. In a RCP8.5 high-emission scenario it is estimated a lower grow rate of lapse rate inversion, equal to +0,6 days/decade for period from 2010 to 2100. Finally, the projections indicate that the frequency of air stagnation events, days characterized by moderate winds and no rain, is also expected to rise: for the 2091-2100 decade an increase of 13 days and 11 days is estimated with respect to 1986-2005 average, respectively in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

Keywords: Med-CORDEX, atmospheric lapse rate, lapse rate inversion, air quality, atmospheric stability.

* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano. Tel. 02.23996430; E-mail: paolo3.giani@mail.polimi.it.

Ricevuto il 18-01-2016; Correzioni richieste il 10-02-2016; Accettazione finale il 2-03-2016.

1. INTRODUZIONE

La pianura padana è una delle zone più popolate d'Europa ed è anche una delle aree in cui i problemi di inquinamento dell'aria sono fra i più rilevanti a livello europeo (EEA, 2014). Lo stato della qualità dell'aria nelle aree urbane è determinato sia dal peso locale e regionale delle emissioni sia dalle particolari condizioni meteo-climatiche che giocano un ruolo importante nel determinare i livelli osservati dei vari inquinanti. Nonostante le emissioni delle sostanze inquinanti nel periodo 1990-2012 mostrino una tendenza alla diminuzione per via delle riduzioni nel settore industriale e nei trasporti stradali dovuti all'implementazione di varie Direttive europee, la pianura padana è ancora una delle aree italiane in cui il problema dell'inquinamento dell'aria è rilevante; in numerose città si sono superati i limiti normativi relativi al numero di giorni con concentrazioni giornaliere di PM10 superiori a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e il valore limite annuale delle concentrazioni di PM2.5 e di NO₂ (ISPRA, 2014).

Mentre le emissioni medie per abitante e per km² sono in linea o inferiori ai valori di altre aree urbane europee (EEA, 2014), le criticità per la qualità dell'aria, che dipende non solo dalle emissioni di inquinanti ma anche dai meccanismi di dispersione e diffusione dell'atmosfera, sono legate soprattutto alle condizioni meteorologiche spesso sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti (Carbone et al., 2010; Ferrero et al., 2011). Il bacino padano, un'area di circa 46000 km² circondata dalle Alpi, dagli Appennini e dal mar Adriatico, è infatti caratterizzato da una velocità media del vento tra le più basse d'Europa, generalmente compresa tra 2 e 2,5 m/s, con venti particolarmente deboli nei mesi invernali, con valori medi di 1,5 m/s, soprattutto in alcune zone del Piemonte, nell'area di Milano, e nella parte di pianura compresa tra le province di Parma, Reggio Emilia e Modena (Arpa Emilia-Romagna, 2013).

Tra i fenomeni che influenzano la stabilità dell'atmosfera ed impediscono lo sviluppo ed il mantenimento di moti verticali liberi, ci sono le inversioni termiche, particolari situazioni atmosferiche che si verificano in presenza di un gradiente termico verticale positivo (Giuliaci et al., 2010). Tali fenomeni sono in particolar modo caratteristici del periodo invernale, quando l'altezza dello strato limite planetario (PBL) difficilmente supera i 450 m (Biggi et al., 2012), favorendo l'accumulo di inquinanti primari e la formazione di inquinanti secondari (Perrino et al., 2014); proprio nella stagione inver-

nale si registrano in pianura padana, rispetto al resto dell'Italia, i più alti valori di carbonio organico nel particolato atmosferico (Sandrini et al., 2014). Le inversioni termiche sono essenzialmente di due tipi: inversioni al suolo (per effetto dell'irraggiamento) e in quota (per effetto della subsidenza atmosferica). Nelle ore notturne è frequente la formazione di inversioni termiche al suolo (Tomasi, 1967), che possono persistere per l'intera giornata. Durante una tipica giornata invernale, la debole radiazione solare assorbita dal suolo nelle ore diurne riesce a malapena a rimuovere i primi 50-100 metri di inversione, cosicché si determina una tipica situazione caratterizzata da un primo strato adiacente al suolo avente un gradiente termico negativo ed una debole instabilità, sormontato da uno strato nel quale persiste ancora l'inversione termica (Giuliaci et al., 2010). In queste condizioni, che possono permanere anche per diversi giorni consecutivi, la dispersione degli inquinanti emessi a bassa quota è fortemente limitata, così da determinare un marcato aumento delle concentrazioni in prossimità delle sorgenti emissive che spesso interessa tutti i principali centri urbani dell'area.

Un tema che ha riscontrato notevole interesse negli ultimi anni è come il riscaldamento globale potrà influire sui livelli di inquinamento dell'aria. Alcuni studi (Pasini e Cipolletti, 2007; Giulianelli et al., 2014) hanno mostrato come il riscaldamento globale abbia già portato ad una variazione nei parametri diffusivi dell'atmosfera, nonostante la limitata estensione del periodo di valutazione non consenta di individuare una chiara tendenza. Inoltre, Giulianelli et al. (2014) hanno mostrato che dai primi anni '90 ad oggi gli episodi di nebbia (tipicamente associati ad eventi di inversione termica al suolo) sono diminuiti di circa il 50%: la diminuzione degli eventi di nebbia, registrata anche in altre parti del mondo come ad esempio in California (Johnstone e Dawson, 2010) è legata al contemporaneo aumento delle temperature al suolo dovuto al riscaldamento climatico ed alla diminuzione della presenza di nuclei di condensazione in atmosfera (Giulianelli et al., 2014).

Rimane tuttavia difficile la valutazione dell'influenza dei cambiamenti previsti sulla frequenza degli eventi di stagnazione, che sono largamente causati da eventi atmosferici di blocco (come ad esempio anticicloni di blocco). Secondo alcuni studi si instaurerà un clima sempre più caldo e la frequenza di eventi di stagnazione, associati ad una persistente alta pressione, tenderà a diminuire, anche se possono verificarsi aumenti in alcune re-

gioni, con intensità e durate difficili da valutare (Kirtman et al., 2013). Secondo Horton et al. (2012) nell'area mediterranea è previsto un aumento medio dei periodi di stagnazione del 12-25% per fine secolo, con un aumento di giorni con maggiore stabilità, accompagnata anche da una diminuzione dei giorni di pioggia. In pianura padana le precipitazioni invernali ed estive hanno già subito una diminuzione rispetto al clima 1960-1995 e, pur con tutta la cautela legata all'incertezza sui dettagli locali delle simulazioni delle precipitazioni, per il futuro ci si aspetta una progressiva ulteriore riduzione, soprattutto nei mesi estivi (Tomozieu et al., 2002). Inoltre, le variazioni della temperatura e dell'umidità dell'atmosfera legate ai cambiamenti climatici incidono sulle reazioni chimiche che determinano la formazione degli inquinanti secondari (Stocker et al., 2013).

Poiché dunque l'influenza delle variazioni climatiche sulla stabilità atmosferica sembra essere un fattore importante legato alla qualità dell'aria e alla concentrazione di inquinanti accumulati in atmosfera, questo lavoro ha inteso valutare la tendenza storica della frequenza degli episodi di inversione termica diurni e degli eventi di stagnazione in pianura padana e la loro proiezione futura in conseguenza del progressivo riscaldamento globale in atto sul pianeta e nell'area mediterranea. L'attenzione si è concentrata sulle inversioni termiche diurne in quanto queste sono indice di una particolare condizione di stabilità atmosferica e non sono dovute al normale ciclo della radiazione solare fra giorno e notte che porta alla formazione

di strati di inversione poco persistenti tipicamente nelle ore notturne.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Temperature al suolo

I dati di temperatura al suolo sono stati acquisiti per un totale di 41 stazioni meteorologiche gestite dalle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente delle quattro principali regioni della pianura padana (Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna) e per sette stazioni dell'Aeronautica Militare: Bologna Borgo Panigale, Ferrara, Brescia Ghedi, Milano Linate, Padova, Piacenza e Verona Villafranca (Figura 1). L'arco temporale di riferimento è compreso tra il 1985 e il 2013.

Nel periodo 1985-2013 il 90% delle stazioni considerate mostra un aumento delle temperature statisticamente significativo (livello di significatività del 5%) con un aumento della temperatura media del bacino padano, stimato dalla pendenza della retta di regressione delle anomalie delle temperature pari a $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$ (Figura 2); si tratta di una tendenza due volte superiore a quella dell'emisfero nord, pari a $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$, e tre volte superiore a quella media globale, pari a $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$ nel periodo considerato (GISS, 2014).

2.2. Profilo termico verticale

I dati di temperatura in quota sono stati acquisiti per le uniche due stazioni in pianura padana in cui

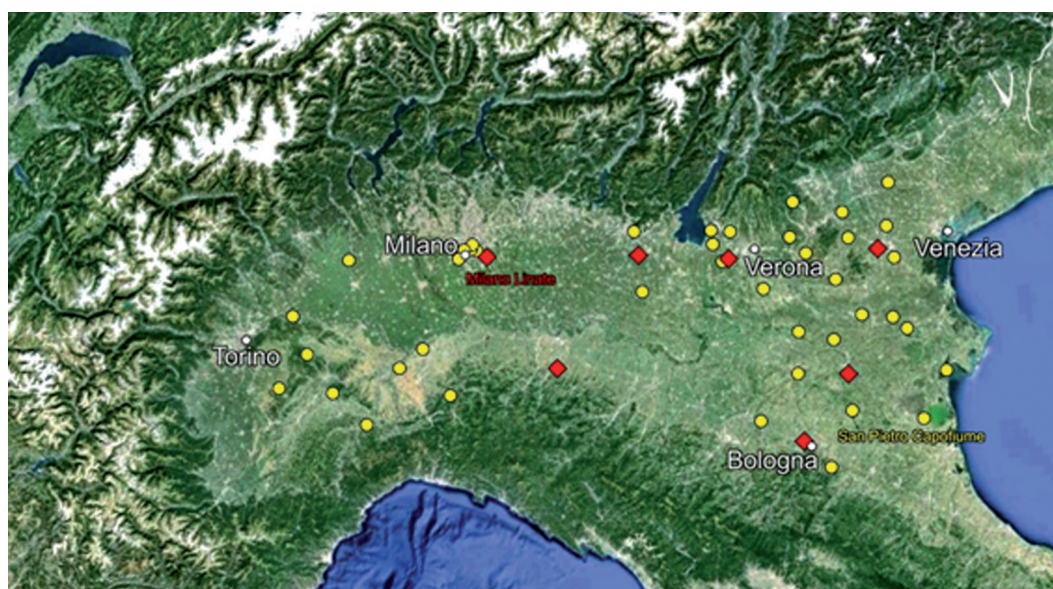


Figura 1 – Posizione delle stazioni delle agenzie ARPA (pallino) e dell'Aeronautica Militare (rombo)

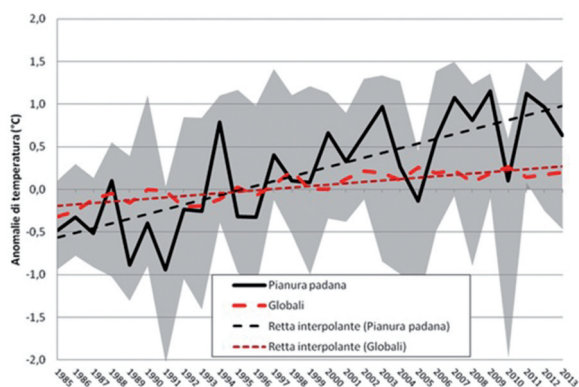


Figura 2 – Confronto tra l'andamento delle anomalie di temperatura rispetto al periodo 1986-2005 in pianura padana e a livello globale nel periodo 1985-2013, e relative rette di interpolazione lineare. L'area grigia rappresenta l'andamento delle anomalie di temperatura delle singole stazioni

si effettuano radiosondaggi dell'atmosfera, San Pietro Capofiume e Milano Linate; queste due stazioni, distanti tra loro circa 200 km, possono essere rispettivamente considerate rappresentative della cosiddetta bassa pianura e dell'alta pianura padana (Figura 1).

La stazione di San Pietro Capofiume, gestita da ARPA Emilia-Romagna, rileva dal 1985 i dati di temperatura, pressione, umidità e velocità del vento in quota tramite radiosondaggi effettuati alle ore 00 e 12 UTC (Coordinated Universal Time). In particolare, è stato possibile ricostruire il gradiente termico verticale tipico dell'atmosfera dell'area di San Pietro Capofiume alle ore 12 UTC sulla base dei dati di temperatura misurati a diversi livelli di pressione, mediamente 6 o 7 nello strato di atmosfera compreso tra il suolo e l'altezza geopotenziale 850 hPa; questi livelli di pressione (chiamati livelli significativi) vengono rilevati quando il sensore registra una significativa variazione in verticale di temperatura.

L'analisi della frequenza delle inversioni termiche alle 12 UTC è effettivamente interessante in quanto a mezzogiorno si colgono solo le inversioni persistenti, dovute a particolari condizioni di stabilità atmosferica, e non quelle dovute alla variazione della radiazione solare fra giorno e notte che porta alla formazione di strati di inversione poco persistenti, tipicamente nelle ore notturne.

Il periodo esaminato va dal 1987 al 2006, poiché solo per questo intervallo di tempo si ha a disposizione un numero di dati validi superiore al 90%. Dal 2007 la stazione di San Pietro Capofiume ha infatti ridotto notevolmente il numero di osserva-

zioni in quota, con una media di giorni all'anno con dati disponibili pari al 20%. Pertanto, i dati a disposizione dal 2007 in poi non possono essere considerati consistenti per lo studio del profilo termico verticale medio, sia mensile sia stagionale, e per la stima del trend della frequenza delle inversioni termiche.

Per la stazione di Milano Linate, gestita dall'Aeronautica Militare, sono disponibili i dati dei radiosondaggi effettuati quotidianamente alle ore 12 UTC nel periodo 1985-2012, che forniscono osservazioni della temperatura misurata a diversi livelli significativi di pressione. Nei radiosondaggi del periodo 1985-1999, il numero medio di livelli significativi nello strato di atmosfera compreso tra suolo e altezza geopotenziale 850 hPa è stato pari a 5 (5,5 nel periodo invernale), minore rispetto a quello nel periodo successivo al 1999 in cui i livelli significativi sono stati mediamente 7 (8 nel periodo invernale).

2.3. Modello CCLM 4-8-19 (Progetto MEDCORDEX)

Il modello regionale CCLM 4-8-19 (per brevità denominato CMCC nel proseguo della trattazione), considerato per valutare il trend della frequenza delle inversioni termiche e degli eventi di stagnazione in pianura padana, è stato sviluppato dal CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) nell'ambito dell'iniziativa MedCORDEX (www.medcordex.eu) che propone, all'interno del più generale programma CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment, <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr>), una serie di modelli regionali ad alta risoluzione. L'obiettivo è quello di simulare il clima dell'area mediterranea tenendo conto delle sue particolari caratteristiche: i numerosi venti regionali (Maestrale, Tramontana, Scirocco, Bora, Meltemi), i fiumi che alimentano il mar Mediterraneo, le molte isole di piccole dimensioni che limitano il flusso d'aria, le importanti catene montuose che caratterizzano l'area (Alpi, Appennini, Balcani, Pirenei) e i litorali fortemente urbanizzati (Ruti et al., 2011). CMCC è un modello di circolazione generale accoppiato atmosfera-oceano con un dominio che copre l'intera regione mediterranea, formato da 6174 maglie (98 in latitudine x 63 in longitudine), ciascuna di circa $0,44^\circ \times 0,44^\circ$, pari a circa $50 \times 50 \text{ km}^2$ (Ruti et al., 2011); la pianura padana è compresa all'interno di 17 maglie, per un totale di 42500 km^2 (Figura 3).

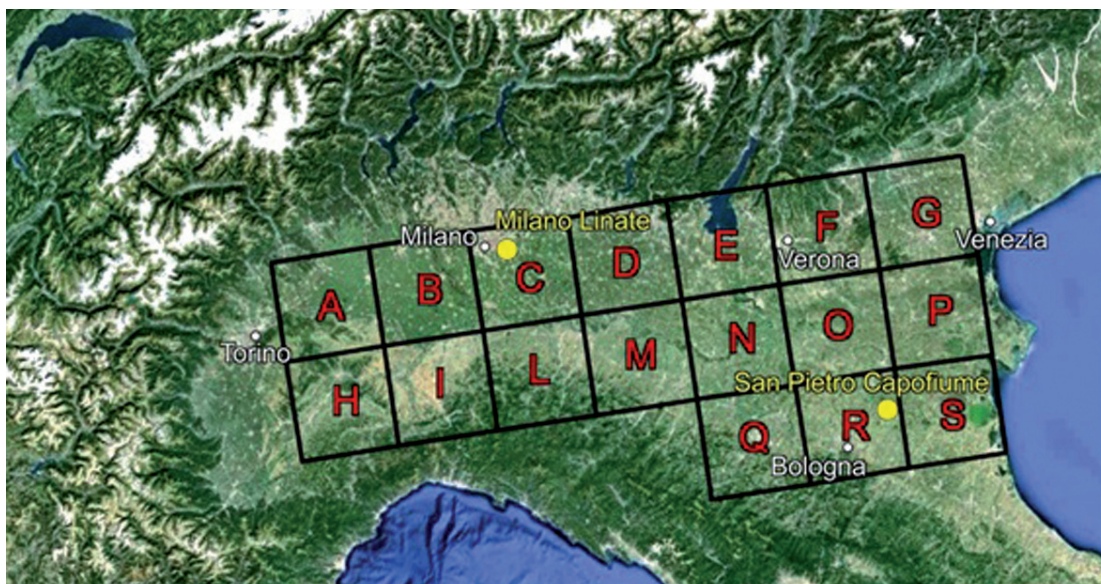


Figura 3 – Area di studio: suddivisione della Pianura Padana nelle 17 maglie del modello CMCC che la comprendono

Il modello fornisce dati sia per la serie storica, dal 1950 al 2005, sia per le proiezioni future, dal 2006 al 2100, per diversi scenari. Nello specifico, le 11 variabili fornite dal modello considerate in questo lavoro sono riassunte in Tabella 1.

Gli scenari RCP (Representative Concentration Pathways) considerati sono lo scenario RCP4.5 e lo scenario RCP8.5. Lo scenario RCP4.5 prevede una forzante radiativa sul bilancio energetico terrestre pari a $+4,5 \text{ W/m}^2$ nel 2100 rispetto all'era preindustriale, che equivale a circa il doppio di quella stimata per il 2011 ($+2,3 \text{ W/m}^2$, Stocker et al., 2013); è caratterizzato da politiche di riduzioni intermedie di gas serra, con stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra in atmosfera a fine secolo (2081-2100) a circa 650 ppm $\text{CO}_{2\text{eq}}$, e un riscaldamento medio globale pari a $1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (intervallo $1,1\text{-}2,6 \text{ }^\circ\text{C}$) rispetto alla media 1986-2005 (Van Oldenborgh et al., 2013) e a $2,4 \text{ }^\circ\text{C}$ rispetto all'era preindustriale. Lo scenario RCP8.5, invece, è il peggiore considerato in termini di forzante radiativa ($+8,5 \text{ W/m}^2$ nel 2100), ed è caratterizzato dall'assenza di politiche sostanziali di riduzioni delle emissioni: la stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra in atmosfera prevista per il 2100 è pari a circa 1370 ppm $\text{CO}_{2\text{eq}}$, e il riscaldamento medio globale pari a circa $3,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (intervallo $2,6\text{-}4,8 \text{ }^\circ\text{C}$) rispetto alla media 1986-2005 (Van Oldenborgh et al., 2013).

Tutti i dati delle simulazioni modellistiche usati in questo lavoro sono stati scaricati dal database MED-CORDEX (www.medcordex.eu).

Tabella 1 – Variabili del modello CMCC considerate in questo lavoro

Variabile	Sigla	Unità di misura
Temperatura media giornaliera al suolo	tas	K
Temperatura media giornaliera a 850hPa	ta850	K
Temperatura massima giornaliera al suolo	tasmx	K
Temperatura minima giornaliera al suolo	tasmin	K
Pressione al livello del mare	psl	Pa
Altezza geopotenziale a 500 hPa	zg500	M
Precipitazioni	pr	$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
Velocità del vento a 10 m dal suolo in direzione nord	uas	m s^{-1}
Velocità del vento a 10 m dal suolo in direzione est	vas	m s^{-1}
Velocità del vento al livello standard di 500hPa in direzione nord	va500	m s^{-1}
Velocità del vento al livello standard di 500hPa in direzione est	ua500	m s^{-1}

2.4. Air Stagnation Index

Oltre al profilo verticale di temperatura e alle inversioni termiche, si sono analizzati anche i cosiddetti “eventi di stagnazione”, ovvero quelle particolari condizioni meteorologiche tali da ridurre al minimo le possibilità di dispersione sia orizzontale che verticale degli inquinanti emessi in atmosfera (Wang e Angell, 1999). Questa particolare situazione può essere monitorata e quindi quantificata grazie all'indice ASI (Air Stagnation Index)

sviluppato dallo statunitense NCDC (National Climatic Data Center): viene definito evento di stagnazione un periodo caratterizzato da (i) vento moderato alle basse quote, che indica che il primo strato dell'atmosfera è tendenzialmente stabile, (ii) vento moderato a quote più elevate, che generalmente è associato alla formazione di un persistente sistema di alta pressione, (iii) assenza di precipitazioni, che quindi minimizza i fenomeni di "wash out" (Horton et al., 2012).

Nello specifico, si è in presenza di un evento di stagnazione se in una determinata giornata si verificano contemporaneamente tre condizioni: (i) la velocità media giornaliera del vento a 10m dal suolo è minore di 4 m/s (4,4 m/s in caso di inversione termica), (ii) la velocità media giornaliera del vento a 500hPa è minore di 13 m/s, (iii) le precipitazioni sono inferiori a 1 mm/d (Horton et al., 2012).

3. STIMA DELLA FREQUENZA DELLE INVERSIONI TERMICHE

3.1. Profilo termico verticale dei radiosondaggi

Sulla base dei dati del profilo termico verticale è possibile identificare la presenza di uno strato di inversione termica dall'analisi del gradiente termico tra due valori di temperatura ai livelli significativi di pressione, utilizzando la seguente relazione:

$$\frac{dT}{dz} \approx \frac{T_1 - T_2}{z_1 - z_2} \quad (1)$$

in cui T_1 e T_2 sono le temperature alle quote z_1 e z_2 relative ai rispettivi livelli significativi di pressione ($z_2 > z_1$). Un gradiente positivo evidenzia la presenza di uno strato di inversione termica. Se il primo gradiente in esame (tra il suolo e il primo livello significativo di pressione) risulta positivo si è in presenza di inversione termica al suolo.

L'esame dei dati dei radiosondaggi di San Pietro Capofiume ha consentito di quantificare la frequenza delle inversioni termiche al suolo e in quota (al di sotto dell'altezza geopotenziale 850 hPa – circa 1500 m – dove i fenomeni di inversione tipicamente si sviluppano).

L'analisi ha mostrato che i mesi invernali, in particolare dicembre e gennaio, sono quelli principalmente caratterizzati dal fenomeno delle inversioni termiche. L'andamento della frequenza dei fenomeni di inversione termica mostra per l'intero anno solare un trend crescente (Figura 4). Gli eventi così stimati di inversione termica sono in seguito definiti "dati osservati" in quanto per la loro stima si è di fatto applicata la definizione stessa di inversione termica.

3.2. Metodo gradiente G850

Il modello regionale CMCC fornisce unicamente i dati di temperatura al suolo e al livello standard di pressione di 850 hPa (circa 1500 m). Gli strati di inversione termica, al suolo o in quota, che hanno un forte legame con la qualità dell'aria, sono tipici in particolar modo proprio dei primi 1000-1500

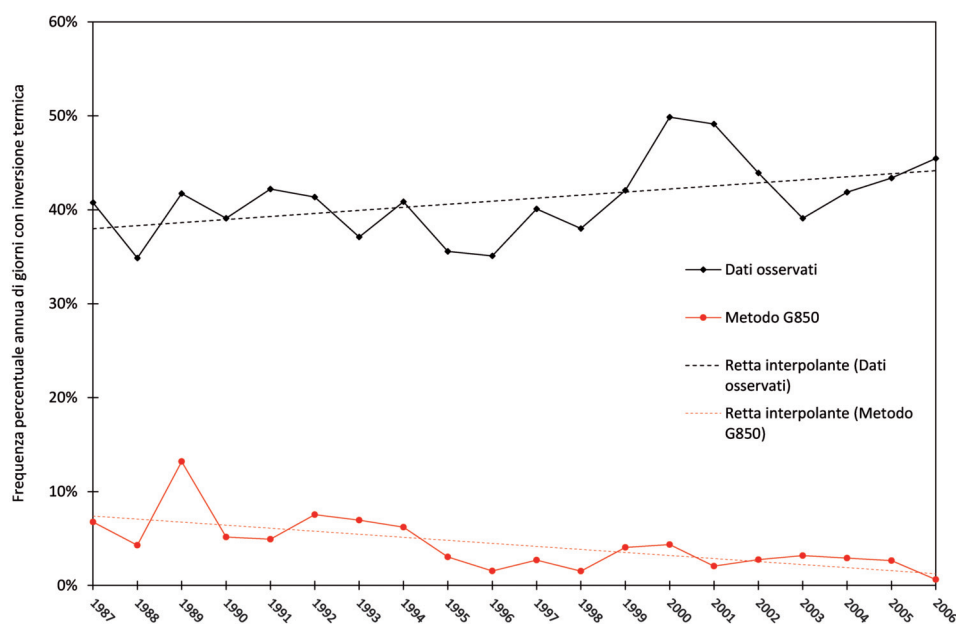


Figura 4 – Frequenza percentuale di giorni all'anno con inversione termica a San Pietro Capofiume alle 12 UTC: confronto tra dati osservati e stimati con il metodo G850 per il periodo 1987-2006

metri dell'atmosfera. Con i dati forniti dal modello non è quindi possibile ricostruire in dettaglio il profilo verticale di temperatura per individuare le inversioni termiche. Pertanto, è stato sviluppato un metodo alternativo per individuare la presenza di una inversione termica utilizzando unicamente i dati modellistici a disposizione.

Negli studi di Iacobellis et al. (2009) sulla variabilità della frequenza di inversioni termiche nei primi strati dell'atmosfera in California, è stato utilizzato semplicemente il gradiente termico tra la temperatura a 850 hPa e il suolo (chiamato G850), definito dalla relazione:

$$G850 = \frac{T_{850} - T_{suolo}}{z_{850} - z_{suolo}} \quad (2)$$

dove T_{850} indica la temperatura alla altezza geopotenziale di 850hPa, T_{suolo} la temperatura a 2 metri dal suolo, z_{850} l'altezza geopotenziale corrispondente a 850hPa, e z_{suolo} l'altezza del suolo sul livello del mare. Questo metodo, già considerato nello studio di Wang e Angell (1999) per i fenomeni di stagnazione dell'aria negli Stati Uniti, individua la presenza di uno strato di inversione termica quando tra le due quote è presente un gradiente termico positivo ($G850 > 0$).

Tale metodo, applicato ai dati osservati a San Pietro Capofiume nel periodo 1987-2006, fornisce però una sottostima importante ed un trend statisticamente differente (livello di significatività del 5%) del numero effettivo di giorni con inversione termica derivato dai radiosondaggi (Figura 4).

3.3. Il metodo indiretto

Viste le criticità del metodo G850, è stato sviluppato un metodo che consente di stimare la frequenza delle inversioni termiche utilizzando unicamente i valori di temperatura a disposizione (al suolo e a 850hPa), denominato in seguito metodo indiretto. Il metodo utilizza sempre il gradiente termico G850 ma individua una inversione termica se è soddisfatta la seguente relazione:

$$G850 > \beta \quad (3)$$

in cui β è un coefficiente generalmente compreso fra $-0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$ e $-0,6 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$. La modifica è stata introdotta in quanto, ad un'attenta analisi di numerosi casi in cui il metodo G850 non è riuscito a cogliere l'inversione termica, si è notato che il gradiente leggermente negativo in realtà "nascondeva" un'inversione termica nei primi strati dell'atmosfera. Nell'esempio mostrato in Figura 5 si nota come, nonostante un gradiente G850 negativo ($-0,56 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$), sia comunque presente uno strato molto spesso di inversione termica ($>400 \text{ m}$) tra i 600 ed i 1100 m di quota. I risultati dell'analisi, riassunti in Figura 6, mostrano che, per gradienti G850 leggermente negativi (in modulo fino a $0,3\text{-}0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$) la presenza di inversione termica è molto frequente, giustificando così l'errore di sottostima del metodo originale.

Il valore del coefficiente β è stato determinato come una funzione lineare della pressione al suolo, secondo la seguente relazione:

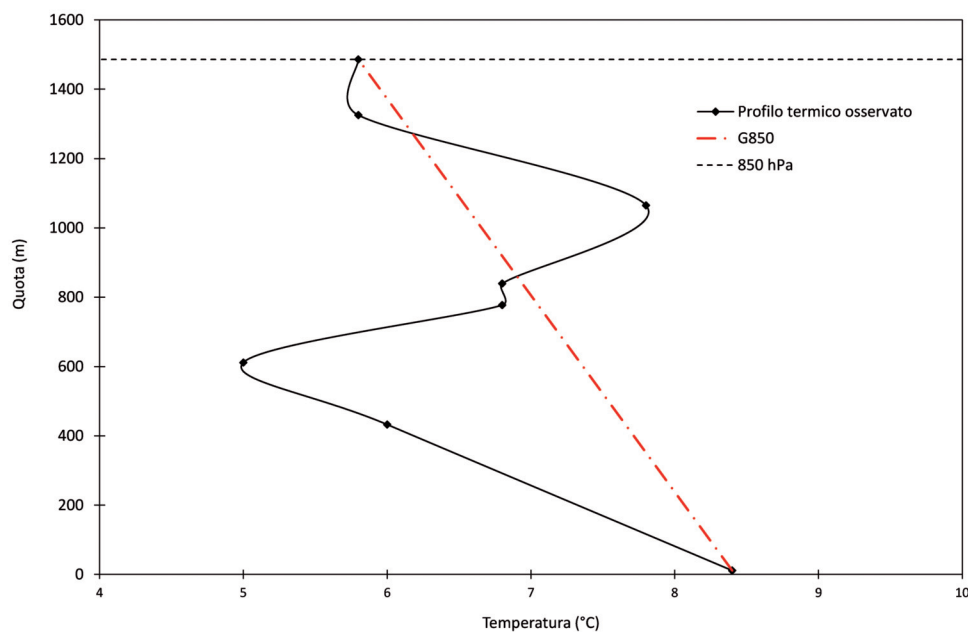


Figura 5 – Profilo verticale di temperatura osservato a San Pietro Capofiume il 29/12/1987 alle 12 UTC

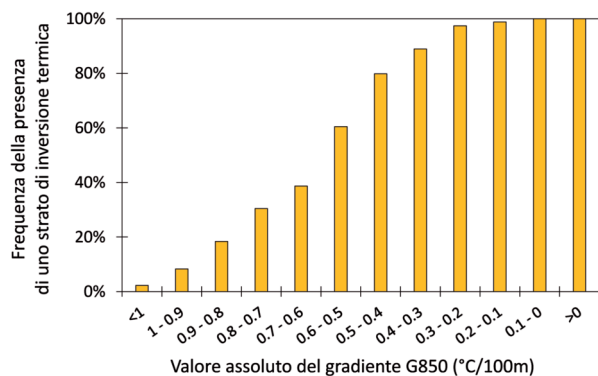


Figura 6 – Frequenza del numero di giorni con inversione termica per classe di valori del G850 nel periodo 1987-2006 a San Pietro Capofiume

$$\beta(\text{psl}) = m \cdot \text{psl} + q \quad (4)$$

in cui m e q sono due parametri di taratura e psl è la pressione al suolo (in hPa).

La dipendenza del coefficiente β dalla pressione al suolo deriva dal fatto che dall'analisi dei giorni di inversione termica a San Pietro Capofiume si è notato che più la pressione superficiale è elevata, più è probabile che ci sia inversione termica nei primi strati dell'atmosfera (Figura 7).

Il legame tra pressione al suolo e fenomeni di inversione rispecchia il fatto che le giornate anticicloniche (dovute a sistemi di alta pressione) sono molto spesso precursori di inversioni termiche da subsidenza. Il coefficiente β , per come è definito, cresce in modulo durante queste particolari giornate, favorendo pertanto l'individuazione delle inversioni termiche da subsidenza e migliorando l'accuratezza del metodo indiretto.

I parametri m e q sono stati stimati con una procedura volta a minimizzare gli errori del metodo in-

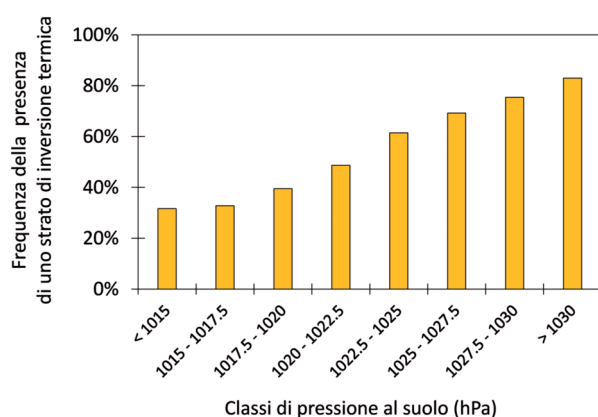


Figura 7 – Frequenza del numero di giorni con inversione termica per classe di pressione al suolo a San Pietro Capofiume nel periodo 1987-2006

diretto nell'individuazione delle inversioni osservate a San Pietro Capofiume, ottenendo i seguenti valori:

$$m = -0,006772 \quad ^\circ\text{C}/(100\text{m}\cdot\text{hPa})$$

$$q = 6,29271 \quad ^\circ\text{C}/(100\text{m})$$

Si noti che i due parametri così calcolati potrebbero non essere validi per aree diverse dalla Pianura Padana e per orari diversi dalle 12 UTC.

La capacità del metodo indiretto di stimare in modo accurato il numero di inversioni termiche, è mostrata nel grafico a dispersione di Figura 8 (a pagina seguente), in cui sulle ascisse è riportato il numero di giorni mensili in cui i radiosondaggi indicano la presenza di inversione termica mentre sulle ordinate il numero di giorni mensili stimati dal metodo indiretto. Il coefficiente di determinazione $R^2 = 0,97$ della retta di interpolazione per il periodo invernale prova che il metodo indiretto è in grado di descrivere molto bene i dati osservati.

3.4. Validazione del metodo indiretto

La validazione del metodo indiretto sviluppato per la stima del numero di inversioni termiche è stata condotta utilizzando i dati dei radiosondaggi delle ore 12 UTC di Milano Linate, di cui si dispongono le osservazioni giornaliere della temperatura misurata a diversi livelli significativi di pressione per il periodo 1985-2012, per un totale di 9614 giorni con misurazioni valide. Per ogni giorno si è individuata la presenza o meno di inversione termica sia partendo dalla ricostruzione del profilo termico verticale sia applicando il metodo indiretto con i valori dei parametri m e q tarati in precedenza.

Il confronto tra il numero di giorni mensili con inversione termica osservati e stimati ha indicato una buona correlazione, con valori del coefficiente di determinazione R^2 pari a 0,86 sia per l'intero anno sia per il solo periodo invernale.

Come mostrato in Figura 9 (a pagina seguente), tuttavia, negli anni precedenti il 1999 il metodo si discosta dalle osservazioni in quanto il minor numero di dati osservati in quota ai livelli significativi non permette di ricostruire con precisione il profilo termico verticale e, quindi, di valutare la frequenza delle inversioni termiche osservate; dal 1999 in poi, invece, il trend ottenuto con il metodo indiretto si sovrappone molto meglio a quello ottenuto dai dati osservati. In particolare, i due trend non mostrano differenze statisticamente si-

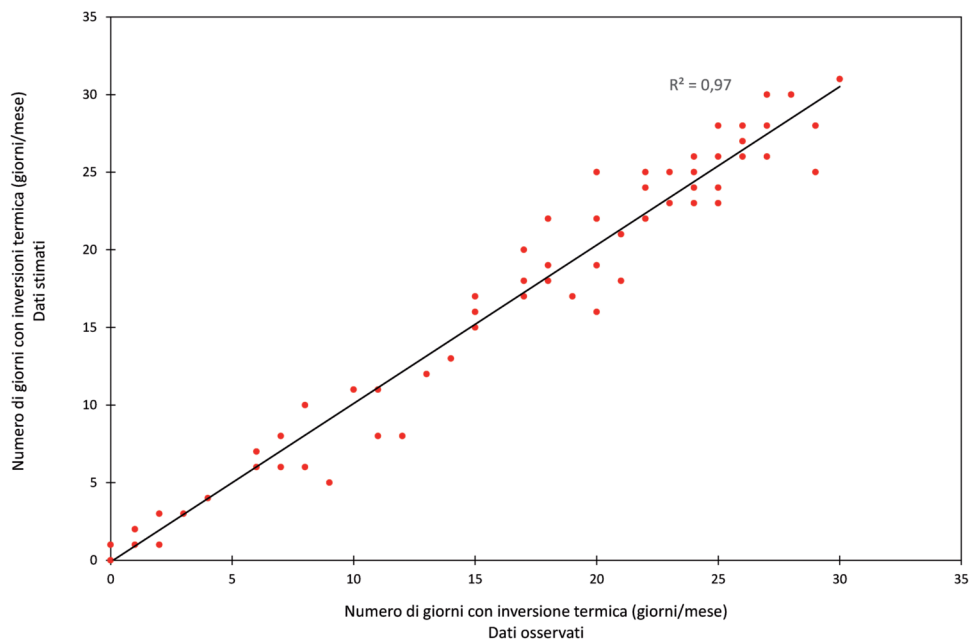


Figura 8 – Confronto tra il numero di giorni mensili con inversione termica (giorni/mese) osservati e stimati (metodo indiretto) per il periodo invernale a San Pietro Capofiume nel periodo 1987-2006

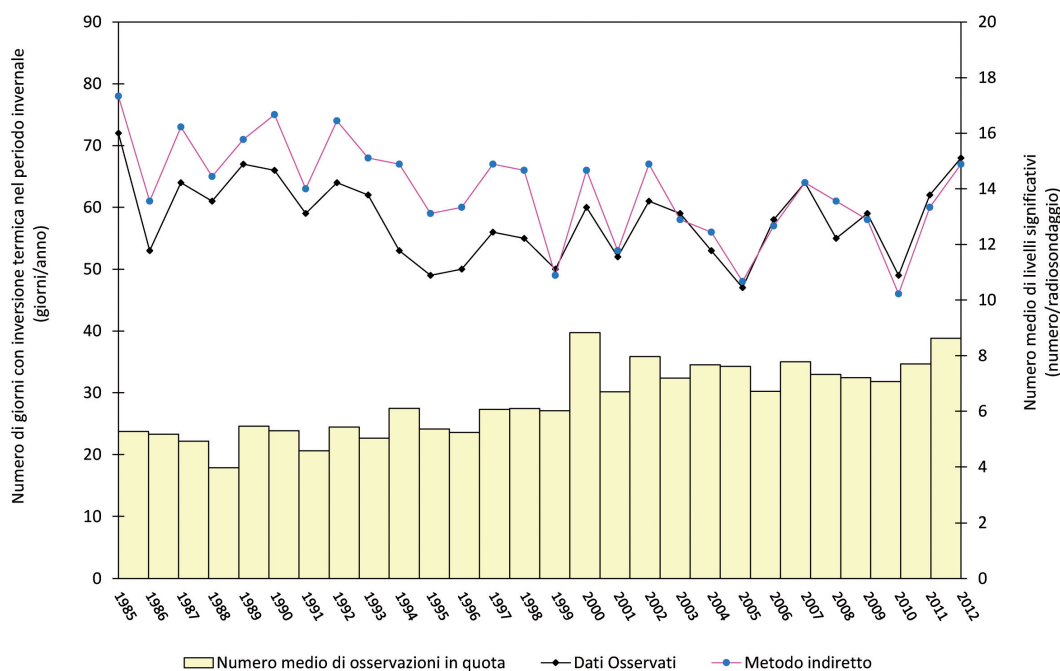


Figura 9 – Numero di inversioni termiche nel periodo invernale a Milano Linate (12 UTC): confronto tra gli andamenti ottenuti a partire dai dati osservati e stimati con il metodo indiretto. Le barre verticali rappresentano il numero medio di livelli significativi tra il suolo e l’altezza geopotenziale 850 hPa

gnificative con un livello di significatività del 5% per il periodo 1999-2012, ed il coefficiente di determinazione R^2 della retta di interpolazione tra dati valori osservati e stimati del numero mensile di giorni con inversione termica mensili risulta pari a circa 0,92 per il periodo invernale e 0,87 per l’intero anno solare.

3.5. Applicazione del metodo indiretto ai dati del modello CMCC

3.5.1 Calcolo delle temperature alle 12 UTC

Per applicare il metodo indiretto ai dati del modello CMCC, è stato necessario prestare alcuni accorgi-

menti in quanto il metodo indiretto è stato tarato e validato sui dati alle 12 UTC, mentre il modello CMCC fornisce solamente le temperature minime, medie e massime giornaliere al suolo e la temperatura media giornaliera 850hPa. Per derivare dai dati di temperatura al suolo del CMCC quello richiesti in ingresso dal metodo indiretto (dato alle 12 UTC), è stato utilizzato il modello di De Wit et al. (1978) che descrive l'andamento giornaliero della temperatura al suolo in funzione della temperatura massima giornaliera (T_{max}), minima giornaliera (T_{min}) e dell'ora in cui si leva il sole ($hlev$). Per il calcolo della temperatura alle 12 è stata utilizzata la seguente equazione:

$$T_{suolo}(12UTC) = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{12 - hlev}{14 - hlev}\right) \quad (5)$$

La bontà del modello di De Wit per il caso di studio è stata verificata applicandolo alle temperature medie giornaliere osservate a San Pietro Capofiume, dove sono disponibili con frequenza giornaliera sia i dati di temperatura minima e massima sia i dati di temperatura alle 12 UTC. Il confronto tra i dati di temperatura osservati alle 12 e quelli calcolati con l'equazione (5) ha mostrato che il modello ricostruisce molto bene i dati osservati, con un valore di R^2 pari a 0,99 ed ha confermato che il modello di De Wit può essere applicato nell'area di studio per derivare dai dati del modello CMCC l'informazione della temperatura al suolo alle 12 UTC.

Per la quota di 850hPa, invece, il modello CMCC fornisce unicamente la temperatura media giornaliera e pertanto non è possibile applicare il modello di De Wit. Tuttavia, l'analisi dei dati di temperatura a 850hPa dei radiosondaggi della stazione di Milano Linate ha mostrato che la variazione giornaliera della temperatura è molto ridotta e che non c'è una differenza statisticamente significativa tra la temperatura media giornaliera e la temperatura alle 12 UTC. Nello specifico, l'analisi, relativa a 581 giorni del periodo 1999-2000, anni in cui si dispone di un numero sufficiente di radiosondaggi a diverse ore del giorno per poter stimare la temperatura media giornaliera alla quota di 850hPa, ha evidenziato una buona corrispondenza tanto tra i singoli valori della temperatura media giornaliera e di quella alle 12 UTC (Figura 10) quanto tra i corrispondenti valori medi, rispettivamente pari a $6,78 \pm 6,01$ °C ed a $6,57 \pm 6,04$ (media \pm deviazione standard)

In prima approssimazione, pertanto, per l'applicazione del metodo indiretto ai dati del modello CMCC si è usata direttamente la temperatura media giornaliera alla quota di 850hPa. Si noti che questa assunzione, giustificata da un punto di vista matematico, è coerente anche da un punto di vista fisico: essendo la quota geopotenziale di 850hPa comparabile con la quota dello strato limite planetario, la temperatura a 850hPa non risulta particolarmente influenzata dall'irraggiamento del suolo e quindi dal ciclo giorno-notte.

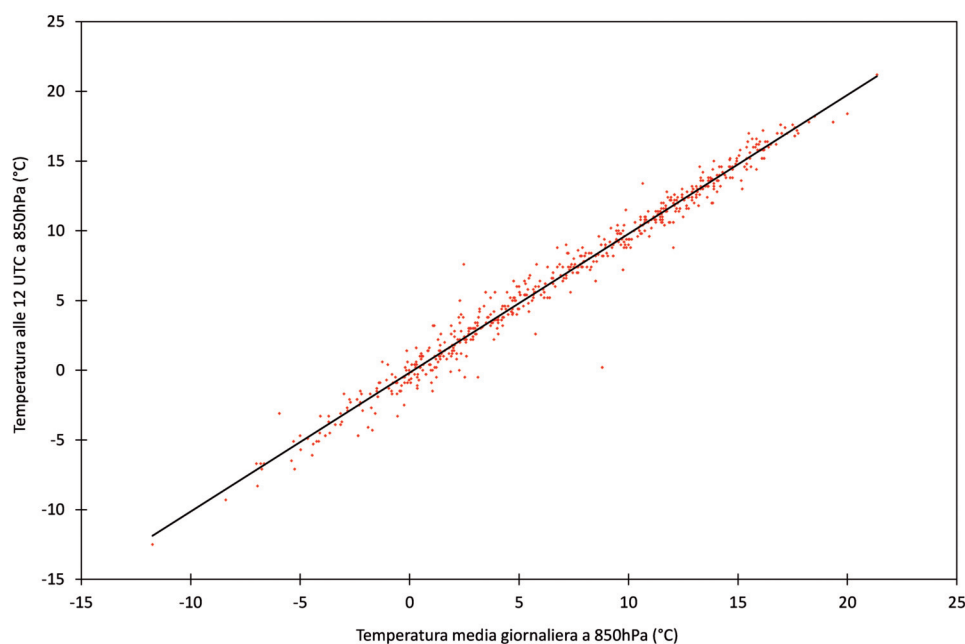


Figura 10 – Confronto tra la temperatura media giornaliera a 850hPa e la temperatura alle 12 UTC a 850hPa nel periodo 1999-2000 (581 giorni)

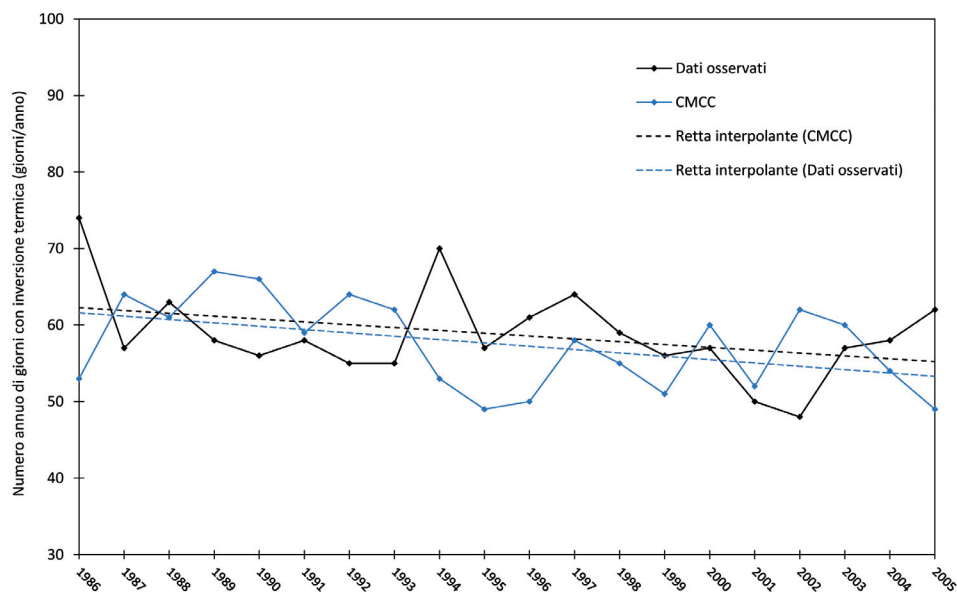


Figura 11 – Numero annuo di giorni con inversioni termiche per il solo periodo invernale a Milano Linate: confronto tra i dati osservati e stimati del modello e relative rette di interpolazione lineare

3.5.2. Confronto tra i trend osservati e stimati dai dati del modello CMCC

Il metodo indiretto è stato applicato utilizzando i dati del modello CMCC relativi alla maglia che contiene Milano Linate (maglia C in Figura 4) per valutarne la capacità di descrivere la situazione osservata nel periodo 1986-2005. Con riferimento al solo periodo invernale, la Figura 11 riporta il confronto fra gli andamenti del numero di inversioni osservate e di quelle stimate tramite l'applicazione del metodo indiretto alla serie storica del modello CMCC.

Nonostante l'evidente presenza di alcune differenze sui singoli valori annuali e di periodi in cui gli andamenti appaiono anticorrelati, ad un'analisi di più lungo periodo i due trend tendono a sovrapporsi e non mostrano differenze statisticamente significative (test t ad un livello di significatività α pari al 5%). Anche il confronto tra i trend dell'intero anno solare per il medesimo periodo storico porta a concludere che non ci sono differenze statisticamente significative tra il trend osservato e quello ottenuto con il metodo indiretto applicato ai dati del CMCC (Figura 12).

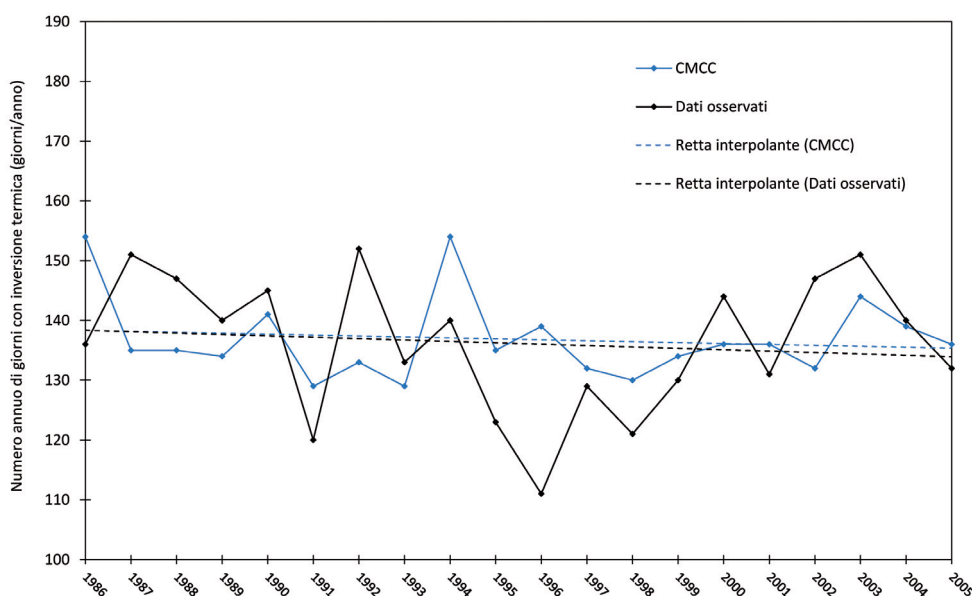


Figura 12 – Numero annuo di giorni con inversioni termiche per l'intero anno solare a Milano Linate: confronto tra i dati osservati e stimati del modello e relative rette di interpolazione lineare

Sebbene i singoli valori annuali del numero di inversioni presentino delle differenze, dovute a varie fonti di rumore, tra cui l'incertezza del modello climatico e l'incertezza del metodo indiretto, appare comunque ragionevole assumere che il metodo indiretto applicato ai dati del CMCC sia in grado di descrivere il trend storico e possa essere applicato per avere informazioni sulle proiezioni future.

4. PROIEZIONI FUTURE

4.1. Eventi di stagnazione

Per le proiezioni future sono state analizzate due diverse caratteristiche relative alla capacità dell'atmosfera di disperdere gli inquinanti emessi: la frequenza degli eventi di stagnazione, legate alla forza dei venti e alle precipitazioni e la frequenza delle inversioni termiche, legate al profilo termico verticale.

Sulla base delle proiezioni del modello CMCC si è potuto ricostruire il trend delle frequenze degli eventi di stagnazione per lo storico (1950-2005) e per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 (2006-2100). Si è determinata la presenza o meno di condizioni di stagnazione secondo i criteri di letteratura riportati nel paragrafo 2.4 con una frequenza giornaliera, dopodiché si è determinata la percentuale di giorni all'anno in cui si verificano tali condizioni. I risultati, mostrati in Figura 13, si riferiscono all'intero bacino padano e sono otte-

nuti come media fra le 17 maglie considerate. Contrariamente a quanto fatto negli studi di Wang e Angell (1999), e in accordo con quanto sviluppato da Horton et al. (2012), non è stato posto nessun requisito sul numero minimo di giorni per definire un evento di stagnazione, pur riconoscendo che periodi di stagnazione persistenti e poco frequenti possono avere impatti ben peggiori rispetto a periodi di stagnazione più brevi ma più frequenti.

Sia per lo scenario RCP4.5 sia per lo scenario RCP8.5 il trend è statisticamente significativo (test di Mann-Kendall con significatività del 5%): i tassi di variazione degli eventi di stagnazione per l'intero periodo 1950-2100 valgono rispettivamente +1,3 giorni/decennio e +1,1 giorni/decennio. Il trend della frequenza degli eventi di stagnazione è pertanto in evidente crescita, a causa sostanzialmente dell'incremento previsto dal modello di giorni senza precipitazioni e in minor parte di una variazione della forza del vento a 500hPa (nello scenario RCP4.5). La Figura 14 (a pagina seguente) sintetizza questi due aspetti per entrambi gli scenari, evidenziando perché nello scenario RCP8.5 l'aumento degli eventi di stagnazione sia leggermente meno marcato: infatti, il trend della velocità dei venti a 500hPa previsto per questo scenario è crescente, fattore che favorisce una maggiore dispersione degli inquinanti (e quindi una riduzione degli eventi di stagnazione) e compensa così in parte il fattore legato al maggiore aumento dei giorni secchi rispetto alle scenario RCP4.5.

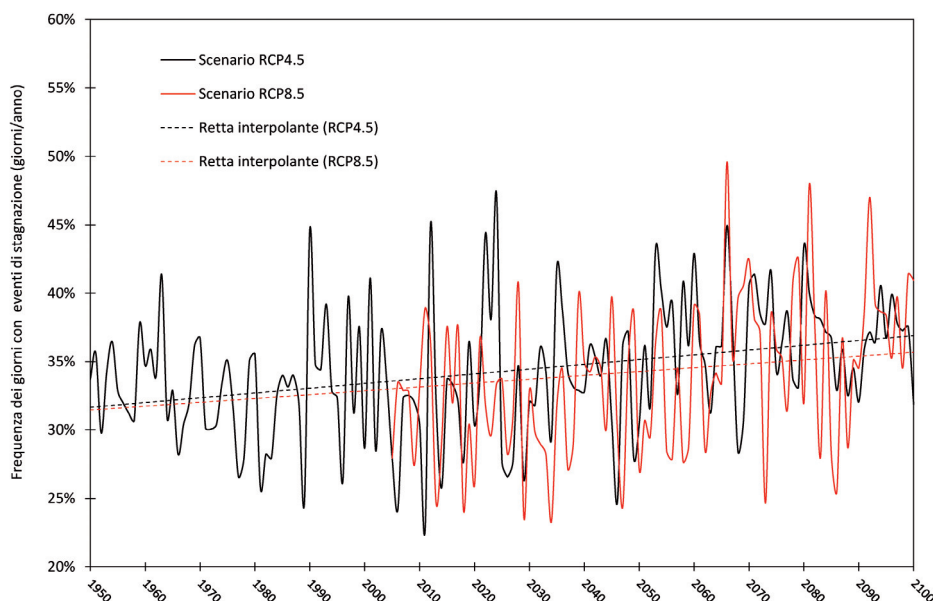


Figura 13 – Andamento della frequenza annua dei giorni con condizioni di stagnazione nell'intero anno solare (giorni/anno) stimato dai dati del modello CMCC

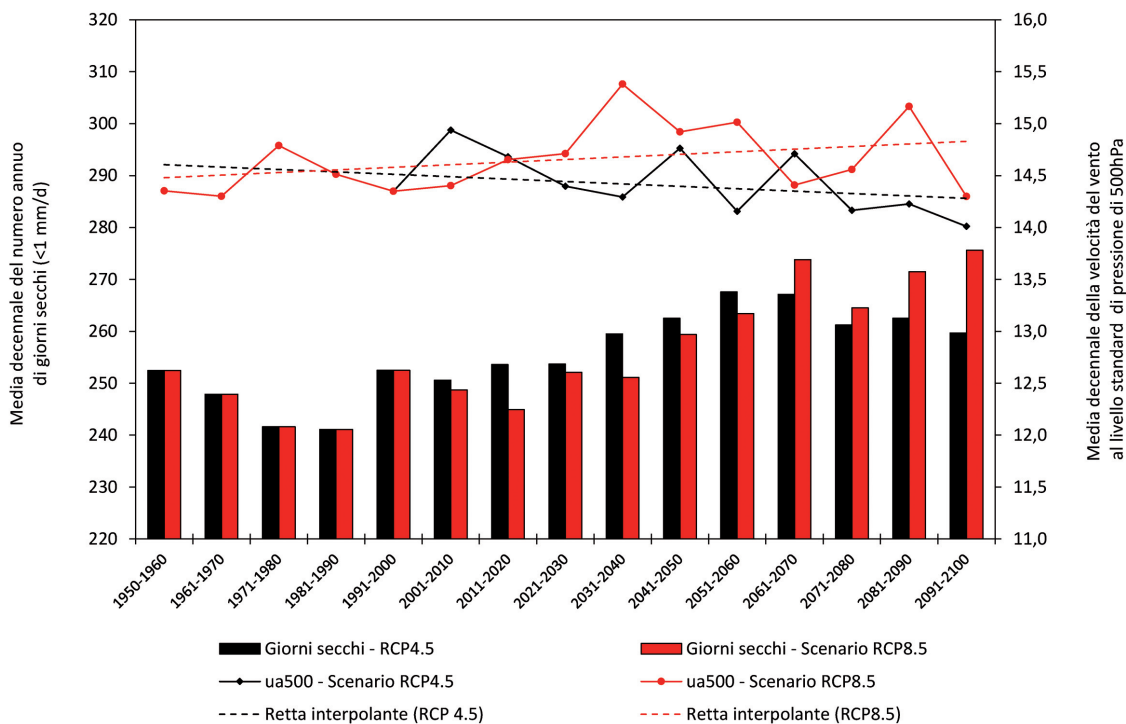


Figura 14 – Andamento delle grandezze che regolano la presenza di condizioni di stagnazione nelle proiezioni dei due scenari RCP4.5 e RCP8.5

4.2. Frequenza delle inversioni termiche

I dati del modello CMCC sono stati utilizzati come base anche per le proiezioni future relative alla frequenza di inversioni termiche in pianura padana fino al 2100. In Figura 15 è mostrata la stima del numero di inversioni termiche effettuata per il periodo dal 1950 al 2100 per l'intero anno

solare, per tutte le maglie considerate del bacino padano.

L'applicazione del metodo indiretto ai dati del modello CMCC mostra un aumento statisticamente significativo (test di Mann-Kendall con significatività pari al 5%) del numero di inversioni termiche in entrambi gli scenari, con un tasso di variazione per il periodo 2010-2100 pari a +1,2 inver-

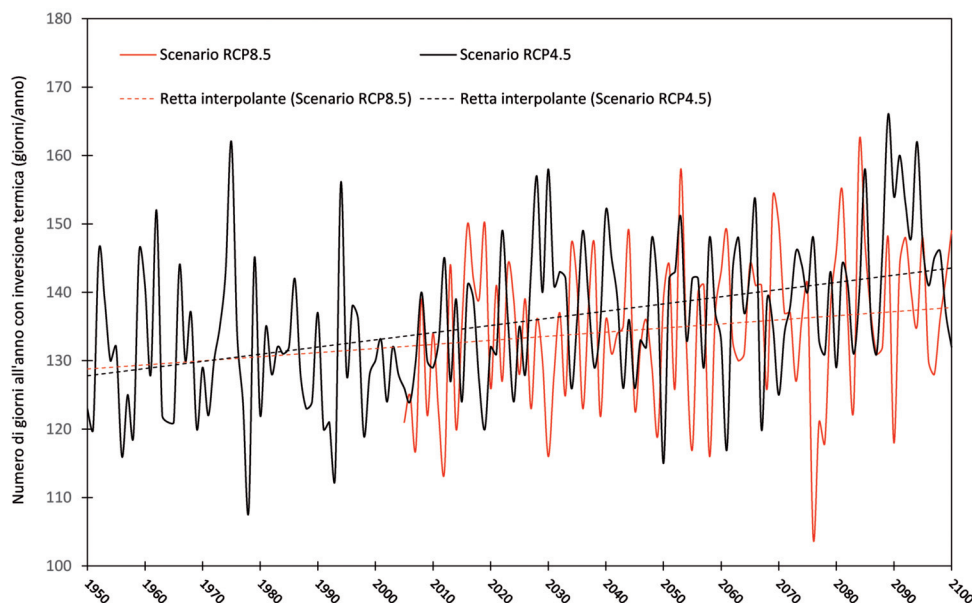


Figura 15 – Andamento della numero annuo di giorni caratterizzati da inversione termica per l'intero anno solare (giorni/anno) stimato dai dati del modello CMCC per l'intero bacino padano

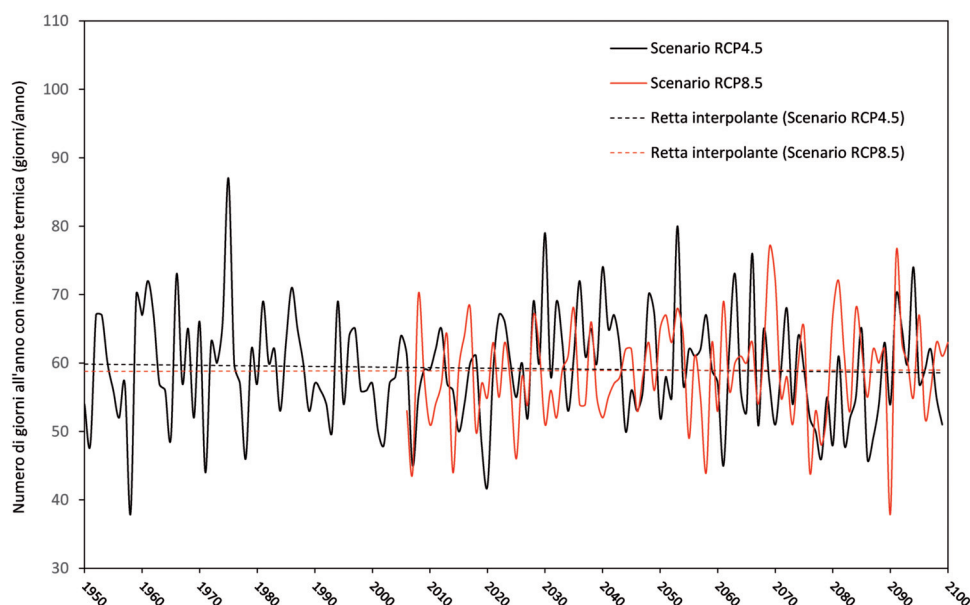


Figura 16 – Andamento del numero annuo di giorni caratterizzati da inversione termica all'anno per il solo periodo invernale (giorni/anno) stimato dai dati del modello CMCC per l'intero bacino padano

sioni/decennio per lo scenario RCP4.5 e +0,6 inversioni/decennio per lo scenario RCP8.5. Rispetto alla media 1986-2005, per il decennio 2091-2100 si stima un aumento di circa 12 giorni (circa +10%) con inversione termica all'anno nell'ipotesi di scenario RCP4.5, mentre un aumento di circa 6 giorni all'anno nell'ipotesi di scenario RCP8.5.

Rispetto allo scenario RCP4.5, nello scenario RCP8.5 il trend di crescita delle inversioni termiche è meno marcato: infatti, per questo scenario più estremo, il modello CMCC prevede un maggior aumento della temperatura al suolo rispetto a quella relativa alla quota 850hPa, fattore che provoca più instabilità dei primi strati dell'atmosfera e quindi l'attenuazione del trend di crescita delle inversioni termiche. Questo fenomeno di riscaldamento differenziale in quota ed al suolo, previsto anche nello scenario RCP4.5, è tuttavia molto più marcato nello scenario RCP8.5, soprattutto nel periodo invernale. In particolare, l'incidenza di tale fenomeno nel periodo invernale è tale da attenuare a tal punto il trend delle inversioni termiche stimate per il solo periodo invernale da renderlo praticamente stazionario in entrambi gli scenari (Figura 16).

Da un punto di vista fisico l'incremento tendenziale stimato per le inversioni termiche è dovuto all'aumento previsto delle giornate anticicloniche di alta pressione: le inversioni termiche in quota sono infatti più frequenti e intense durante questi periodi (Giuliacci et al., 2010) a causa dei moti di-

scendenti delle masse d'aria che si scaldano per compressione. A sua volta, l'aumento delle giornate anticicloniche è dovuto alla variazione della circolazione generale dell'atmosfera indotta dal riscaldamento globale in atto e previsto. Il probabile spostamento (Kirtman et al., 2013) verso i poli della cella di Hadley (Lu et al., 2007) è principalmente la causa della maggiore frequenza con la quale gli anticicloni di matrice subtropicale interesseranno le nostre latitudini e della maggiore persistenza di tali configurazioni bariche. Il trend positivo delle anomalie delle altezze geopotenziali a 500hPa previste dal modello CMCC (Figura 17, a pagina seguente) per la Pianura Padana conferma la maggior frequenza con la quale gli anticicloni tenderanno a spingersi a latitudini superiori.

5. CONCLUSIONI

Il lavoro ha valutato la tendenza storica della frequenza degli episodi di inversione termica e degli eventi di stagnazione in pianura padana e la loro proiezione futura in conseguenza del progressivo riscaldamento globale in atto sul pianeta e nell'area mediterranea. Secondo le proiezioni del modello CMCC, in uno scenario a emissioni medio-basse (RCP 4.5), la temperatura media annua superficiale in pianura padana aumenterà a fine secolo di circa 2,4 °C rispetto alla media 1986-2005. Questo riscaldamento, in linea con quanto riportato nell'Atlante delle Proiezioni Climatiche del Quinto Rapporto sul Clima (IPCC, 2013), è maggiore di

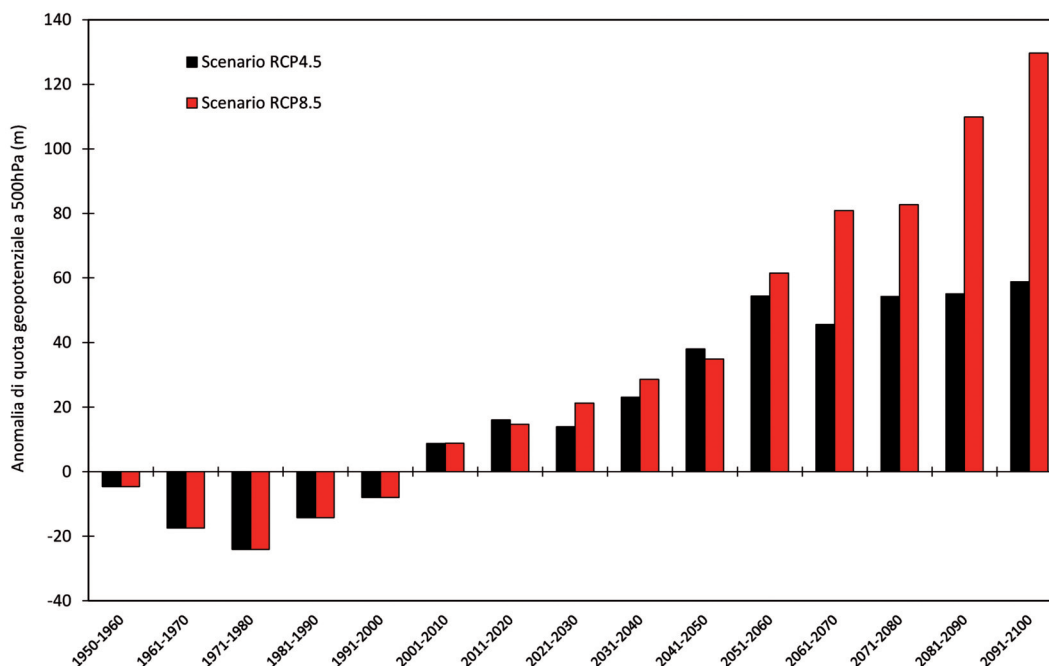


Figura 17 – Trend delle anomalie dell'altezza geopotenziale a 500hPa rispetto alla media 1986-2005 sull'intero bacino padano per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5

quanto previsto a livello globale per lo stesso scenario, pari a 1,8 °C (con intervallo di confidenza 5-95% pari a 1,4-3,1 °C) a cui si aggiunge ad un riscaldamento già registrato precedentemente al periodo 1986-2005, pari a 0,61 °C.

Il metodo indiretto, sviluppato per calcolare la presenza o meno di uno strato di inversione termica utilizzando unicamente quattro dati in ingresso (temperatura al suolo massima e minima, temperatura alla quota di 850 hPa e pressione al suolo), indica che questo riscaldamento sarà accompagnato da un modesto aumento del numero di giorni con inversioni termiche nei primi strati dell'atmosfera (fra il suolo e il livello corrispondente a 850hPa), pari circa 12 giorni all'anno nel decennio 2091-2100 rispetto alla media 1986-2005 (aumento di circa il 10%).

L'aumento previsto del numero di inversioni termiche e la maggior frequenza degli eventi di stagnazione (che tengono conto anche dell'aumento dei giorni secchi) potranno comportare una variazione delle condizioni dispersive dell'atmosfera con un potenziale impatto negativo sulle condizioni della qualità dell'aria in Pianura Padana. Questo peggioramento, soprattutto dal punto di vista delle inversioni termiche, sembra soprattutto concentrato nei mesi estivi, sebbene l'analisi stagionale non sia stata indagata approfonditamente in questo lavoro. Lo sviluppo futuro del lavoro dovrebbe indirizzarsi verso un'analisi stagionale di maggior det-

taglio, in particolare per quanto riguarda i parametri che regolano la frequenza delle inversioni termiche, riprendendo, per esempio, lo studio di Pasini e Cipolletti (2007).

Nell'ipotesi di scenario RCP8.5, che prevede un aumento di temperatura a fine secolo in Pianura Padana di circa 4,4 °C rispetto alla media 1986-2005, sia la frequenza delle inversioni termiche sia degli eventi di stagnazione tende ad aumentare, anche se in maniera meno marcata rispetto allo scenario RCP4.5, a causa di una maggiore instabilità generata dal maggior incremento di temperatura. Tuttavia, la situazione generale di qualità dell'aria risentirà in maniera negativa del minore livello di riduzione delle emissioni associato alla decarbonizzazione del sistema energetico, che invece sarebbe obbligatoria per uno scenario ad emissioni medio-basse, come lo scenario RCP4.5. Per quest'ultimo scenario, invece, la riduzione delle emissioni di inquinanti primari e di precursori sarebbe ragionevolmente tale da compensare gli impatti attesi sulla capacità dispersiva locale dei bassi strati dell'atmosfera.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Arpa Emilia-Romagna (2013) Piano regionale integrato per la qualità dell'aria dell'Emilia-Romagna: quadro conoscitivo. Centro Tematico Regionale Qualità dell'Aria. Rapporto finale, giugno 2013.

- Bigi A., Ghermandi G. e Harrison R. (2012) Analysis of the air pollution climate at a background site in the Po valley. *Journal of Environmental Monitoring* 14: 552-563.
- Carbone C., Decesari S., Mircea M. et al. (2010) Size-resolved aerosol chemical composition over the Italian Peninsula during typical summer and winter conditions. *Atmospheric Environment* 44: 5269-5278.
- De Wit C.T., Goudriaan J., Van Laar H.H. (1978) Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. *Pudoc. Wageningen. The Netherlands*, 148 pp.
- EEA (2014) Air quality in Europe – 2014 report. European Environment Agency report n. 5/2014.
- Ferrero L., Riccio A., Perrone M.G. et al. (2011) Mixing height determination by tethered balloon-based particle soundings and modeling simulations. *Atmospheric Research* 102: 145-156.
- GISS (2014) NASA Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature Analysis (GISTEMP) <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Giuliaci M., Giuliaci A., Corazzon P. (2010) Termodinamica dell'atmosfera. *Manuale di Meteorologia*, 5: 249-304.
- Giulianelli L., Gilardoni S., Tarozzi L. et al. (2014) Fog occurrence and chemical composition in the Po valley over the last twenty years. *Atmospheric Environment* 98: 394-401.
- Horton D.E., Harshvardhan S., Diffenbaugh N.S. (2012) Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing. *Environmental Research Letters*, 7, 044034.
- Iacobellis S., Norris J.R., Kanamitsu M. et al. (2009) Climate variability and California low-level temperature inversion. California Climate Change Center. CEC Publication # CEC-500-2009-020-F.
- IPCC (2013) Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISPRA (2014) Emissioni e qualità dell'aria. In: *Qualità dell'ambiente urbano. Istituto Superiore per la Protezione e la ricerca ambientale*, 10° Rapporto 53/2014: 371-512.
- Johnstone J.A., Dawson T.E. (2010) Climatic context and ecological implications of summer fog decline in the coast redwood region. *PNAS* 10 (107): 4533-4538.
- Kirtman B., Power S.B., Adedoyin J.A. (2013) Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 953-1028.
- Lu J., Vecchi A.G., Reichler T. (2007) Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical research letters*, 34, L06805.
- Pasini A., Cipolletti F. (2007) Evidence of changes in diffusive properties over Italy during the period November 2006-April 2007: a case study. *Nuovo Cimento*, Vol. 30, 4, 431-434.
- Perrino C., Catrambone M., Dalla Torre S. et al. (2014) Seasonal variations in the chemical composition of particulate matter: a case study in the Po Valley. Part I: macro-components and mass closure. *Environmental Science and Pollution Research* 21: 3999-4009.
- Ruti P.M., Somot S., Dubois C. et al. (2011) MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011 – 10715
- Sandrini S., Fuzzi S., Piazzalunga A. et al. (2014) Spatial and seasonal variability of carbonaceous aerosol across Italy. *Atmospheric Environment* 99: 587-598.
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K. et al. (2013) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tomasi C. (1967) The nocturnal surface inversion height in the Po valley. *Atmospheric Environment* 17: 1123-1129.
- Tomozeiu R., Lazzeri M., Cacciamani C. (2002) Precipitation fluctuations during the winter season from 1960 to 1995 over Emilia-Romagna, Italy. *Theoretical and Applied Climatology* 72: 221-229.
- Van Oldenborgh G.J., Collins M., Arvllaster J.M. et al. (2013) Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Wang J.X.L., Angell J.K. (1999) Air Stagnation Climatology for the United States (1948-1998). NOAA/Air Resources Laboratory ATLAS No. 1.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano ARPA Lombardia, ARPA Emilia-Romagna, ARPA Piemonte e ARPA Veneto per la fornitura dei dati meteorologici. Per i dati dei radiosondaggi di San Pietro Capofiume si ringrazia il dottor Sandro Nanni del Servizio IdroMeteoClima dell'ARPA Emilia-Romagna e per quelli di Milano Linate si ringrazia il Maresciallo Andrea Gurreri dell'Aeronautica Militare. Si ringraziano inoltre il dottor Alessandro dell'Aquila di ENEA e il dottor Dario Conte del CMCC per il supporto riguardo i dati del modello Med-CORDEX. Si ringrazia infine l'anonimo revisore che ha fornito utili suggerimenti per il miglioramento della prima versione del lavoro.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2016 è sostenuta da:

