

Analisi climatologica delle situazioni meteorologiche tipiche a scala sinottica e dei loro effetti sul territorio della Provincia di Trento

L.Panziera, L. Giovannini, L. Laiti, D. Zardi

Gruppo di Fisica dell' Atmosfera
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica
Università di Trento

25 settembre 2014

Indice

1	Introduzione	5
2	Metodi di classificazione della circolazione a scala sinottica	6
2.1	Introduzione	6
2.1.1	Metodi soggettivi	7
2.1.2	Metodi misti	8
2.1.3	Metodi oggettivi	8
2.2	Capacità predittiva	9
3	Il metodo di classificazione della circolazione sinottica prescelto	10
4	Dati	16
4.1	Rianalisi ERA-Interim	16
4.2	Dati delle stazioni meteorologiche	16
4.2.1	Dati di temperatura	16
4.2.2	Dati di precipitazione	17
4.2.3	Dati di radiazione solare	20
4.2.4	Dati di vento	20
4.3	Validazione dei dati	24
4.3.1	Dati di temperatura e precipitazione	24
4.3.2	Dati di radiazione solare	25
4.3.3	Dati di vento	28
5	Metodi statistici	29
5.1	Temperatura	29
5.2	Precipitazione	32
5.2.1	Precipitazione giornaliera	32
5.2.2	Precipitazione oraria	34
5.3	Radiazione solare	35
5.4	Vento	36
5.5	Analisi della significatività statistica delle anomalie	39
5.6	Analisi della capacità predittiva	40
5.7	Modalità di rappresentazione dei parametri statistici	41
6	Analisi delle frequenze	42
6.1	Distribuzione delle frequenze	42
6.2	Andamento temporale delle frequenze	45

7	Relazione tra i tipi di tempo e il clima del Trentino	48
7.1	Relazione tra i tipi di tempo e la temperatura sul Trentino	48
7.1.1	Numero di giorni con dati di temperatura	48
7.1.2	Percentuale di notti tropicali	48
7.1.3	Percentuale di giorni tropicali	50
7.1.4	Percentuale di giorni estivi	50
7.1.5	Percentuale di giorni di ghiaccio	50
7.1.6	Percentuale di giorni di gelo	50
7.1.7	Minima delle minime	50
7.1.8	Massima delle massime	51
7.1.9	Percentuale di giorni caldi	51
7.1.10	Percentuale di giorni freddi	51
7.1.11	Percentuale di notti calde	53
7.1.12	Percentuale di notti fredde	53
7.1.13	Anomalia stagionale di temperatura media giornaliera	53
7.2	Relazione tra i tipi di tempo e la precipitazione sul Trentino	57
7.2.1	Numero di giorni con dati di precipitazione	57
7.2.2	Precipitazione giornaliera media condizionata	57
7.2.3	Contributo alla precipitazione totale	60
7.2.4	Massimo della precipitazione giornaliera	60
7.2.5	Frequenza dei giorni di pioggia	62
7.2.6	Numero di giorni di pioggia intensa	62
7.2.7	Anomalia stagionale di precipitazione giornaliera condizionata	62
7.2.8	Numero di ore con dati di precipitazione	66
7.2.9	Precipitazione media oraria condizionata	66
7.2.10	Massimo della precipitazione oraria	66
7.2.11	Numero di ore di pioggia intensa	69
7.2.12	Durata media della pioggia	69
7.3	Relazione tra i tipi di tempo e la radiazione solare sul Trentino	69
7.3.1	Numero di giorni con dati di radiazione	69
7.3.2	Radiazione solare cumulata giornaliera media	69
7.3.3	Contributo alla radiazione totale	73
7.3.4	Anomalia stagionale di radiazione solare cumulata giornaliera	73
7.3.5	Percentuale di giorni scuri	75
7.3.6	Percentuale di giorni chiari	75
7.4	Relazione tra i tipi di tempo e il vento sul Trentino	75
7.4.1	Numero di giorni con dati di vento	79
7.4.2	Velocità del vento medio giornaliero	79
7.4.3	Direzione del vento medio giornaliero	79
7.4.4	Massima velocità del vento medio giornaliero	79
7.4.5	Massima velocità del vento medio orario	82
7.4.6	Percentuale di giorni poco ventosi	82
7.4.7	Percentuale di giorni molto ventosi	82
7.4.8	Percentuale di ore poco ventose	82
7.4.9	Percentuale di ore molto ventose	86
7.4.10	Percentuale di ore con calme di vento	86
7.4.11	Anomalia stagionale del vento medio giornaliero	86

8	Capacità predittiva della classificazione sinottica per il Trentino	91
8.1	Capacità predittiva per la temperatura	91
8.1.1	Capacità predittiva per la precipitazione	92
8.1.2	Capacità predittiva per la radiazione solare	95
8.1.3	Capacità predittiva per il vento	100
9	Conclusioni	103

Premessa

La presente relazione contiene la descrizione delle attività svolte e dei risultati conseguiti nell'ambito del progetto "Analisi climatologica delle situazioni meteorologiche tipiche a scala sinottica e dei loro effetti sul territorio della Provincia di Trento", commissionato dalla Provincia Autonoma di Trento, Servizio Valutazione Ambientale, all'Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (Protocollo n° S158/2012/S52493/3.5-2012-1311).

Lo scopo del progetto è un'analisi climatologica finalizzata a individuare le situazioni meteorologiche tipiche a scala sinottica sull'Europa Centrale, e i loro effetti locali sul territorio della Provincia di Trento. La ricerca è stata condotta elaborando le mappe di rianalisi prodotte dal centro meteorologico europeo ECMWF, e mediante l'analisi climatologica di dati provenienti da osservazioni meteorologiche sul territorio provinciale.

Capitolo 1

Introduzione

Al fine di raggiungere gli obiettivi di questo progetto, sono state svolte le seguenti attività:

1. Studio della letteratura scientifica riguardante la classificazione delle situazioni sinottiche ed individuazione di un metodo di classificazione da adottare per questo progetto.
2. Implementazione dell'algoritmo di classificazione sinottica prescelto, e adattamento al Trentino.
3. Raccolta e validazione di dati meteorologici del territorio provinciale.
4. Analisi delle frequenze temporali delle configurazioni sinottiche.
5. Analisi statistica degli effetti delle varie configurazioni sinottiche sul clima del Trentino.
6. Analisi del potenziale previsionale della classificazione sinottica adottata, con particolare riferimento al valore aggiunto rispetto alla climatologia.

La presente relazione è così strutturata:

- Nel capitolo 2 viene riportata un'analisi della letteratura scientifica esistente sui metodi di classificazione sinottica, che costituisce un'importante branca della climatologia sinottica.
- Nel capitolo 3 viene introdotto il metodo di classificazione sinottica utilizzato in questo studio, illustrando le piccole modifiche che sono state apportate allo stesso, al fine di adattarlo meglio al Trentino.
- Nel capitolo 4 vengono introdotti i dati meteorologici che sono stati utilizzati per questo progetto, e come gli stessi siano stati validati prima delle elaborazioni.
- Il capitolo 5 illustra i metodi statistici che sono stati utilizzati al fine di studiare gli effetti che le configurazioni sinottiche hanno sulle condizioni meteorologiche in Trentino.
- Il capitolo 6 riporta lo studio che è stato fatto sulle frequenze delle varie configurazioni sinottiche, e sul loro cambiamento negli anni.
- Il capitolo 7 raccoglie tutti i risultati delle analisi statistiche che sono state condotte. Esso è diviso in quattro sezioni, relative all'analisi di temperatura, precipitazione, radiazione solare e vento.
- Il capitolo 8 costituisce uno studio volto ad indagare la capacità predittiva della classificazione sinottica adottata, cioè la sua potenzialità di fornire delle previsioni meteorologiche migliori rispetto alla climatologia.
- Le conclusioni di questo progetto sono riportate nel capitolo 9.

Capitolo 2

Metodi di classificazione della circolazione a scala sinottica

2.1 Introduzione

I metodi di classificazione del tipo di circolazione atmosferica permettono di categorizzare il continuo dei moti atmosferici in un numero ragionevole e discreto di tipi di circolazione sinottica. L'aggettivo *sinottico* viene usato per riferirsi ai moti atmosferici che avvengono su scale spaziali dell'ordine del migliaio di chilometri. I metodi di classificazione sono uno strumento indispensabile per analizzare non solo la variabilità della circolazione atmosferica, ma anche la relazione esistente tra le situazioni atmosferiche sinottiche e il clima di una regione.

In generale, il processo di classificazione consiste nel raggruppare delle entità (casi) in modo che i membri all'interno dello stesso gruppo condividano particolari caratteristiche. Quest'ultime non vengono invece condivise tra i membri di gruppi diversi. Chiaramente la circolazione atmosferica non è un sistema con alcuni tipi di circolazione ben definiti e separati che si alternano nel tempo, ma è piuttosto un continuo di moti atmosferici. Di conseguenza ogni metodo di classificazione sinottica introduce necessariamente una semplificazione dettata dalla necessità di trattare i moti atmosferici in maniera più comoda e discreta. Vi sono molti approcci e metodologie diverse per classificare i moti atmosferici che avvengono a scala sinottica. Ogni classificazione consiste fondamentalmente in due fasi principali: la definizione dei vari tipi di circolazione e l'assegnazione dei singoli casi ai diversi tipi. Circa il primo passo, c'è una distinzione fondamentale tra i metodi in cui i tipi sono definiti precedentemente all'assegnazione, e i metodi in cui i tipi di circolazione vengono ricavati durante lo stesso processo di assegnazione. Nel primo caso la definizione dei tipi di circolazione atmosferica può venir guidata da una conoscenza umana esperta o da considerazioni di tipo fisico o geometrico (come la direzione dei venti, la loro intensità, il grado di ciclonicità, etc.). I metodi in cui i tipi di circolazione vengono ricavati durante lo stesso processo di assegnazione sono guidati invece da scelte più o meno oggettive che includono solitamente una misura di similarità e la massimizzazione della varianza tra i diversi tipi. Nonostante i criteri usati possano esser completamente oggettivi, la procedura nel suo insieme richiede delle scelte soggettive quali, per esempio, la scelta della misura di similarità o il numero di tipi di circolazione. L'assegnazione dei singoli casi ai diversi tipi può avvenire in maniera soggettiva, cioè per attribuzione visiva da parte di un esperto, oppure numerica, cioè basata sulla minimizzazione della differenza tra i singoli casi e i tipi predefiniti, mediante un processo iterativo eseguito da un algoritmo numerico. Considerando gli approcci che possono essere seguiti sia per definire i tipi di circolazione atmosferica che per assegnare i singoli casi ai vari tipi, si ottengono tre gruppi principali di metodi di classificazione sinottica:

1. Metodi soggettivi, in cui i tipi di circolazione sono definiti a priori, e l'assegnazione dei singoli

casi ai tipi di circolazione è soggettiva.

2. Metodi misti, in cui i tipi di circolazione sono definiti soggettivamente a priori, e i singoli casi vengono assegnati ai diversi tipi per mezzo di criteri oggettivi.
3. Metodi oggettivi (o automatizzati), in cui sia la definizione dei tipi di circolazione che l'assegnazione dei singoli casi ai tipi vengono eseguiti in maniera oggettiva per mezzo di una procedura numerica. Da notare che, come precedentemente accennato, l'intera procedura può richiedere alcune scelte non totalmente oggettive.

All'interno dell'Azione COST 733 *Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European Regions* (<http://cost733.org>) è stato fatto un inventario dei metodi di classificazione sinottica in uso in Europa, e gli stessi sono stati valutati e confrontati tra loro. Sono stati identificati in totale 23 metodi di classificazione che, includendo anche le rispettive varianti, arrivano a 72 (Philipp et al., 2010). I metodi si differenziano tra loro per il criterio con il quale vengono definiti i tipi di circolazione (soggettivo, misto o oggettivo, come precedentemente accennato), per il numero totale di tipi di circolazione, e per le grandezze fisiche prese in considerazione nel definire i tipi. Nelle sezioni seguenti vengono brevemente descritti i principali metodi di classificazione sinottica.

2.1.1 Metodi soggettivi

Come accennato sopra, i metodi soggettivi sono quelli in cui i tipi di circolazione sono definiti a priori, e l'assegnazione dei singoli casi ai tipi prescelti avviene anche soggettivamente. Dato che essi presuppongono la conoscenza degli effetti di certi modelli di circolazione su varie grandezze atmosferiche, questi metodi cercano in pratica di identificare le situazioni sinottiche tipiche. Vi sono però alcuni svantaggi legati a questo tipo di metodi: essi non sono facilmente applicabili e trasferibili ad altre regioni rispetto a quelle per cui sono stati sviluppati, e vi è un'elevata probabilità di riscontrare artefatti legati al cambio delle persone che eseguono la classificazione.

1. *Hess and Brezowsky European Grosswetterlagen* è una delle classificazioni più famose, sviluppata inizialmente da Baur (1949) e perfezionata poi da Hess and Brezowsky (1952) e Gerstengarbe and Werner (1999). La classificazione è basata sulla direzione delle masse d'aria sull'Europa Centrale, e classifica quindi la circolazione atmosferica in zonale, meridionale e mista e combinazioni di queste, per un totale di 29 tipi di circolazione.
2. *Objective Grosswetterlagen* è una versione più oggettiva di Hess and Brezowsky (1952) prodotta da James (2007a) usando solamente i campi medi di pressione a livello del suolo e altezza geopotenziale a 500 hPa dei 29 tipi di circolazione originari di Hess and Brezowsky (1952), e assegnando in seguito ad essi i campi giornalieri di pressione e geopotenziale. Una persistenza minima di 3 giorni nella circolazione è richiesta da questo metodo.
3. *Carpatian basin weather types* fu sviluppato da Péczely (1957) e, in sostanza, si basa sulla posizione geografica di cicloni e anticicloni sulla Carpazia, considerando anche la posizione di fronti freddi e caldi, ottenendo un totale di 13 tipi di circolazione sinottica.
4. *Alpine Weather Statistics* è una classificazione sviluppata da Perret (1987) che considera la situazione sinottica in un cerchio con raggio 2 gradi di latitudine centrato sulla Svizzera. Non solo la direzione dei venti su quella zona determina i tipi di circolazione, ma anche la loro intensità e ciclonicità.
5. *ZAMG weather types* è un metodo sviluppato presso l'Ufficio meteorologico nazionale austriaco fin dagli anni Cinquanta, basato sia sui tipi di circolazione di Baur (1949) e Lauscher (1985), che

sul tipo di massa d'aria e sul passaggio di fronti al suolo. Questo metodo riconosce in tutto 43 tipi di circolazione sinottica.

2.1.2 Metodi misti

In questo tipo di metodi di classificazione della circolazione sinottica i tipi sono definiti soggettivamente a priori, e i singoli casi vengono poi assegnati ai diversi tipi per mezzo di criteri oggettivi basati su alcune soglie. Il vantaggio di questi metodi è la riproducibilità e il tempo di calcolo molto corto.

1. *Gross-Wetter types* è un metodo sviluppato da Beck (2000) in cui la circolazione viene caratterizzata in base alla direzione e alla vorticità dei venti. Questo metodo verrà descritto in maniera dettagliata nel capitolo 3 in quanto è quello che è stato scelto per questo progetto.
2. *Litynski advection and circulation types* si basa sulle caratteristiche dell'avvezione delle masse d'aria e sulla loro ciclonicità (Pianko-Kluczynska, 2007). I valori di soglia vengono definiti sulle componenti del vento geostrofico mediate spazialmente e sul valore di pressione al centro del dominio (Litynski, 1969), utilizzando le medie a lungo termine e le deviazioni standard di tali parametri. Ne risultano 27 tipi di circolazione sinottica.
3. *Lamb-weather types version 2* è una versione di Jenkinson and Collison (1977) modificata da James (2007b) e basata sul metodo soggettivo di Lamb (1950). I campi giornalieri di pressione al suolo sono classificati in 26 tipi di circolazione a dipendenza della direzione e della vorticità del vento. Vi sono 8 tipi direzionali, 2 ciclonici e anticlonici e 16 tipi ibridi.
4. *Objective Wetterlagenklassifikation*. In questo metodo, basato su Dittmann et al. (1977) e Bissolli and Dittmann (2004), la direzione del vento a 700 hPa, la ciclonicità a 925 e 500 hPa e l'acqua precipitabile vengono usati per classificare la circolazione in 40 tipi di tempo.
5. *Schüepp Alpine Weather Statistics* è un metodo sviluppato da Schüepp (1957, 1968, 1979) che classifica la circolazione in 40 tipi basandosi su dati a livello del suolo e a 500 hPa su un cerchio di 2 gradi di latitudine centrato a 46,5°N, 9°E. Le soglie sono definite sulle seguenti grandezze atmosferiche: gradiente di pressione e direzione del vento in superficie, direzione ed intensità del vento a 500 hPa, cambiamento del vento con l'altezza e baroclinicità. I tipi di circolazione risultanti possono essere avvevativi, convettivi o misti.

2.1.3 Metodi oggettivi

In questo tipo di metodi, come accennato sopra, sia la definizione dei tipi di circolazione che l'assegnazione dei singoli casi ai tipi vengono eseguiti in maniera oggettiva per mezzo di una procedura numerica. L'idea è quella di identificare i tipi di circolazione indicati dalle strutture stesse presenti nei dati, senza assumere a priori la presenza di tipi ben definiti. Da notare che, come precedentemente accennato, l'intera procedura può richiedere alcune scelte non totalmente oggettive. Vi sono essenzialmente tre famiglie di metodi oggettivi. La prima utilizza l'analisi delle componenti principali per identificare le principali componenti che spiegano la maggior parte della varianza dei dati, mentre i singoli casi vengono assegnati ai diversi tipi utilizzando una misura di relazione con le componenti principali. La seconda famiglia utilizza degli algoritmi di elezione per assegnare i casi ai tipi che vengono automaticamente identificati come modelli, la terza utilizza il principio della minimizzazione della variabilità interna ad ogni tipo. Una descrizione dettagliata di questi metodi si trova in Philipp et al. (2010) e relative citazioni.

2.2 Capacità predittiva

L'utilità e l'affidabilità di tutti i metodi di classificazione della circolazione sinottica dipendono dalla loro abilità di risolvere non solo le variazioni delle variabili fisiche utilizzate per discriminare i diversi tipi, ma anche altre grandezze meteorologiche di interesse climatologico. In altre parole, l'utilità dei metodi di classificazione dipende da quanto stretta sia la relazione tra il fenomeno sotto osservazione e i diversi tipi di circolazione. Tale caratteristica dei metodi di classificazione viene chiamata da diversi autori con diversi nomi: "applicabilità sinottico-climatologica" (Huth, 2010), "potenza discriminativa" (Beck and Philipp, 2010), "risoluzione" e "capacità predittiva" (Schiemann and Frei, 2010), "variabilità interna ai tipi" e "variabilità interna ai gruppi" (Yarnal, 1993; Brinkmann, 1999; Beck et al., 2007), "abilità sinottica" (Beck et al., 2013). In questa relazione verrà usata l'espressione "capacità predittiva". Nell'ambito dell'Azione COST 733 la capacità predittiva di numerosi metodi di classificazione è stata investigata utilizzando diverse metriche di confronto e per diverse grandezze atmosferiche (Beck and Philipp, 2010; Philipp et al., 2010; Casado et al., 2010; Demuzere et al., 2011; Fleig et al., 2010; Huth, 2010; Schiemann and Frei, 2010; Tveito, 2010; Beck et al., 2013). Diversi studi mostrano come la capacità predittiva per un particolare metodo possa variare a dipendenza della regione (capacità maggiore sulle zone oceaniche rispetto a quelle continentali), della stagione (capacità maggiore in inverno che in estate), del dominio spaziale su cui il metodo è applicato (capacità maggiore su domini sinottici) e della variabile analizzata (capacità maggiore per la temperatura rispetto alla precipitazione). Inoltre, la capacità predittiva varia anche a seconda del numero di tipi, del numero di variabili usate per la classificazione, della lunghezza del periodo classificato (giorno o più giorni), del periodo usato per la classificazione (anno o stagione). Ovviamente, la capacità predittiva cambia anche tra i diversi metodi di classificazione. In generale, non è stata identificata una classificazione la cui capacità predittiva sia maggiore rispetto a tutte le altre (Beck and Philipp, 2010). Particolarmente rilevante per questo progetto è l'analisi condotta da Schiemann and Frei (2010), in cui numerosi metodi di classificazione sono stati valutati in base alla loro capacità di prevedere la pioggia giornaliera sulla regione alpina. Tale studio mostra come anche in questo caso la capacità predittiva dipenda dalla soglia di precipitazione analizzata (basse intensità vengono risolte meglio dalle classificazioni), dalla stagione (maggiore capacità in inverno), dal numero di tipi (classificazioni con molti tipi risolvono meglio la pioggia), e dall'area geografica analizzata (capacità predittiva maggiore sui versanti settentrionale e nord-occidentale delle Alpi). Circa le differenze tra le varie classificazioni, è stato trovato come anche queste varino a dipendenza delle stagioni e delle regioni analizzate, benchè la capacità predittiva non vari molto per diverse soglie di pioggia e diverso numero di tipi all'interno della stessa classificazione sinottica. Anche nel caso della precipitazione alpina, non è stata trovata una classificazione sinottica migliore di tutte le altre, ma solo un gruppo di classificazioni che tendono ad avere una capacità predittiva maggiore delle altre.

Capitolo 3

Il metodo di classificazione della circolazione sinottica prescelto

La scelta del metodo con il quale classificare le situazioni sinottiche per l'Atlante Climatico del Trentino è stata guidata da esigenze ben precise. In particolare, il metodo prescelto doveva essere:

- di facile comprensione e di immediata interpretazione per gli utenti finali dell'Atlante Climatico.
- caratterizzato da un numero limitato di tipologie di circolazione sinottica.
- dal significato fisico, cioè non frutto di algoritmi numerici che identificano tipi di circolazione senza una precisa interpretazione meteorologica.
- particolarmente adatto a caratterizzare la circolazione atmosferica sull'Europa Centrale e sulla regione alpina in particolare.
- non dispendioso in termini di potenza e tempo di calcolo.
- il più oggettivo possibile.

Dopo un'approfondita analisi dei metodi presenti in letteratura e brevemente illustrati nelle sezioni precedenti, e delle esigenze qui sopra riportate, si è deciso di scegliere il metodo noto come *Gross-Wetter types* (Beck, 2000; Beck et al., 2007) con 10 tipi di circolazione (nome abbreviato *GWT*). Questo metodo fa parte della famiglia dei metodi misti, in quanto i vari tipi di circolazione sono definiti soggettivamente a priori, ma i singoli casi vengono assegnati ai diversi tipi per mezzo di criteri oggettivi. La scelta dei tipi di circolazione è basata sul lavoro di Hess and Brezowsky (1952) e Gerstengarbe and Werner (1993), e assume che la circolazione dell'atmosfera possa essere sufficientemente caratterizzata dal grado di zonalità, meridionalità e vorticità del campo di pressione al suolo sull'Europa. Sulla base di questa ipotesi, il metodo di classificazione *GWT* consiste nei seguenti passi (Beck, 2000):

1. Vengono definiti tre modelli di distribuzione della pressione al suolo sul dominio spaziale, corrispondenti ad isobare orientate Est-Ovest, Sud-Nord e una bassa pressione al centro del dominio (vedi Figura 3.1).
2. Si calcolano i coefficienti di correlazione tra il campo di pressione corrispondente ai singoli casi da classificare e il modello idealizzato con isobare orientate Est-Ovest (coefficiente di zonalità *Z*), quello con isobare orientate Sud-Nord (coefficiente di meridionalità *M*) e quello con la bassa pressione al centro (coefficiente di vorticità *V*).

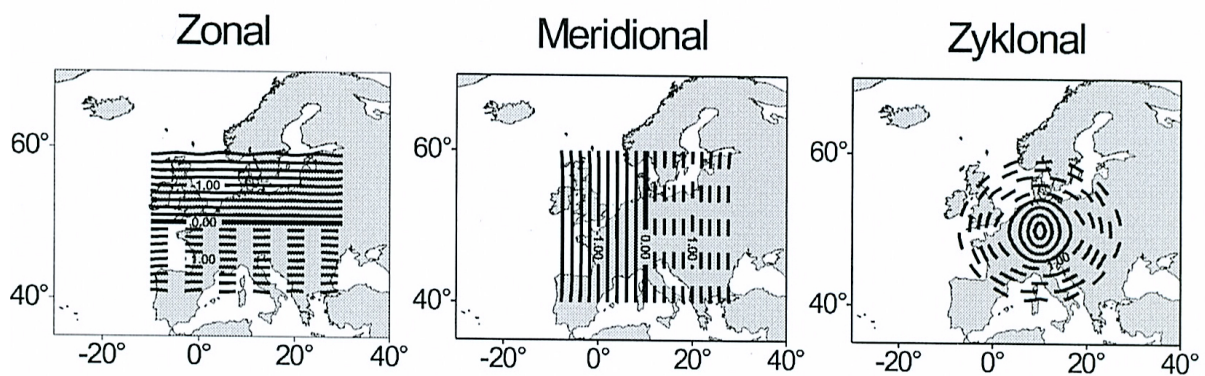


Figura 3.1: Modelli ideali di distribuzione della pressione al suolo utilizzati per definire i tipi di tempo da Beck (2000)

3. Se il valore assoluto del coefficiente di vorticità è maggiore di entrambi gli altri due e il suo segno positivo (negativo), il campo viene definito di bassa (alta) pressione.
4. I rimanenti tipi di circolazione (classi direzionali) sono ottenuti calcolando la distanza euclidea tra i valori riportati in tabella 3.1 e i coefficienti di zonalità Z e meridionalità M del campo da classificare. La classe con minor distanza euclidea viene assegnata al campo di pressione analizzato.
5. In base al segno del coefficiente di vorticità, le 8 classi direzionali possono essere suddivise a loro volta in ulteriori 8 classi che rappresentano isobare a curvatura ciclonica ($V > 0$) o anticiclonica ($V < 0$).

Tabella 3.1: Valori di soglia utilizzati per i coefficienti di correlazione tra i campi di pressione giornalieri e i modelli idealizzati di circolazione sinottica, da Beck (2000).

tipo di tempo	coeff. di zonalità Z	coeff. di meridionalità M
W	1.0	0.0
SW	0.7	0.7
NW	0.7	-0.7
N	0.0	1.0
NE	-0.7	-0.7
E	-1.0	0.0
SE	-0.7	0.7
S	0.0	1.0

Questo metodo di classificazione della circolazione sinottica può essere applicato teoricamente a qualunque campo bidimensionale. In questo progetto l'algoritmo è stato applicato non solo al campo di pressione al livello del mare, ma anche a quelli di altezza geopotenziale a 850, 700 e 500 hPa, per estendere alle diverse quote l'analisi delle situazioni sinottiche. I tipi di circolazione sinottica identificati con questo metodo rappresentano la direzione prevalente del vento sul dominio spaziale considerato e alla quota analizzata. Mentre a livello del suolo il vento non soffia parallelo alle isobare perchè l'effetto dell'attrito causa una deviazione verso le basse pressioni, alle quote più elevate ci si avvicina alla situazione di equilibrio geostrofico, in cui il vento è parallelo alle isopse. Il dominio spaziale sul quale è stato applicato l'algoritmo di classificazione GWT è centrato sulla catena alpina e comprende anche

l'Italia settentrionale, la Francia orientale, gran parte della Germania e dell'Europa orientale. La figura 3.2 rappresenta i domini spaziali utilizzati nell'ambito del progetto COST 733, e il dominio utilizzato per questo progetto è quello indicato con il codice *D06* (3-20°E, 41-52°N). Si può notare come i tipi di circolazione identificati da questo metodo siano di immediata interpretazione ed abbiano un significato fisico, essendo sostanzialmente legati alla direzione del vento medio sulle Alpi. L'importanza della direzione del vento nel determinare le condizioni meteorologiche sulla regione alpina è fondamentale. Infatti, direzioni diverse portano sulle Alpi masse d'aria diverse, che determinano tipi di tempo diversi. Data la posizione geografica della catena alpina, ci possiamo aspettare che con venti settentrionali masse d'aria fredde siano convogliate verso le Alpi, così come masse d'aria più calda saranno portate verso Nord da venti meridionali. Inoltre, nelle Alpi la distribuzione delle piogge è strettamente legata alla direzione di provenienza delle correnti atmosferiche (e.g. Frei and Schär, 1998; Panziera and Germann, 2010). Inoltre, il metodo scelto è oggettivo e può essere riprodotto senza il rischio di interpretazioni soggettive, e il tempo di calcolo è brevissimo in quanto l'algoritmo è molto semplice. Tutte condizioni che soddisfano le esigenze illustrate precedentemente.

L'algoritmo di classificazione GWT è stato leggermente modificato per questo progetto. Infatti, si è notato come il tipo di circolazione legato alla presenza di una bassa pressione presentasse una notevole variabilità tra i vari casi di quella stessa classe. In altre parole, situazioni in cui la bassa pressione si trovava in posizioni diverse rispetto al Trentino venivano attribuite allo stesso tipo di circolazione sinottica. Questo introduceva un'elevata incertezza nella direzione del vento sul Trentino in quei casi, dato che la posizione della bassa pressione determina la provenienza dei venti a causa della rotazione in senso antiorario che si verifica attorno al centro di bassa pressione. Si è quindi pensato di suddividere il tipo di circolazione relativo alla presenza della bassa pressione in ulteriori 4 tipologie di circolazione, definite in base alla posizione del centro della bassa pressione più vicina al Trentino rispetto alla città di Trento: una classe per i casi in cui il centro si trova a Nord-Est, una per i casi in cui il centro è a Nord-Ovest, una per quelli con il centro a Sud-Est, e una per quelli con il centro a Sud-Ovest. In totale, quindi, 13 tipi di circolazione sinottica sono considerati per questo progetto.

L'algoritmo GWT è stato applicato ai campi di pressione e geopotenziale delle rianalisi ERA-Interim delle 12 UTC di ogni giorno per il periodo 1992-2013 (vedi sezione 4.1). Le figure 3.3 e 3.4 rappresentano le mappe ottenute mediando i campi di tutti i singoli giorni che appartengono ad una specifica tipologia di circolazione. In particolare, la figura 3.3 presenta le mappe relative al metodo GWT applicato ai campi di pressione al livello del mare e al campo di altezza geopotenziale a 850 hPa; la figura 3.4 quelle relative ai campi di altezza geopotenziale a 700 e 500 hPa.

Come si può notare nelle figure, i campi medi di pressione a livello del mare e di altezza geopotenziale a 850 hPa sono meno lisci rispetto ai campi relativi a quote superiori, in particolare in prossimità della catena alpina. Questo è dovuto proprio alla presenza del terreno e dell'orografia, che può causare delle brusche variazioni di temperatura che si manifestano anche nel campo di pressione atmosferica. In generale l'algoritmo riesce però ad identificare bene situazioni caratterizzate da una ben precisa direzione dei venti sulla catena alpina e nelle regioni limitrofe. Anche i tipi di circolazione relativi alla presenza di una bassa pressione centrata in posizioni diverse rispetto al Trentino sono ben visibili nelle figure, così come la classe relativa all'alta pressione posizionata sulla catena alpina.

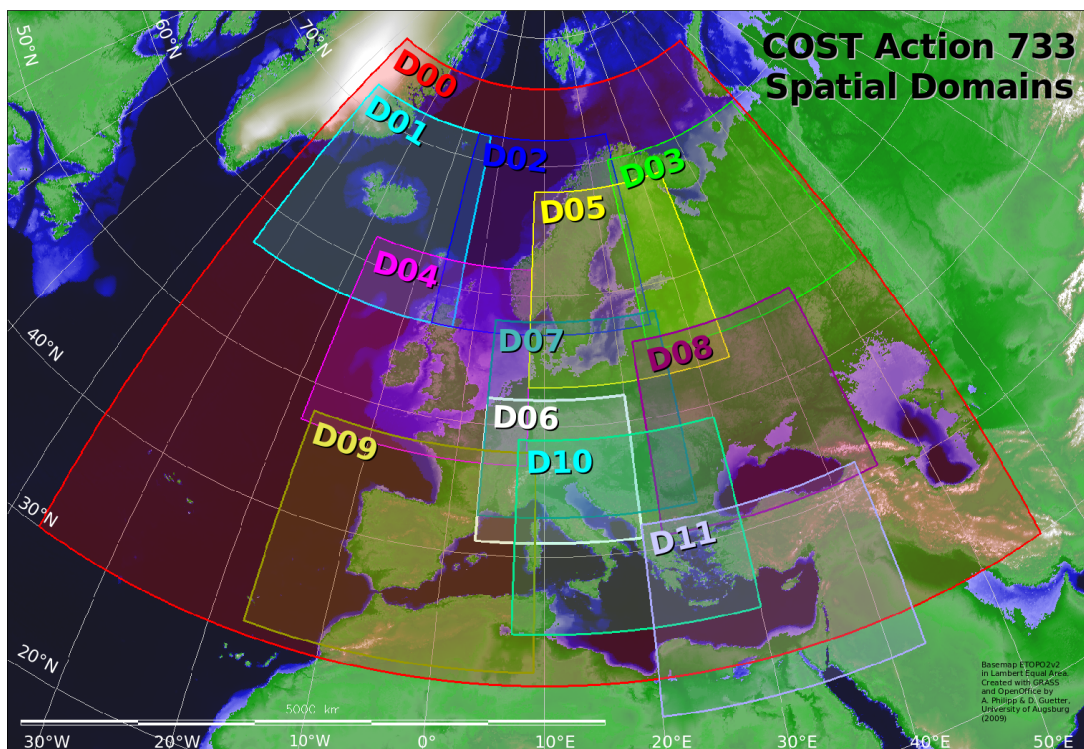


Figura 3.2: I domini spaziali utilizzati nell'ambito del progetto COST 733. Il dominio utilizzato per la classificazione sinottica di questo studio è il *D06*, centrato sulla catena alpina.

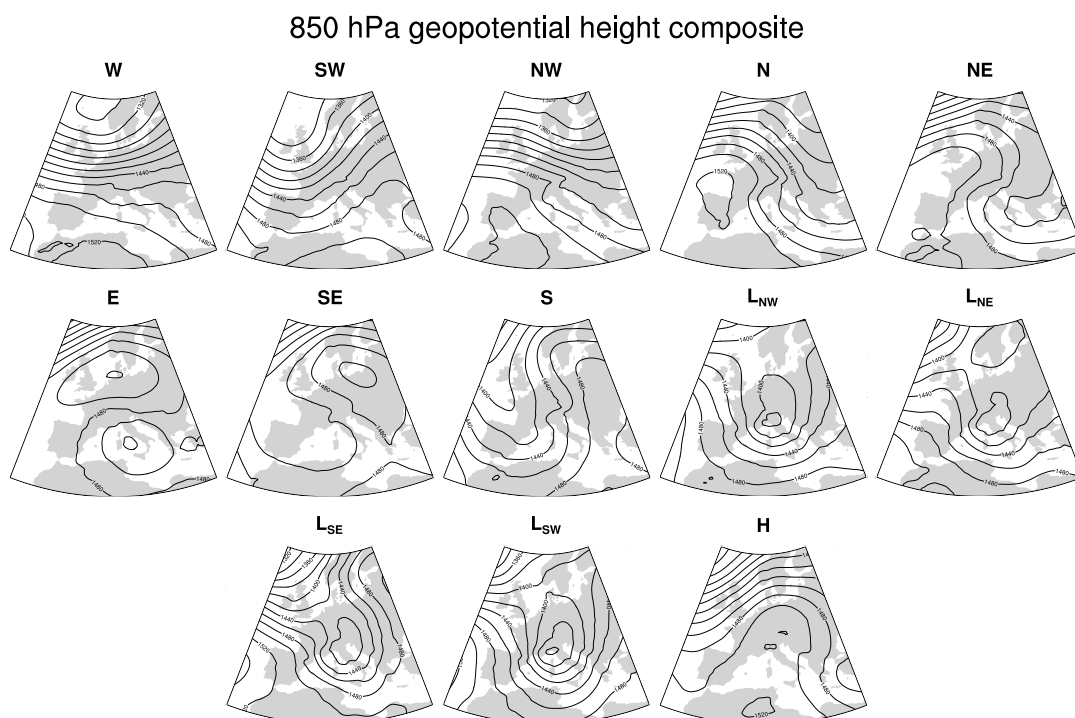
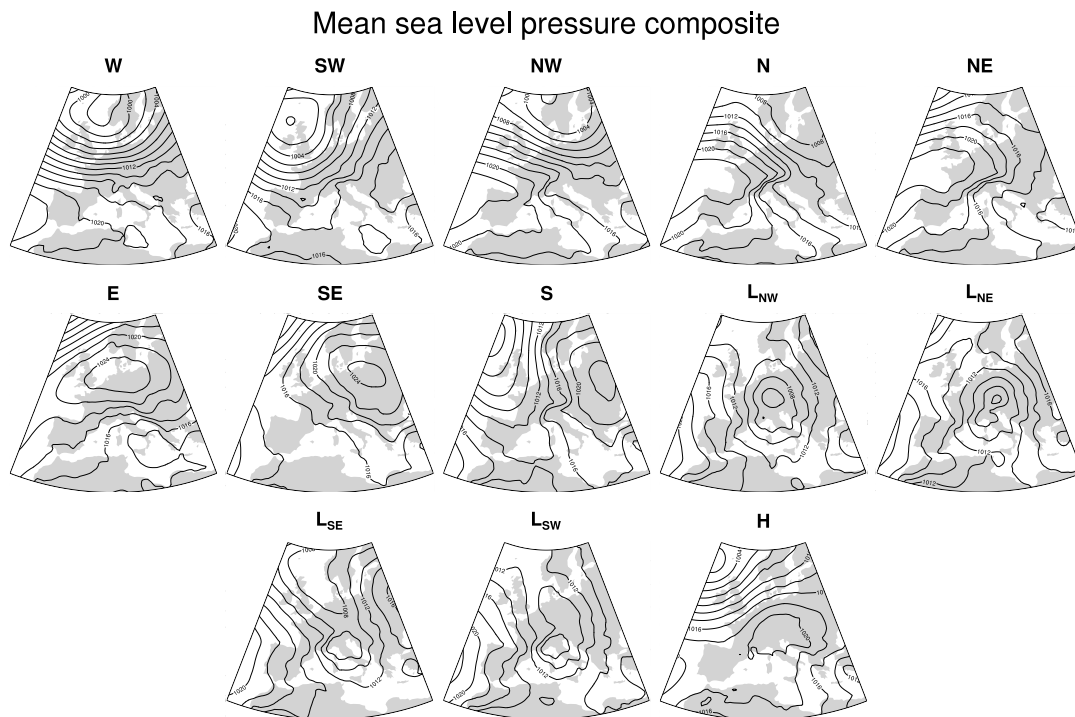


Figura 3.3: Mappe di pressione media e altezza geopotenziale media a 850 hPa per i 13 tipi di circolazione sinottica.

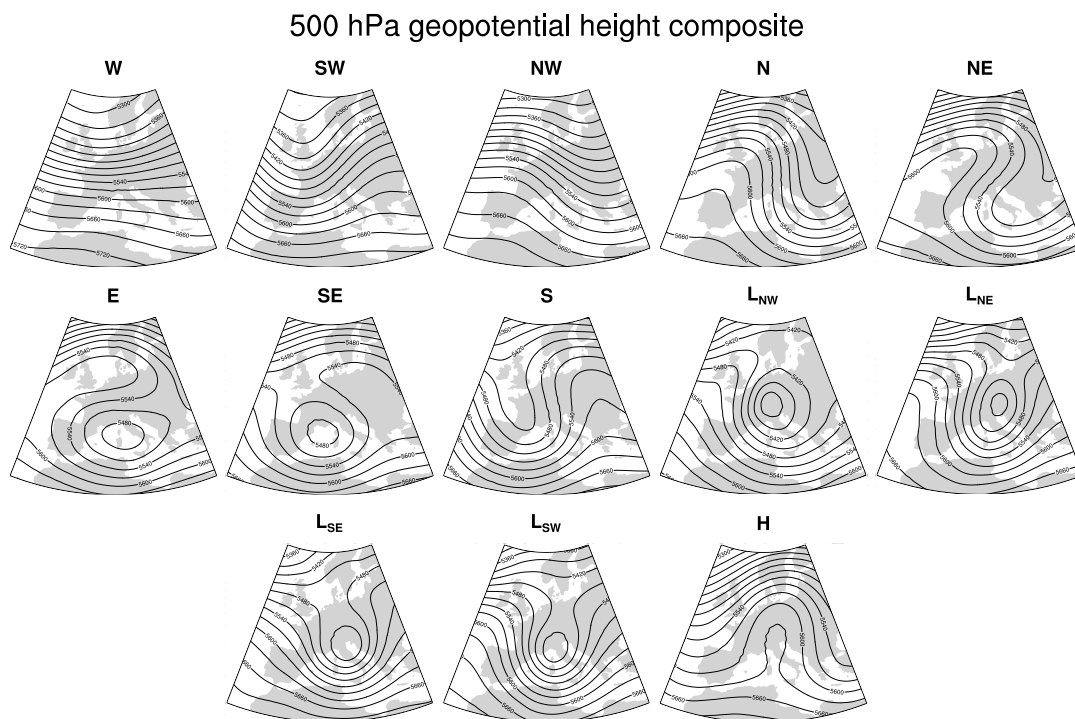
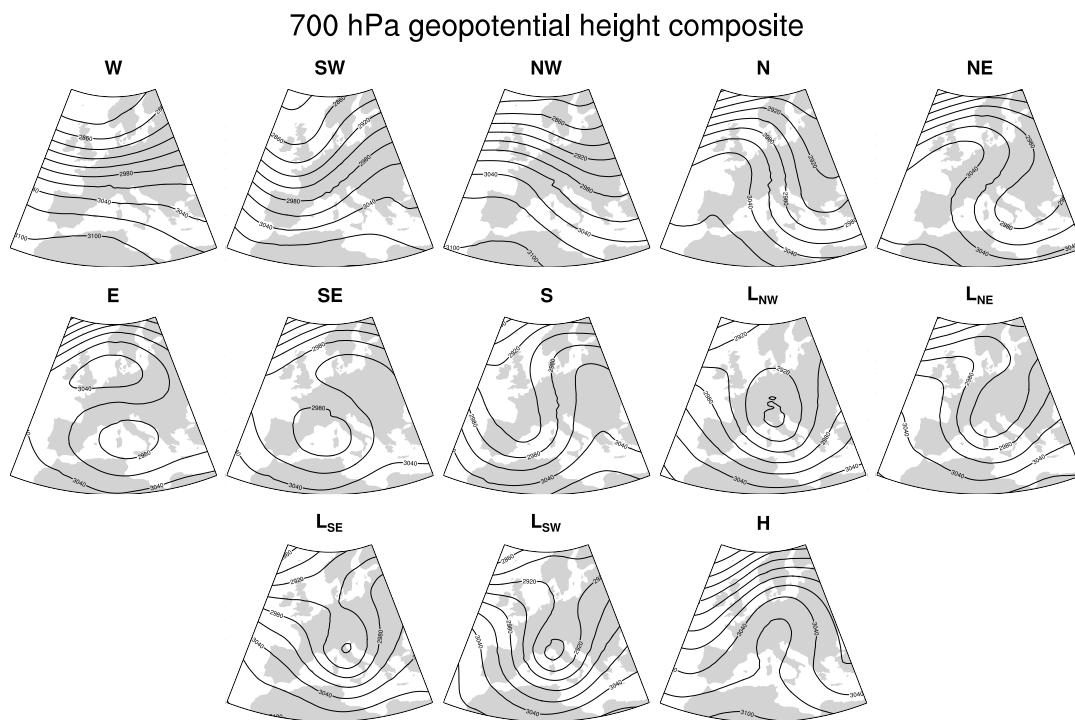


Figura 3.4: Mappe di altezza geopotenziale media a 700 e 500 hPa per i 13 tipi di circolazione sinottica.

Capitolo 4

Dati

In questo capitolo vengono introdotti i dati utilizzati per questo studio. Nella sezione 4.1 vengono brevemente descritte le mappe di rianalisi utilizzate per la classificazione sinottica; nella sezione 4.2 vengono presentati i dati delle stazioni meteorologiche del territorio provinciale utilizzate per caratterizzare il tempo a dipendenza delle situazioni sinottiche. La sezione 4.3, infine, descrive gli algoritmi di validazione che sono stati creati per eseguire il controllo di qualità dei dati.

4.1 Rianalisi ERA-Interim

Le rianalisi sono una ricostruzione dello stato dell'atmosfera fatta a posteriori sfruttando tutte le osservazioni utili disponibili (come osservazioni al suolo, radiosondaggi, osservazioni da satelliti e radar, etc..). Per questo progetto sono state utilizzate le rianalisi elaborate dal centro meteorologico europeo (*European Center for Medium Range Weather Forecasting*) denominate ERA-Interim (Dee et al., 2011), che costituiscono un miglioramento rispetto alle rianalisi ERA-40 (Uppala, 2005). Al fine della classificazione sinottica sono stati usati i campi di pressione ridotta al livello del mare e di altezza geopotenziale relativi alle ore 12 UTC di tutti i giorni dal 1/1/1992 al 31/12/2013, con una risoluzione spaziale di 0.5° . L'algoritmo di classificazione sinottica riceve direttamente in input tali campi in formato netcdf.

4.2 Dati delle stazioni meteorologiche

I dati delle misure al suolo utilizzati in questo progetto sono relativi a due reti di rilevamento atmosferico: quella della Provincia Autonoma di Trento gestita dall'Ufficio Previsioni e Organizzazione MeteoTrentino (chiamata rete PAT in questa relazione), e quella della Fondazione Edmund Mach gestita dall'Unità Sistema Informativo Geografico del Centro Trasferimento Tecnologico (chiamata rete FEM in questa relazione).

4.2.1 Dati di temperatura

Le misure di temperatura in Trentino sono effettuate da entrambe le reti PAT e FEM, e il numero di stazioni attive negli ultimi 30 anni è aumentato progressivamente. Si è ritenuto che prima del 1991 non vi fosse un numero di stazioni di rilevamento di temperatura sufficiente per raggiungere gli scopi di questo progetto, cioè per trarre conclusioni statisticamente significative sulla relazione tra i tipi di circolazione sinottica e il tempo del Trentino, mentre dal 1992 il numero di stazioni è stato ritenuto idoneo a tale scopo (vedi tabella 4.1). Come in tutte le serie di dati, anche nelle serie di temperatura delle reti PAT e FEM sono presenti alcuni buchi dovuti alle cause più diverse. Si è quindi calcolata la percentuale di dati presenti per ogni stazione dal 1992 al 2013 (vedi figura 4.1), e per questo progetto sono state prese

Tabella 4.1: Numero di stazioni meteorologiche che misurano la temperatura attive sulla provincia di Trento per diversi periodi.

periodo	numero di stazioni
1986-2013	12
1987-2013	12
1988-2013	14
1989-2013	17
1990-2013	18
1991-2013	30
1992-2013	50
1993-2013	53
1994-2013	59
1995-2013	61
1996-2013	61
1997-2013	61
1998-2013	61
1999-2013	62
2000-2013	65

in considerazione solamente le stazioni che coprono più del 90% del periodo selezionato. Tali stazioni sono riportate nella tabella 4.2, e la loro posizione geografica è rappresentata nella figura 4.2.

Negli anni la rete PAT ha misurato la temperatura nelle diverse stazioni con frequenze di campionamento diverse (di 10, 15, 30 minuti o orarie); in alcuni casi le frequenze temporali sono cambiate anche per la stessa stazione durante il suo periodo di vita. La frequenza temporale delle stazioni della rete FEM, invece, è stata sempre oraria. Si è reso quindi necessario scrivere un algoritmo per creare delle serie orarie di temperatura per le stazioni della rete PAT da utilizzare nelle successive elaborazioni, in modo da avere serie uniformi per entrambe le reti di monitoraggio.

I dati di temperatura della rete PAT sono soggetti ad un processo di validazione interno all'Ufficio di MeteoTrentino, che permette di assegnare un codice di qualità ai singoli dati misurati. Nel caso in cui il dato non venga ritenuto buono dal processo di validazione, esso può essere archiviato come incerto per analisi climatiche o per accertato malfunzionamento della stazione, non validato, mancante o mancante per guasto alla stazione. Solamente i dati ritenuti buoni dal processo di validazione di MeteoTrentino sono stati considerati in questo studio. Un ulteriore processo di validazione è stato poi applicato ai dati di temperatura di entrambe le reti, come descritto nella sezione 4.3.1.

4.2.2 Dati di precipitazione

Anche la precipitazione è misurata in Trentino da entrambe le reti di monitoraggio PAT e FEM, e anche in questo caso il numero di stazioni è aumentato negli anni (vedi tabella 4.3). Il periodo prescelto per l'analisi delle precipitazioni è stato, come nel caso della temperatura, dal 1992 al 2013, in quanto dopo il 1991 c'è stato un notevole incremento del numero di stazioni di misura (vedi tabella 4.4 e figura 4.3). Anche in questo caso solamente le stazioni che coprono con i dati più del 90% del tempo totale sono state utilizzate per questo studio (vedi figura 4.4). Solamente 3 stazioni, e per giunta molto vicine tra loro, sono ubicate al di sopra dei 1500 metri di quota. L'assenza di misure di precipitazione in quota è da tenere in considerazione nell'interpretare i risultati delle analisi statistiche condotte in seguito.

Mentre per le serie FEM gli accumuli orari di pioggia sono stati misurati sempre al minuto 00, i periodi temporali utilizzati per la misura della pioggia accumulata per le stazioni PAT sono diversi, ed essi sono

Available stations for temperature, 1992-2013

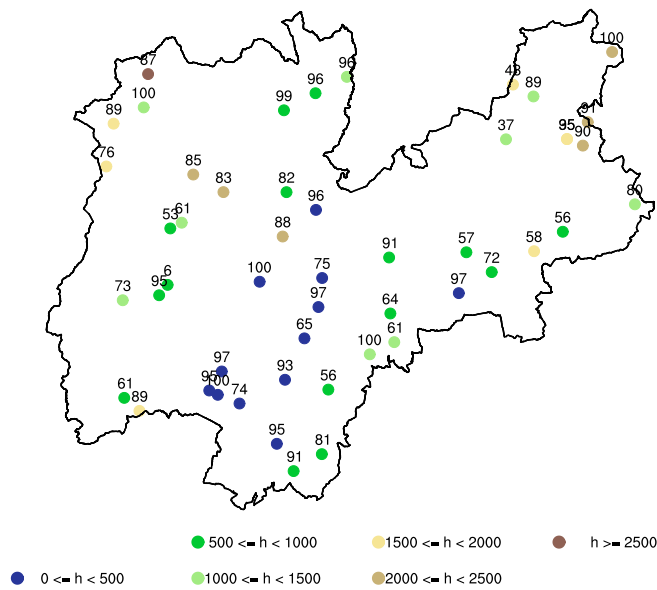


Figura 4.1: Stazioni meteorologiche con rilevamento della temperatura dal 1992 al 2013. I colori indicano la quota della stazione secondo la legenda in basso, mentre il numero indica per ogni stazione la percentuale di dati presenti.

Stations for temperature, 1992-2013 with > 90% of data

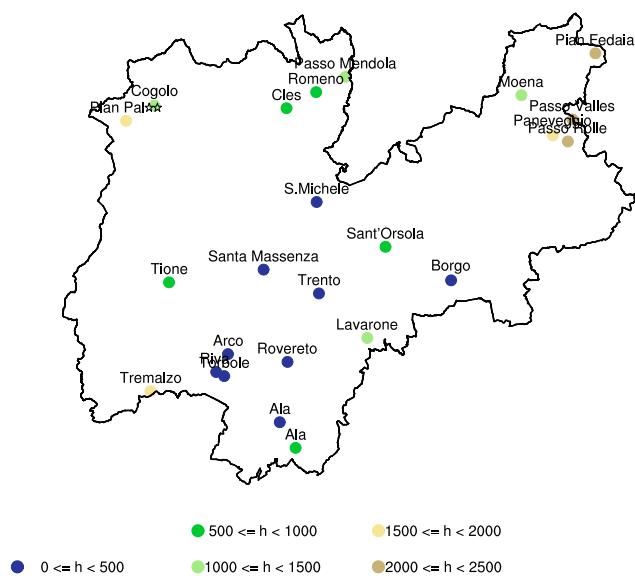


Figura 4.2: Stazioni meteorologiche con rilevamento della temperatura che presentano più del 90% di dati nel periodo 1992-2013. I colori indicano la quota della stazione secondo la legenda in basso.

Tabella 4.2: Stazioni meteorologiche che rilevano la temperatura prese in esame in questo studio.

Nome della stazione	Rete di monitoraggio	Quota [m]	Percentuale di dati presenti
Riva	FEM	66	95
Arco	FEM	84	97
Torbole (Belvedere)	PAT	90	99
Ala	FEM	172	95
Trento	FEM	185	97
Rovereto	PAT	203	100
San Michele	FEM	203	96
Santa Massenza (Centrale)	PAT	252	100
Borgo	FEM	420	97
Tione	PAT	533	100
Cles	FEM	656	95
Ala (Ronchi)	PAT	692	97
Sant'Orsola	PAT	925	91
Romeno	PAT	958	100
Lavarone (Chiesa)	PAT	1155	99
Cogolo Pont (Centrale)	PAT	1190	98
Moena (Diga Pezzè)	PAT	1205	100
Passo Mendola	PAT	1360	96
Paneveggio	FEM	1543	95
Tremalzo	PAT	1560	89
Pian Palù	PAT	1800	89
Passo Rolle	PAT	2012	91
Passo Valles	PAT	2032	93
Pian Fedaia (Diga)	PAT	2063	100

Tabella 4.3: Numero di stazioni meteorologiche che misurano la precipitazione attiva sulla provincia di Trento per diversi periodi.

periodo	numero di stazioni
1986-2013	12
1987-2013	12
1988-2013	14
1989-2013	17
1990-2013	18
1991-2013	30
1992-2013	50
1993-2013	53
1994-2013	59
1995-2013	60
1996-2013	60
1997-2013	60
1998-2013	60
1999-2013	61
2000-2013	64

anche cambiati negli anni per alcune delle stazioni; inoltre, essi variano tra le diverse stazioni. Pertanto anche per i dati di precipitazione è stato necessario creare un algoritmo per generare somme orarie di pioggia con frequenza oraria in modo da avere delle serie uniformi tra le due reti per le successive elaborazioni. Inoltre, solamente per le stazioni della rete PAT sono state create delle serie di accumuli di precipitazione oraria con frequenza temporale 5 minuti, informazione non disponibile per le serie FEM. I dati di precipitazione della rete PAT sono stati sottoposti al processo di validazione interno a MeteoTrentino come nel caso dei dati di temperatura. Successivamente, i dati di entrambe le reti sono stati sottoposti ad un'ulteriore validazione secondo quanto descritto nella sezione 4.3.1.

4.2.3 Dati di radiazione solare

I dati di radiazione solare utilizzati provengono dal database sviluppato per l'elaborazione dell'Atlante Solare del Trentino (Laiti et al., 2014). La rete radiometrica del Trentino è costituita da 104 stazioni attualmente in attività, gestite dalla PAT (26 stazioni), dalla FEM (77 stazioni) e dall'Università degli Studi di Trento (UNI, 1 stazione). Presso ognuna di tali stazioni è installato uno strumento che misura la radiazione globale incidente sul piano orizzontale (piranometro), con una risoluzione temporale variabile tra 10 minuti (Università di Trento), 15 minuti (PAT) e un'ora (FEM). Le misure di radiazione globale a risoluzione temporale diversa da quella oraria sono state inizialmente aggregate per ottenere dati omogenei tra loro. Le osservazioni disponibili per tutte le stazioni radiometriche nel periodo compreso tra il 01-01-1987 e il 31-12-2012 sono state poi sottoposte alla procedura automatica di validazione descritta nella sezione 4.3.2. La successiva omogeneizzazione e ricostruzione dei dati, che è riportata nel dettaglio in quella sezione, ha permesso di selezionare le 25 stazioni riportate nella tabella 4.5 e in figura 4.5, caratterizzate da serie temporali complete, validate e omogenee di radiazione cumulata giornaliera, per il periodo 2004-2012 (9 anni).

4.2.4 Dati di vento

I dati del vento provengono dalle stazioni di rilevamento della rete di monitoraggio FEM. In questo studio sono state considerate solamente le stazioni che nei 15 anni del periodo 1999-2013 presentano

Tabella 4.4: Stazioni meteorologiche che misurano la precipitazione prese in esame in questo studio.

Nome della stazione	Rete di monitoraggio	Quota [m]	Percentuale di dati presenti
Riva	FEM	66	96
Arco	FEM	84	97
Torbole (Belvedere)	PAT	90	99
Ala	FEM	172	95
Trento	FEM	185	98
Rovereto	PAT	203	100
San Michele	FEM	203	99
Santa Massenza (Centrale)	PAT	252	100
Borgo	FEM	420	99
Tione	PAT	533	100
Cles	FEM	656	99
Ala (Ronchi)	PAT	692	97
Romeno	PAT	958	100
Lavarone (Chiesa)	PAT	1155	99
Cogolo Pont (Centrale)	PAT	1190	99
Moena (Diga Pezzè)	PAT	1205	100
Passo Mendola	PAT	1360	95
Paneveggio	FEM	1543	95
Passo Rolle	PAT	2012	92
Passo Valles	PAT	2032	94

Available stations for rainfall, 1992-2013

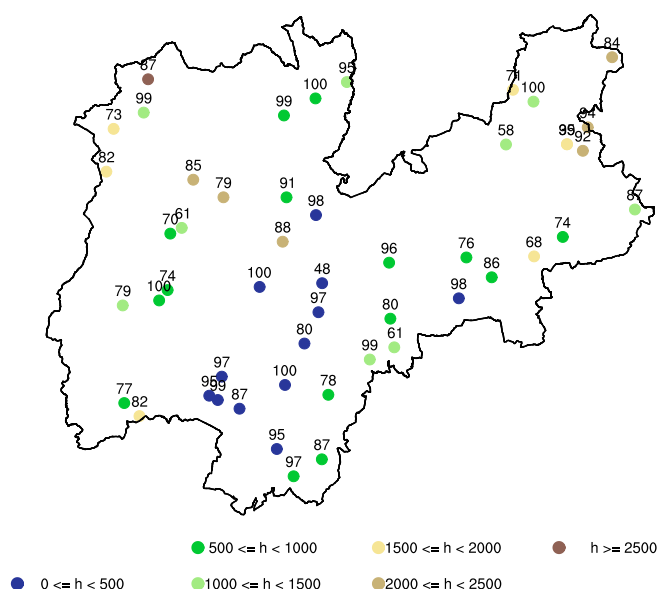


Figura 4.3: Stazioni meteorologiche che misurano la precipitazione dal 1992 al 2013. I colori indicano la quota della stazione secondo la legenda in basso, mentre il numero indica per ogni stazione la percentuale di dati presenti.

Stations for rainfall, 1992-2013 with > 90% of data

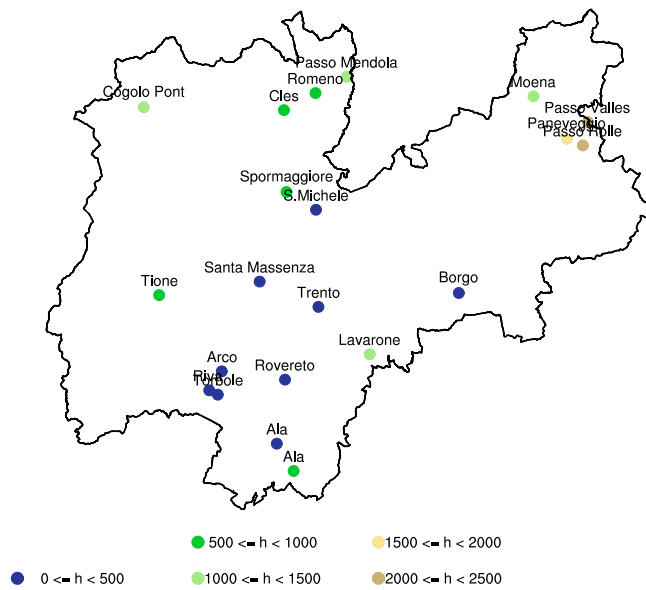


Figura 4.4: Stazioni meteorologiche che misurano la precipitazione che presentano più del 90% di dati nel periodo 1992-2013. I colori indicano la quota della stazione secondo la legenda in basso.

Available stations for solar radiation, 2004-2012

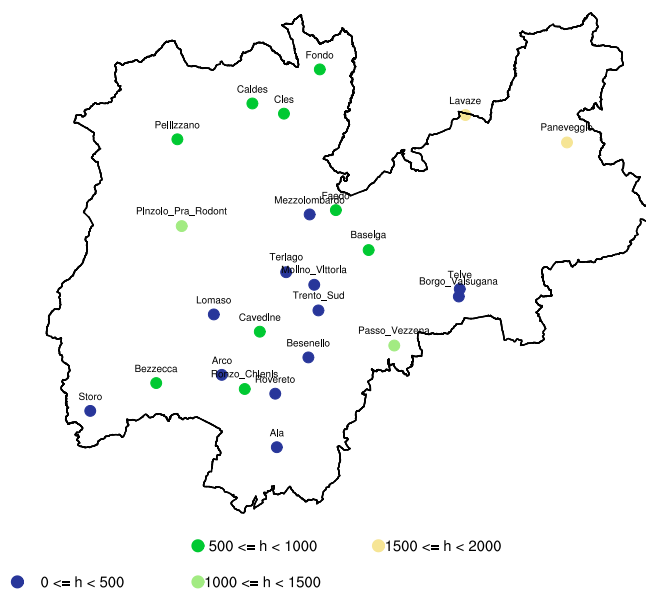


Figura 4.5: Stazioni meteorologiche che misurano la radiazione solare impiegate in questo studio.

Tabella 4.5: Stazioni meteorologiche che misurano la radiazione solare prese in esame in questo studio.

Nome della stazione	Rete di monitoraggio	Quota [m]
Ala	FEM	172
Arco	FEM	84
Baselga	FEM	983
Besenello	FEM	180
Bezzecca	FEM	705
Borgo Valsugana	FEM	420
Caldes	FEM	772
Cavedine	FEM	552
Cles	FEM	656
Faedo (Maso Togn)	FEM	695
Fondo	FEM	918
Lavazè	FEM	1807
Lomaso	FEM	492
Mezzolombardo	FEM	203
Paneveggio	FEM	1543
Passo Vezena	FEM	1368
Pellizzano	FEM	986
Pinzolo Prà Rodont	FEM	1498
Ronzo Chienis	FEM	957
Rovereto	FEM	170
Storo	FEM	385
Telve	FEM	412
Terlago	FEM	428
Trento Sud	FEM	185
Molino Vittoria	UNI	193

Available stations for wind, 1999-2013

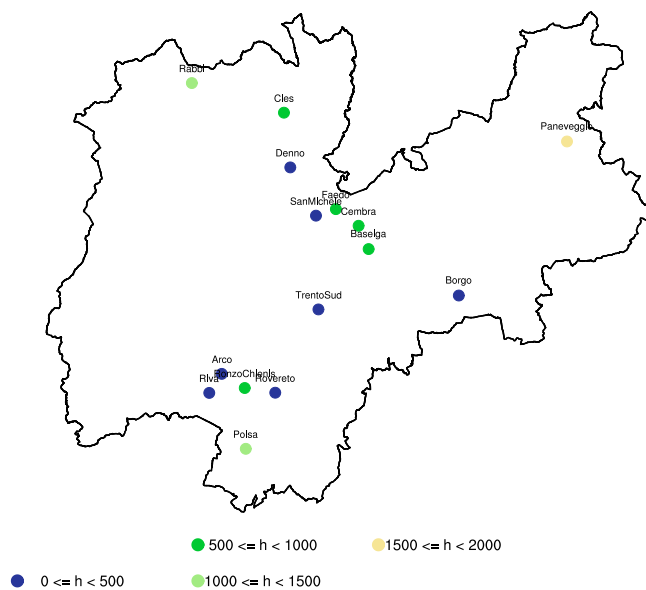


Figura 4.6: Stazioni meteorologiche che misurano direzione e intensità del vento impiegate in questo studio.

dati per almeno il 90% del tempo. L'ubicazione di tale stazioni è rappresentata nella figura 4.6, mentre la tabella 4.6 riporta la loro quota. Come si può notare, la maggior parte delle stazioni sono ubicate a quote basse e lungo le principali vallate del Trentino, informazione da tenere presente quando si analizzano i risultati delle elaborazioni presentate in seguito. Tutte le misure sono medie orarie, dalle quali si sono ricavate le medie giornaliere.

4.3 Validazione dei dati

4.3.1 Dati di temperatura e precipitazione

I dati di temperatura e precipitazione della rete FEM e PAT sono stati sottoposti ad un'ulteriore validazione. Questo si è reso necessario sia perché i dati della rete FEM non vengono sottoposti a nessuna validazione interna prima di essere diffusi, e sia perché si sono notati dei valori poco plausibili o errati nei dati della rete PAT, anche se questi erano già stati oggetto di una validazione interna da parte di MeteoTrentino. Pertanto è stato creato un algoritmo di validazione per garantire una maggiore qualità dei dati utilizzati in questo progetto. Esso si basa sulle linee guida dettate dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale in tema di controllo di qualità per dati di stazioni meteorologiche automatiche. Sostanzialmente la validazione esegue tre tipi di controllo sui dati:

1. Plausibilità: l'obiettivo di questo controllo è quello di verificare se il dato sia all'interno di un intervallo di valori fisicamente possibile.
2. Consistenza temporale: l'obiettivo di questo controllo è quello di verificare che la differenza tra due dati temporalmente vicini sia all'interno di un certo intervallo. Il dato viene confrontato sia con il valore precedente che con quello successivo.

Tabella 4.6: Stazioni meteorologiche che misurano il vento prese in esame in questo studio.

Nome della stazione	Rete di monitoraggio	Quota [m]
Arco	FEM	84
Baselga	FEM	983
Borgo Valsugana	FEM	420
Cembra	FEM	550
Cles	FEM	656
Denno	FEM	324
Faedo (Maso Togn)	FEM	695
Paneveggio	FEM	1543
Polsa	FEM	1310
Rabbi	FEM	1444
Riva	FEM	66
Ronzo Chienis	FEM	957
Rovereto	FEM	170
San Michele	FEM	203
Trento Sud	FEM	185

Tabella 4.7: Valori di temperatura in °C usati per il test di plausibilità sui dati di temperatura.

	stazioni più basse di 1000 m di 1000 m	stazioni tra 1000 m e 2000 m	stazioni più alte di 2000 m
valore minimo consentito	-20	-30	-30
valore massimo consentito	42	35	+30

3. Persistenza temporale: l'obiettivo di questo test è quello di controllare se i valori misurati durante un certo periodo temporale presentino una variabilità minima.

Il primo controllo effettuato è stato quello di plausibilità; i valori di temperatura e precipitazione utilizzati per questo test sono riportati nelle tabelle 4.7 e 4.8, e nel caso della pioggia dipendono necessariamente dal periodo di accumulazione usato per le misure. I dati che hanno superato il controllo di plausibilità sono stati poi controllati nella loro consistenza temporale, confrontando ogni valore dapprima con quello precedente e successivo (per individuare la possibile presenza di un picco), successivamente solo con quello precedente (per individuare la presenza di un gradino nei dati). Le soglie usate per questi controlli sono riportate nelle tabelle 4.9, 4.10, e anch'essi dipendono dalla risoluzione temporale dei dati. Tali valori di soglia sono scaturiti sia da considerazioni di carattere fisico che di carattere empirico. Solamente i dati che hanno superato i controlli di plausibilità e consistenza temporale sono stati poi testati per la loro persistenza temporale. Mentre non è stato necessario applicare questo test ai dati di pioggia a causa della naturale presenza di molti zeri consecutivi, ai dati di temperatura il test è stato applicato con un valore di soglia di 0.1°C. I dati di temperatura che hanno superato tutti e tre questi controlli sono stati inclusi nelle analisi statistiche di questo progetto, così come i dati di pioggia che hanno superato i primi due controlli. Ai dati rigettati è stato applicato un codice di qualità che varia a dipendenza del controllo non superato.

4.3.2 Dati di radiazione solare

I criteri utilizzati per il controllo di qualità dei dati di radiazione sono ampiamente diffusi e riconosciuti in letteratura (e.g. Journèe and Bertrand, 2011), e appartengono a cinque tipologie di controlli:

Tabella 4.8: Valori di precipitazione in mm usati per il test di plausibilità sui dati di pioggia.

tempo di accumulo	val. massimo consentito
5 min	20
10 min	30
15 min	40
30 min	50
60 min	60

Tabella 4.9: Valori di temperatura in °C usati per il test di consistenza temporale sui dati di temperatura.

risoluzione temporale	massimo valore consentito per un picco	massimo valore consentito per un gradino
5 min	3	4
10 min	4.5	6
15 min	6	8
30 min	7.5	10
60 min	9	12

Tabella 4.10: Valori di pioggia in mm usati per il test di consistenza temporale sui dati di pioggia.

risoluzione temporale	massimo valore consentito per un picco	massimo valore consentito per un gradino
5 min	12	15
10 min	20	25
15 min	25	35
30 min	35	45
60 min	40	50

1. Controllo di plausibilità, finalizzati ad accertarsi che i valori misurati siano fisicamente significativi. Per l'implementazione di tali test è stato utilizzato il modello di radiazione in condizioni di cielo sereno (o modello *clear-sky*) sviluppato nell'Atlante Europeo della Radiazione Solare ESRA (Scharmer and Greif, 2000; Rigollier et al., 2000; Remund and Page, 2002). Il modello ESRA consente di stimare accuratamente la radiazione massima incidente su un piano orizzontale al limite superiore dell'atmosfera (radiazione extraterrestre) e alla superficie terrestre (radiazione globale), in funzione delle coordinate geografiche e della quota del punto di interesse, ovvero prendendo in considerazione solamente fattori astronomici. Queste stime sono state utilizzate per definire i valori limite superiori ed inferiori con i quali filtrare le osservazioni. Data la complessa orografia del territorio trentino, è stato utilizzato il Sistema Informativo Geografico GRASS, che include un modello *clear-sky* basato sulle equazioni del modello ESRA (Hofierka and Sùri, 2002) per modellare adeguatamente gli effetti di ombreggiamento orografico e per calcolare gli orari di alba e tramonto astronomici e orografici, ovvero gli orari di inizio e termine dell'irradiazione diretta. Per le osservazioni orarie effettuate durante aurora e crepuscolo (definiti come gli intervalli di tempo compresi tra gli orari di alba/tramonto astronomica/o e orografica/o) che misurano la sola componente diffusa della radiazione solare, è stato applicato un limite superiore di $0.76 \text{ MJ}/\text{m}^2$.
2. Controllo di consistenza temporale, finalizzato ad escludere le misure successive che presentano variazioni fisicamente non accettabili (a seconda della frequenza di campionamento), come picchi improvvisi o valori troppo ridotti. Seguendo le indicazioni di Journèe and Bertrand (2011), è stato imposto un limite superiore di variazione tra misure successive pari al 75% del valore delle misure stesse.
3. Controllo di persistenza temporale, che impone limiti superiori e inferiori alla variabilità delle misure orarie valutata su base giornaliera. Alla deviazione standard giornaliera della radiazione normalizzata sono stati imposti come limite superiore un ottavo della media della variabile stessa e come limite inferiore il 35% (escludendo le ore notturne).
4. Controllo di consistenza esterna, atto a confrontare i dati di stazioni vicine tra loro situate a quote simili e con condizioni di insolazione confrontabili. Questo test è stato effettuato su dati di radiazione cumulati giornalieri. È stato imposto un limite superiore sul valore assoluto della differenza tra le misure presso la stazione in esame e i valori stimati tramite interpolazione delle misure dalle stazioni vicine, pari al 150% del valore assoluto di tale differenza media per le stazioni vicine.
5. Controlli basati su statistiche mensili e annuali. Per le serie di lunghezza superiore a cinque anni sono state analizzate le statistiche mensili e annuali, in particolare media, mediana, massimo e deviazione standard, per verificare la presenza di eventuali derive e salti nelle misure (ovvero inomogeneità).

I dati validati sono stati successivamente sottoposti a un'analisi di omogeneità seguendo il metodo descritto in Longman et al. (2013), che si basa sul confronto tra le osservazioni (orarie) e i valori stimati tramite un modello *clear-sky* (ESRA), limitatamente alle sole giornate con cielo sereno e alle ore di picco della radiazione solare (tipicamente dalle 10:00 alle 16:00 LST, in funzione della presenza o meno di effetti di ombreggiamento orografico). L'analisi si concentra essenzialmente sulle serie temporali della quantità adimensionale denominata "daily clear-day ratio", pari al rapporto tra la media delle osservazioni considerate per il singolo giorno e la media dei corrispondenti valori stimati dal modello. Con questo metodo sono state identificate (e corrette ove possibile) eventuali inomogeneità presenti nelle serie temporali analizzate.

Infine, è stata eseguita una ricostruzione dei dati mancanti utilizzando il database di radiazione solare

da satellite HelioMont (Stöckli, 2013), disponibile per il periodo 2004-2012. La ricostruzione è stata circoscritta alle sole serie di valori cumulati giornalieri di radiazione, in quanto la risoluzione spaziale del dato satellitare (2 km) si è rivelata non sufficiente per una stima accurata dei valori orari, a causa della riproduzione inadeguata degli effetti orografici a scala locale. Per la stima dei dati mancanti sono state calcolate 12 regressioni lineari su base mensile tra i dati giornalieri da satellite e i dati giornalieri disponibili per le 25 stazioni al suolo. Le regressioni lineari hanno mostrato coefficienti di correlazione di Pearson significativi, mai inferiori a 0.7, e un'analisi di validazione incrociata ha permesso di stimare l'errore medio assoluto commesso nella ricostruzione come compreso in media tra il 3% (nei mesi estivi) e il 15% (nei mesi invernali).

4.3.3 Dati di vento

I dati di vento utilizzati per questo studio sono stati sottoposti ad un controllo di qualità secondo quanto riportato in Jiménez et al. (2010) e Chávez-Arroyo and Probst (2013). In particolare, sono stati effettuati i test seguenti:

1. Controllo di plausibilità, finalizzato ad accertare che i valori misurati siano fisicamente significativi. La velocità del vento deve essere maggiore uguale di 0 m/s e minore di 30 m/s.
2. Controllo di persistenza temporale, finalizzato a controllare se i valori misurati all'interno di un certo intervallo temporale presentino una variabilità minima. In condizioni di calma di vento (velocità minore di 0.5 m/s) i dati sono stati controllati manualmente quando più di 12 misure consecutive (12 ore) presentavano lo stesso valore, mentre i dati sono stati eliminati se più di 24 misure presentavano lo stesso valore. In condizioni di vento (velocità maggiore di 0.5 m/s), i dati sono stati eliminati se più di 5 misure presentavano lo stesso valore. La suddivisione tra condizioni di calma di vento e condizioni di vento si è resa necessaria perchè in condizioni di calma di vento periodi prolungati con velocità del vento costante sono più frequenti.
3. Controllo di consistenza temporale, il cui obiettivo è quello di verificare che la differenza tra due dati temporalmente vicini sia all'interno di un certo intervallo. Se la differenza tra due misure consecutive risultava maggiore di 10 m/s, i dati sono stati eliminati. La soglia di 10 m/s è stata derivata dall'analisi della distribuzione delle differenze tra misure successive.
4. Controllo sulla frequenza delle calme, finalizzato a identificare periodi sospetti prolungati con vento praticamente assente (velocità minore di 0.5 m/s). In questo caso i dati sono stati controllati manualmente utilizzando soglie derivate da un'analisi della frequenza dei periodi di calma per le diverse stazioni analizzate.
5. Controllo basato sulla media e varianza mobili, finalizzato ad identificare errori sistematici nella misura del vento.

Capitolo 5

Metodi statistici

Al fine di analizzare l'effetto sul Trentino dei diversi tipi di circolazione sinottica identificati dal metodo di classificazione GWT, sono state fatte molte analisi statistiche mettendo in relazione i tipi di tempo con i dati misurati dalle stazioni meteorologiche. In questa sezione vengono introdotte le quantità statistiche utilizzate in questa analisi, suddivise in base alla grandezza atmosferica a cui sono state applicate: temperatura (sezione 5.1), precipitazione (sezione 5.2), radiazione solare (sezione 5.3) e vento (sezione 5.4). I risultati saranno poi presentati nel capitolo 7.

5.1 Temperatura

I dati di temperatura delle stazioni della tabella 4.2 sono stati analizzati utilizzando le quantità statistiche descritte in questa sezione, che sono state calcolate per ogni stazione e per ogni tipo di circolazione sinottica, a livello stagionale o annuale:

- *Numero di giorni con dati di temperatura.* Questo numero indica semplicemente il numero di giorni n_t in cui si è verificato un determinato tipo di tempo all'interno del periodo preso in esame. Tale numero può essere diverso da quello riportato nell'istogramma di figura 6.1 per il corrispondente tipo di circolazione sinottica, perché esso comprende solo i giorni in cui si hanno dati validi di temperatura per la stazione in esame.
- *Percentuale di notti tropicali.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giorni con temperatura minima superiore a 20°C .
Per uno specifico tipo di tempo $t = 1, \dots, T$ al quale appartengono i giorni $i = 1, \dots, N$ la cui temperatura minima è stata $T_{\min,t,i}$, la percentuale di notti tropicali $f_{nt,t}$ è data da:

$$f_{nt,t}[\%] = \frac{n_{nt,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.1)$$

dove $n_{nt,t} = \text{num.giorni}(T_{\min,t,i} > 20^\circ\text{C})$

- *Percentuale di giorni tropicali.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giorni con temperatura massima superiore a 30°C .
La percentuale di giorni tropicali $f_{gt,t}$ è data da:

$$f_{gt,t}[\%] = \frac{n_{gt,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.2)$$

dove $n_{gt,t} = \text{num.giorni}(T_{\max,t,i} > 30^\circ\text{C})$

- *Percentuale di giorni estivi.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giorni con temperatura massima superiore a 25°C.

La percentuale di giorni estivi $f_{ge,t}$ è data da:

$$f_{ge,t}[\%] = \frac{n_{ge,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.3)$$

dove $n_{ge,t} = \text{num.giorni}(T_{max,t,i} > 25^\circ C)$

- *Percentuale di giorni di ghiaccio.* Tale quantità rappresenta la percentuale di giorni con temperatura massima inferiore a 0°C.

La percentuale di giorni di ghiaccio $f_{gi,t}$ è data da:

$$f_{gi,t}[\%] = \frac{n_{gi,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.4)$$

dove $n_{gi,t} = \text{num.giorni}(T_{max,t,i} < 0^\circ C)$

- *Percentuale di giorni di gelo.* Tale quantità rappresenta la percentuale di giorni con temperatura minima inferiore a 0°C.

La percentuale di giorni di gelo $f_{gg,t}$ è data da:

$$f_{gg,t}[\%] = \frac{n_{gg,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.5)$$

dove $n_{gg,t} = \text{num.giorni}(T_{min,t,i} < 0^\circ C)$

- *Minima delle minime.* Tale valore $T_{MIN,t}$ è la temperatura più bassa tra le temperature minime registrate in corrispondenza ad un certo tipo di tempo:

$$T_{MIN,t}[^{\circ}C] = \min(T_{min,t,i}) \quad (5.6)$$

- *Massima delle massime.* Tale valore $T_{MAX,t}$ è la temperatura più alta tra le temperature massime registrate in corrispondenza ad un certo tipo di tempo:

$$T_{MAX,t}[^{\circ}C] = \max(T_{max,t,i}) \quad (5.7)$$

- *Percentuale di giorni caldi.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giornate calde verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita calda se la sua temperatura massima $T_{max,t,i}$ è superiore a $T_{max,90}$, il 90 percentile delle temperature massime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Il numero di giornate calde $n_{giornicaldi,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{giornicaldi,t} = \text{num.giorni}(T_{max,t,i} > T_{max,90}) \quad (5.8)$$

con

$$T_{max,90} = 90\text{perc.}(T_{max,d-4}, T_{max,d-3}, T_{max,d-2}, T_{max,d-1}, T_{max,d}, T_{max,d+1}, T_{max,d+2}, T_{max,d+3}, T_{max,d+4}) \quad (5.9)$$

La percentuale di giorni caldi per ogni tipo di tempo $f_{giornicaldi,t}$ è quindi pari a:

$$f_{giornicaldi,t}[\%] = \frac{n_{giornicaldi,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.10)$$

dove, lo ricordiamo, N è il numero totale di giorni caratterizzati dal tipo di tempo t .

- *Percentuale di giorni freddi.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giornate fredde verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita fredda se la sua temperatura massima $T_{max,t,i}$ è inferiore a $T_{max,10}$, il 10 percentile delle temperature massime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Il numero di giornate fredde $n_{giornifreddi,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{giornifreddi,t} = num.giorni(T_{max,t,i} < T_{max,10}) \quad (5.11)$$

dove

$$T_{max,10} = 10perc.(T_{max,d-4}, T_{max,d-3}, T_{max,d-2}, T_{max,d-1}, T_{max,d}, T_{max,d+1}, T_{max,d+2}, T_{max,d+3}, T_{max,d+4}) \quad (5.12)$$

La percentuale di giorni freddi per ogni tipo di tempo $f_{giornifreddi,t}$ è quindi pari a:

$$f_{giornifreddi,t}[\%] = \frac{n_{giornifreddi,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.13)$$

- *Percentuale di notti calde.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di notti calde verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Una notte caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita calda se la sua temperatura minima $T_{min,t,i}$ è superiore a $T_{min,90}$, il 90 percentile delle temperature minime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Il numero di notti calde $n_{notticalde,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{notticalde,t} = num.giorni(T_{min,t,i} > T_{min,90}) \quad (5.14)$$

dove

$$T_{min,90} = 90perc.(T_{min,d-4}, T_{min,d-3}, T_{min,d-2}, T_{min,d-1}, T_{min,d}, T_{min,d+1}, T_{min,d+2}, T_{min,d+3}, T_{min,d+4}) \quad (5.15)$$

La percentuale di notti calde per ogni tipo di tempo $f_{notticalde,t}$ è quindi pari a:

$$f_{notticalde,t}[\%] = \frac{n_{notticalde,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.16)$$

- *Percentuale di notti fredde.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di notti fredde verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Una notte caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita fredda se la sua temperatura minima $T_{min,t,i}$ è inferiore a $T_{min,10}$, il 10 percentile delle temperature minime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Il numero di notti fredde $n_{nottifredde,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{nottifredde,t} = num.giorni(T_{min,t,i} < T_{min,10}) \quad (5.17)$$

dove

$$T_{min,10} = 10perc.(T_{min,d-4}, T_{min,d-3}, T_{min,d-2}, T_{min,d-1}, T_{min,d}, T_{min,d+1}, T_{min,d+2}, T_{min,d+3}, T_{min,d+4}) \quad (5.18)$$

La percentuale di notti fredde per ogni tipo di tempo $f_{nottifredde,t}$ è quindi pari a:

$$f_{nottifredde,t}[\%] = \frac{n_{nottifredde,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.19)$$

- *Anomalia stagionale di temperatura media giornaliera.* Tale quantità statistica rappresenta l'anomalia di temperatura media giornaliera associata ad ogni tipo di circolazione sinottica, ed è stata calcolata solamente su base stagionale.

Inizialmente è stata calcolata l'anomalia standardizzata mensile, la cui formula è data da:

$$A_{temp,t,month} = \frac{(\bar{T}_{t,month} - \bar{T}_{month})}{\sigma_{T,month}} \quad (5.20)$$

dove $\bar{T}_{t,month} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{t,i}$ rappresenta la temperatura media giornaliera misurata in presenza di un certo tipo di circolazione sinottica in un certo mese, $\bar{T}_{month} = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D T_d$ è la temperatura media giornaliera mensile, con D il numero dei giorni del mese, e $\sigma_{T,month} = \frac{\sum_{d=1}^D (T_d - \bar{T}_{month})^2}{D-1}$ la deviazione standard della temperatura media giornaliera mensile.

Una volta ottenuta l'anomalia standardizzata mensile per ogni mese dell'anno, l'anomalia stagionale è stata ricavata mediando le anomalie dei tre mesi che fanno parte di ogni stagione. Così, se $A_{temp,t,m1}$, $A_{temp,t,m2}$ e $A_{temp,t,m3}$ sono le anomalie mensili dei mesi composti da D_1 , D_2 e D_3 giorni rispettivamente, l'anomalia stagionale $A_{temp,t,sea}$ è data da:

$$A_{temp,t,sea} = \frac{A_{temp,t,m1} \cdot D_1 + A_{temp,t,m2} \cdot D_2 + A_{temp,t,m3} \cdot D_3}{D_1 + D_2 + D_3} \quad (5.21)$$

5.2 Precipitazione

5.2.1 Precipitazione giornaliera

La precipitazione giornaliera misurata dalle stazioni della tabella 4.4 è stata analizzata utilizzando le seguenti quantità statistiche, che sono state calcolate per ogni stazione e per ogni tipo di circolazione sinottica, a livello stagionale o annuale:

- *Numero di giorni con dati di precipitazione.* Questo numero indica semplicemente il numero di giorni n_t in cui si è verificato un determinato tipo di tempo all'interno del periodo preso in esame. Tale numero può essere diverso da quello riportato nell'istogramma di figura 6.1 per il corrispondente tipo di circolazione sinottica, perché esso comprende solo i giorni in cui si hanno dati validi di precipitazione per la stazione in esame.
- *Precipitazione giornaliera media condizionata.* Tale grandezza è la media della precipitazione misurata in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica in cui si è avuto precipitazione.

Per uno specifico tipo di tempo $t = 1, \dots, T$ al quale appartengono i giorni $i = 1, \dots, N$ in cui è piovuto $R_{t,i}$, la media condizionata $\bar{R}_{cond,t}$ è data da:

$$\bar{R}_{cond,t} [mm] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{t,i} \quad (5.22)$$

dove

$$R_{t,i} > 0.2mm$$

- *Contributo alla precipitazione totale.* Esprime il contributo percentuale di un certo tipo di circolazione sinottica alla pioggia totale misurata nel periodo 1992-2013 (o in una certa stagione di tale periodo) per la stazione presa in esame.

Se $d = 1, \dots, D$ sono tutti i giorni del periodo analizzato in cui é piovuto R_d , seguendo la simbologia introdotta in precedenza il contributo percentuale alla precipitazione totale C_t del tipo di tempo t é dato da:

$$C_t[\%] = \frac{\sum_{i=1}^N R_{t,i}}{\sum_{d=1}^D R_d} \cdot 100 \quad (5.23)$$

- *Massimo della precipitazione giornaliera.* Questa grandezza é semplicemente il valore piú alto della pioggia giornaliera misurato in corrispondenza ad uno specifico tipo di circolazione sinottica. Il massimo giornaliero $R_{max,t}$ é dato da

$$R_{max,t}[mm] = \max(R_{t,i}) \quad (5.24)$$

Per poter confrontare la massima precipitazione giornaliera di diverse stazioni tra le varie situazioni sinottiche, si é reso necessario effettuare una normalizzazione di $R_{max,t}$ rispetto alla massima precipitazione di ogni stazione nel periodo preso in esame:

$$R_{max,norm,t} = \max(R_{t,i}) / \max(R_d) \quad (5.25)$$

- *Frequenza dei giorni di pioggia.* Questa grandezza esprime la frequenza percentuale dei giorni in cui é piovuto all'interno di un tipo di circolazione sinottica. Se $n_{rain,t}$ rappresenta il numero di giorni all'interno del tipo di tempo t in cui $R_{t,i} > 0.2mm$, la frequenza percentuale di giorni di pioggia $f_{rain,t}$ é data da:

$$f_{rain,t}[\%] = \frac{n_{rain,t}}{D} \cdot 100 \quad (5.26)$$

dove D é il totale di giorni di pioggia del periodo analizzato.

- *Numero di giorni di pioggia intensa.* Tale quantità rappresenta il numero di giorni appartenenti ad una certa situazione sinottica in cui la precipitazione é stata superiore al 95 percentile della distribuzione di pioggia giornaliera di quella stazione, calcolato considerando solamente i giorni di pioggia.

Il numero di giorni di pioggia intensa $N_{R95,t}$ é dato da:

$$N_{R95,t}[\text{giorni}] = \text{num.giorni}(R_{t,i} > R_{95}) \quad (5.27)$$

dove R_{95} rappresenta il 95 percentile della distribuzione degli R_d di una data stazione, con $R_d > 0.2mm$.

- *Anomalia stagionale di precipitazione giornaliera.* Tale quantità statistica rappresenta l'anomalia di precipitazione giornaliera associata ad ogni tipo di circolazione sinottica, ed é stata calcolata solamente su base stagionale.

In particolare, é stata calcolata l'anomalia standardizzata $A_{rain,t,sea}$, la cui formula é data da:

$$A_{rain,t,sea} = \frac{(\bar{R}_{t,sea} - \bar{R}_{sea})}{\sigma_{R,sea}} \quad (5.28)$$

dove $\bar{R}_{t,sea} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{t,i}$ rappresenta la precipitazione media misurata in presenza di un certo tipo di circolazione sinottica in una certa stagione, $\bar{R}_{sea} = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D R_d$ é la pioggia giornaliera media stagionale, e $\sigma_{R,sea} = \frac{\sum_{d=1}^D (R_d - \bar{R}_{sea})^2}{D-1}$ la deviazione standard della pioggia giornaliera stagionale. L'anomalia di precipitazione giornaliera é stata calcolata considerando sia tutti i giorni della stagione in esame, sia solamente i giorni in cui é piovuto all'interno della stagione in esame ($R_{t,i} > 0.2mm$ e $R_d > 0.2mm$). In quest'ultimo caso, si parla di *anomalia stagionale di precipitazione giornaliera condizionata*.

5.2.2 Precipitazione oraria

Come detto nella sezione 4.2.2, per le stazioni di rilevamento della rete PAT sono state calcolate somme orarie con frequenza temporale di 5 minuti. Quindi, per ogni giorno si hanno 288 valori di pioggia oraria. Per l'analisi di tali valori sono state utilizzate le seguenti quantità statistiche:

- *Numero di ore per ogni tipo di tempo.* Questo numero indica semplicemente il numero di ore $n_{hours,t}$ in cui si é verificato un determinato tipo di tempo all'interno del periodo preso in esame e si sono avuti dati buoni di precipitazione oraria per la stazione considerata.
- *Precipitazione media oraria condizionata.* Tale grandezza é la media della precipitazione oraria misurata in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica in cui si é avuto precipitazione.

Per uno specifico tipo di tempo $t = 1, \dots, T$ al quale appartengono i giorni $i = 1, \dots, N$ in cui la precipitazione oraria é stata $r_{t,i,h}$ con $h = 1, \dots, H$ dove $H = 288$ (tutte le ore all'interno di un giorno sulle quali si sono calcolate le somme), la media condizionata $\bar{r}_{cond,t}$ é data da:

$$\bar{r}_{cond,t}[mm] = \frac{1}{N * H} \sum_{i=1}^{N*H} r_{t,i,h} \quad (5.29)$$

dove

$$r_{t,i,h} > 0.2mm$$

- *Massimo della precipitazione oraria.* Questa grandezza é semplicemente il valore piú alto della pioggia oraria misurato in corrispondenza ad uno specifico tipo di circolazione sinottica. Il massimo giornaliero $r_{max,t}$ é dato da

$$r_{max,t}[mm] = \max(r_{t,i,h}) \quad (5.30)$$

Per poter confrontare la massima precipitazione oraria di diverse stazioni tra le varie situazioni sinottiche, anche nel caso della pioggia oraria si é reso necessario effettuare una normalizzazione di $r_{max,t}$ rispetto alla massima precipitazione oraria di ogni stazione nel periodo preso in esame:

$$r_{max,norm,t} = \max(r_{t,i,h}) / \max(r_h) \quad (5.31)$$

dove r_h rappresenta i valori di precipitazione oraria nel periodo preso in esame.

- *Numero di ore di pioggia intensa.* Tale quantità rappresenta il numero di ore appartenenti ad una certa situazione sinottica in cui la precipitazione é stata superiore al 95 percentile della distribuzione di pioggia oraria di quella stazione, calcolato considerando solamente le ore di pioggia. Il numero di ore di pioggia intensa $n_{R95,t}$ é dato da:

$$n_{R95,t}[ore] = \text{num.ore}(r_{t,i,h} > r_{95,h}) \quad (5.32)$$

dove $R_{95,h}$ rappresenta il 95 percentile della distribuzione degli R_h di una data stazione, con $R_h > 0.2mm$.

- *Durata media della pioggia.* Questa grandezza rappresenta il numero medio di ore $n_{rain,day,t}$ in un giorno appartenente ad un certo tipo di tempo in cui é piovuto:

$$n_{rain,day,t}[ore/giorno] = \text{num.ore}(r_{t,i,h} > 0.2) \quad (5.33)$$

5.3 Radiazione solare

I dati di radiazione solare cumulata giornaliera delle stazioni della tabella 4.5 sono stati analizzati utilizzando le quantità statistiche descritte in questa sezione, che sono state calcolate per ogni stazione, per ogni tipo di circolazione sinottica e per ogni stagione:

- *Numero di giorni con dati di radiazione.* Questo numero indica semplicemente il numero di giorni n_t in cui si é verificato un determinato tipo di tempo all'interno del periodo preso in esame per l'analisi dei dati di radiazione (2004-2012).
- *Radiazione solare cumulata giornaliera media.* Tale grandezza é la media della radiazione solare cumulata giornaliera misurata in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica. Per uno specifico tipo di tempo $t = 1, \dots, T$ al quale appartengono i giorni $i = 1, \dots, N$ la cui radiazione solare cumulata giornaliera è stata $rad_{t,i}$, la radiazione media \bar{rad}_t é data da:

$$\bar{rad}_t \left[\frac{MJ}{m^2} \right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N rad_{t,i} \quad (5.34)$$

- *Contributo alla radiazione totale.* Esprime il contributo percentuale di un certo tipo di circolazione sinottica alla radiazione solare totale misurata in una certa stagione del periodo 2004-2012 per la stazione presa in esame.

Se $d = 1, \dots, D$ sono tutti i giorni del periodo analizzato la cui radiazione solare giornaliera cumulata è stata rad_d , il contributo percentuale alla radiazione totale $C_{rad,t}$ del tipo di tempo t é dato da:

$$C_{rad,t} [\%] = \frac{\sum_{i=1}^N rad_{t,i}}{\sum_{d=1}^D rad_d} \cdot 100 \quad (5.35)$$

- *Anomalia stagionale di radiazione solare cumulata giornaliera.* Tale quantità statistica rappresenta l'anomalia di radiazione solare cumulata giornaliera associata ad ogni tipo di circolazione sinottica.

Come nel caso della temperatura, inizialmente é stata calcolata l'anomalia standardizzata mensile, la cui formula, seguendo la simbologia introdotta, é data da:

$$A_{rad,t,month} = \frac{(\bar{rad}_{t,month} - \bar{rad}_{month})}{\sigma_{rad,month}} \quad (5.36)$$

Una volta ottenuta l'anomalia standardizzata mensile per ogni mese dell'anno, l'anomalia stagionale è stata ricavando mediando le anomalie dei tre mesi che fanno parte di ogni stagione. Così, se $A_{rad,t,m1}$, $A_{rad,t,m2}$ e $A_{rad,t,m3}$ sono le anomalie mensili dei mesi composti da D_1 , D_2 e D_3 giorni rispettivamente, l'anomalia stagionale $A_{t,sea}$ è data da:

$$A_{rad,t,sea} = \frac{A_{rad,t,m1} \cdot D_1 + A_{rad,t,m2} \cdot D_2 + A_{rad,t,m3} \cdot D_3}{D_1 + D_2 + D_3} \quad (5.37)$$

- *Percentuale di giorni scuri.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giornate scure (poco luminose) verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo. Una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita scura se la sua cumulata giornaliera di radiazione solare $rad_{t,i}$ è inferiore a rad_{10} , il 10 percentile delle cumulate giornaliere di radiazione solare registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Il numero di giornate scure $n_{giorniscuri,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{giorniscuri,t} = num.giorni(rad_{t,i} < rad_{10}) \quad (5.38)$$

dove

$$rad_{10} = 10perc.(rad_{d-4}, rad_{d-3}, rad_{d-2}, rad_{d-1}, rad_d, rad_{d+1}, rad_{d+2}, rad_{d+3}, rad_{d+4}) \quad (5.39)$$

La percentuale di giorni scuri per ogni tipo di tempo $f_{giorniscuri,t}$ è quindi pari a:

$$f_{giorniscuri,t}[\%] = \frac{n_{giorniscuri,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.40)$$

- *Percentuale di giorni chiari.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giornate chiare (lumino- nose) verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita chiara se la sua cumulata giornaliera di radiazione solare $rad_{t,i}$ è superiore a rad_{90} , il 90 percentile delle cumulate giornaliere di radiazione solare registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Il numero di giornate chiare $n_{giornichiar,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{giornichiar,t} = num.giorni(rad_{t,i} > rad_{90}) \quad (5.41)$$

dove

$$rad_{90} = 90perc.(rad_{d-4}, rad_{d-3}, rad_{d-2}, rad_{d-1}, rad_d, rad_{d+1}, rad_{d+2}, rad_{d+3}, rad_{d+4}) \quad (5.42)$$

La percentuale di giorni chiari per ogni tipo di tempo $f_{giornichiar,t}$ è quindi pari a:

$$f_{giornichiar,t}[\%] = \frac{n_{giornichiar,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.43)$$

5.4 Vento

I dati di vento misurati dalle stazioni della tabella 4.6 sono stati analizzati utilizzando le quantità statistiche descritte in questa sezione, che sono state calcolate per ogni stazione, per ogni tipo di circolazione sinottica e per ogni stagione:

- *Numero di giorni con dati di vento.* Questo numero indica semplicemente il numero di giorni n_t in cui si è verificato un determinato tipo di tempo all'interno del periodo preso in esame. Tale numero può essere diverso da quello riportato nell'istogramma di figura 6.1 per il corrispondente tipo di circolazione sinottica, perché esso comprende solo i giorni in cui si hanno dati validi di vento per la stazione in esame.
- *Velocità del vento medio giornaliero.* Tale grandezza è la media del vento medio giornaliero misurato in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica. Per uno specifico tipo di tempo $t = 1, \dots, T$ al quale appartengono i giorni $i = 1, \dots, N$ la cui intensità del vento è stata $w_{t,i}$, la velocità del vento media giornaliera \bar{w}_t è data da:

$$\bar{w}_t [m/s] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{t,i} \quad (5.44)$$

- *Direzione del vento medio giornaliero.* Tale grandezza è la media della direzione del vento giornaliera misurata in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica.

- *Massima velocità del vento medio giornaliero.* Tale grandezza é il valore massimo del vento medio giornaliero misurato in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica. La massima velocità del vento giornaliera $w_{max,t}$ é data da:

$$w_{max,t}[m/s] = \max(w_{t,i}) \quad (5.45)$$

Per poter confrontare la massima velocità del vento giornaliera di diverse stazioni tra le varie situazioni sinottiche, si é reso necessario effettuare una normalizzazione di $w_{max,t}$ rispetto alla massima velocità del vento giornaliera di ogni stazione nel periodo preso in esame:

$$w_{max, norm,t} = \max(w_{t,i}) / \max(w_d) \quad (5.46)$$

dove w_d rappresenta i valori di vento giornaliero di tutto il periodo analizzato.

- *Massima velocità del vento medio orario.* Tale grandezza é il valore massimo del vento orario misurato in tutti i giorni corrispondenti ad una certa situazione sinottica. Per uno specifico tipo di tempo $t = 1, \dots, T$ al quale appartengono i giorni $i = 1, \dots, N$ la cui intensità del vento oraria è stata $w_{t,i,h}$, con $h = 1, \dots, 24$, la massima velocità del vento oraria $w_{max,t,h}$ é data da:

$$w_{max,t,h}[m/s] = \max(w_{t,i,h}) \quad (5.47)$$

Per poter confrontare la massima velocità del vento oraria di diverse stazioni tra le varie situazioni sinottiche, si é reso necessario effettuare una normalizzazione di $w_{max,t,h}$ rispetto alla massima velocità del vento oraria di ogni stazione nel periodo preso in esame:

$$w_{max, norm,t,h} = \max(w_{t,i,h}) / \max(w_h) \quad (5.48)$$

dove w_h rappresenta i valori di vento orario di tutto il periodo analizzato.

- *Percentuale di giorni poco ventosi.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giornate poco ventose verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo. Una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita poco ventosa se il suo valore di vento medio giornaliero $w_{t,i}$ è inferiore a w_{10} , il 10 percentile della distribuzione climatologica dei valori di vento medio giornaliero. Il numero di giornate poco ventose $n_{giornipocovento,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{giornipocovento,t} = \text{num.giorni}(w_{t,i} < w_{10}) \quad (5.49)$$

dove

$$w_{10} = 10\text{perc.}(w_{t,i}) \quad (5.50)$$

con

$$w_{t,i} > 0 \quad (5.51)$$

La percentuale di giorni poco ventosi per ogni tipo di tempo $f_{giornipocovento,t}$ è quindi pari a:

$$f_{giornipocovento,t}[\%] = \frac{n_{giornipocovento,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.52)$$

- *Percentuale di giorni molto ventosi.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di giornate molto ventose verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo. Una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita molto ventosa se il suo valore di vento medio giornaliero $w_{t,i}$ è superiore a w_{90} , il 90 percentile della distribuzione climatologica dei valori

di vento medio giornaliero. Il numero di giornate molto ventose $n_{giornimoltovento,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{giornimoltovento,t} = num.giorni(w_{t,i} > w_{90}) \quad (5.53)$$

dove

$$w_{90} = 90perc.(w_{t,i}) \quad (5.54)$$

con

$$w_{t,i} > 0 \quad (5.55)$$

La percentuale di giorni molto ventosi per ogni tipo di tempo $f_{giornimoltovento,t}$ è quindi pari a:

$$f_{giornimoltovento,t}[\%] = \frac{n_{giornimoltovento,t}}{N} \cdot 100 \quad (5.56)$$

- *Percentuale di ore poco ventose.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di ore poco ventose verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Un'ora appartenente ad una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita poco ventosa se il suo valore di vento medio orario $w_{t,i,h}$ è inferiore a $w_{10,h}$, il 10 percentile della distribuzione climatologica dei valori di vento medio orario maggiori di zero. Il numero di ore poco ventose $n_{orepocovento,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{orepocovento,t} = num.ore(w_{t,i,h} < w_{10,h}) \quad (5.57)$$

dove

$$w_{10,h} = 10perc.(w_{t,i,h}) \quad (5.58)$$

con

$$w_{t,i,h} > 0 \quad (5.59)$$

La percentuale di ore poco ventose per ogni tipo di tempo $f_{orepocovento,t}$ è quindi pari a:

$$f_{orepocovento,t}[\%] = \frac{n_{orepocovento,t}}{N * H} \cdot 100 \quad (5.60)$$

con $H = 24$.

- *Percentuale di ore molto ventose.* Tale grandezza rappresenta la percentuale di ore molto ventose verificatesi in corrispondenza ad ogni tipo di tempo.

Un'ora appartenente ad una giornata caratterizzata dal tipo di tempo t viene definita molto ventosa se il suo valore di vento medio orario $w_{t,i,h}$ è superiore a $w_{90,h}$, il 90 percentile della distribuzione climatologica dei valori di vento medio orario maggiori di zero. Il numero di ore molto ventose $n_{oremoltovento,t}$ osservate con un certo tipo di circolazione sinottica t è quindi dato da

$$n_{oremoltovento,t} = num.ore(w_{t,i,h} > w_{90,h}) \quad (5.61)$$

dove

$$w_{90,h} = 90perc.(w_{t,i,h}) \quad (5.62)$$

con

$$w_{t,i,h} > 0 \quad (5.63)$$

La percentuale di ore molto ventose per ogni tipo di tempo $f_{oremoltovento,t}$ è quindi pari a:

$$f_{oremoltovento,t}[\%] = \frac{n_{oremoltovento,t}}{N * H} \cdot 100 \quad (5.64)$$

- *Percentuale di ore con calme di vento.* Questa quantità esprime la percentuale di ore di ogni tipo di tempo in cui si è misurato un valore medio orario del vento inferiore a 0.5 m/s, chiamato calma di vento.

La percentuale di ore con calme di vento corrispondente ad un certo tipo di tempo $f_{orecalmevento,t}$ è quindi:

$$f_{orecalmevento,t}[\%] = \frac{n_{orecalmevento,t}}{N * H} \cdot 100 \quad (5.65)$$

con

$$n_{orecalmevento,t} = \text{num.ore}(w_{t,i,h} < 0.5\text{m/s}) \quad (5.66)$$

Per poter confrontare la percentuale di ore con calme di vento di diverse stazioni tra le varie situazioni sinottiche, si è reso necessario effettuare una normalizzazione di $f_{orecalmevento,t}$ rispetto alla massima percentuale di ogni stazione nel periodo preso in esame:

$$f_{orecalmevento, \text{norm}, t} = f_{orecalmevento,t} / f_{orecalmevento, tmax} \quad (5.67)$$

dove $tmax$ rappresenta il tipo di tempo che presenta il valore massimo di percentuale di ore con calme di vento.

- *Anomalia stagionale del vento medio giornaliero.* Tale quantità statistica rappresenta l'anomalia dell'intensità del vento media giornaliera associata ad ogni tipo di circolazione sinottica.

Come nel caso della temperatura, inizialmente è stata calcolata l'anomalia standardizzata mensile, la cui formula, seguendo la simbologia introdotta, è data da:

$$A_{wind,t,month} = \frac{(\bar{w}_{t,month} - \bar{w}_{month})}{\sigma_{w,month}} \quad (5.68)$$

Una volta ottenuta l'anomalia standardizzata mensile per ogni mese dell'anno, l'anomalia stagionale è stata ricavata mediando le anomalie dei tre mesi che fanno parte di ogni stagione. Così, se $A_{wind,t,m1}$, $A_{wind,t,m2}$ e $A_{wind,t,m3}$ sono le anomalie mensili dei mesi composti da D_1 , D_2 e D_3 giorni rispettivamente, l'anomalia stagionale $A_{t,sea}$ è data da:

$$A_{wind,t,sea} = \frac{A_{wind,t,m1} \cdot D_1 + A_{wind,t,m2} \cdot D_2 + A_{wind,t,m3} \cdot D_3}{D_1 + D_2 + D_3} \quad (5.69)$$

5.5 Analisi della significatività statistica delle anomalie

Per verificare se le anomalie stagionali di temperatura media giornaliera, precipitazione accumulata giornaliera, radiazione solare media giornaliera e vento medio giornaliero risultanti dalle equazioni 5.20, 5.28, 5.36 e 5.68 fossero significative, si è reso necessario applicare un test statistico alle distribuzioni di anomalie stagionali. In questa sezione viene descritto il test che è stato utilizzato, cioè il test di Welch, un adattamento del test di Student al caso in cui si abbiano due distribuzioni con numero di campioni e varianze diversi.

Il problema consiste nel confrontare la distribuzione delle anomalie stagionali di una certa grandezza X corrispondenti ad una certa circolazione sinottica $A_{t,sea}$ data dalla formula

$$A_{t,sea} = \frac{(X_{t,sea} - \bar{X}_{sea})}{\sigma_{X,sea}} \quad (5.70)$$

con la distribuzione delle anomalie stagionali climatiche A_{sea} :

$$A_{sea} = \frac{(X_{sea} - \bar{X}_{sea})}{\sigma_{X,sea}} \quad (5.71)$$

dove \bar{X}_{sea} è la media della grandezza X nella stagione considerata (ad esempio la pioggia giornaliera), $X_{t,sea}$ la media della grandezza X nella stagione considerata in corrispondenza al tipo di tempo t , e $\sigma_{X,sea}$ la deviazione standard della pioggia giornaliera nella stagione considerata. La formula 5.70 è una versione generalizzata delle formule 5.20, 5.28, 5.36 e 5.68 introdotte nelle sezioni precedenti, mentre la formula 5.71 è utilizzata per il calcolo delle anomalie stagionali climatiche necessarie per eseguire il test statistico.

La statistica per il test di Welch è data dal valore assoluto della quantità t_w che è pari a:

$$t_w = \frac{(\bar{A}_{sea} - \bar{A}_{t,sea})}{\sqrt{\frac{\sigma_{A,sea}^2}{D} + \frac{\sigma_{A,t,sea}^2}{N}}} \quad (5.72)$$

dove $\sigma_{A,sea}$ è la deviazione standard dell'anomalia stagionale A_{sea} ed è pari a 1 per definizione, e $\sigma_{A,t,sea}$ è la deviazione standard dell'anomalia stagionale per un certo tipo di tempo $A_{t,sea}$; inoltre, lo ricordiamo, D è il numero totale di giorni della stagione considerata, e N il numero totale di giorni del tipo di tempo t all'interno di quella stagione. Come si può notare, il numeratore della 5.72 rappresenta la differenza tra i due valori medi di anomalia e, dato che \bar{A}_{sea} è pari a 0 per definizione, è uguale a $\bar{A}_{t,sea}$. Il denominatore, invece, rappresenta la variabilità delle due distribuzioni (errore standard della differenza tra le due medie), ed è dato dalla varianza di ogni distribuzione divisa per il numero di campioni. Il test di Welch necessita anche del calcolo del numero di gradi di libertà ν , dato da:

$$\nu = \frac{\left(\frac{\sigma_{A,sea}^2}{D} + \frac{\sigma_{A,t,sea}^2}{N}\right)}{\frac{\sigma_{A,sea}^4}{D^2 \cdot D - 1} + \frac{\sigma_{A,t,sea}^4}{N^2 \cdot N - 1}} \quad (5.73)$$

I valori di t e ν sono necessari per stabilire se la differenza tra le due distribuzioni A_{sea} e $A_{t,sea}$ sia statisticamente significativa: il valore t_w deve essere superiore al valore che si trova per un dato numero di gradi di libertà ν su un'apposita tabella del t-test (e.g. Wilks, 1995). In questo caso, possiamo rigettare l'ipotesi nulla che la differenza tra le due anomalie medie sia dovuta al caso, e ritenere dunque che l'anomalia trovata sia statisticamente significativa, e derivi da condizioni meteorologiche effettivamente diverse da quelle medie climatiche.

5.6 Analisi della capacità predittiva

Come introdotto nella sezione 2.2, la capacità predittiva di un metodo di classificazione sinottica descrive la sua abilità di risolvere grandezze meteorologiche di interesse climatologico, che dipende da quanto stretta sia la relazione tra il fenomeno sotto osservazione e i diversi tipi di circolazione. Al fine di analizzare la capacità predittiva del metodo di classificazione GWT applicato ai campi di pressione al suolo, altezza geopotenziale a 500, 700 e 850 hPa, sono state utilizzate le seguenti quantità statistiche:

- *Varianza spiegata*. Tale parametro descrive la relazione tra la varianza esistente tra i tipi di tempo e la varianza totale della variabile analizzata a :

$$EV = \frac{\sum_{t=1}^T N_t (\bar{a}_t - \bar{a})^2}{\sum_{d=1}^D (a_d - \bar{a})^2} \quad (5.74)$$

dove $t = 1, \dots, T$ sono i tipi di tempo, N_t il numero di casi appartenenti al tipo di tempo t , \bar{a}_t è la media della variabile analizzata per il tipo di tempo t , $d = 1, \dots, D$ tutti i giorni del periodo di tempo sotto esame in cui la variabile a_d ha media \bar{a} . Maggiore è la varianza spiegata, migliore è la capacità predittiva del metodo per la variabile in esame.

- *Brier skill score*. Introdotto da Schiemann and Frei (2010), tale indice quantifica la capacità del metodo di classificazione sinottica di rappresentare il superamento di soglie della variabile analizzata. Esso è definito come:

$$BSS = \frac{\frac{1}{D} \sum_{t=1}^T N_t (f_t - \bar{o})^2}{\bar{o}(1 - \bar{o})} \quad (5.75)$$

dove f_t è la frequenza osservata dell'evento, cioè la frequenza con cui la soglia prefissata è stata superata all'interno di un tipo di tempo, e \bar{o} è la frequenza climatologica, cioè la frequenza con cui la soglia prefissata è stata superata all'interno del periodo preso in esame. Tale indice può variare tra 0 e 1, e la capacità predittiva del metodo è maggiore per valori alti rispetto a valori bassi. Esso esprime quindi la capacità dei vari tipi di tempo del metodo di classificazione di discostarsi dalle frequenze climatologiche di superamento delle soglie prefissate.

5.7 Modalità di rappresentazione dei parametri statistici

Tutte le grandezze statistiche introdotte in questo capitolo vengono rappresentate in questa relazione per mezzo di due modalità:

1. *Tabelle statistiche*. Con questa modalità vengono rappresentati i parametri statistici relativi al metodo di classificazione sinottica GWT applicato a due livelli contemporaneamente, cioè 500 hPa e pressione a livello del mare. La tabella statistica è una matrice al cui interno si trovano i valori dei parametri statistici corrispondenti al tipo di tempo il cui codice è riportato sulla prima riga e colonna. In tale modo, si possono consultare i valori dei parametri statistici relativi non solo ai tipi di tempo a 500 hPa e al suolo singolarmente, ma anche alle loro combinazioni.
2. *Box plots*. Tale rappresentazione è comunemente usata per descrivere la distribuzione composta dai valori del parametro statistico in oggetto per ogni stazione. La distribuzione è rappresentata tramite un rettangolo orientato verticalmente diviso in due parti, da cui escono due segmenti. Il rettangolo è delimitato dal 25° e 75° percentile e diviso al suo interno dalla mediana, mentre i segmenti sono delimitati dal 10° e dal 90° percentile. Solamente nell'analisi delle quantità statistiche che coinvolgono il massimo della grandezza esaminata, i segmenti sono delimitati dal minimo e dal massimo valore. Ad ogni tipo di tempo corrisponde un box plot. In tal modo, è possibile avere un'idea dell'intervallo di variabilità del parametro statistico tra le varie stazioni all'interno dello stesso tipo di tempo. Questo tipo di grafico è stato prodotto solamente per i parametri per i quali è possibile confrontare i valori tra le varie stazioni, e che quindi non sono influenzati in maniera significativa dalla quota della stazione meteorologica. Nelle figure relative alle anomalie, un punto indica i box plot significativi, quelli cioè in cui almeno un terzo delle stazioni presentano un'anomalia significativa in accordo con il test di Welch (vedi sezione 5.5).

Capitolo 6

Analisi delle frequenze

Come descritto nella sezione precedente, ad ogni giorno del periodo 1992-2013 corrisponde un tipo di circolazione sinottica, che in questa relazione viene chiamato anche tipo di tempo; è quindi possibile analizzare la frequenza con cui i diversi tipi di tempo si sono verificati. La sezione 6.1 analizza le distribuzioni delle frequenze dei tipi di tempo nel periodo 1992-2013, quello utilizzato per analizzare gli effetti delle situazioni sinottiche sul territorio della provincia di Trento, mentre la sezione 6.2 presenta una breve analisi dell'andamento temporale delle frequenze dal 1979 ad oggi.

6.1 Distribuzione delle frequenze

La figura 6.1 mostra le frequenze dei tipi di circolazione identificati dal metodo di classificazione GWT applicato ai 4 livelli verticali (pressione al suolo, altezza geopotenziale a 850, 700 e 500 hPa). Come si può vedere, alle alte quote prevalgono i tipi di tempo da ovest (NW, W, SW), in particolare la circolazione da nord-ovest (NW) è quella che presenta le frequenze più alte. A quote più basse anche il tipo di tempo nord-est (NE) presenta frequenze piuttosto alte, mentre diminuiscono quelle della circolazione da ovest. I tipi di tempo di alta e bassa pressione sono quelli meno ricorrenti a tutte le quote, e notiamo anche che la bassa pressione a sud-ovest del Trentino si è verificata un numero maggiore di volte rispetto alle altre configurazioni di bassa pressione. In generale, le frequenze dei tipi di tempo tendono ad essere più omogenee alle basse quote rispetto alle alte, dove invece, come detto, i tipi di tempo da ovest dominano la distribuzione.

Le frequenze dei tipi di tempo presentano anche una certa variabilità stagionale. In figura 6.2 sono riportate le distribuzioni delle frequenze stagionali delle configurazioni sinottiche a 500 hPa. Notiamo come i tipi di tempo da ovest siano i più prevalenti in tutte le stagioni, tuttavia in inverno anche i tipi di tempo da nord presentano frequenze significative. Frequenze simili si hanno anche per i tipi di tempo a 700 hPa (vedi figura 6.3). A 850 hPa le frequenze hanno invece una diversa distribuzione (figura 6.4): il tipo di tempo da nord-est presenta frequenze simili ai tipi di tempo da ovest, e, specialmente in inverno, anche i tipi di tempo da est si verificano un numero significativo di volte. Le differenze stagionali più grandi si notano tuttavia per le configurazioni sinottiche al suolo (figura 6.5). In inverno la distribuzione appare molto più omogenea rispetto alle altre stagioni, e solamente i tipi di tempo da nord e da sud, oltre a quelli relativi ad alte e basse pressioni, presentano frequenze molto minori rispetto agli altri. Il picco di frequenze del tempo da nord-est appare chiaramente in primavera e in estate, mentre non è più così marcato nelle altre stagioni.

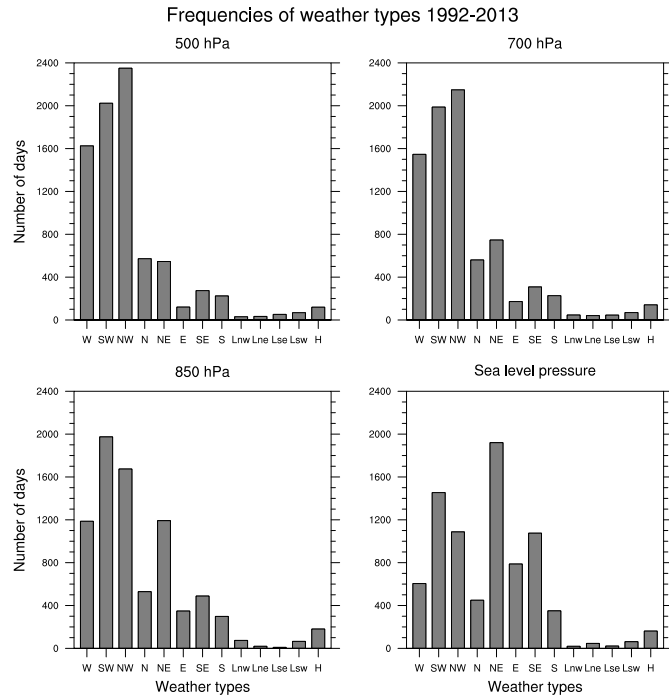


Figura 6.1: Frequenze dei tipi di circolazione sinottica (weather types) alle diverse altezze (suolo, 850, 700 e 500 hPa) nel periodo 1992-2013.

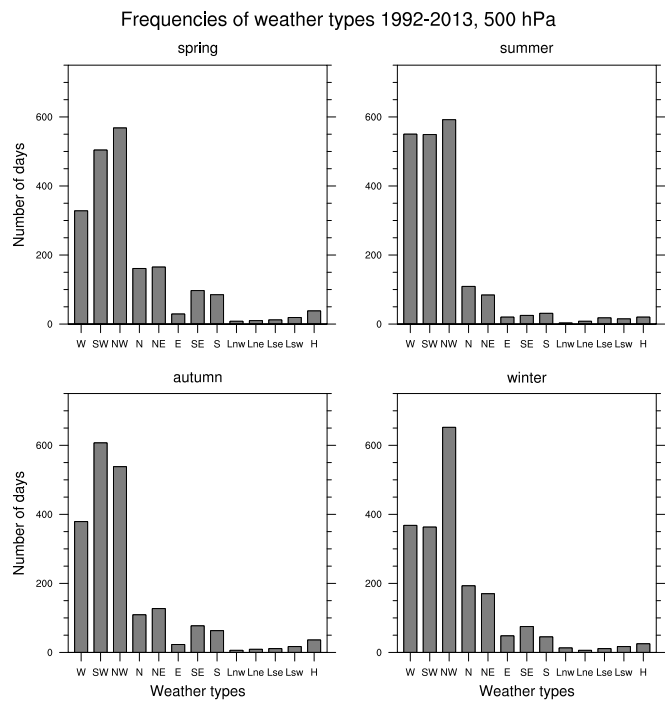


Figura 6.2: Frequenze dei tipi di circolazione sinottica a 500 hPa nelle diverse stagioni nel periodo 1992-2013.

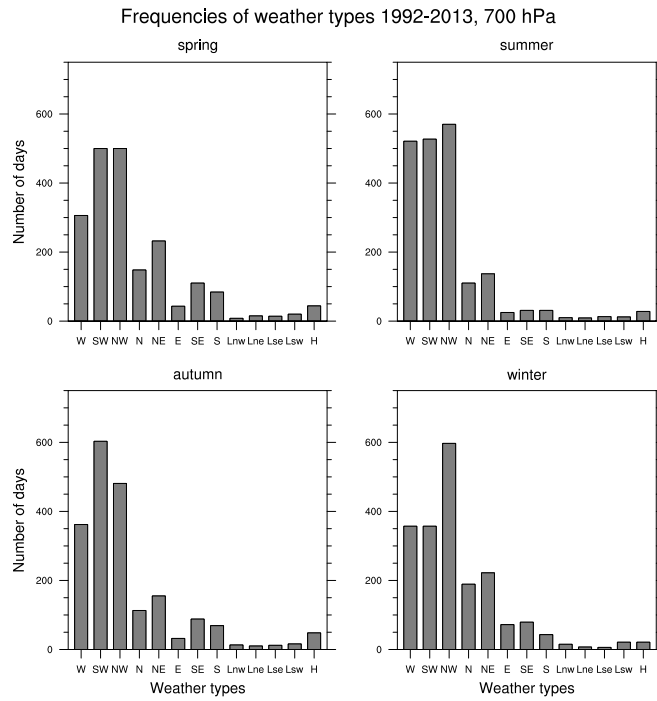


Figura 6.3: Frequenze dei tipi di circolazione sinottica a 700 hPa nelle diverse stagioni nel periodo 1992-2013.

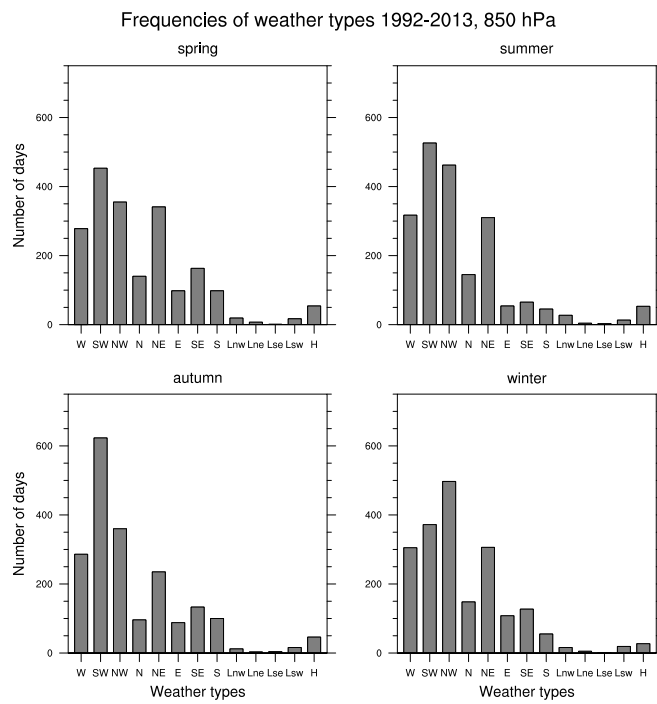


Figura 6.4: Frequenze dei tipi di circolazione sinottica a 850 hPa nelle diverse stagioni nel periodo 1992-2013.

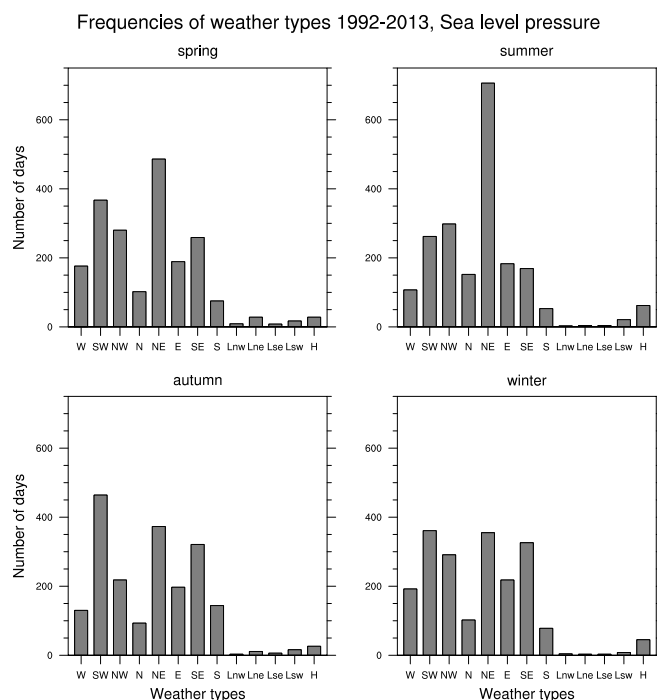


Figura 6.5: Frequenze dei tipi di circolazione sinottica al suolo nelle diverse stagioni nel periodo 1992-2013.

6.2 Andamento temporale delle frequenze

Per analizzare l'andamento temporale delle frequenze dei vari tipi di tempo, l'inizio del periodo preso in esame è stato anticipato al 1979-2013. Questo perché le rianalisi ERA-Interim (vedi sezione 4.1) sono disponibili dal primo gennaio 1979. Quest'analisi include quindi un totale di 35 anni, e in questo caso, il tipo di tempo bassa pressione non è stato suddiviso in 4 classi a dipendenza della posizione della bassa pressione rispetto al Trentino. La figura 6.6 mostra l'andamento delle frequenze percentuali con cui si sono verificate le situazioni sinottiche a 500 hPa negli ultimi 35 anni. Notiamo che per alcuni tipi di tempo le frequenze percentuali presentano importanti variazioni tra i vari anni (si consideri che una variazione in frequenza del 5% corrisponde ad una variazione di circa 18 giorni). Tuttavia non è possibile riconoscere un trend significativo di crescita o decrescita per nessun tipo di tempo dal 1979 ad oggi. Le stesse considerazioni si possono fare per le frequenze con cui si sono verificati i vari tipi di tempo sugli altri livelli verticali (vedi figure 6.7, 6.8 e 6.9). Quest'analisi è stata fatta anche a livello stagionale, cioè considerando le frequenze con cui si sono verificati i vari tipi di circolazione sinottica nelle 4 stagioni separatamente. Anche in questo caso, però, non è stato possibile identificare alcun trend significativo.

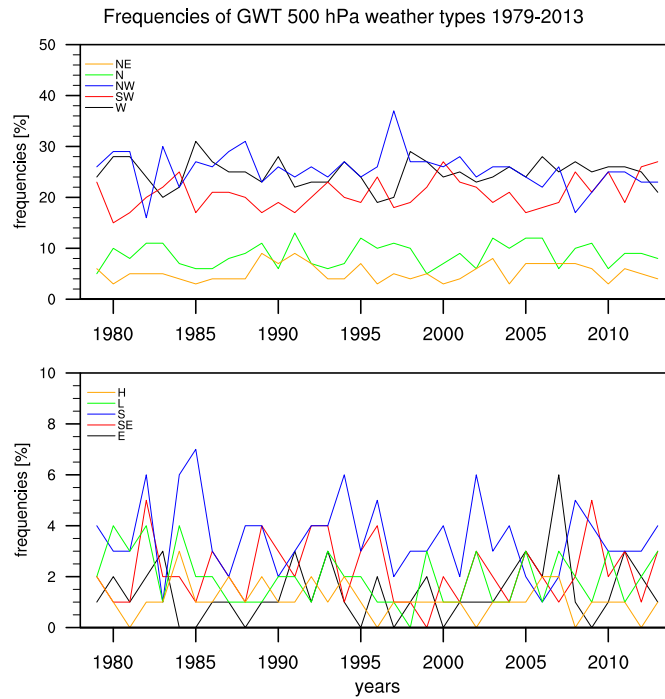


Figura 6.6: Andamento temporale delle frequenze dei tipi di circolazione sinottica a 500 hPa nel periodo 1979-2013.

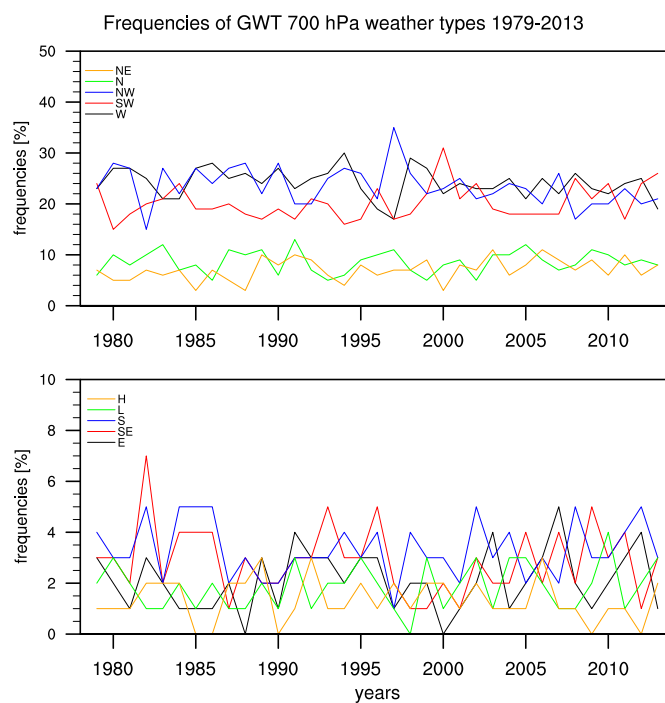


Figura 6.7: Andamento temporale delle frequenze dei tipi di circolazione sinottica a 700 hPa nel periodo 1979-2013.

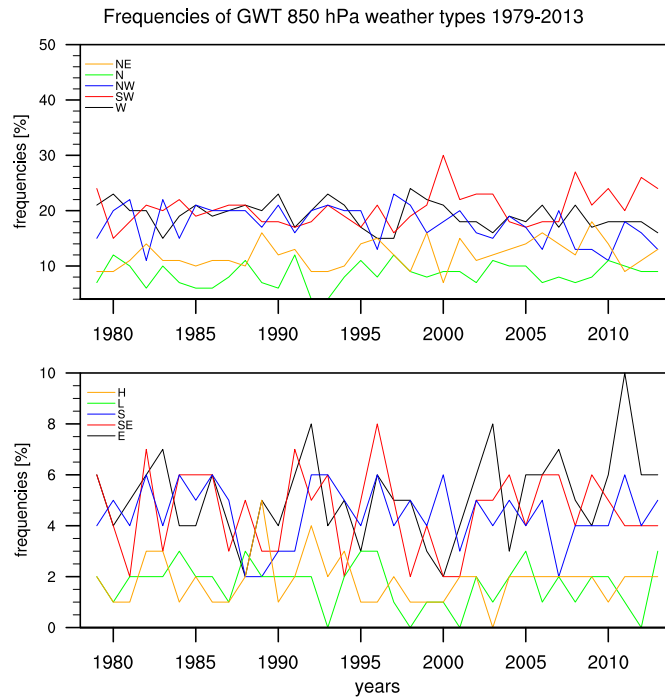


Figura 6.8: Andamento temporale delle frequenze dei tipi di circolazione sinottica a 850 hPa nel periodo 1979-2013.

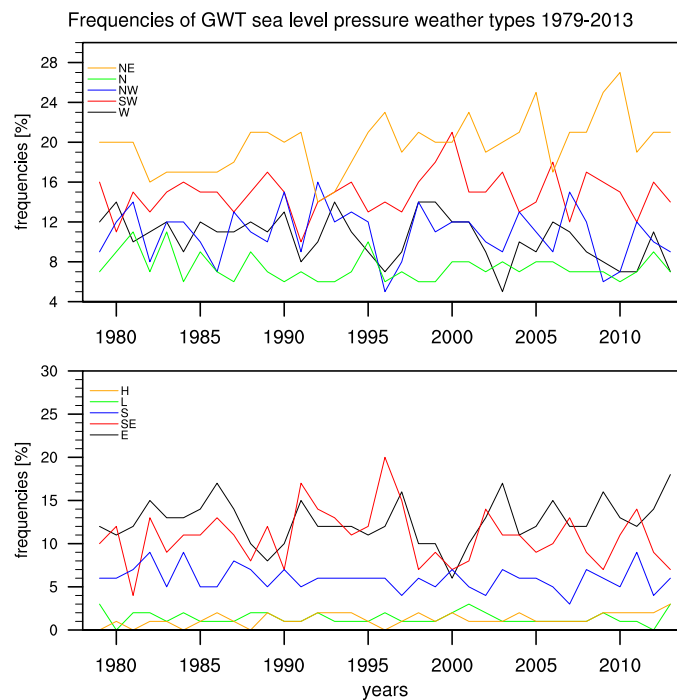


Figura 6.9: Andamento temporale delle frequenze dei tipi di circolazione sinottica al suolo nel periodo 1979-2013.

Capitolo 7

Relazione tra i tipi di tempo e il clima del Trentino

Questo capitolo raccoglie tutti i risultati delle analisi statistiche che sono state condotte al fine di analizzare la relazione tra i tipi di tempo a scala sinottica e i loro effetti sul territorio trentino, in termini di temperatura (sezione 7.1), precipitazione (sezione 7.2), radiazione solare (sezione 7.3) e vento (sezione 7.4). In questo capitolo, tuttavia, non sono riportate tutte le numerose tabelle statistiche e tutte le figure che sono state prodotte per ogni singola stazione, ma solamente quelle che riassumono il comportamento di tutte le stazioni. Le immagini e le tabelle relative ad ogni singola stazione sono riportate nel cd allegato a questa relazione.

7.1 Relazione tra i tipi di tempo e la temperatura sul Trentino

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi della relazione tra i tipi di tempo e la temperatura misurata nelle stazioni di rilevamento trentine introdotte in tabella 4.2. Le tabelle statistiche relative ad ogni singola stazione si trovano nel cd allegato, mentre le figure box plot relative alle varie grandezze statistiche sono riportate nel testo.

7.1.1 Numero di giorni con dati di temperatura

Il numero di giorni per ogni tipo di tempo per ogni stazione per il quale vi sono dati validi di temperatura è un'informazione necessaria per interpretare correttamente tutti gli altri indici statistici riportati in questo capitolo (vedi sezione 5.1). Tali valori sono riportati per ogni stazione nelle apposite tabelle statistiche nel cd in allegato, mentre la loro distribuzione per ogni tipo di tempo è rappresentata nei box plot della figura 7.1. Notiamo come il numero di giorni rispecchi i valori degli istogrammi di figura 6.2, 6.4 e 6.5, ma che tuttavia nella figura 7.1 il numero di giorni può variare tra le varie stazioni a causa della presenza di buchi nell'archivio dei dati. I parametri statistici presentati in seguito relativi ai tipi di tempo che si sono verificati un numero di giorni molto piccolo devono essere interpretati con una certa cautela, in quanto possono non essere statisticamente non significativi.

7.1.2 Percentuale di notti tropicali

Come riportato nella sezione 5.1, le notti tropicali sono quelle in cui la temperatura minima non scende al di sotto dei 20°C. Tale grandezza è stata calcolata solo per l'estate. Nel cd allegato vengono riportate per ogni stazione le tabelle statistiche contenenti le percentuali di notti tropicali osservate in corrispondenza ad ogni tipo di tempo a 500 hPa e al suolo, e loro combinazioni. In Trentino si possono avere notti

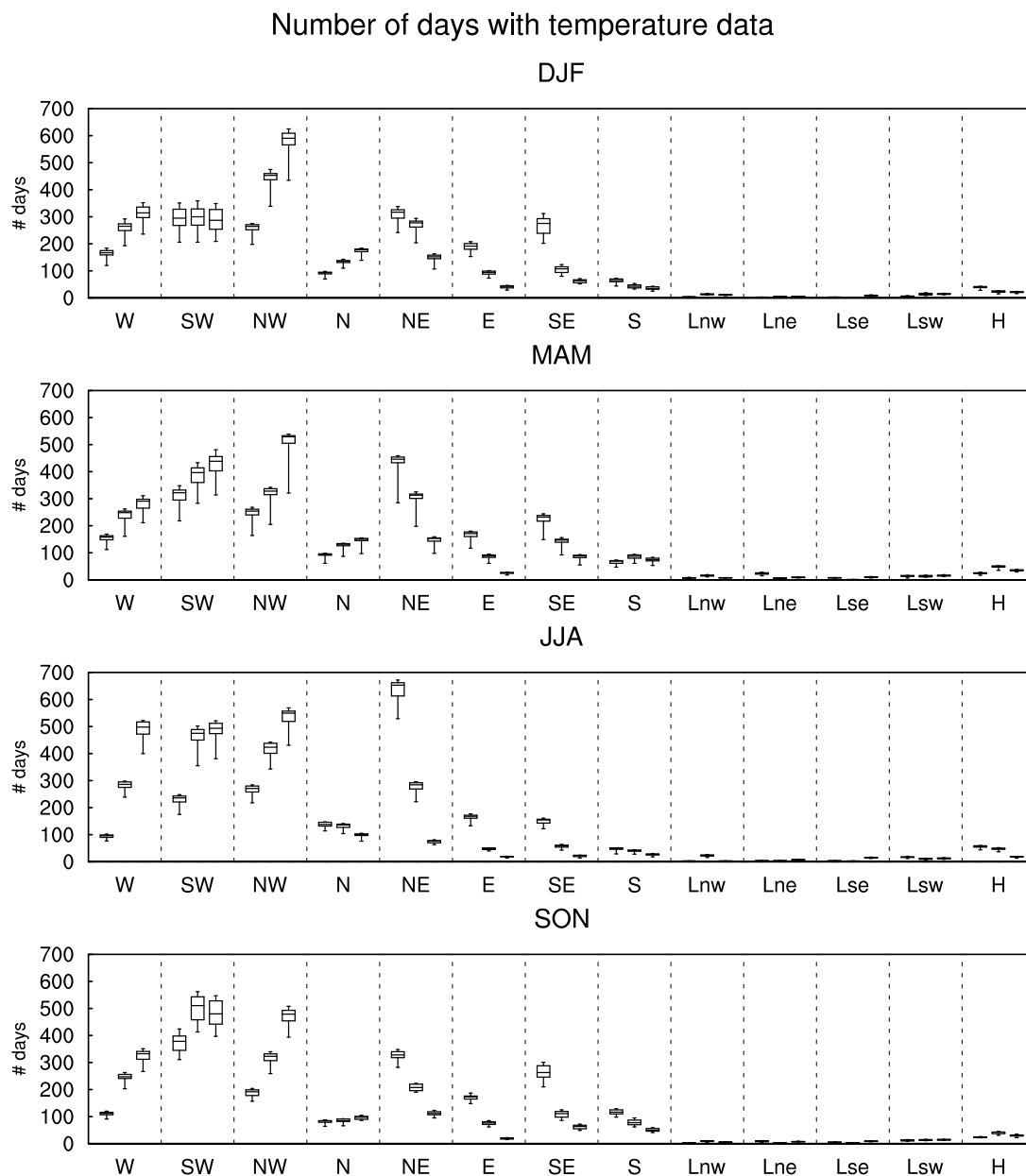


Figura 7.1: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni del numero di giorni in cui si sono avuti dati buoni di temperatura per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

tropicali alle basse quote, indicativamente al di sotto dei 500 metri di altitudine. Prendendo la stazione di Trento come rappresentativa del fondovalle della Val d'Adige, notiamo come il 7.8% delle notti estive sia climatologicamente definibile come tropicale. In condizioni di alta pressione in quota, quasi una notte su tre è tropicale, mentre con venti da Ovest poco meno di una notte su dieci è tropicale. Considerando invece i tipi di tempo al suolo, la maggior parte delle notti tropicali si verifica con circolazioni da Est (poco meno di una notte su dieci è tropicale in questo caso), Sud-Ovest e Sud.

7.1.3 Percentuale di giorni tropicali

Anche le tabelle statistiche relative alla percentuale di giorni tropicali (quelli in cui la temperatura massima supera i 30°C) per ogni tipo di tempo sono riportate per ogni stazione nel cd allegato. Prendendo ancora la stazione di Trento come rappresentativa delle condizioni meteorologiche della Val d'Adige, notiamo come in estate circa il 40% dei giorni sia tropicale. Tali condizioni si possono verificare con molti tipi di tempo, ma in prevalenza con condizioni di alta pressione in quota o al suolo, con i tipi di tempo da Sud, Est o Sud-Ovest al suolo o da Nord in quota. In Trentino si possono osservare giornate tropicali fin verso i 1000-1200 metri, in prevalenza con condizioni di alta pressione al suolo.

7.1.4 Percentuale di giorni estivi

I giorni estivi sono quelli in cui la temperatura massima è superiore ai 25°C. Le percentuali di giorni estivi osservati in corrispondenza ad ogni tipo di tempo per ogni stazione sono riportate nelle tabelle statistiche nel cd allegato. A Trento in estate l'80% dei giorni sono climatologicamente definibili come estivi, e si verificano prevalentemente con l'alta pressione in quota con i tipi di tempo da Ovest e Nord in quota; praticamente tutte le configurazioni sinottiche al suolo, invece, sono state osservate in corrispondenza con giornate estive. Salendo con la quota il numero di giorni estivi ovviamente diminuisce, ma si possono ancora registrare giorni estivi fin verso i 1500-1800 metri in condizioni di alta pressione o tipi di tempo da Sud.

7.1.5 Percentuale di giorni di ghiaccio

I giorni di ghiaccio sono quelli particolarmente freddi, in cui la temperatura massima non supera gli 0°C. Nel cd allegato si trovano le tabelle statistiche dei giorni di ghiaccio per tutte le stazioni per la stagione invernale. Se a Trento climatologicamente meno di un giorno per stagione invernale è in media di ghiaccio, a quote di circa 1500 metri i giorni di ghiaccio sono circa il 30%, percentuale che sale oltre il 50% per stazioni poste oltre i 2000 m di quota. I tipi di tempo osservati in corrispondenza di giornate di ghiaccio sono molteplici, specialmente per quanto riguarda le configurazioni al suolo.

7.1.6 Percentuale di giorni di gelo

I giorni di gelo, cioè con temperatura minima inferiore a 0°C, si verificano frequentemente in tutto il Trentino durante la stagione invernale. Come visibile nelle tabelle statistiche riportate nel cd allegato, a Trento poco più di due giorni su tre è mediamente di gelo, mentre a quote superiori ai 1600-1800 metri tutti i giorni hanno temperature minime inferiori a 0°C. I tipi di tempo più frequenti a 500 hPa nei quali si verificano giorni di gelo a quote medio-basse in Trentino sono l'alta pressione e quelli da Nord e Nord-Est; al suolo ancora condizioni di alta pressione e tipi di tempo da Nord, Nord-Ovest e Est.

7.1.7 Minima delle minime

Al fine di analizzare se vi sia una relazione tra la circolazione a scala sinottica e gli estremi di temperatura misurati sul Trentino, nel cd in allegato a questa relazione si trovano anche le tabelle statistiche che

riportano il valore minimo delle temperature minime giornaliere registrate in corrispondenza ad ogni tipo di tempo al suolo e a 500 hPa, e loro combinazioni. Notiamo come in generale non vi sia una grande variabilità dei valori di temperatura tra i vari tipi di tempo, considerando quelli che hanno un numero di giorni significativo. Questo accade molto probabilmente perchè il metodo di classificazione della circolazione sinottica GWT, nonostante riesca ad individuare la provenienza della massa d'aria, non tenga conto dell'effettiva temperatura dell'aria trasportata sulla catena alpina. Per alcune stazioni, tuttavia, si nota come le minime più basse siano state registrate con tipi di tempo da Nord, mentre quelle più alte con tipi di tempo da Sud. Infatti, i tipi di tempo da Nord spingono sulla catena alpina masse d'aria generalmente più fredde della norma, mentre quelli da Sud portano sul Trentino venti più caldi della climatologia.

7.1.8 Massima delle massime

Anche la temperatura più alta delle temperature massime giornaliere registrate in corrispondenza ai vari tipi di tempo è riportata per ogni stazione nelle tabelle statistiche nel cd in allegato. Anche in questo caso si nota come sia difficile trarre delle conclusioni sulla relazione tra tipi di tempo e gli estremi di temperatura massima, in quanto questi sono dovuti sia alle caratteristiche delle masse d'aria in arrivo sulla catena alpina, sia dalla presenza di nuvolosità, sia dalle condizioni locali. L'unico segnale rilevante è quello dato dai tipi di tempo di bassa pressione, che tendono a causare temperature massime più basse rispetto agli altri tipi di tempo, probabilmente a causa della maggiore nuvolosità ad essi associata.

7.1.9 Percentuale di giorni caldi

Come descritto nella sezione 5.1, una giornata viene definita calda se la sua temperatura massima è superiore al 90 percentile delle temperature massime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. La percentuale di giorni caldi osservata in corrispondenza ad ogni tipo di tempo tiene quindi in considerazione il ciclo annuale della temperatura per una certa stazione; inoltre, proprio per come la grandezza è stata definita, è possibile confrontare facilmente i suoi valori per le varie stazioni e tra i diversi tipi di tempo. Per questo motivo per questa grandezza presentiamo anche il box plot corrispondente (vedi sezione 5.7) nella figura 7.2, oltre alle tabelle statistiche riportate nel cd allegato contenenti i valori per ogni stazione. I baffi dei box plot della figura 7.2 rappresentano il 10 e 90 percentile della distribuzione; inoltre, in questa figura è stata tracciata una linea orizzontale al valore 10% in quanto tale valore rappresenta la media climatologica.

Notiamo che per ogni tipo di tempo non vi è una grande variabilità nelle percentuali di giorni caldi tra le varie stazioni, tranne per i casi di bassa pressione in cui le differenze tra le stazioni arrivano ad essere anche del 30%. Questi casi, però, si sono verificati per un numero di giorni molto piccoli, pertanto essi non forniscono una statistica significativa. Notiamo anche che ogni tipo di tempo presenta percentuali di giorni freddi e caldi diverse dalla climatologia, specialmente l'alta pressione in tutte le stagioni e la circolazione da Nord in inverno al suolo per i quali la percentuale di giorni caldi è molto più elevata della climatologia. Questo si spiega facilmente con il maggior irraggiamento solare che si verifica in condizioni di alta pressione e con l'effetto di riscaldamento dovuto al vento di föhn associato a venti da nord nei bassi strati. I tipi di tempo che causano un numero di giorni caldi minore rispetto a quello climatologico sono associati alla presenza di estesa nuvolosità o all'avvezione di aria fredda, come ad esempio le circolazioni da Sud in inverno o quella da Nord in estate.

7.1.10 Percentuale di giorni freddi

La figura 7.3 riporta i box plot relativi alla percentuale di giorni freddi per ogni tipo di tempo. Come introdotto nella sezione 5.1, una giornata viene definita fredda se la sua temperatura massima è inferiore al

Percentage of warm days

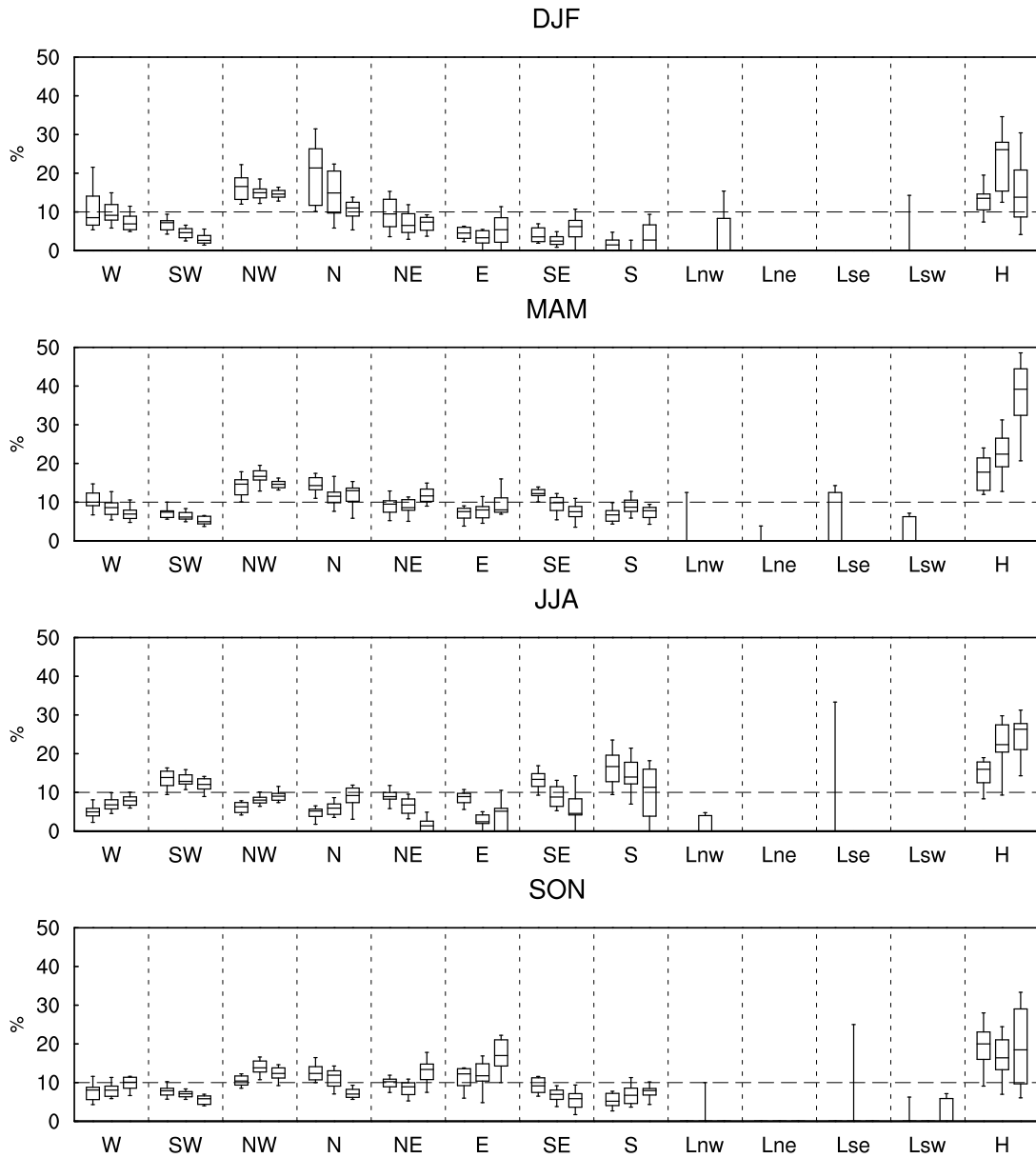


Figura 7.2: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni delle percentuali di giorni caldi per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

10 percentile delle temperature massime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Notiamo subito che i tipi di tempo legati alla presenza di una bassa pressione presentano la variabilità maggiore nei valori percentuali, e l'unico segnale che si può trarre è che tali classi determinano in generale un elevato numero di giornate fredde, probabilmente a causa della nuvolosità ad esse associata. Le alte pressioni, invece, provocano raramente giornate fredde, eccetto se si verificano in inverno al suolo, quando favoriscono la formazione di inversioni termiche che causano un numero di giorni freddi poco più elevato rispetto alla norma. Anche i tipi di tempo da Sud in quota tendono ad avere un numero di giornate fredde maggiore rispetto alla climatologia, probabilmente a causa della presenza di nuvolosità compatta che ostacola l'irraggiamento e il riscaldamento diurno. Quando si verificano al suolo, tuttavia, i tipi di tempo da Sud provocano un numero di giornate fredde nella norma o sotto la norma, in quanto essi spingono sulle Alpi masse d'aria piuttosto calde. Le circolazioni sinottiche da Nord sono responsabili per un numero minore di giorni freddi rispetto alla climatologia, ancora una volta a causa della possibile presenza di vento di föhn. In estate, tuttavia, con una circolazione da Nord al suolo il numero di giorni freddi risulta maggiore rispetto alla climatologia, in quanto questo tipo di circolazione porta sul Trentino una massa d'aria più fredda rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare in quel periodo, e condizioni di föhn si verificano meno spesso che nelle altre stagioni.

7.1.11 Percentuale di notti calde

Nella sezione 5.1 una notte è stata definita calda se la sua temperatura minima è superiore al 90 percentile delle temperature minime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Pertanto, questo indicatore dice quali sono i tipi di tempo che sono caratterizzati da temperature notturne più calde della climatologia del periodo. In figura 7.4 notiamo che i tipi di tempo da Nord causano tendenzialmente poche notti calde, a causa dell'avvezione di aria fredda verso il Trentino che essi comportano. Anche quando si ha una situazione da Nord in inverno, che come abbiamo visto tende a causare giornate calde per condizioni di föhn, il numero di notti calde è in linea con la climatologia. Le situazioni sinottiche più favorevoli al verificarsi di notti calde sono quelle legate all'alta pressione, in primavera a tutti i livelli e in estate e autunno in quota, e a circolazioni da Sud e Sud-Ovest in estate e autunno. Le basse pressioni presentano ancora una volta una variabilità elevata. Da notare come in autunno e inverno la circolazione da Ovest sia perfettamente in linea con la climatologia, probabilmente perchè quella configurazione porta sul Trentino masse d'aria di origine atlantica che non sono associate ad anomalie termiche rilevanti.

7.1.12 Percentuale di notti fredde

La figura 7.5 riporta i box plot relativi alla percentuale di notti fredde per ogni tipo di tempo. Come è stato introdotto nella sezione 5.1, una notte è definita fredda se la sua temperatura minima è inferiore al 10 percentile delle temperature minime registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. La figura 7.5 mostra che i tipi di tempo Ovest, Sud e Sud-Ovest provocano meno notti fredde rispetto alla climatologia in tutte le stagioni, mentre il Sud-Est ha questo comportamento eccetto che in inverno quando si verifica a basse quote. Le circolazioni da Nord e Nord-Est causano invece più notti fredde della climatologia, a parte la configurazione Nord al suolo in inverno (probabilmente associata a vento di föhn) e Nord-Est in quota in estate. Le basse pressioni presentano come al solito una grande variabilità, mentre le alte pressioni tendono a generare notti fredde solo se si verificano al suolo in inverno e in primavera.

7.1.13 Anomalia stagionale di temperatura media giornaliera

Le anomalie di temperatura associate ad ogni tipo di tempo, calcolate secondo le formule introdotte nella sezione 5.1, sono rappresentate per mezzo di box plot nella figura 7.6, come descritto nella sezione

Percentage of cold days

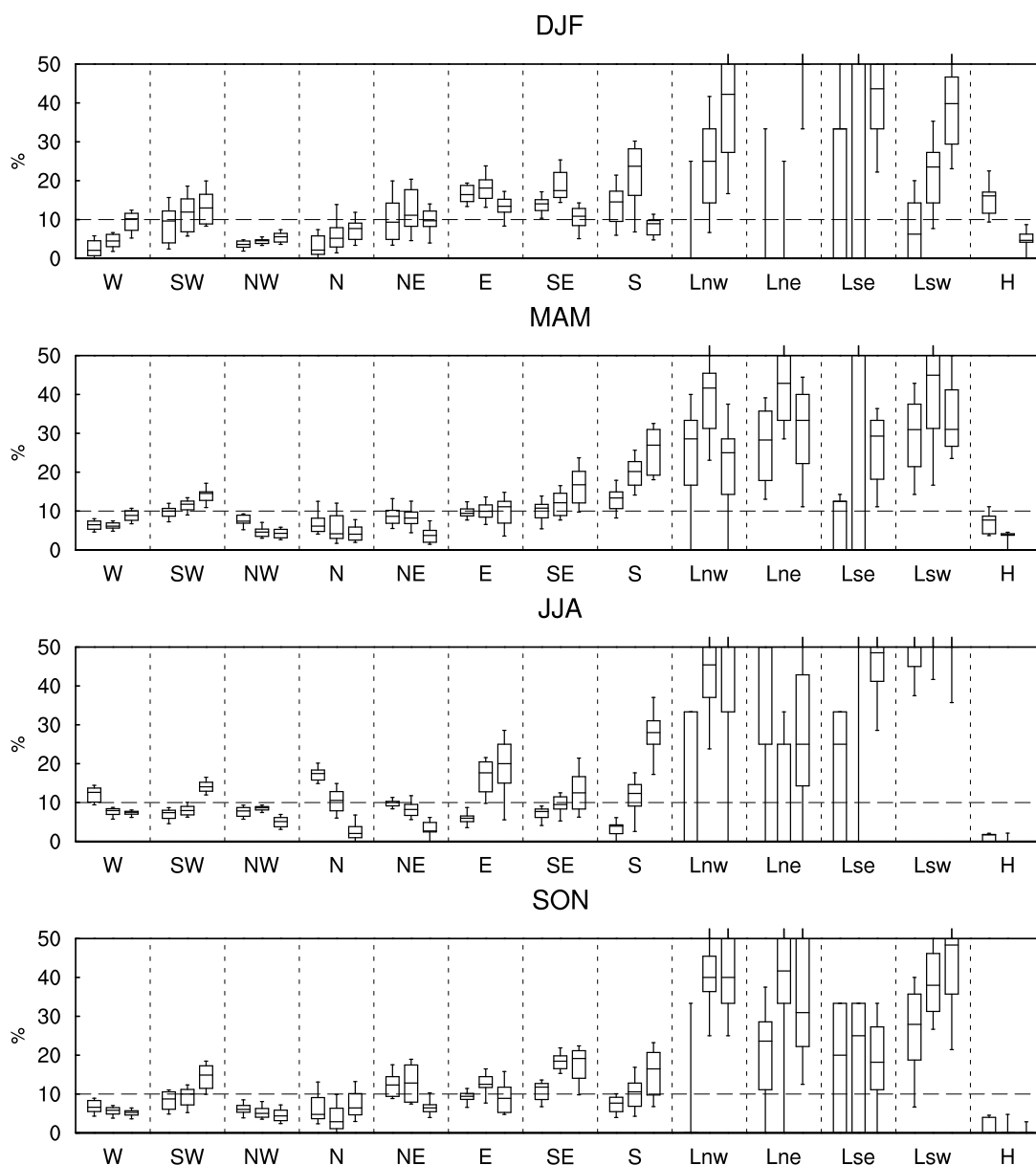


Figura 7.3: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni delle percentuali di giorni freddi per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

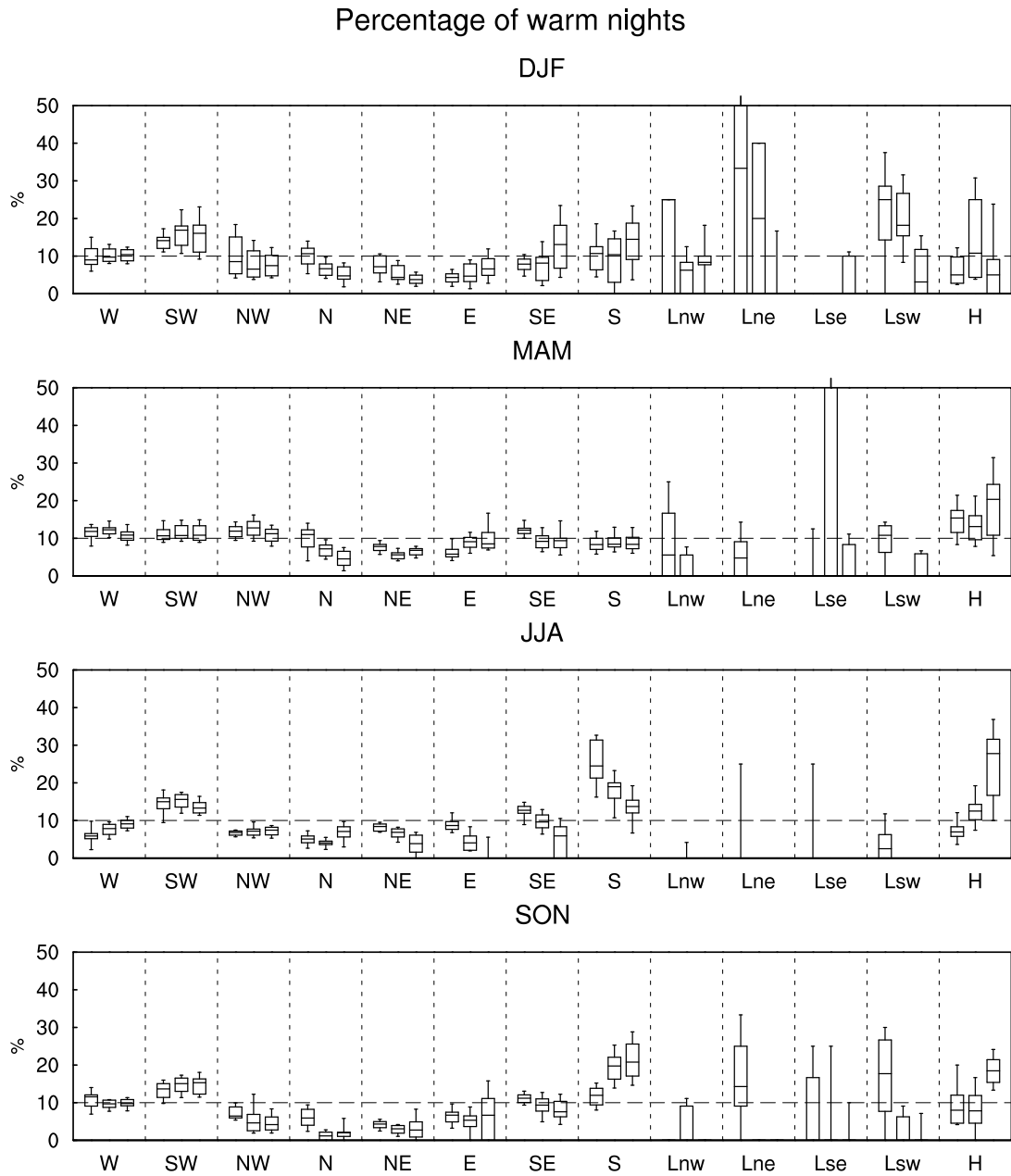


Figura 7.4: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni delle percentuali di notti calde per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

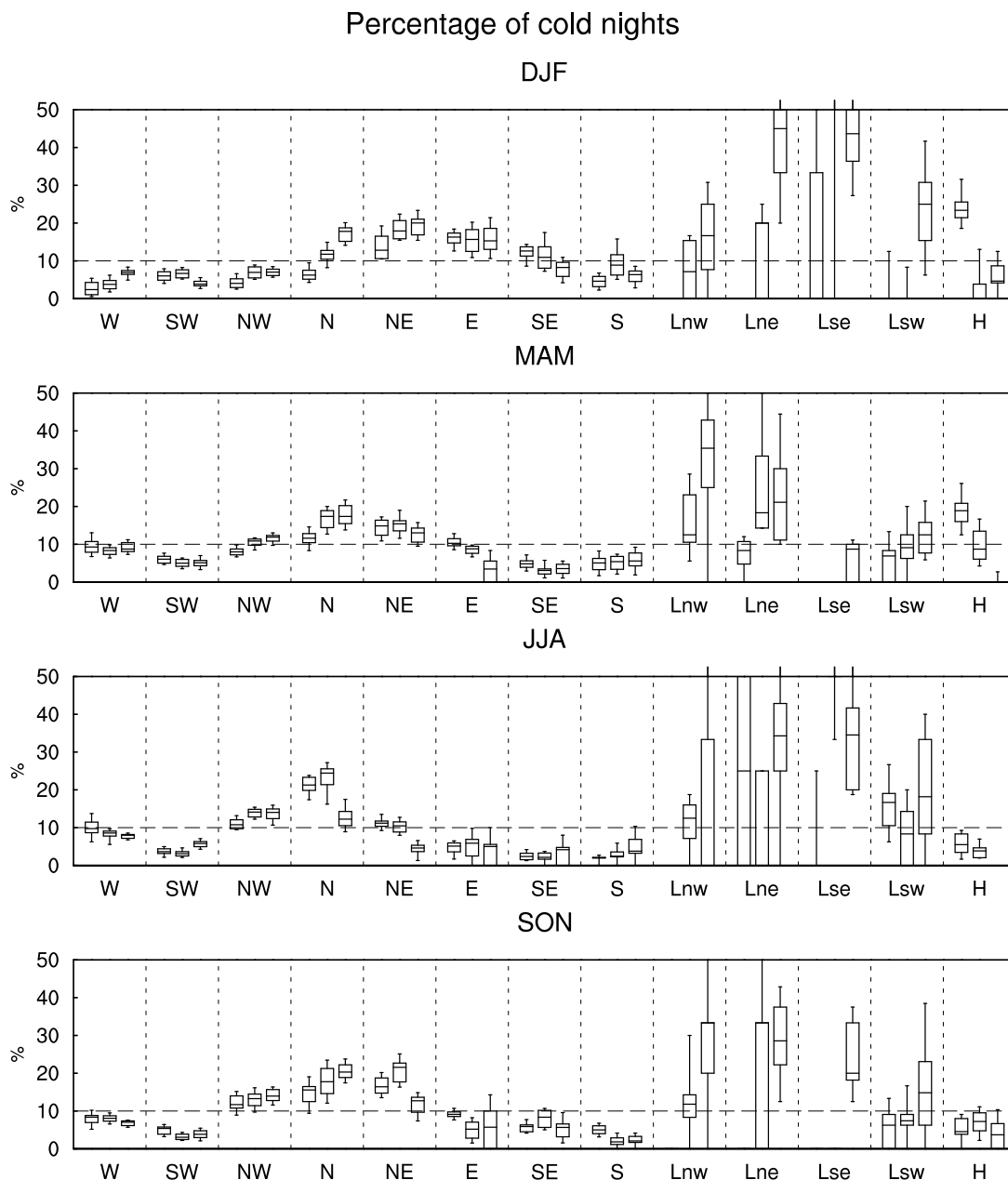


Figura 7.5: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni delle percentuali di notti fredde per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

5.7. Questa figura offre interessanti valutazioni sull'impatto dei vari tipi di circolazione sinottica sulle temperature misurate in Trentino. Per esempio, notiamo come condizioni di alta pressione siano sempre associate ad anomalie positive, mentre la presenza di basse pressioni determini anomalie generalmente negative. Le uniche eccezioni a questo comportamento sono date dall'alta pressione al suolo in inverno, che può causare anomalie negative a causa della formazione di inversioni termiche, basse pressioni a Nord-Est e Sud-Ovest del Trentino al suolo in inverno, probabilmente associate rispettivamente a caldi venti settentrionali di föhn e venti caldi meridionali, e basse pressioni al suolo a Sud-Est del Trentino in estate e autunno, che probabilmente richiamano venti caldi verso le Alpi. Il tipo di tempo da Ovest causa sempre anomalie leggermente positive tranne quando si verifica al suolo in estate. Anche il Nord-Ovest e il Sud-Ovest provocano temperature più calde della media, tranne in primavera quando si verifica il Sud-Ovest in quota e in estate col Nord-Ovest. I tipi di tempo da Nord, Est e Nord-Est sono invece associati ad anomalie negative, tranne il Nord al suolo d'inverno e l'Est al suolo d'estate. Le circolazioni da Sud e Sud-Est presentano un'ampia variabilità non solo stagionale ma anche in base al livello verticale in cui il tipo di tempo è riscontrato. Da notare come sia in primavera che in estate queste due circolazioni provochino anomalie termiche positive quando si verificano nei bassi strati, e anomalie negative quando si presentano negli strati più alti. Infine notiamo come le anomalie che non sono statisticamente significative non si discostino comunque da quelle che invece lo sono, tranne nel caso delle basse pressioni dove vi possono essere maggiori differenze dovute al minor numero di giorni che si riscontra in tali classi di circolazione.

In generale, possiamo concludere che vi è una buona correlazione tra i tipi di tempo osservati a scala sinottica sulla regione alpina e le anomalie termiche registrate sulla provincia di Trento, principalmente dovute alla direzione di provenienza dei venti associati ad ogni situazione sinottica, che determina l'avvezione verso la regione alpina di masse d'aria dalle diverse caratteristiche termiche.

7.2 Relazione tra i tipi di tempo e la precipitazione sul Trentino

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi della relazione tra i tipi di tempo e la precipitazione misurata nelle stazioni di rilevamento trentine della tabella 4.4. Le tabelle statistiche relative ad ogni singola stazione si trovano nel cd allegato, mentre le figure box plot relative ad alcune delle grandezze statistiche sono riportate nel testo.

7.2.1 Numero di giorni con dati di precipitazione

Al fine di interpretare in maniera corretta i parametri statistici che vengono presentati in questa sezione, è necessario conoscere il numero di giorni appartenente ad ogni tipo di tempo con dati validi di precipitazione che entrano effettivamente nell'analisi. Tale informazione si trova per ogni stazione nelle tabelle statistiche nel cd in allegato, ed è riassunta nel box plot della figura 7.7. Anche nel caso della pioggia vediamo che c'è una certa variabilità tra le stazioni dovuta alla presenza di buchi nei dati, ma che, tuttavia, i valori rispecchiano quelli delle figure 6.2, 6.4 e 6.5.

7.2.2 Precipitazione giornaliera media condizionata

Come introdotto nella sezione 5.2, per ogni tipo di tempo e per ogni stazione è stata calcolata la pioggia media giornaliera che si è misurata nei soli giorni in cui è piovuto (media condizionata). Tali valori sono riportati per ogni stazione solamente nelle tabelle che si trovano nel cd in allegato a questa relazione, in quanto non è possibile confrontare tra loro i valori di precipitazione di stazioni poste a quote diverse per mezzo di un unico box plot. In generale, i valori di precipitazione giornaliera più elevati si osservano in Trentino in tutte le stagioni in presenza di basse pressioni e di circolazioni sinottiche dai quadranti meridionali. Da notare come le situazioni di bassa pressione, nonostante non siano molto frequenti (vedi

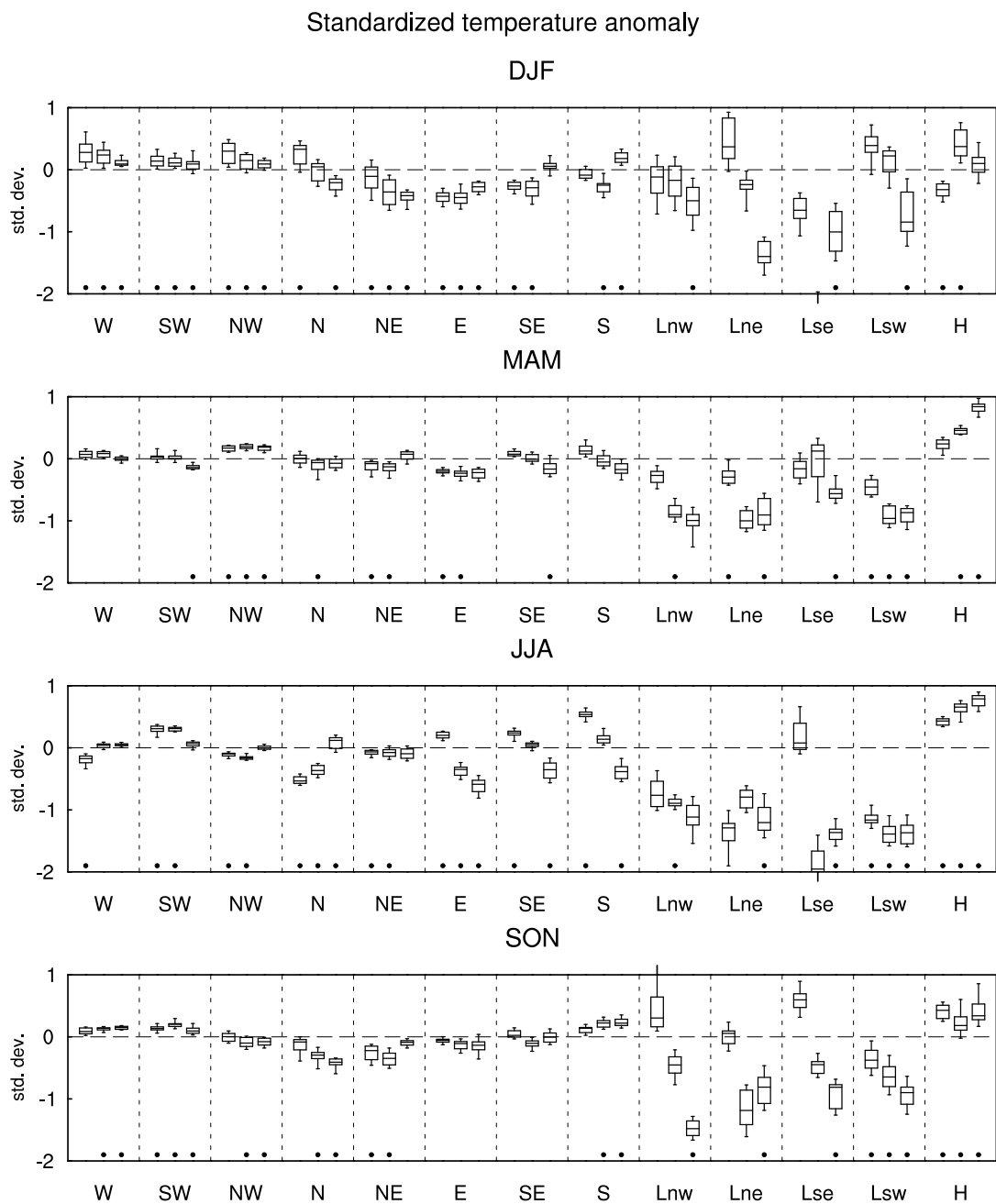


Figura 7.6: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni delle anomalie standardizzate di temperatura media giornaliera per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto o verso il basso alla posizione x corrispondente. I punti indicano i box plot contenenti anomalie statisticamente significative.

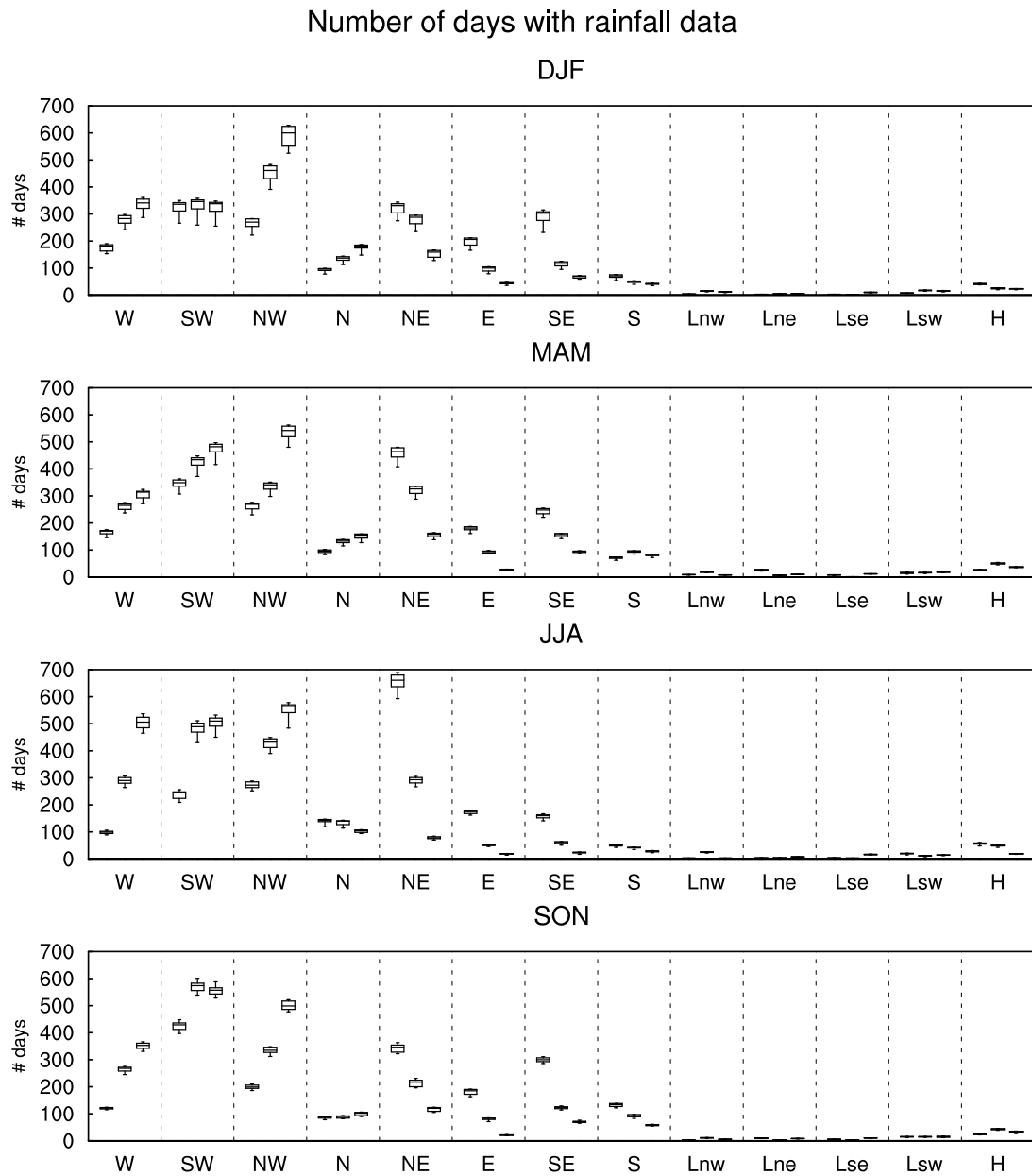


Figura 7.7: Box plot relativi ad ogni tipo di tempo che mostrano le distribuzioni del numero di giorni in cui si sono avuti dati buoni di precipitazione per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

figura 7.7), producano quantitativi di pioggia rilevanti sul Trentino. I tipi di tempo da Nord non presentano valori significativi di precipitazione media, dato che con questo tipo di circolazione il Trentino si trova sottovento alla cresta delle Alpi e interessato quindi da venti di caduta che inibiscono la formazione di precipitazioni.

7.2.3 Contributo alla precipitazione totale

Un'altra quantità interessante è il contributo alla pioggia totale di ogni tipo di tempo, introdotto nella sezione 5.2. Tale grandezza non tiene conto della frequenza con cui ogni tipo di tempo si è verificato sul Trentino, ma esprime solamente la percentuale di pioggia che si è misurata in corrispondenza di una certa circolazione sinottica rispetto alla pioggia totale misurata nel periodo in esame (1992-2013). La figura 7.8 presenta i box plot relativi a questa grandezza, mentre i dati di ogni singola stazione sono riportati nelle tabelle statistiche nel cd in allegato. La figura 7.8 mostra molto chiaramente come in tutte le stagioni il tipo di tempo Sud-Ovest sia quello che genera i quantitativi totali di pioggia maggiori sul Trentino, in particolare quando si verifica a 500 hPa. In particolare, in autunno e in inverno tale configurazione sinottica genera oltre il 60% della pioggia totale. Nelle stagioni più calde, invece, tale percentuale è minore, e quantitativi di pioggia significativi vengono causati da un maggior numero di tipi di tempo. Questo accade probabilmente perchè nelle stagioni più calde i processi a mesoscala che generano le precipitazioni sono meno legati alle situazioni sinottiche, e dipendono maggiormente dalle condizioni locali. Ad esempio i temporali estivi che tipicamente si sviluppano nelle ore pomeridiane si sviluppano principalmente se le condizioni atmosferiche locali sono sufficientemente instabili, situazione che può verificarsi con diversi tipi di circolazioni sinottiche. Vi sono poi altri tipi di tempo che causano quantità rilevanti di pioggia, come il Sud-Est al suolo in autunno e inverno (che genera quasi il 20% dell'acqua totale), il Nord-Est al suolo e il Sud in quota in primavera, l'Ovest e il Sud-Ovest in quota e il Nord-Est al suolo in estate. Risulta abbastanza sorprendente come quest'ultimo tipo di tempo, essendo associato ad una circolazione settentrionale, generi quantitativi di acqua importanti sul Trentino in primavera e in estate. Dalle tabelle statistiche che si trovano nel cd in allegato si nota come in realtà questa circolazione sinottica produca la maggior parte della pioggia con un tipo di tempo Ovest o Sud-Ovest a 500 hPa, circolazioni che favoriscono la formazione di pioggia e temporali nella stagione calda sul Trentino, specialmente se associate a fronti freddi che spingono sul Trentino masse d'aria fredda dai quadranti settentrionali nei bassi strati. Le circolazioni sinottiche associate con le basse pressioni non producono in totale molta pioggia, ma, come abbiamo visto nella sezione precedente, possono presentare quantitativi di pioggia giornalieri piuttosto alti: questo accade perchè tali situazioni non sono molto frequenti. I tipi di tempo settentrionali non producono elevate quantità d'acqua, eccetto il Nord-Ovest e il Nord-Est d'estate nei bassi strati, che tendono a favorire l'attività temporalesca.

7.2.4 Massimo della precipitazione giornaliera

Nell'ottica di analizzare quali siano i tipi di tempo che generano gli accumuli di pioggia giornalieri più elevati, la figura 7.9 mostra i box plot del massimo di pioggia giornaliero normalizzato, quantità introdotta nella sezione 5.2 (i segmenti dei box plot sono delimitati in questo caso dal minimo e massimo valore). Le tabelle statistiche relative ad ogni stazione sono riportate nel cd in allegato. La figura 7.9 mostra che in inverno il massimo della pioggia giornaliera è stato osservato per la maggior parte delle stazioni nel periodo 1992-2013 con il tipo di tempo Sud-Ovest in quota. In primavera, invece, la maggior parte delle stazioni ha registrato il massimo giornaliero in presenza di una circolazione da Sud in quota. In estate e in autunno ha di nuovo prevalso il Sud-Ovest, non solo in quota ma anche al suolo. In generale, i massimi giornalieri sono stati osservati con una maggior variabilità di situazioni sinottiche al suolo rispetto alla quota. Possiamo quindi affermare che i tipi di tempo a scala sinottica a 500 hPa

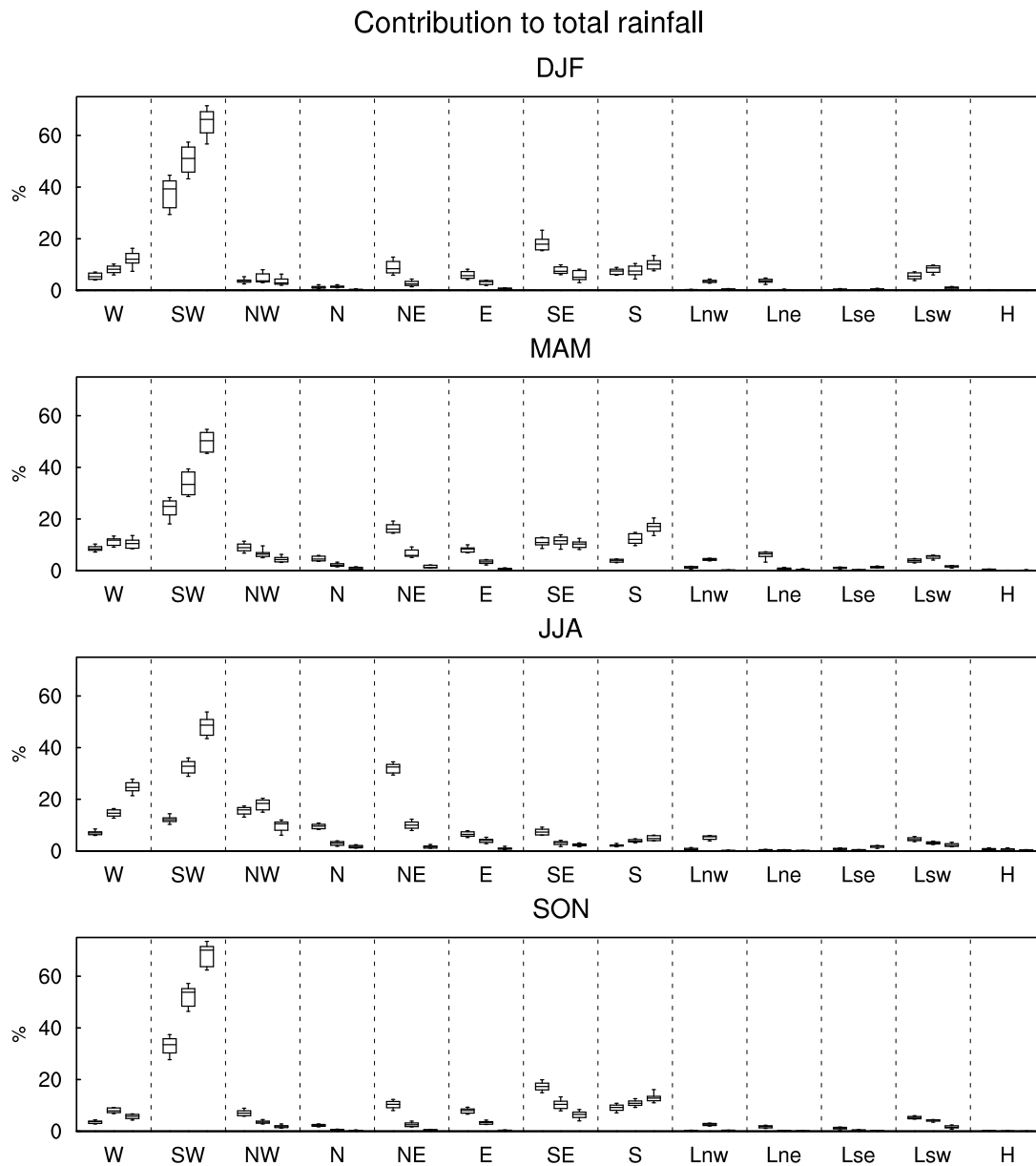


Figura 7.8: Box plot che mostrano le distribuzioni del contributo alla pioggia totale di ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

sono un indicatore migliore della possibilità di avere precipitazioni giornaliere elevate, specialmente in inverno e autunno, rispetto alle configurazioni sinottiche al suolo.

7.2.5 Frequenza dei giorni di pioggia

Un altro parametro necessario per analizzare la relazione tra i tipi di tempo e la pioggia sul Trentino è dato dalla frequenza di giornate piovose osservate in presenza di una determinata circolazione sinottica. Tale grandezza, introdotta nella sezione 5.2, è riportata nelle tabelle statistiche nel cd in allegato, e le distribuzioni relative ai diversi tipi di tempo sono rappresentate nella figura 7.10. Notiamo come i tipi di tempo che causano più spesso precipitazione siano associati alle basse pressioni; tuttavia, la significatività statistica delle loro frequenze è ridotta dal basso numero di giorni in cui tali situazioni si sono verificate. Notiamo poi che in più della metà dei giorni invernali in cui si è verificato il Sud-Ovest in quota o il Sud a 850 hPa si è avuta precipitazione, mentre gli altri tipi di tempo hanno causato pioggia meno volte rispetto a questi due tipi di circolazione. In autunno il Sud-Ovest e il Sud in quota sono le configurazioni che, oltre alle basse pressioni, causano pioggia più frequentemente. Nelle stagioni più calde, invece, le frequenze dei tipi di tempo da Nord, specie al suolo, aumentano rispetto alle stagioni più fredde. Inoltre, si nota come in primavera e in estate la precipitazione si verifichi con un maggior numero di configurazioni sinottiche, in accordo con quanto osservato nelle precedenti analisi.

7.2.6 Numero di giorni di pioggia intensa

Al fine di analizzare quali siano i tipi di tempo che causano più spesso elevati accumuli di pioggia giornalieri, si è calcolato per ogni circolazione sinottica il numero di giorni di pioggia intensa, definito nella sezione 5.2. I valori per ogni stazione sono riportati nelle tabelle nel cd allegato, mentre la figura 7.11 mostra i box plot relativi a tale grandezza. Notiamo come una giornata di pioggia intensa non si sia mai verificata in condizioni di alta pressione, e, in inverno, con circolazioni da Nord e Nord-Ovest. Tutti gli altri tipi di tempo presentano almeno una giornata di pioggia intensa. Notiamo poi come in tutte le stagioni tranne che in estate i tipi di tempo da Sud siano quelli che presentano il maggior numero di giornate di precipitazione intensa, mentre la presenza di basse pressioni non sembra portare frequentemente a piogge giornaliere estreme. In primavera e in estate il tipo di tempo Nord-Est è in grado di causare un numero significativo di giornate di pioggia intensa, essendo probabilmente legato a fronti atmosferici, come sottolineato in precedenza.

7.2.7 Anomalia stagionale di precipitazione giornaliera condizionata

Come introdotto nella sezione 5.2, per ogni tipo di tempo e per ogni stazione è stata calcolata l'anomalia stagionale di precipitazione giornaliera relativa ai soli giorni in cui è piovuto, secondo la formula 5.28. Tale quantità è riportata per ogni stazione nelle tabelle statistiche che si trovano nel cd in allegato, mentre la figura 7.12 riporta i box plot relativi alle distribuzioni di anomalia derivata dalle varie stazioni di rilevamento per tutti i tipi di tempo. Come anticipato nella sezione 5.7, i punti che si trovano al di sotto dei box plot indicano le anomalie che sono statisticamente significative.

I tipi di tempo da Nord o le alte pressioni sono generalmente associati ad un'anomalia di precipitazione negativa, mentre i tipi di tempo da Sud presentano anomalie in genere positive. Le basse pressioni presentano anomalie positive, tranne la bassa pressione centrata a nord-est del Trentino e quelle a nord-ovest e sud-ovest del Trentino in quota. Il tipo di tempo da Ovest, infine, è associato ad un'anomalia negativa in inverno e in autunno, e ad una positiva in primavera ed estate. Da notare poi come le anomalie che non sono statisticamente significative siano comunque in linea con le anomalie statisticamente significative dello stesso tipo di tempo, tranne in qualche caso di bassa pressione dove il segnale tra i vari livelli verticali della classificazione può essere discordante. Il segno delle anomalie di tutti i tipi

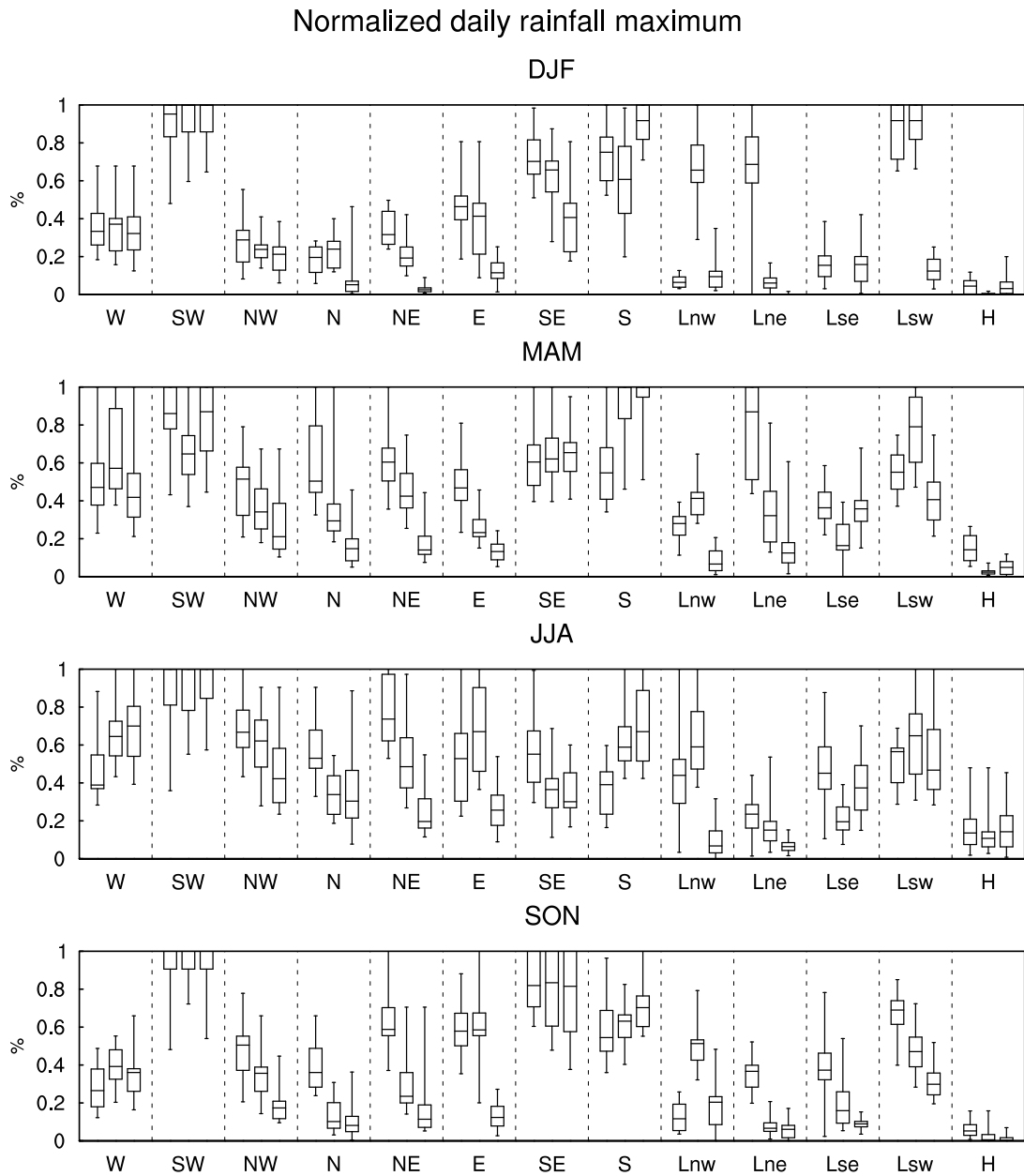


Figura 7.9: Box plot che mostrano le distribuzioni del massimo di pioggia giornaliera normalizzato per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

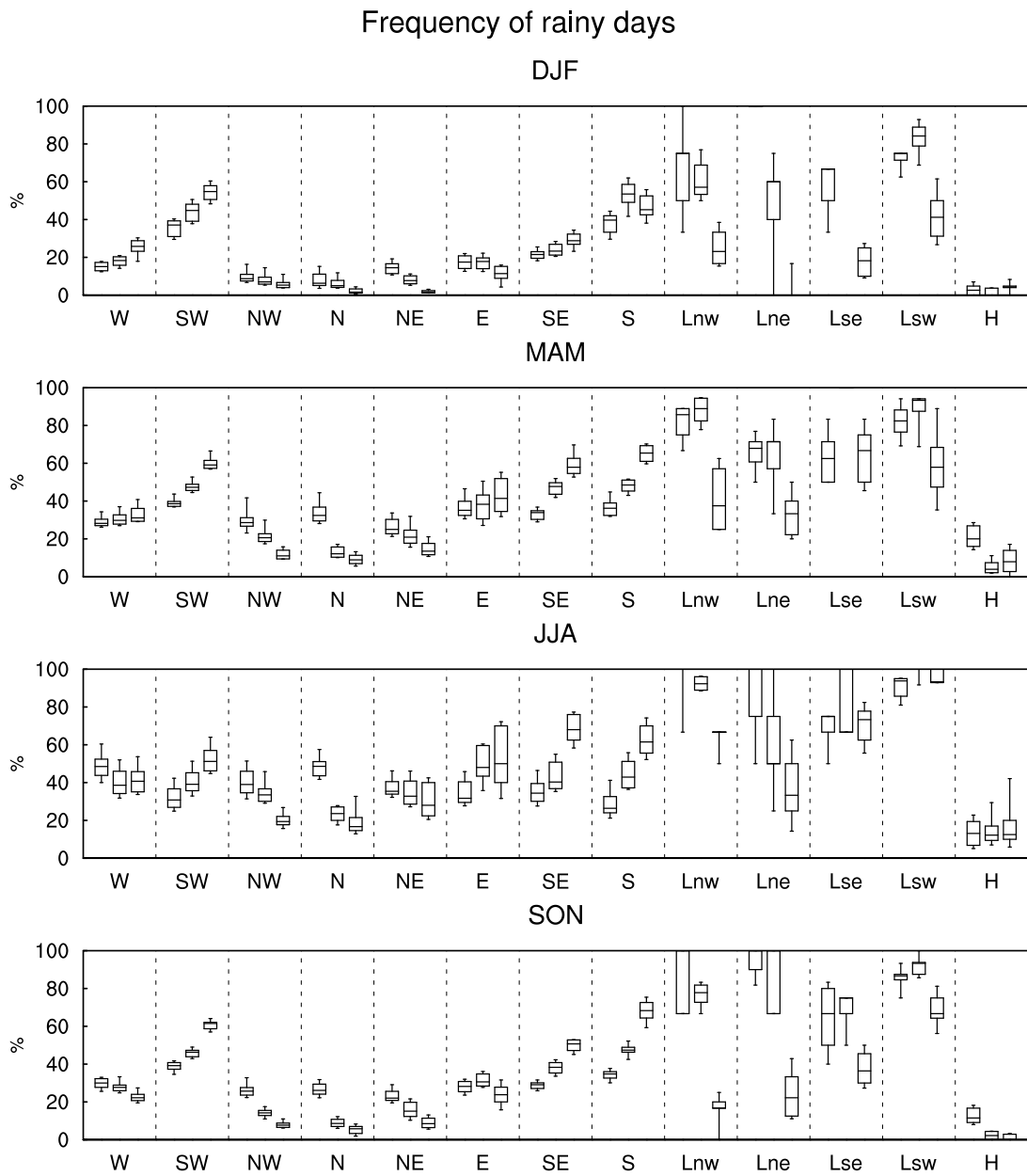


Figura 7.10: Box plot che mostrano le distribuzioni delle frequenze di giorni di pioggia per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

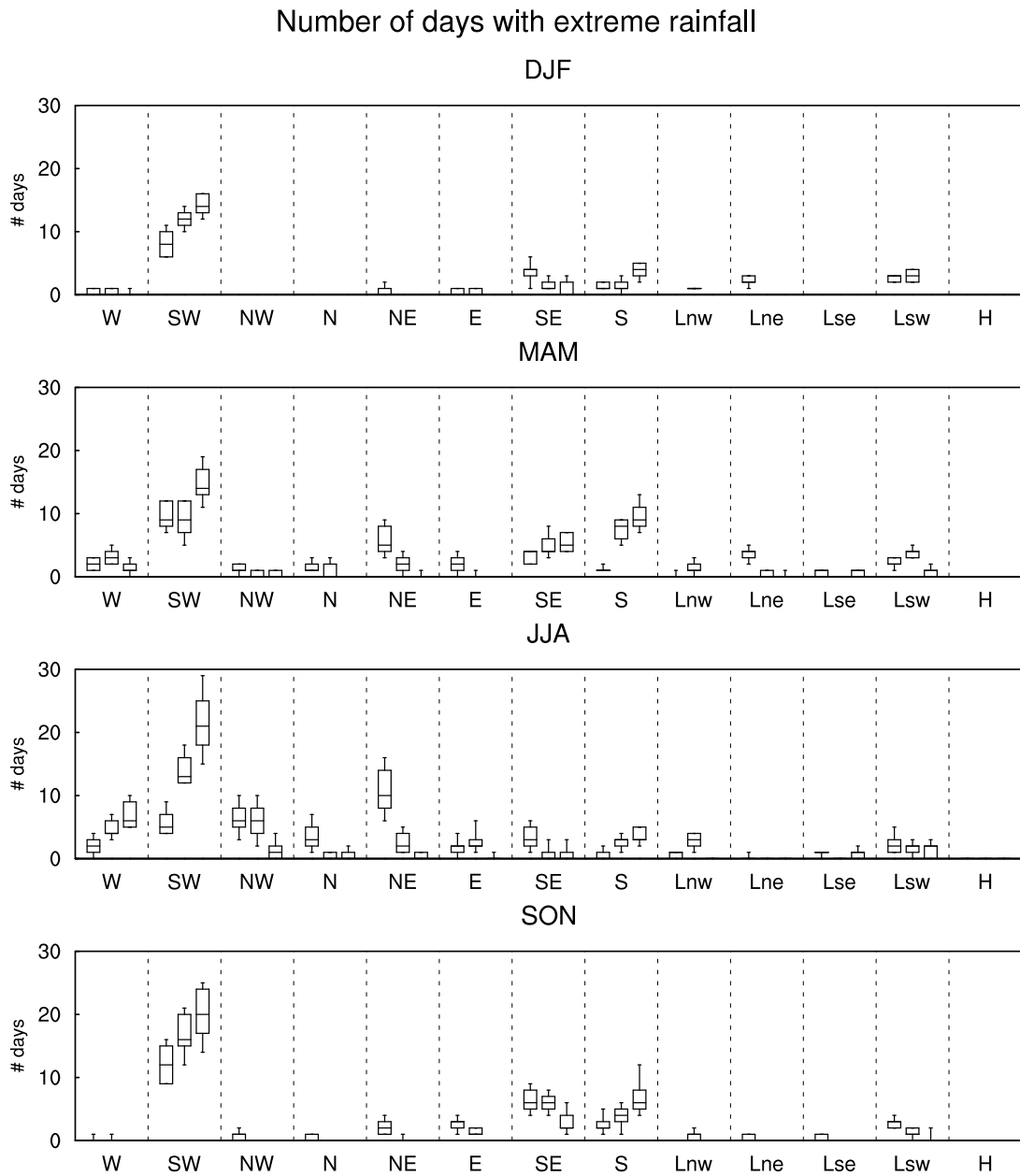


Figura 7.11: Box plot che mostrano le distribuzioni del numero di giorni di pioggia intensa per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

di tempo è facilmente interpretabile con considerazioni di carattere meteorologico, cioè con l'effetto di sollevamento delle masse d'aria provenienti dai quadranti meridionali provocato dalle Alpi, che favorisce la formazione della precipitazione. Sorprende però notare come il tipo di tempo da Sud-Est sia associato con anomalie generalmente negative in inverno, e in primavera quando si verifica al suolo. La figura 7.12 evidenzia come in generale vi sia una chiara relazione tra la circolazione sinottica sulle Alpi e la precipitazione giornaliera sul territorio del Trentino.

7.2.8 Numero di ore con dati di precipitazione

Nella sezione 4.2.2 si è menzionato che per le stazioni meteorologiche della rete PAT sono disponibili anche misurazioni di pioggia a scale temporali sub-orarie con risoluzione di 5 minuti; è stato pertanto possibile calcolare per tali stazioni gli accumuli orari della precipitazione con risoluzione temporale 5 minuti, necessari per analizzare la relazione tra le configurazioni sinottiche e la precipitazione oraria sul Trentino. Nel cd allegato si trovano le tabelle statistiche che riportano il numero di ore per le quali si hanno dati buoni di pioggia per ogni tipo di tempo e per ogni stazione, necessarie per interpretare in maniera corretta gli indici statistici della precipitazione oraria che vengono illustrati di seguito.

7.2.9 Precipitazione media oraria condizionata

Tale grandezza rappresenta la pioggia media oraria che è stata misurata nelle ore in cui è piovuto in corrispondenza ad ogni tipo di tempo, come introdotto nella sezione 5.2. Anche le tabelle statistiche di questa grandezza si trovano nel cd allegato a questa relazione, e mostrano come le circolazioni sinottiche da Sud e Sud-Ovest e le basse pressioni tendano a far registrare piogge medie orarie superiori rispetto agli altri tipi di tempo, in particolare quando si verificano in quota. I valori orari relativi ai tipi di tempo al suolo, invece, sono più simili tra loro.

7.2.10 Massimo della precipitazione oraria

Tale quantità rappresenta il valore massimo di precipitazione oraria registrato in corrispondenza ad ogni tipo di tempo, normalizzato con la precipitazione massima oraria di ogni stazione (vedi sezione 5.2). L'obiettivo di quest'analisi è quello di capire se ci sia una relazione tra la circolazione sinottica sull'area alpina e i massimi orari di precipitazione sul Trentino. Le tabelle relative ad ogni stazione sono riportate nel cd allegato, mentre la figura 7.13 rappresenta i box plot delle distribuzioni dei valori di ogni stazione di tale quantità per ogni tipo di tempo. La figura mostra come i massimi orari di precipitazione in inverno e primavera vengano registrati per la maggior parte delle stazioni con il tipo di tempo Sud-Ovest a 850 e 500 hPa. In estate e in autunno, invece, non vi è un tipo di circolazione sinottica con la quale i massimi orari di precipitazione si verificano nella maggior parte delle stazioni. Interessante notare come qualche stazione abbia registrato il massimo orario di precipitazione con circolazioni da Nord e con condizioni di alta pressione, specialmente in estate probabilmente a causa di temporali. Il confronto tra le figure 7.9 e 7.13 risulta essere molto interessante. Notiamo come le differenze dei valori dei massimi di pioggia tra i vari tipi di tempo tendano ad essere molto meno marcate a scala oraria rispetto a quella giornaliera, specialmente in estate e in autunno. In altre parole, i massimi della pioggia giornaliera hanno una relazione molto più stretta con la circolazione sinottica rispetto ai massimi della pioggia oraria. Questo comportamento è spiegabile dal fatto che i tipi di tempo sinottici determinano il carattere della precipitazione su scale temporali giornaliere, mentre su scale sub-giornaliere i fenomeni meteorologici che si sviluppano a mesoscala hanno un'importanza maggiore nel determinare le quantità di pioggia.

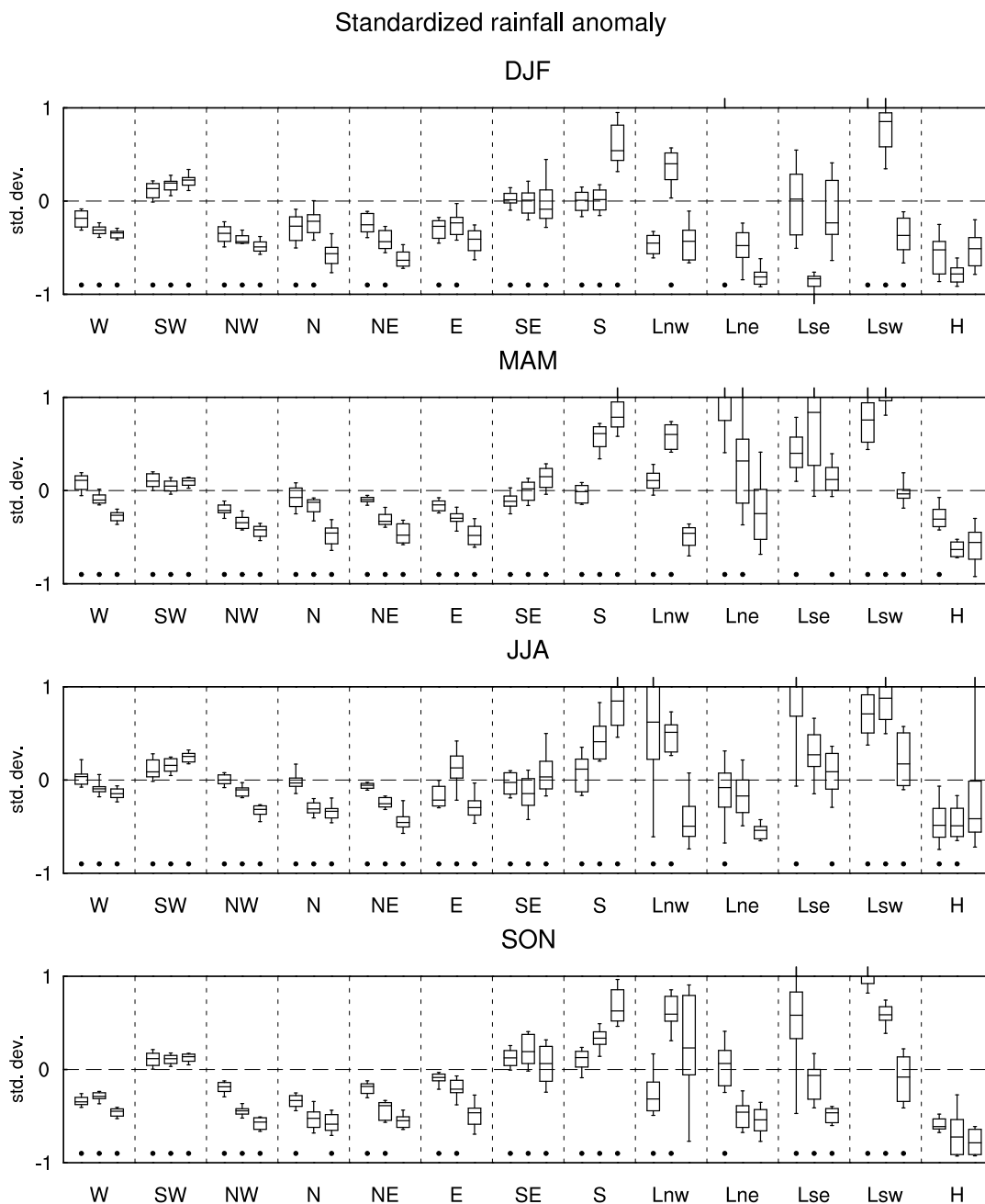


Figura 7.12: Box plot che mostrano le distribuzioni delle anomalie standardizzate stagionali di precipitazione media per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto o verso il basso alla posizione x corrispondente. I punti indicano le anomalie statisticamente significative.

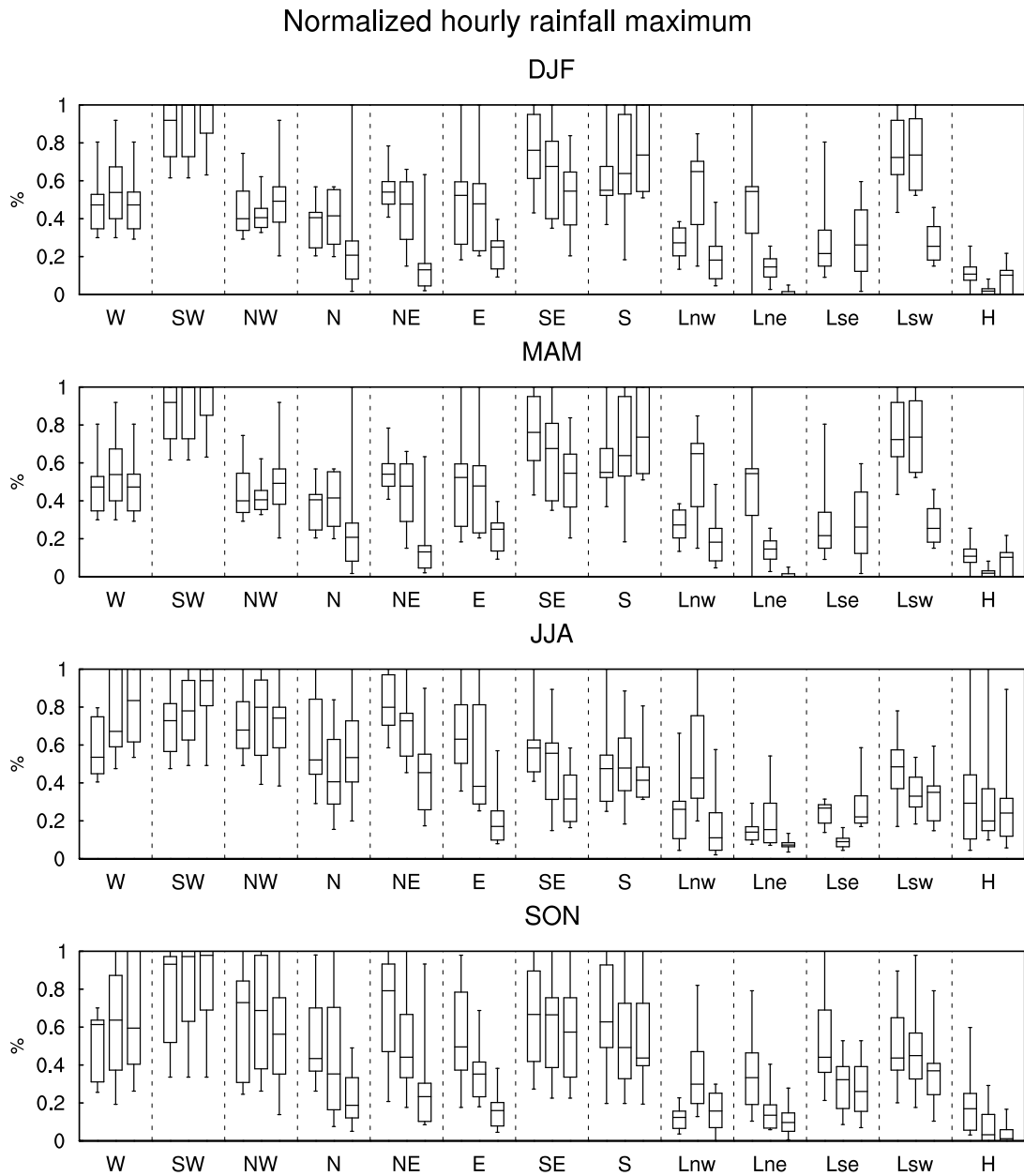


Figura 7.13: Box plot che mostrano le distribuzioni dei massimi orari di pioggia normalizzati per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

7.2.11 Numero di ore di pioggia intensa

Nell'ottica di analizzare quali tipi di tempo causino un numero elevato di precipitazioni orarie intense, è stato calcolato il numero di ore di pioggia intensa per ogni tipo di tempo, secondo le formule introdotte nella sezione 5.2. Le tabelle statistiche contenenti questi valori sono riportate nel cd in allegato, mentre nella figura 7.14 si trovano i box plot dei valori di tale grandezza per ogni tipo di tempo. Notiamo che le ore di precipitazione più intensa sono osservate in presenza di basse pressioni e del tipo di tempo da Sud in quota. Anche il Sud-Ovest tende a produrre precipitazioni orarie significative, tranne che nella stagione estiva. Tutti gli altri tipi di tempo non presentano grandi differenze, con numeri di ore che sono confrontabili non solo tra le diverse circolazioni sinottiche, ma anche tra lo stesso tipo di tempo osservato a quote diverse. Con condizioni di alta pressione si è avuta pioggia oraria intensa sia in estate che in autunno, probabilmente associata ad attività temporalesca, mentre il numero di giorni di pioggia giornaliera intensa verificatisi con l'alta pressione è nullo (vedi figura 7.11).

7.2.12 Durata media della pioggia

I dati di pioggia orari hanno permesso anche di analizzare la durata media della pioggia per ogni giorno in cui si verifica un particolare tipo di tempo. Nel cd in allegato si trovano le tabelle statistiche anche per questa grandezza, mentre la figura 7.15 permette di avere uno sguardo d'insieme su tutti i tipi di tempo e su tutte le stazioni. Notiamo come i tipi di tempo che tendono a causare precipitazioni più prolungate siano quelli che, in base a quanto osservato in precedenza, tendono a causare gli accumuli di pioggia maggiori, cioè i tipi di tempo da Sud e alcuni tipi di basse pressioni. Anche in questo caso, però, bisogna tenere conto che il minor numero di campioni delle classi di bassa pressione diminuisce il valore statistico dei valori in quei casi. Inoltre, anche in questo caso le differenze tra i vari tipi di tempo tendono a diminuire d'estate.

7.3 Relazione tra i tipi di tempo e la radiazione solare sul Trentino

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi della relazione tra i tipi di tempo e la radiazione solare cumulata giornaliera misurata nelle stazioni di rilevamento trentine della tabella 4.5. La quantità di radiazione solare che raggiunge il sensore della stazione dipende fortemente dalla presenza e dal tipo di nuvolosità presente in atmosfera. Quindi, questa sezione costituisce un'analisi della relazione che intercorre tra i tipi di tempo a scala sinottica e la nuvolosità presente sul Trentino. Le tabelle statistiche relative ad ogni singola stazione si trovano nel cd in allegato, mentre le figure box plot relative alle grandezze statistiche analizzate sono riportate nel testo.

7.3.1 Numero di giorni con dati di radiazione

Al fine di interpretare in maniera corretta i parametri statistici che vengono presentati in questa sezione, è necessario conoscere il numero di giorni appartenente ad ogni tipo di tempo. Tale informazione si trova per ogni stazione nelle tabelle che si trovano nel cd in allegato, ed è riassunta nella figura 7.16. Il numero di giorni è lo stesso per tutte le stazioni, in quanto i dati di radiazione impiegati in questo studio sono stati ricostruiti laddove mancanti (vedi sezione 4.2.3). Inoltre, i valori relativi ad ogni tipo di tempo per il periodo 2004-2012 rispecchiano quelli delle figure 6.1 relativi al periodo 1992-2013.

7.3.2 Radiazione solare cumulata giornaliera media

Come descritto nella sezione 5.3, è stata calcolata la media della radiazione solare cumulata giornaliera per ogni stazione e per ogni tipo di tempo al suolo e a 500 hPa, e loro combinazioni. Tale grandezza

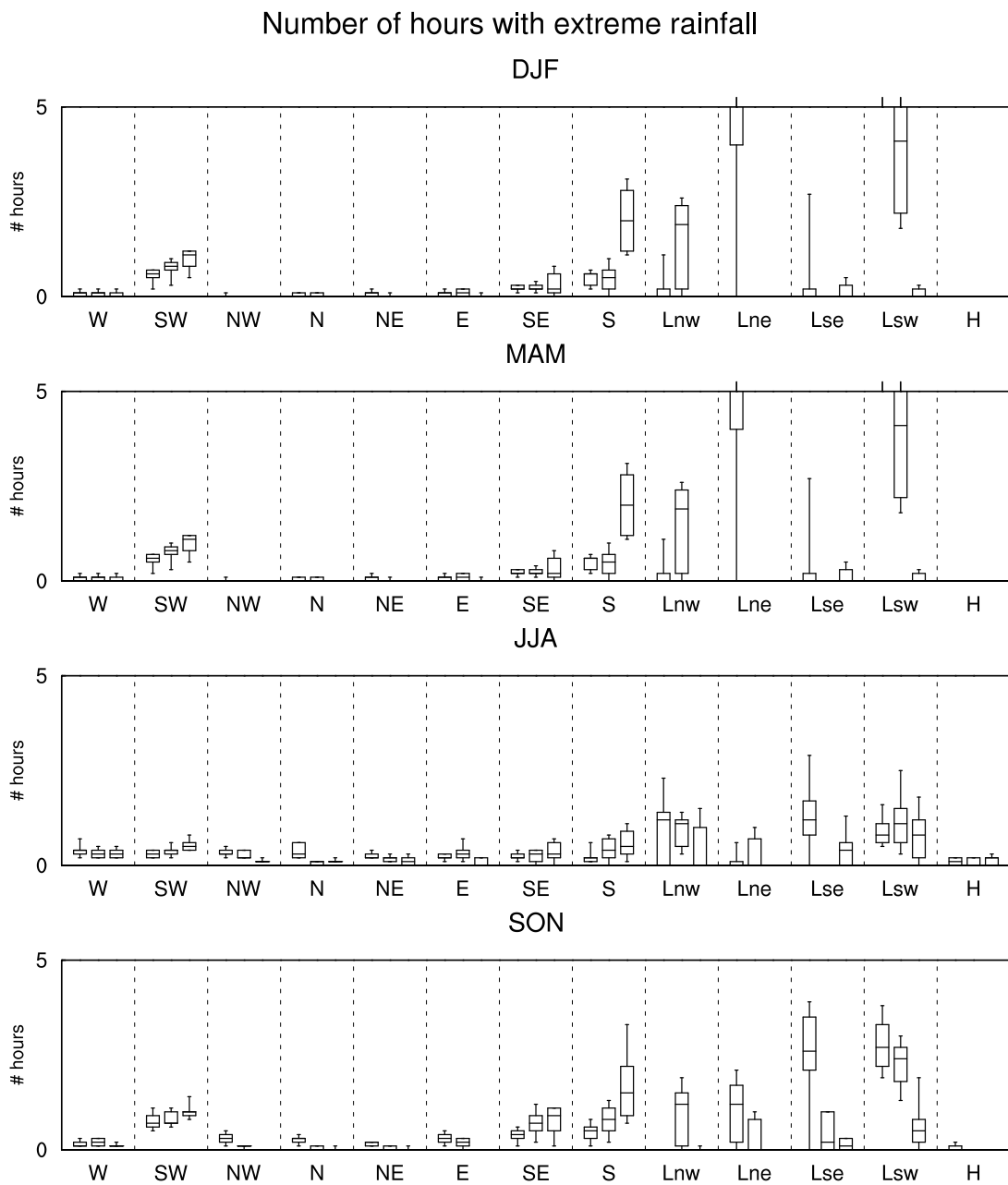


Figura 7.14: Box plot che mostrano le distribuzioni del numero di ore di pioggia intensa per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

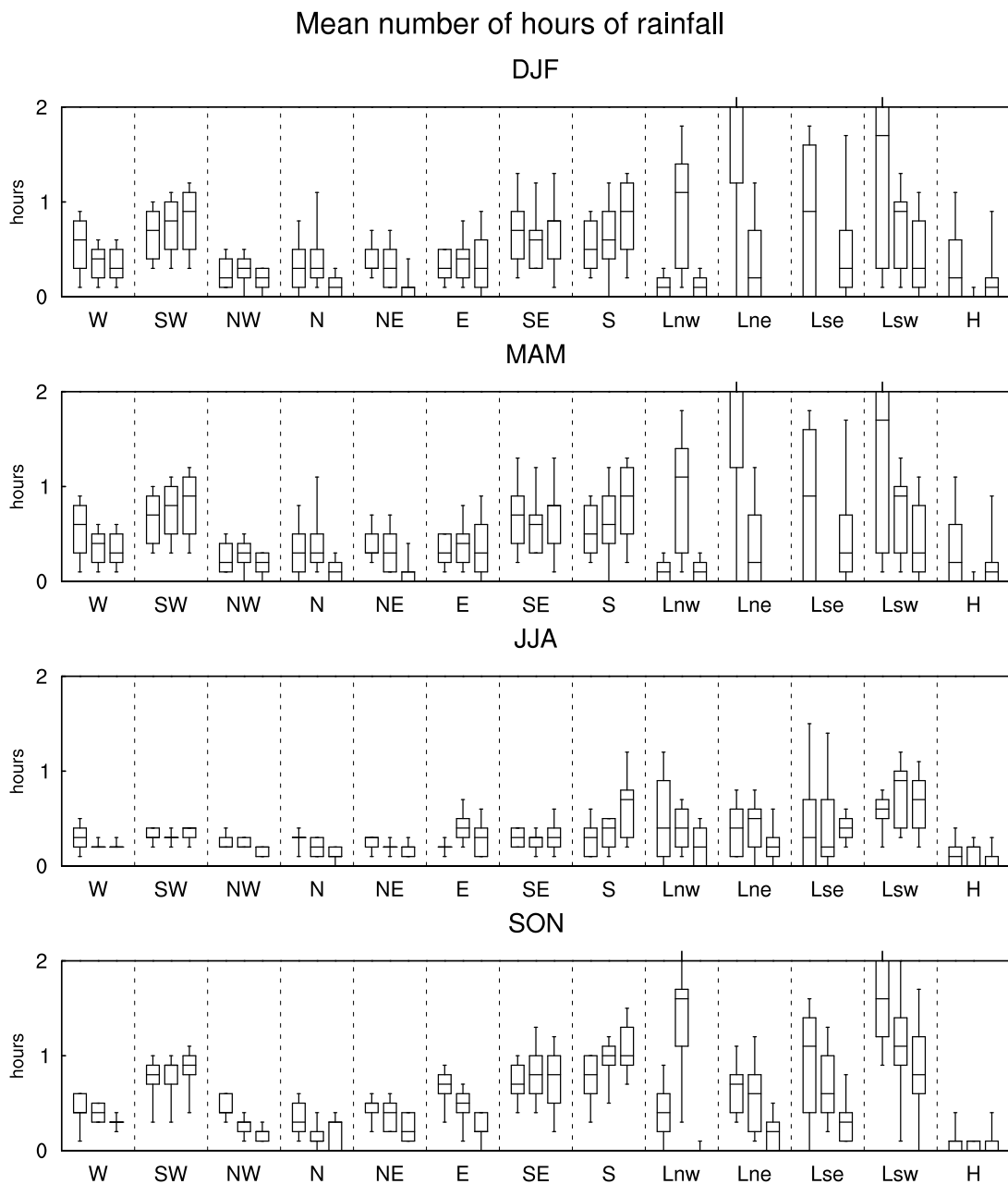


Figura 7.15: Box plot contenente le distribuzioni della durata media della pioggia per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

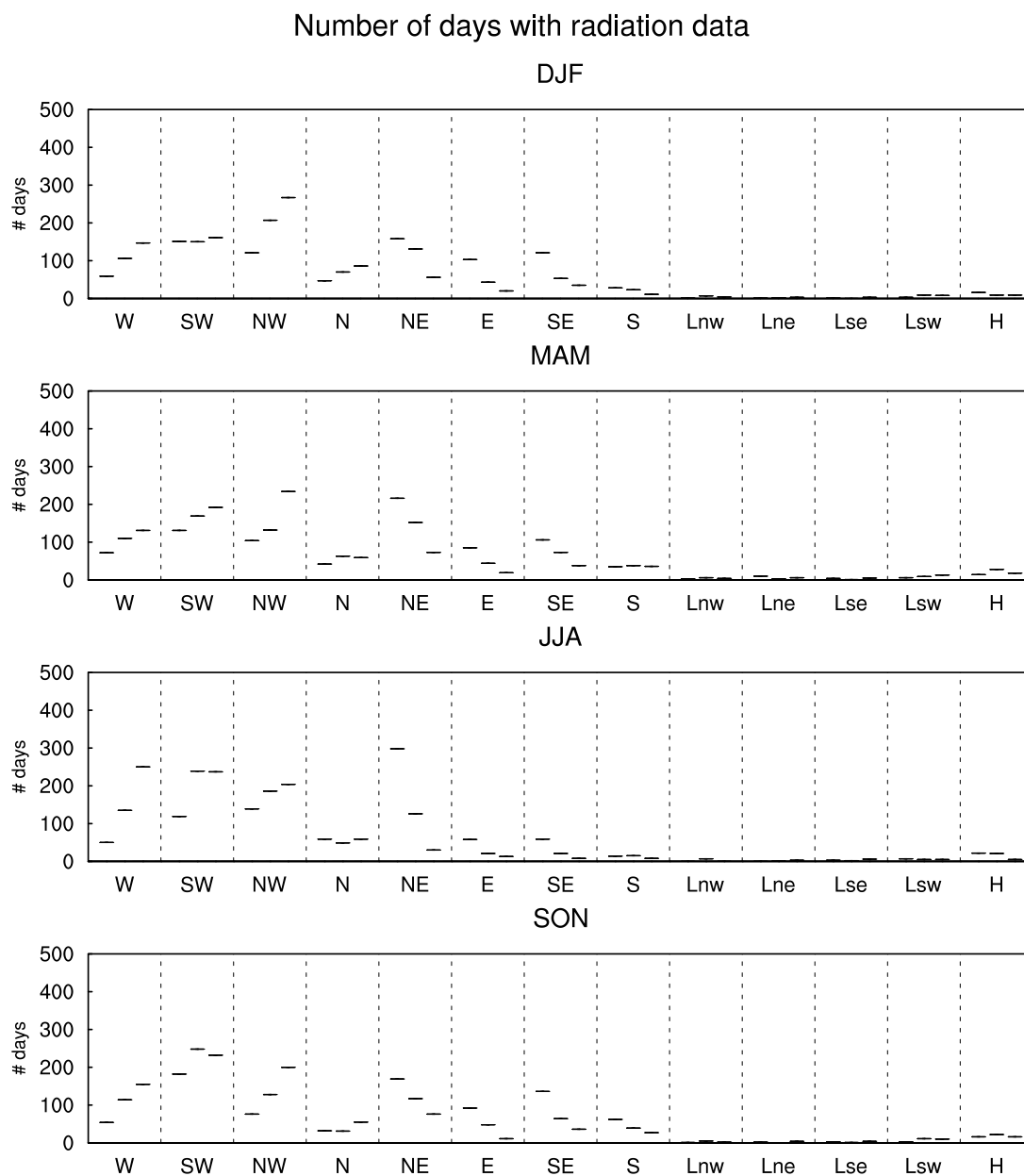


Figura 7.16: Numero di giorni di ogni tipo di tempo per ogni stagione per il periodo 2004-2012. Per ogni tipo di tempo la linea orizzontale di sinistra è relativa alla classificazione GWT al suolo, quella centrale a quella a 850 hPa, quella di destra a quella a 500 hPa.

si trova nelle tabelle statistiche riportate nel cd in allegato per ogni stazione. I tipi di tempo con i quali si osservano i valori di radiazione più elevati sono quelli da Nord, Nord-Est, Est e alta pressione, con i quali la formazione della nuvolosità è inibita dai venti di caduta o dai moti di subsidenza tipici delle condizioni di alta pressione. Invece i tipi di tempo che causano correnti meridionali sull'arco alpino presentano valori di radiazione media piuttosto bassi, a causa della maggiore presenza di nuvolosità che si ha in questi casi.

7.3.3 Contributo alla radiazione totale

Tale grandezza costituisce il contributo percentuale di ogni tipo di tempo alla radiazione solare totale misurata nel periodo 2004-2012 per ogni stazione, come spiegato nella sezione 5.3. Quindi, essa tiene conto sia della frequenza dei tipi di tempo che della quantità di radiazione che raggiunge la stazione con un certo tipo di circolazione sinottica. I dati relativi ad ogni stazione sono riportati nelle tabelle nel cd allegato a questa relazione, mentre la figura 7.17 permette di dare uno sguardo d'insieme a tutti i tipi di tempo e a tutte le stazioni grazie alla rappresentazione box plot. Innanzitutto notiamo che la variabilità tra le stazioni è molto piccola, osservazione che testimonia come su un'area limitata come quella del Trentino non ci siano grandi differenze tra la nuvolosità che si osserva nei diversi luoghi della regione. Il contributo maggiore alla radiazione totale in autunno e in inverno è dato dal tipo di tempo Nord-Ovest in quota, mentre in estate anche i tipi di tempo Nord-Est al suolo, Ovest e Sud-Ovest in quota presentano contributi di radiazione significativi. Tali risultati sono ovviamente influenzati dal numero di giorni in cui ogni tipo di tempo si verifica, riportati nella figura 7.16. Così, per esempio, le condizioni di alta pressione, nonostante presentino alti valori di radiazione cumulata giornaliera, forniscono contributi alla radiazione totale trascurabili. La figura 7.17 mette in luce come le stesse categorie di tempo, ma considerate a quote differenti, contribuiscano in maniera sensibilmente diversa alla radiazione totale. Questo fatto è da attribuire al diverso numero di giorni con cui i diversi tipi di tempo si sono verificati nel periodo di riferimento (vedi figura 7.16).

7.3.4 Anomalia stagionale di radiazione solare cumulata giornaliera

L'anomalia di radiazione solare cumulata giornaliera è stata calcolata secondo quanto riportato nella sezione 5.3. Le tabelle relative ad ogni stazione si trovano nel cd in allegato, mentre la figura 7.18 rappresenta per mezzo di box plot le distribuzioni di tale grandezza per tutte le stazioni e per tutti i tipi di tempo. Come per la temperatura e la precipitazione, i punti denotano le anomalie statisticamente significative. Le informazioni che si possono trarre dalla figura 7.18 sono in accordo con la precedente analisi della radiazione solare cumulata media giornaliera: i tipi di tempo che causano correnti meridionali sull'arco alpino sono associati ad anomalie negative, indice di maggior nuvolosità rispetto a condizioni medie, mentre le circolazioni sinottiche che producono venti settentrionali sul Trentino presentano anomalie positive, dovute ad un soleggiamento più prolungato rispetto alla media stagionale. L'alta pressione provoca sempre anomalie positive, tranne quando si verifica al suolo in estate; in questo caso, probabilmente, lo sviluppo di nuvolosità dovuto al ciclo diurno della radiazione solare è favorito, e l'anomalia si attesta quindi sui valori climatici. Interessante notare anche che i tipi di tempo da Sud e Sud-Ovest provocano anomalie più negative quando si verificano in quota rispetto a quando si osservano al suolo, probabilmente a causa dell'afflusso di nuvolosità compatta verso l'arco alpino nei primi casi. Le basse pressioni presentano la consueta variabilità nei valori di anomalia, che sono in generale negativi. Solamente quando la depressione è situata a nord-est del Trentino si hanno anomalie positive, dovute certamente alla provenienza settentrionale dei venti osservata in quei casi. Più difficile spiegare, invece, l'anomalia di poco positiva associata ad una bassa pressione a 500 hPa il cui centro si trova a sud-ovest del Trentino, posizione che implica venti per lo più meridionali sulle Alpi orientali. Da notare poi come non appaiano differenze significative tra le distribuzioni di anomalia relative alle diverse

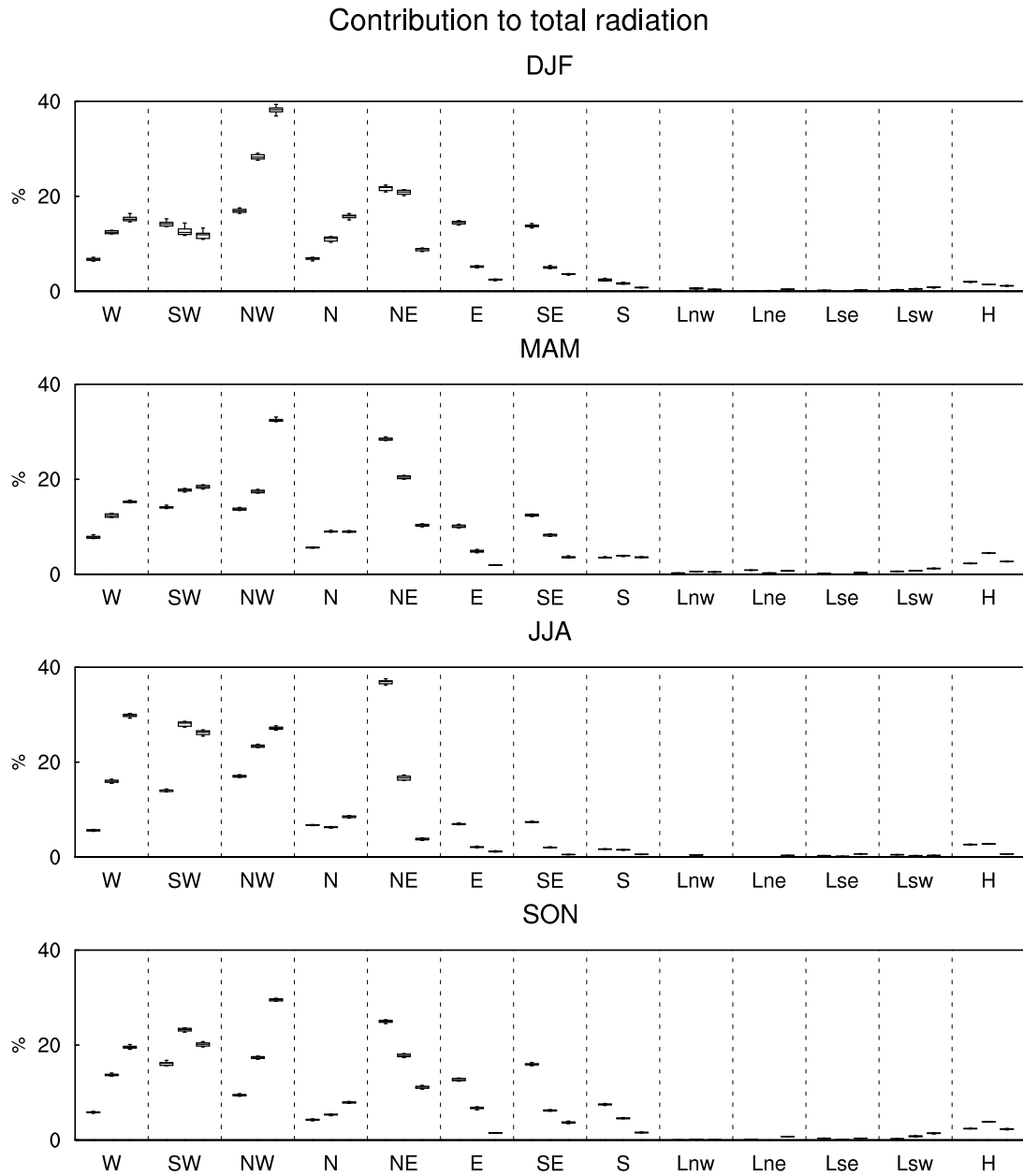


Figura 7.17: Box plot che mostrano le distribuzioni del contributo percentuale alla radiazione totale del periodo 2004-2012 di ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

stagioni. Infine evidenziamo come le basse pressioni siano le uniche configurazioni sinottiche in grado di generare un'anomalia negativa superiore ad una deviazione standard della distribuzione stagionale, anomalie che in certi casi sono anche statisticamente significative.

7.3.5 Percentuale di giorni scuri

Nella sezione 5.3 i giorni scuri sono stati definiti come quelli la cui radiazione solare cumulata giornaliera è inferiore al 10 percentile delle cumulate giornaliere di radiazione solare registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame. Quindi, tale grandezza tiene conto del ciclo stagionale della radiazione solare, e costituisce un modo efficace di individuare le giornate caratterizzate dalla presenza di estesa nuvolosità. Le tabelle statistiche nel cd in allegato presentano i dati relativi a tale parametro per ogni stazione per i tipi di tempo a 500 hPa e al suolo, e loro combinazioni. La figura 7.19, invece, permette di dare uno sguardo d'insieme a tutti i tipi di tempo e a tutte le stazioni per ogni stagione. In inverno i tipi di tempo da Sud e Sud-Ovest sono quelli che più frequentemente rispetto agli altri causano giorni con molta nuvolosità. Le basse pressioni hanno un comportamento molto variabile, ma la loro significatività statistica è limitata dal piccolo numero di campioni di queste classi. I tipi di tempo che causano correnti dai quadranti settentrionali sono invece associati a pochi giorni nuvolosi, a causa dei venti di caduta che sono spesso osservati con questo tipo di circolazione e che inibiscono la formazione di nuvolosità. In estate si nota che anche il tipo di tempo Est causa un elevato numero di giorni scuri, mentre il comportamento della primavera e dell'autunno assomiglia di più a quello dell'inverno.

7.3.6 Percentuale di giorni chiari

I giorni chiari sono quelli in cui la cui radiazione solare cumulata giornaliera è superiore al 90 percentile delle cumulate giornaliere di radiazione solare registrate in una finestra temporale mobile di 9 giorni centrata sulla giornata in esame (vedi sezione 5.3). In pratica, i giorni chiari sono quelli in cui il cielo è stato in prevalenza sereno, senza la presenza di nubi in grado di limitare la quantità di radiazione solare in arrivo sulla superficie terrestre. Le tabelle statistiche nel cd in allegato riportano i valori anche di questa grandezza, mentre la figura 7.20 riassume in modo compatto tale informazione per tutti i tipi di tempo e per tutte le stazioni. Notiamo che il tipo di tempo che in ogni stagione e ad ogni quota causa un numero di giorni chiari maggiore rispetto alla climatologia è quello da Nord, e questo a causa del già menzionato effetto di caduta dei venti che esso comporta. Le condizioni di alta pressione sulla catena alpina manifestano questo comportamento solamente quando si verificano in primavera al suolo o a 850 hPa, mentre in presenza di basse pressioni il numero di giorni chiari è sempre inferiore alla climatologia, tranne quando il centro della depressione è situato a nord-est di Trento, causando venti settentrionali sul Trentino. Le circolazioni sinottiche da Sud, Sud-Ovest, Sud-Est e Ovest vedono sempre un numero di giorni chiari inferiori alla climatologia, in quanto sono associate a nuvolosità più o meno estesa che transita sul Trentino. I tipi di tempo da Est e da Nord-Est, infine, non si discostano di molto dalla climatologia, e il loro comportamento può variare anche in modo significativo a dipendenza del livello al quale si manifestano.

7.4 Relazione tra i tipi di tempo e il vento sul Trentino

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi della relazione tra i tipi di tempo e il vento misurato nelle stazioni di rilevamento trentine della tabella 4.6. Le tabelle statistiche relative ad ogni singola stazione si trovano nel cd in allegato, mentre le figure box plot relative alle grandezze statistiche sono riportate nel testo.

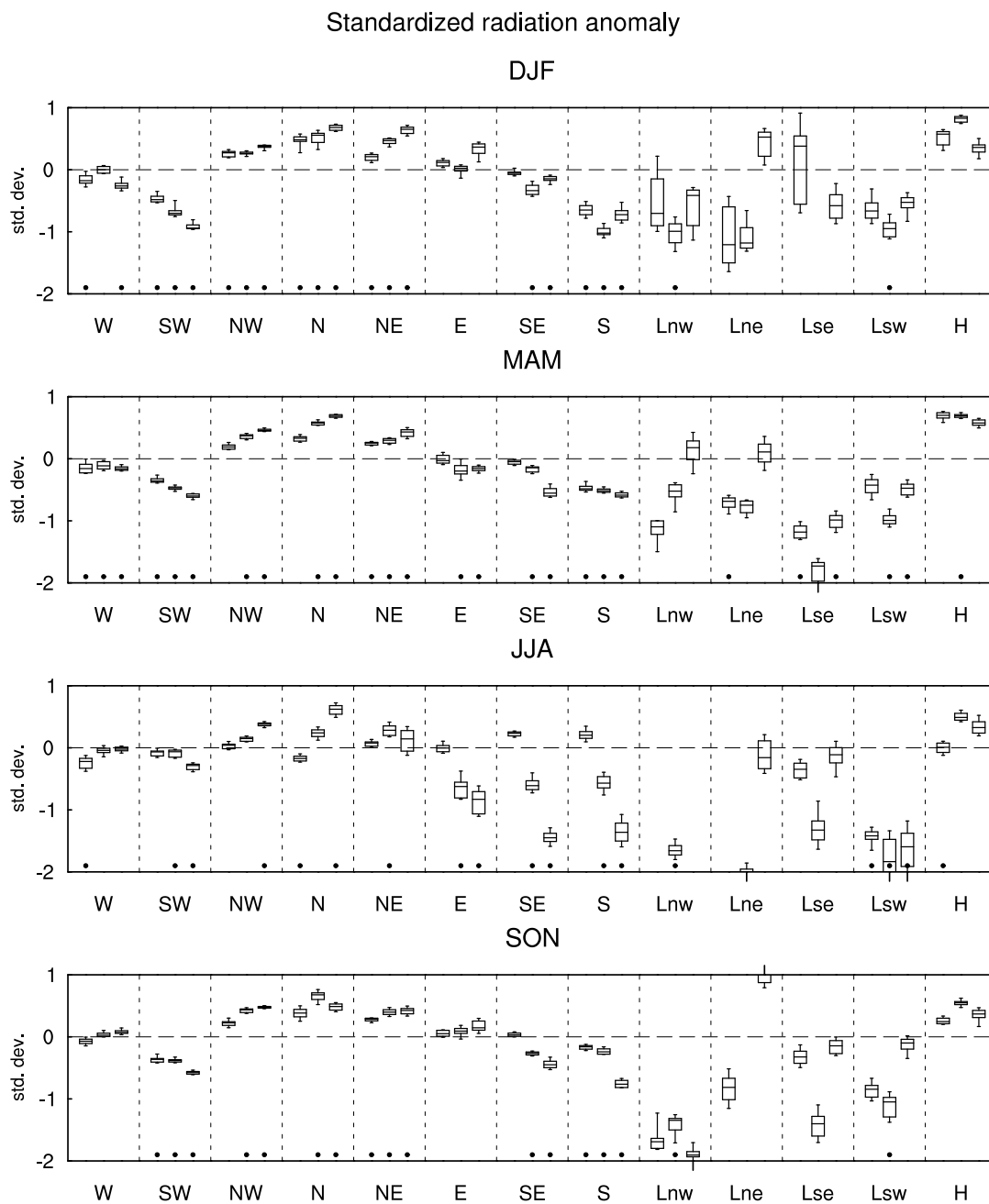


Figura 7.18: Box plot che mostrano le distribuzioni delle anomalie standardizzate stagionali di radiazione solare cumulata giornaliera per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto o verso il basso alla posizione x corrispondente. I punti indicano le anomalie statisticamente significative.

Percentage of cloudy days

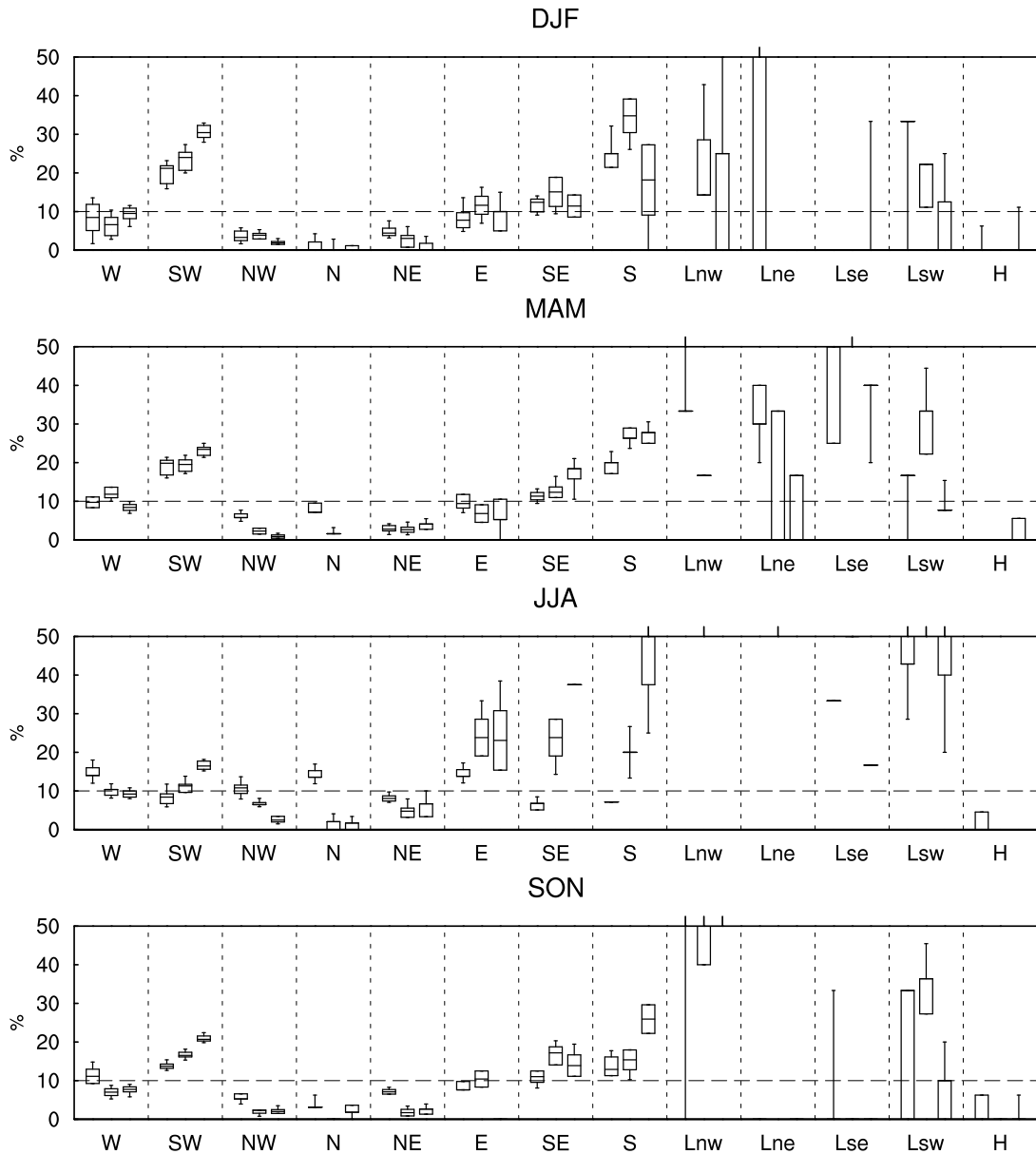


Figura 7.19: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale di giorni scuri per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

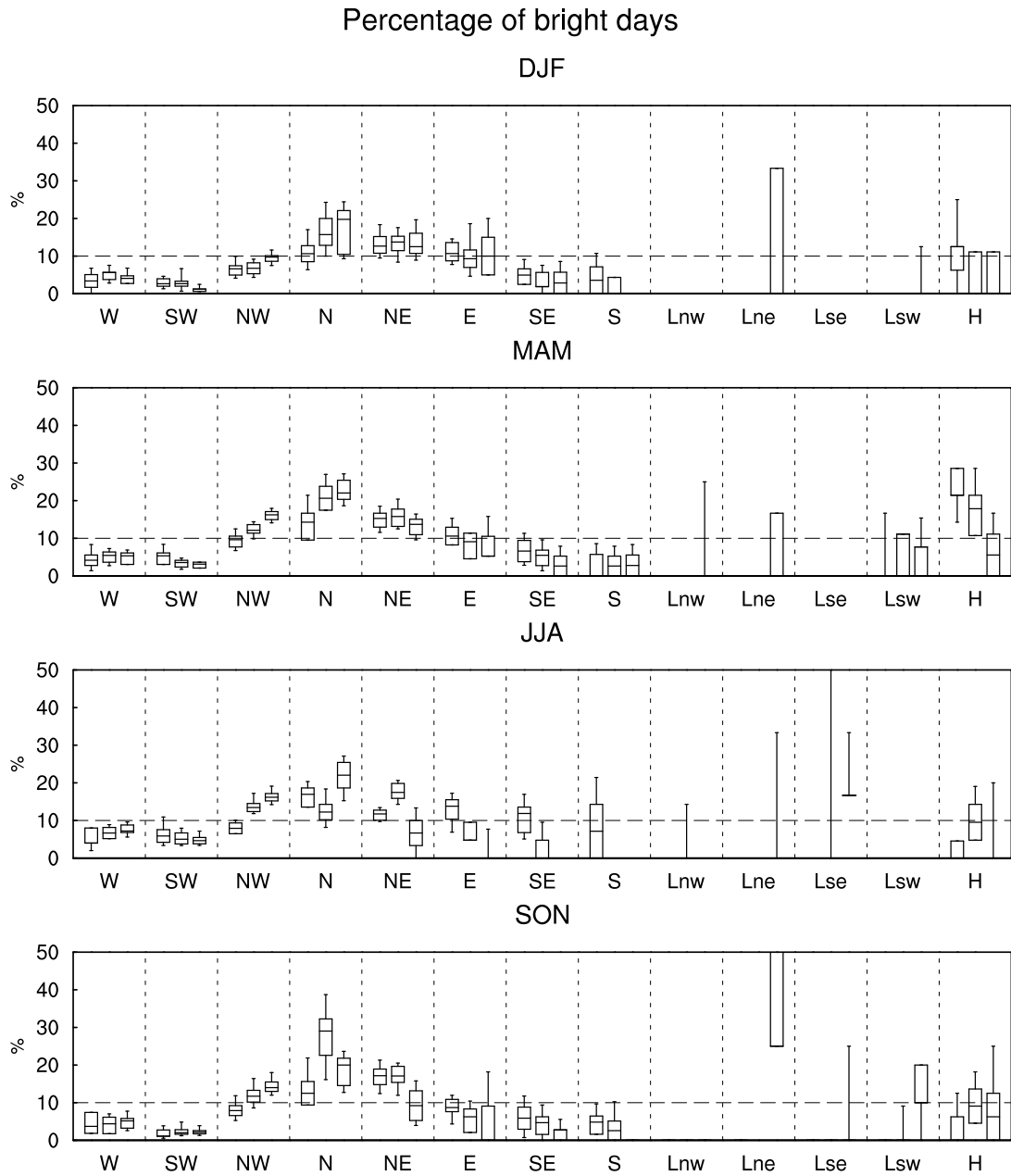


Figura 7.20: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale di giorni chiari per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

7.4.1 Numero di giorni con dati di vento

Al fine di interpretare in maniera corretta i parametri statistici che vengono presentati in questa sezione, è necessario conoscere il numero di giorni appartenente ad ogni tipo di tempo che presenta dati di vento di buona qualità per ogni stazione. Tale informazione si trova nelle tabelle nel cd in allegato, ed è riassunta nella figura 7.21. I valori relativi ad ogni tipo di tempo per il periodo 1999-2013 rispecchiano quelli delle figure 6.1 relativi al periodo 1992-2013.

7.4.2 Velocità del vento medio giornaliero

Come descritto nella sezione 5.4, per ogni tipo di tempo è stata calcolata l'intensità media del vento medio giornaliero. Tali valori sono riportati per ogni stazione nelle tabelle nel cd in allegato. I risultati di questa analisi dipendono molto dalla posizione geografica della stazione in esame, che risente delle caratteristiche orografiche in cui la stessa è situata. Le stazioni poste nei fondovalle, in particolare, risentono molto delle circolazioni di brezza a carattere diurno. In generale, però, notiamo come i valori medi più alti si riscontrino in tutte le stagioni con i tipi di tempo da Nord al suolo e basse pressioni in quota. In estate, invece, la stagione climatologicamente più ventosa in Trentino, si hanno valori elevati con una gran varietà di configurazioni sinottiche.

7.4.3 Direzione del vento medio giornaliero

Anche la direzione media del vento medio giornaliero è riportata nelle tabelle nel cd allegato, al fine di analizzare la relazione tra i tipi di tempo sinottici e la direzione prevalente del vento misurato al suolo dalle stazioni trentine. In generale, notiamo che le direzioni prevalenti misurate dalle stazioni dipendono fortemente dalla posizione geografica della stazione analizzata. Per esempio, le stazioni poste in fondovalle hanno direzioni che coincidono con l'orientamento della valle, mentre quelle poste più in quota hanno una maggior variabilità nelle direzioni osservate. In estate i venti meridionali che risalgono la valle prevalgono nelle stazioni di fondovalle, in quanto questi venti hanno intensità maggiori rispetto a quelli discendenti che si verificano nelle ore notturne.

7.4.4 Massima velocità del vento medio giornaliero

Tale analisi vuole analizzare la relazione tra i tipi di tempo e le giornate più ventose misurate nelle stazioni trentine. Come descritto nella sezione 5.4, è stata così calcolata per ogni tipo di tempo, per ogni stagione e per ogni stazione la massima velocità del vento medio giornaliero; le tabelle statistiche con tali valori sono riportate nelle tabelle nel cd in allegato a questa relazione, mentre la figura 7.22 permette di avere una visuale completa su tutte le stazioni e su tutte le stagioni. Notiamo come in inverno la maggior parte delle stazioni abbiano misurato il valore di vento medio giornaliero più alto con i tipi di tempo da Nord al suolo o a 850 hPa, ma alcune stazioni anche con le circolazioni sinottiche da Nord-Ovest, Nord-Est, Est e di bassa pressione centrata a sud-est del Trentino. In primavera alcune stazioni hanno misurato il massimo anche con il Sud-Ovest in quota e la bassa pressione a sud-ovest del Trentino. L'estate è la stagione in cui i massimi di vento giornaliero si disperdono su un maggior numero di tipi di tempo, infatti alle configurazioni già menzionate si aggiungono il Sud-Est e l'Ovest. In autunno, invece, la maggior parte delle stazioni hanno misurato i massimi giornalieri con il tipo di tempo da Nord-Est. In generale, comunque, i tipi di tempo che causano i massimi giornalieri di vento variano molto tra le stazioni, proprio perché quest'analisi include stazioni poste a quote diverse e in contesti orografici differenti.

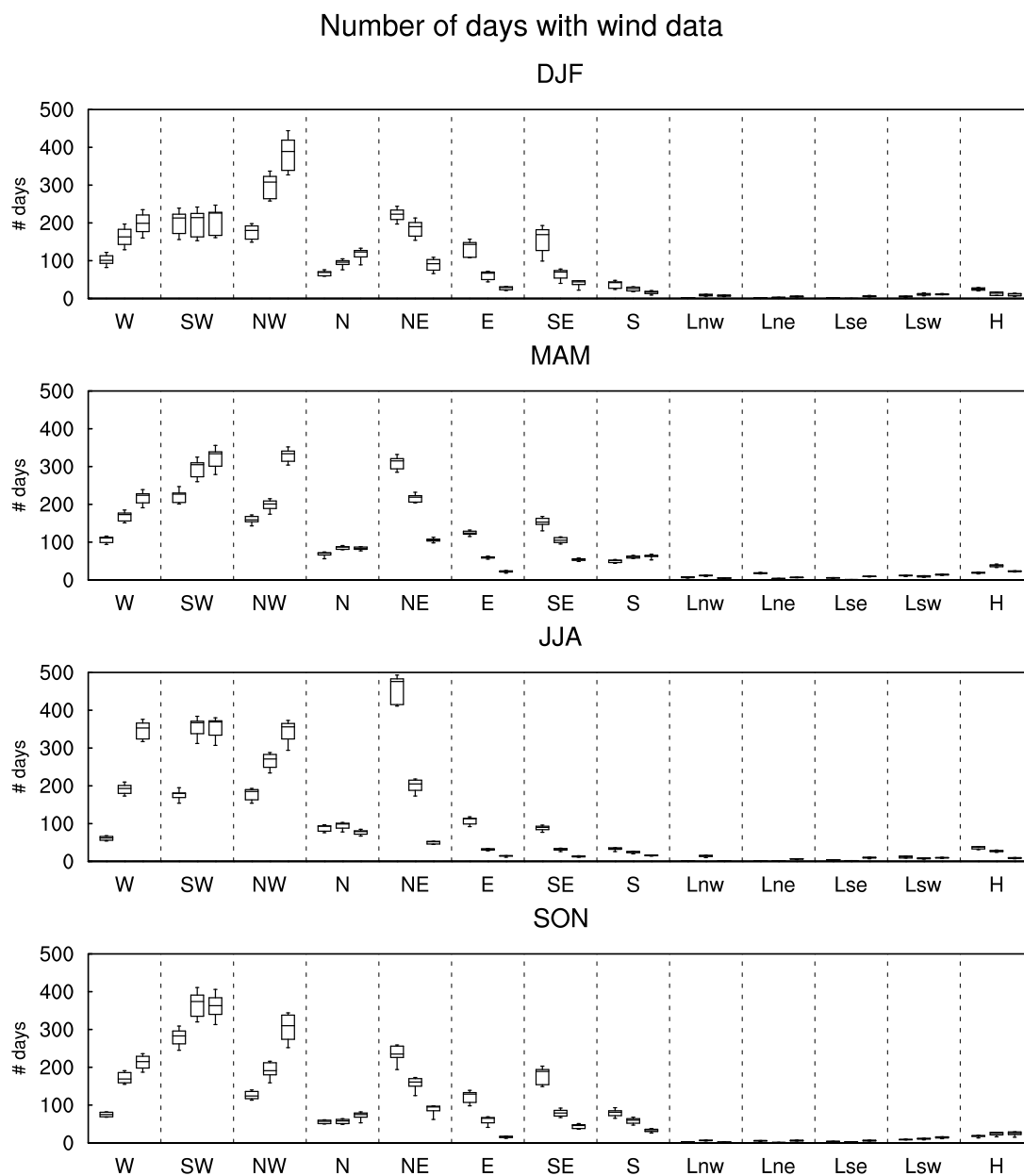


Figura 7.21: Box plot che mostrano le distribuzioni del numero di giorni del periodo 1999-2013 di ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

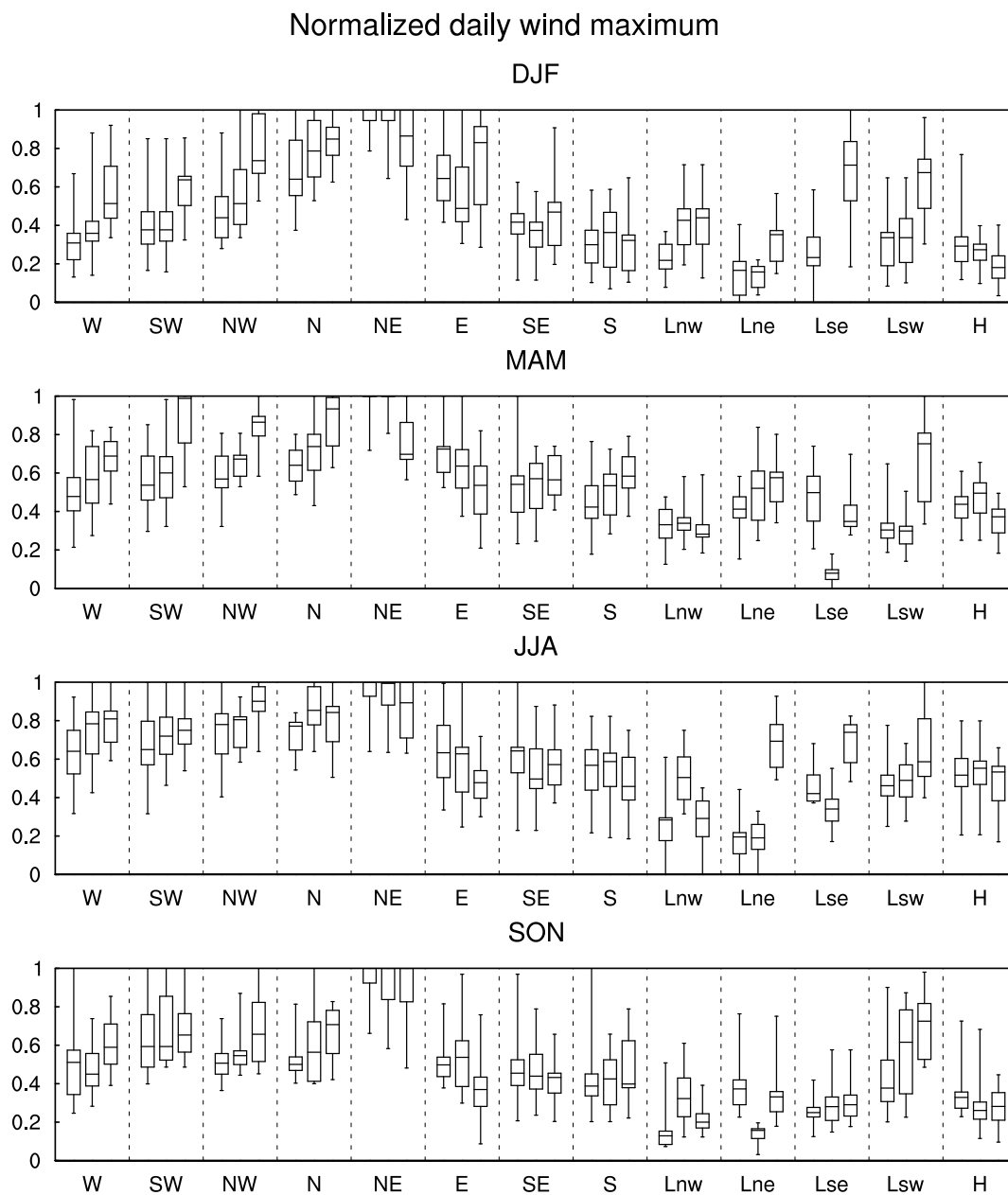


Figura 7.22: Box plot che mostrano le distribuzioni del massimo di vento medio giornaliero normalizzato per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

7.4.5 Massima velocità del vento medio orario

Un'analisi simile a quella descritta nella sezione precedente è stata eseguita utilizzando i valori di vento orari anziché giornalieri. In tal modo è possibile analizzare la relazione tra i tipi di tempo e le ore più ventose misurate nelle stazioni trentine. Oltre alle tabelle riportate nel cd in allegato che presentano i valori ottenuti, la figura 7.23 presenta la rappresentazione box plot per tutte le stazioni, stagioni e tipi di tempo. Dal confronto con la figura 7.22, emerge come le massime intensità orarie siano misurate con un numero maggiore di tipi di tempo rispetto a quello osservato in coincidenza alle massime intensità giornaliere. Questo accade perché le massime velocità del vento orarie possono verificarsi per un periodo limitato di tempo a scala sub-giornaliera e possono essere causate da fenomeni meteorologici a mesoscala i cui effetti in termini di vento possono poi scomparire nelle medie giornaliere. I tipi di tempo che causano le massime intensità orarie sono comunque in linea con quelli che provocano i massimi giornalieri. Notiamo come la configurazione di alta pressione, che non produce massimi giornalieri per alcuna stazione, produca invece dei massimi di vento orario per alcune stazioni nella stagione estiva. In autunno il tipo di vento Nord-Est causa i massimi orari nella maggioranza delle stazioni trentine, come nel caso dei massimi giornalieri.

7.4.6 Percentuale di giorni poco ventosi

Come introdotto nella sezione 5.4, tale grandezza esprime per ogni tipo di tempo la percentuale di giornate poco ventose. La figura 7.24 mostra l'andamento di tale grandezza per ogni stagione, stazione e tipo di tempo. In generale, si hanno giornate meno ventose rispetto alla climatologia in corrispondenza con i tipi di vento Ovest, Sud-Ovest, Sud, Sud-Est al suolo e alta pressione in quota in inverno, col Sud-Ovest, Est in quota, Sud-Est, Sud in primavera, col Sud-Ovest in quota, Est, Sud-Est e Sud in estate, Ovest al suolo, Sud-Ovest, Sud-Est e Sud alle basse quote in autunno. La variabilità delle basse pressioni è molto elevata, cioè alcune stazioni misurano poche giornate poco ventose con questa configurazione, mentre altre misurano molte giornate poco ventose. Probabilmente le stazioni poste in fondovalle vedono giornate poco ventose in questi casi, mentre quelle poste in quota, più esposte ai venti sinottici, sono caratterizzate da un numero più elevato di giornate ventose. L'alta pressione presenta un numero di giornate poco ventose più elevato della climatologia solamente quando si presenta in inverno, specialmente in quota.

7.4.7 Percentuale di giorni molto ventosi

Allo stesso modo è stata calcolata la percentuale di giornate molto ventose associata ad ogni configurazione sinottica, secondo quanto descritto nella sezione 5.4. La figura 7.25 rappresenta i box plot relativi a tale grandezza per ogni stazione, per ogni stagione e per ogni tipo di tempo, mentre i valori numerici sono riportati nelle tabelle che si trovano nel cd allegato a questa relazione. Notiamo come i tipi di tempo associati ad un numero di giorni molto ventosi più elevato della climatologia siano in tutte le stagioni quelli da Nord e Nord-Est. Le situazioni di bassa pressione, invece, come nel caso delle giornate poco ventose, presentano un'elevata variabilità. In generale vi è comunque una buona relazione tra le circolazioni sinottiche e il numero di giornate poco o molto ventose, tranne nei casi di bassa pressione.

7.4.8 Percentuale di ore poco ventose

L'analisi condotta a scala giornaliera illustrata nelle due sezioni precedenti è stata poi eseguita a scala oraria. In tal modo, si è voluto analizzare se vi fossero delle relazioni particolari tra le varie configurazioni sinottiche e il numero di ore molto o poco ventose per ogni stazione, secondo le definizioni fornite nella sezione 5.4. I risultati di questa analisi sono riportati per ogni stazione e per ogni stagione nelle tabelle statistiche che si trovano nel cd in allegato a questa relazione, mentre una visuale compatta

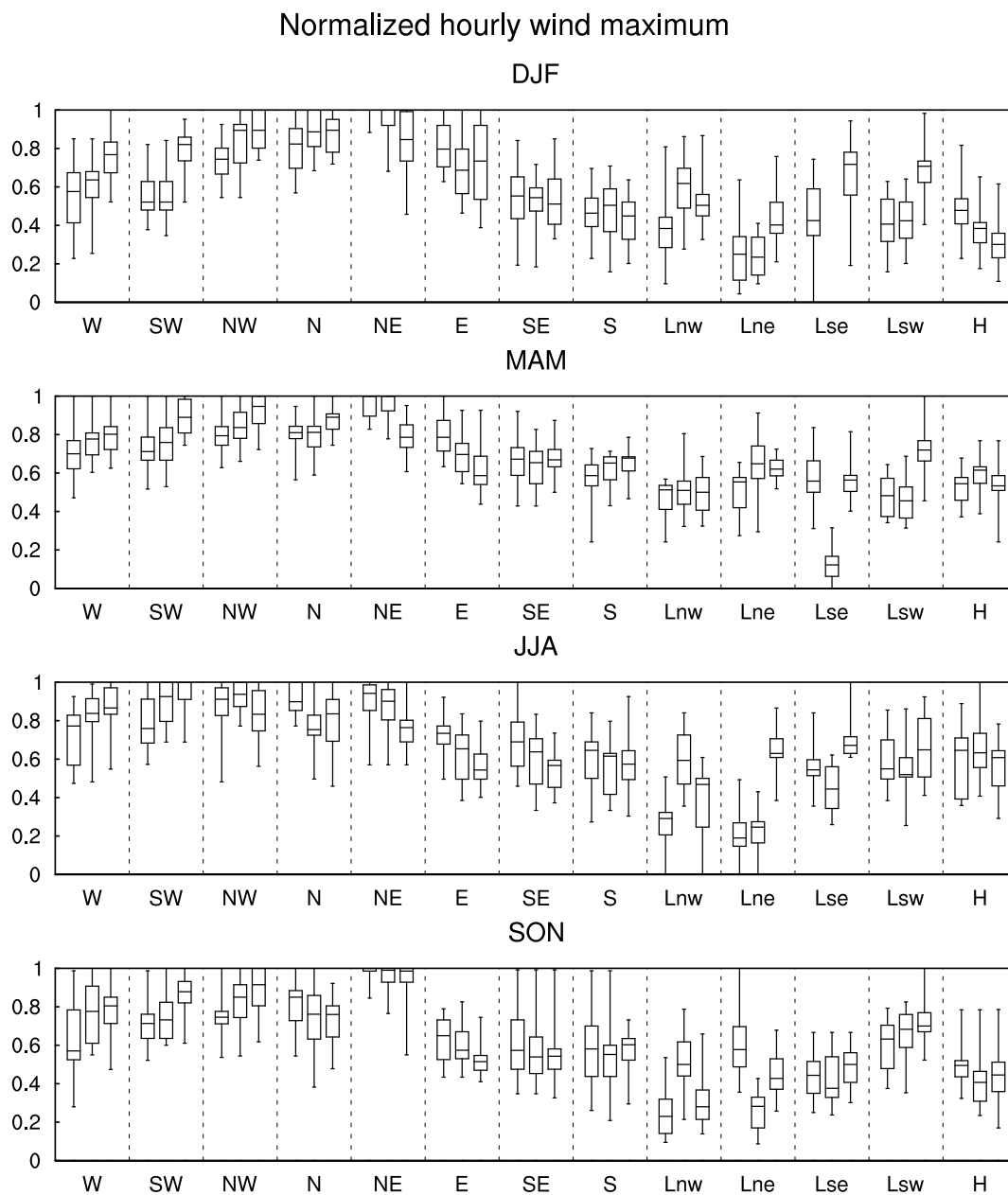


Figura 7.23: Box plot che mostrano le distribuzioni del massimo di vento medio giornaliero normalizzato per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa.

Percentage of low wind days

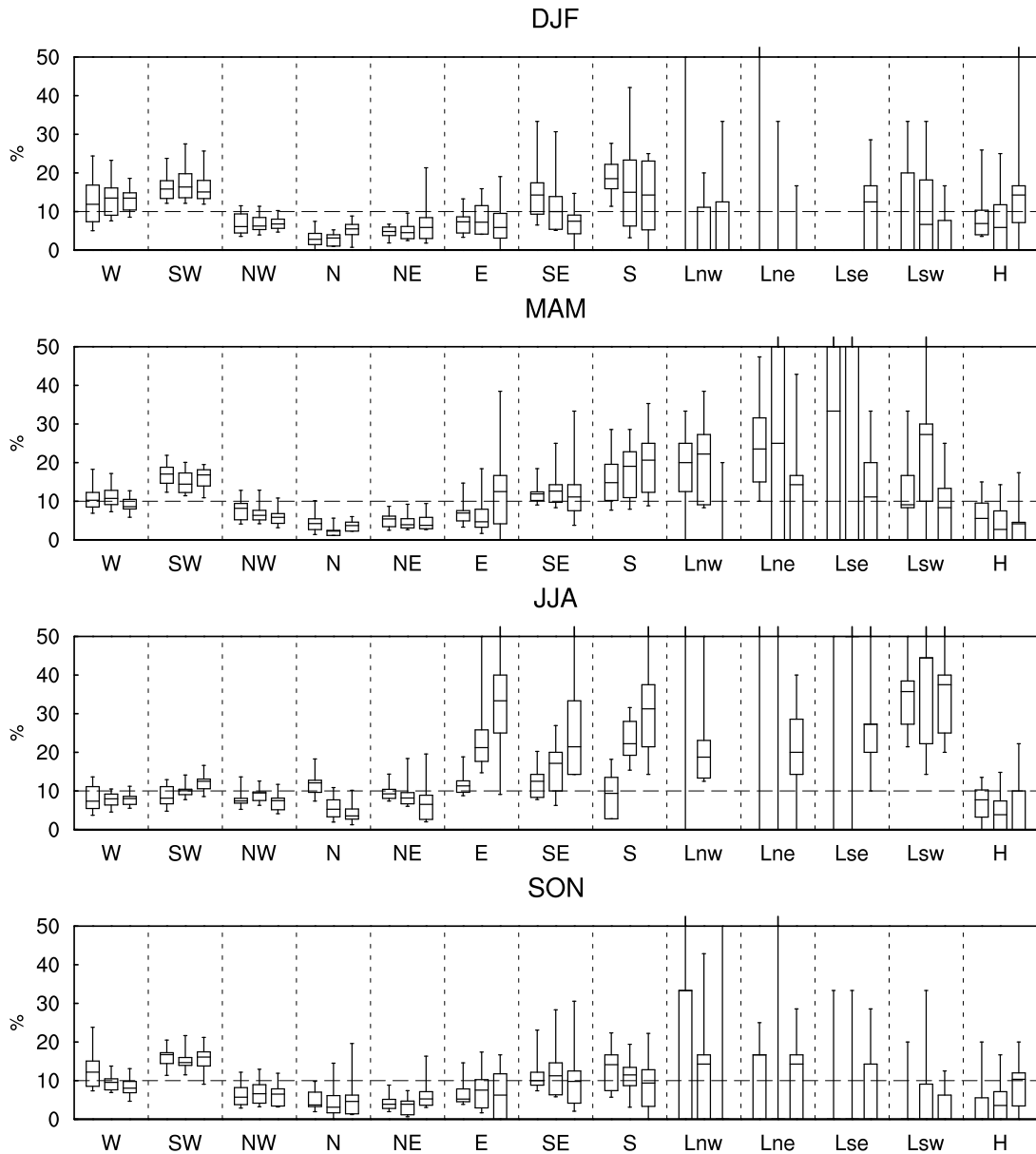


Figura 7.24: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale di giorni poco ventosi per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

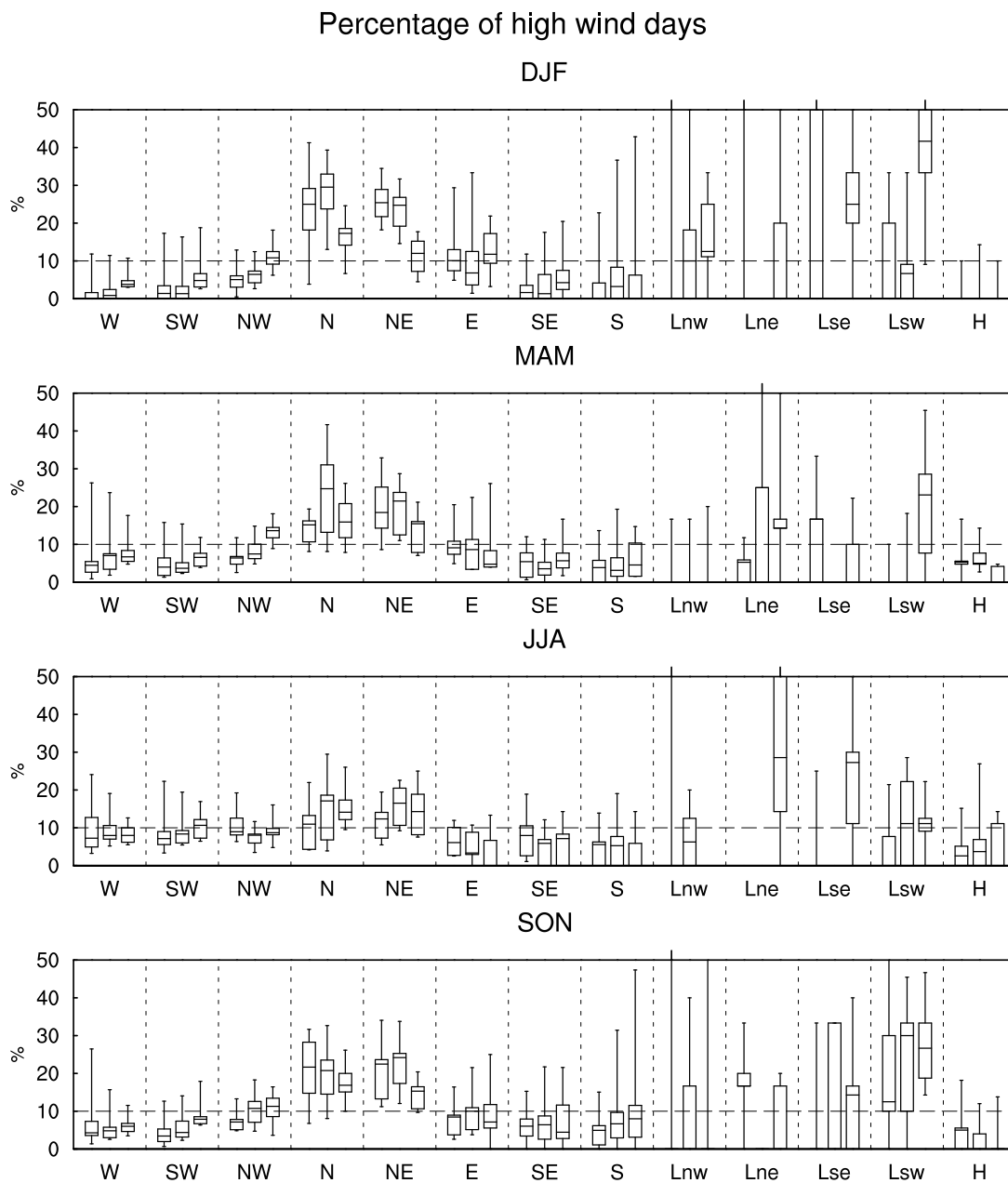


Figura 7.25: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale di giorni molto ventosi per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

su questa grandezza è fornita dalla figura 7.26. In generale, le differenze tra i vari tipi di tempo sono meno marcate in questa figura rispetto alla figura 7.24, e lo sono in particolar modo in estate. I tipi di tempo che causano un numero di ore poco ventose minore rispetto alla climatologia sono comunque quelli da Nord, come nel caso dell'analisi a scala giornaliera. Interessante poi notare come la variabilità tra le stazioni sia minore in questo caso rispetto all'analisi giornaliera.

7.4.9 Percentuale di ore molto ventose

A completamento dell'analisi illustrata nella sezione precedente, è stata calcolata la percentuale di ore molto ventose per ogni tipo di tempo, sempre in accordo con le definizioni date nella sezione 5.4. La figura 7.27 riporta i risultati di tale analisi mediante box plot, mentre i valori numerici relativi ad ogni stazione sono consultabili nelle tabelle riportate nel cd in allegato. Come nel caso delle ore poco ventose, anche in questo caso le distribuzioni della figura 7.27 appaiono meno disperse rispetto alla figura 7.25 relativa all'analisi giornaliera, anche se i tipi di tempo che presentano percentuali più alte o più basse rispetto alla climatologia sono gli stessi. Anche in questo caso, inoltre, la variabilità osservata nei casi di bassa pressione è minore rispetto a quella osservata per l'analisi a scala giornaliera.

7.4.10 Percentuale di ore con calme di vento

Come introdotto nella sezione 5.4, si è calcolata per ogni tipo di tempo, per ogni stazione e per ogni configurazione sinottica la percentuale di ore con vento medio inferiore a 0.5 m/s, cioè praticamente assente (calme di vento). Tali percentuali sono riportate nelle tabelle riportate nel cd in allegato a questa relazione, mentre nella figura 7.28 esse sono state normalizzate in modo da permettere un confronto tra le varie stazioni di rilevamento ubicate in luoghi diversi, e quindi climatologicamente soggette a condizioni di vento diverse, e tra le varie configurazioni. Notiamo che per tutti i tipi di tempo vi è un'elevata variabilità tra le diverse stazioni di rilevamento, e che le differenze tra i vari tipi di tempo sono più accentuate in inverno rispetto alle altre stagioni. In generale i tipi di tempo da Nord presentano le percentuali minori, in accordo con quanto osservato per le percentuali di giornate poco ventose. La figura 7.28 permette di sapere quali sono i tipi di tempo che in almeno una stazione hanno causato la percentuale più alta di ore con calma di vento; essi sono l'alta pressione in quota in inverno e in primavera, le basse pressioni a sud-est e nord-est di Trento in tutte le stagioni, la circolazione da Sud in inverno e in primavera, quelle da Sud-Est e da Ovest al suolo in inverno, quella da Est in quota in estate, la bassa pressione a sud-ovest del Trentino in primavera, la bassa pressione a sud-est del Trentino in estate e in autunno.

7.4.11 Anomalia stagionale del vento medio giornaliero

L'anomalia del vento medio giornaliero è stata calcolata secondo quanto riportato nella sezione 5.4. Le tabelle relative ad ogni stazione si trovano nel cd allegato, mentre la figura 7.29 rappresenta per mezzo di box plot le distribuzioni di tale grandezza per tutte le stazioni e per tutti i tipi di tempo; i punti denotano le anomalie statisticamente significative. I tipi di tempo da Nord sono quelli che sono associati ad anomalie positive, specialmente nelle stagioni più fredde. I tipi di tempo da Ovest o Sud, invece, causano anomalie negative o non sono associati a valori di vento giornalieri significativamente diversi da quelli climatologici. Le condizioni di bassa pressione presentano una elevata variabilità tra loro e tra le diverse stazioni; tuttavia le loro anomalie non sono spesso statisticamente significative, probabilmente a causa del minor numero di giorni in cui le basse pressioni si verificano. L'alta pressione presenta anomalie negative, tranne quando si verifica a 850 hPa in primavera e in estate; in queste stagioni, comunque, i valori sono molto vicini alla climatologia.

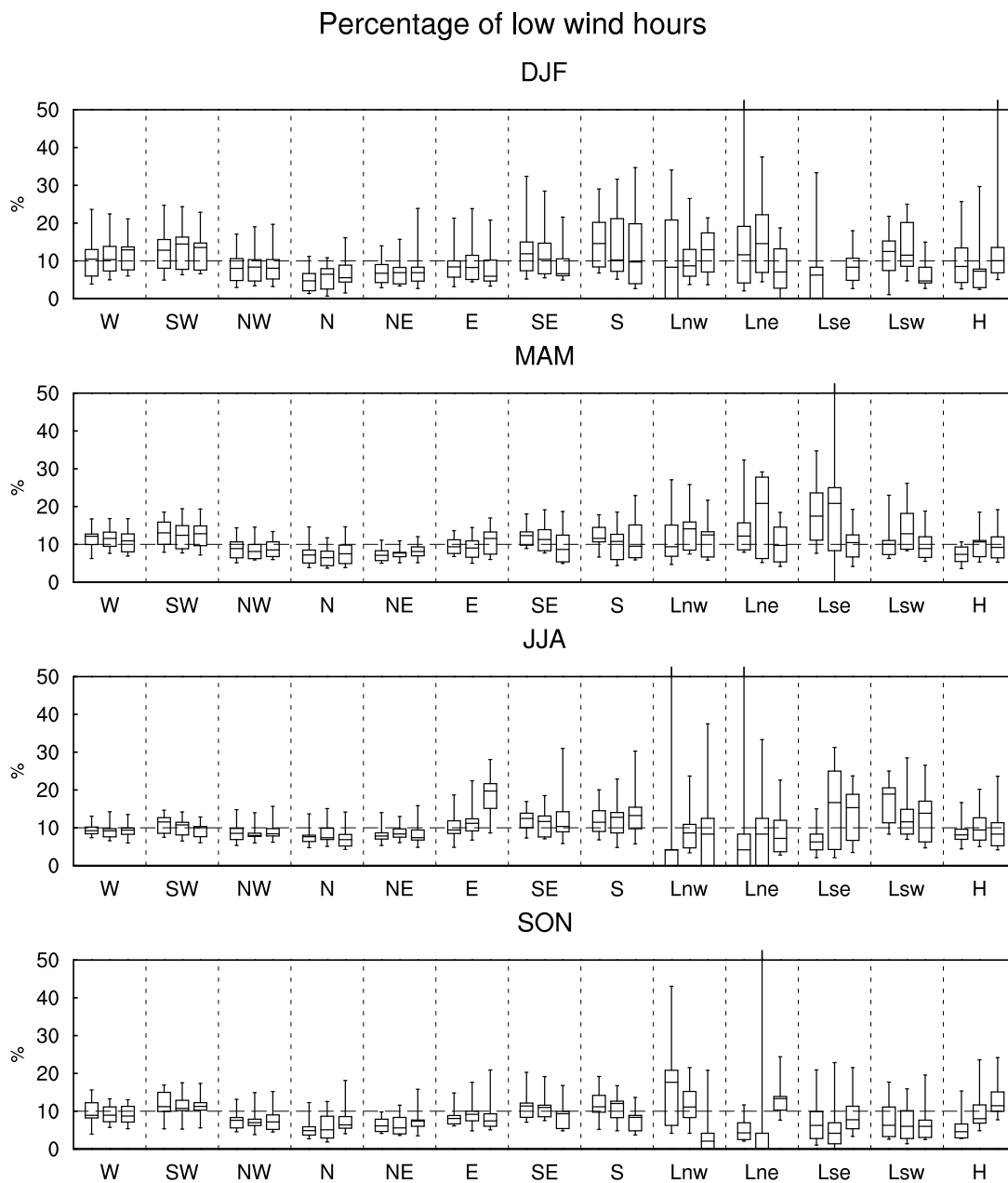


Figura 7.26: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale di ore poco ventose per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

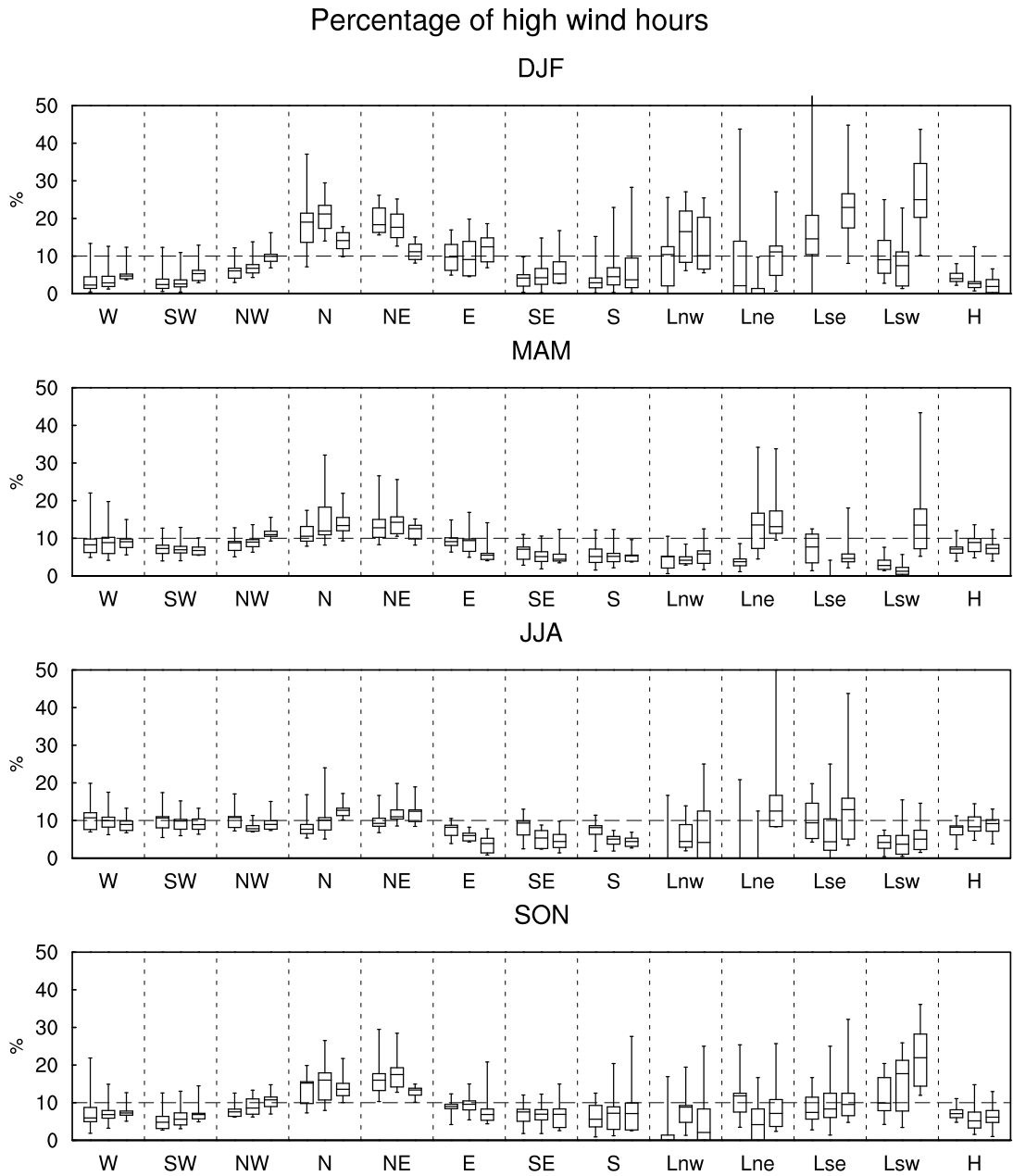


Figura 7.27: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale di ore molto ventose per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

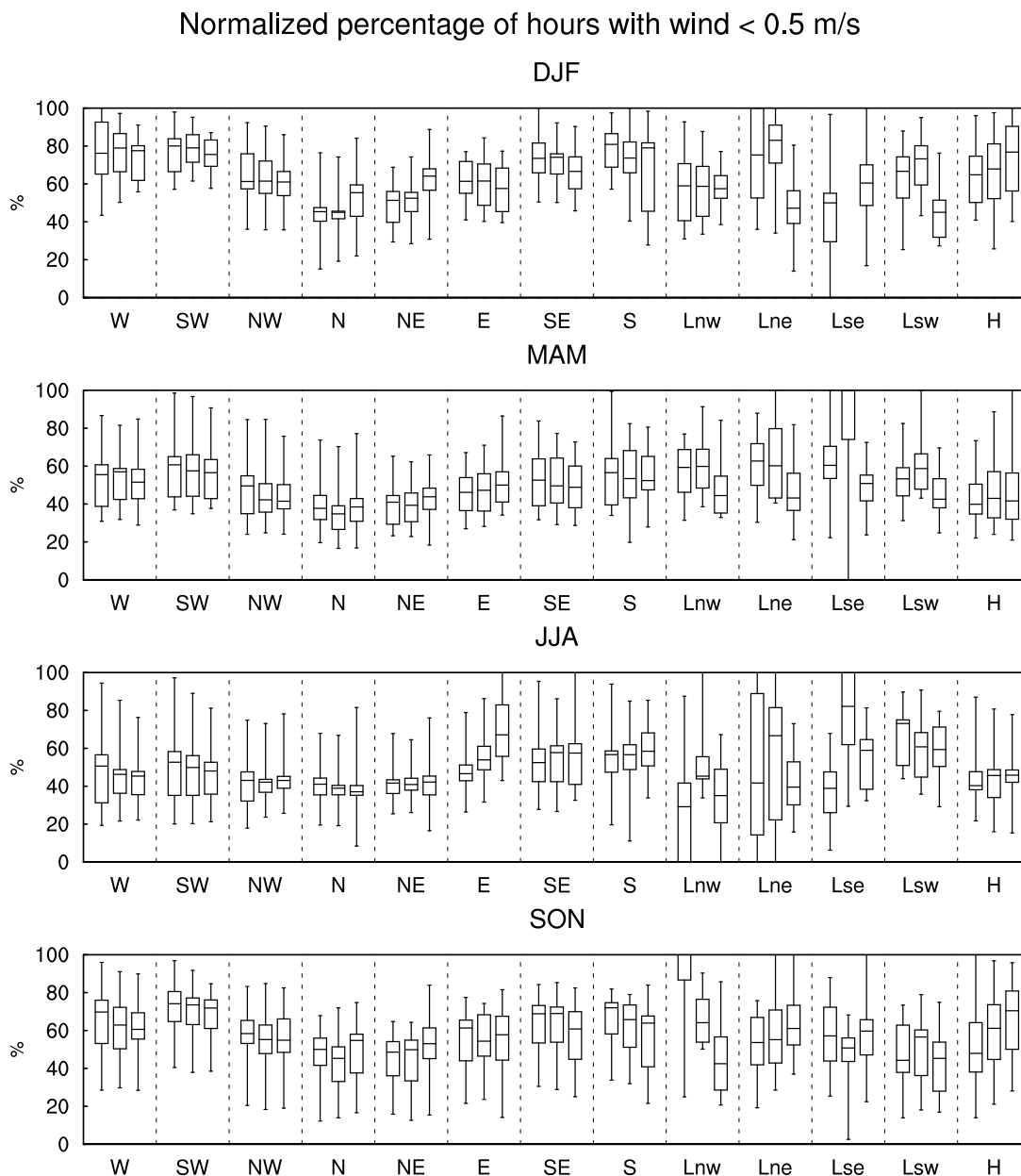


Figura 7.28: Box plot che mostrano le distribuzioni della percentuale normalizzata di ore con calme di vento per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto alla posizione x corrispondente.

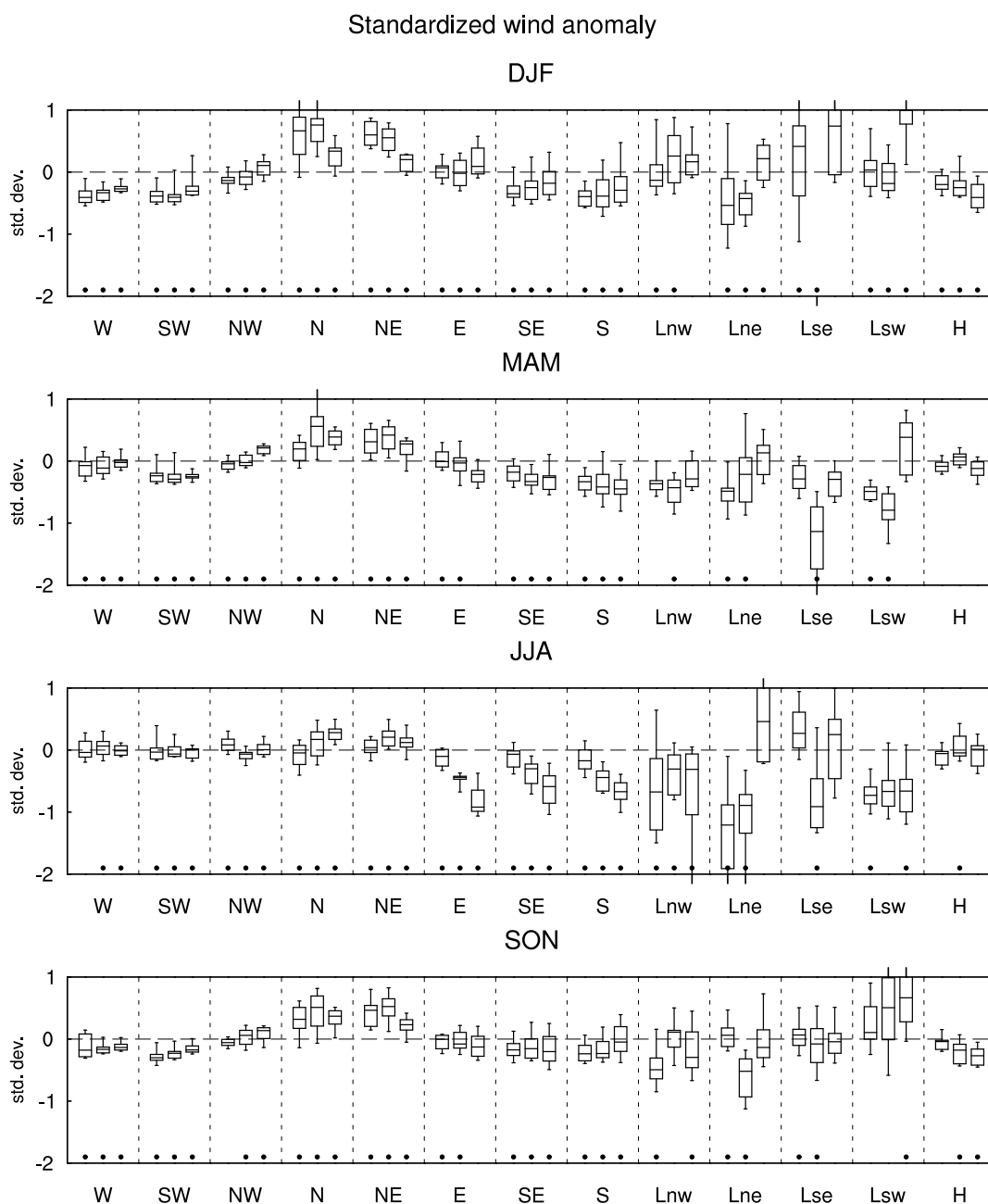


Figura 7.29: Box plot che mostrano le distribuzioni delle anomalie standardizzate stagionali dell'intensità del vento medio giornaliero per ogni tipo di tempo per ogni stagione. Per ogni tipo di tempo il boxplot di sinistra è relativo alla classificazione GWT al suolo, quello centrale a quella a 850 hPa, quello di destra a quella a 500 hPa. Se il box plot si spinge oltre l'intervallo di valori dell'asse y, esso viene rappresentato per mezzo di una linea verticale uscente verso l'alto o verso il basso alla posizione x corrispondente. I punti indicano le anomalie statisticamente significative.

Capitolo 8

Capacità predittiva della classificazione sinottica per il Trentino

In questo capitolo vengono illustrati i risultati dell'analisi della capacità predittiva del metodo di classificazione della circolazione sinottica GWT. Come spiegato nella sezione 2.2, la capacità predittiva dipende da quanto stretta sia la relazione tra il fenomeno sotto osservazione e i diversi tipi di circolazione. La capacità predittiva viene quantificata in questo capitolo per mezzo degli indici statistici introdotti nella sezione 5.6, che sono la varianza spiegata e il Brier skill score.

8.1 Capacità predittiva per la temperatura

La capacità predittiva del metodo di classificazione della circolazione sinottica GWT per la temperatura è illustrata dalle figure 8.1, relativa alla varianza spiegata (*EV*), e 8.2, relativa al Brier skill score (*BSS*). La varianza spiegata e il Brier skill score del metodo GWT sono stati calcolati per le distribuzioni di temperatura media giornaliera, temperatura minima, temperatura massima ed escursione termica giornaliera. Inoltre, gli indici sono stati ottenuti applicando il metodo di classificazione GWT ai 4 livelli verticali (suolo, 850, 700 e 500 hPa) e alle loro combinazioni; in quest'ultimo caso, i valori della temperatura che compongono le distribuzioni usate per il calcolo degli indici statistici sono quelli osservati in corrispondenza alle combinazioni dei tipi di tempo alle diverse quote. La significatività statistica delle differenze nelle distribuzioni della varianza spiegata e del Brier skill score per le diverse classificazioni sinottiche è stata assicurata dal superamento del test statistico di Kruskal-Wallis (Hollander and Wolfe, 1999, e.g.).

La figura 8.1 mostra che la capacità predittiva del metodo GWT per la temperatura è maggiore se si considerano i tipi di tempo su due livelli verticali rispetto ad uno solo. Per quanto riguarda la temperatura media giornaliera, la classificazione al suolo fornisce in inverno i valori più alti di *EV*; in estate, anche la classificazione a 850 hPa presenta valori elevati. In primavera e in autunno, invece, la classificazione al suolo risulta essere la peggiore, mentre i valori più elevati di *EV* sono ottenuti per le classificazioni a 850 e 700 hPa rispettivamente. La capacità predittiva del metodo GWT applicato ai singoli livelli per la temperatura media è comunque più elevata in inverno rispetto alle altre stagioni, anche se la variabilità tra le diverse stazioni è maggiore nella stagione fredda rispetto alle stagioni più calde. Le combinazioni di tipi di tempo a due livelli verticali forniscono però valori di *EV* maggiori in tutte le stagioni, anche se è difficile identificare una combinazione che si comporti meglio delle altre. In particolare, i valori più elevati si ottengono nella stagione estiva, diversamente rispetto a quanto osservato per le classificazioni su livelli singoli che presentano la maggior *EV* nella stagione invernale. I valori di *EV* per le temperature minime e massime ottenuti con il metodo GWT sono leggermente superiori a quelli relativi alla temperatura media giornaliera, tranne per le combinazioni di classificazioni in estate. Le varianze

spiegate per l'escursione termica sono a loro volta superiori a quelle delle temperature medie, minime e massime. Quindi la capacità predittiva del metodo di classificazione GWT per l'escursione termica è maggiore rispetto alla capacità predittiva per le temperature minime, massime e medie giornaliere. Nel caso dell'escursione termica, inoltre, è possibile individuare una classificazione che fornisce valori più alti delle altre in tutte le stagioni, cioè quella a 500 hPa. Per le temperature minime, massime e medie questo non è stato osservato.

L'analisi della capacità predittiva del metodo GWT è stata poi eseguita anche attraverso l'indice Brier skill score, per capire se le frequenze di superamento di certe soglie climatiche osservate in corrispondenza ai tipi di tempo si discostano da quelle climatologiche (vedi sezione 5.6). Valori alti di BSS denotano un'elevata capacità predittiva del metodo di classificazione, in quanto in quel caso le frequenze con cui il fenomeno in esame viene osservato si discostano da quelle attese (climatologiche). Nel caso della temperatura, per il calcolo del BSS si sono utilizzate le frequenze di giornate e notti fredde e calde, secondo la definizione introdotta nella sezione 5.1. La figura 8.2 mostra i box plot relativi alle distribuzioni dei valori di BSS ottenute con i dati di ogni stazione per ogni stagione per i giorni freddi e caldi, e per le notti fredde e calde. Quindi, quest'analisi è volta a quantificare la capacità del metodo di classificazione di individuare tipi di tempo in cui le notti e le giornate fredde e calde si verificano con frequenze diverse da quelle climatologiche stagionali (pari al 10% per come sono state definite). I valori numerici delle frequenze relativi ad ogni stazione e ogni stagione sono anche consultabili nelle tabelle statistiche che si trovano nel cd in allegato relative alle percentuali di giorni e notti freddi e caldi. La figura 8.2 mostra che la capacità predittiva delle combinazioni di classificazioni alle diverse quote è superiore alle classificazioni applicate ai singoli livelli, in accordo con quanto ottenuto per la varianza spiegata. Risulta però difficile individuare una classificazione o una combinazione di classificazioni che dia valori di BSS più elevati delle altre. I tipi di tempo a 500 e 700 hPa sembrano fornire valori più elevati di BSS rispetto a quelli a 850 hPa e al suolo nel caso delle giornate fredde in tutte le stagioni e per le notti fredde in primavera e autunno. I valori di BSS delle varie classificazioni per le notti calde sono invece molto simili. Nel caso delle giornate calde, invece, le classificazioni che danno i risultati migliori cambiano a seconda della stagione analizzata. In generale, la capacità predittiva del metodo di classificazione GWT è maggiore per i giorni freddi rispetto ai giorni caldi e alle notti fredde e calde, come appare dai valori di BSS più elevati per questo indicatore rispetto agli altri. Infine, non si notano importanti differenze stagionali nei valori di BSS, contrariamente a quanto è stato osservato in inverno per i valori di EV.

8.1.1 Capacità predittiva per la precipitazione

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi della capacità predittiva del metodo di classificazione della circolazione sinottica GWT per la precipitazione accumulata giornaliera. La figura 8.3 presenta in maniera compatta i valori di EV per la pioggia giornaliera per ogni stagione, secondo la consueta rappresentazione a box plot. Notiamo come in tutte le stagioni la classificazione a 500 hPa presenti valori di EV più alti rispetto alle altre classificazioni su singoli livelli. Solamente in inverno anche i tipi di tempo al suolo forniscono valori comparabili. I valori di EV delle combinazioni di classificazioni sono comunque più elevati, e tra questi si distingue leggermente la classificazione suolo-500 hPa nelle stagioni invernale e autunnale. Notiamo poi che in estate i valori di EV sono sensibilmente minori rispetto alle altre stagioni. Quindi la capacità predittiva del metodo di classificazione GWT è maggiore nelle stagioni fredde rispetto all'estate.

Per l'analisi del BSS sono state utilizzate 4 soglie sulle quali sono state calcolate le frequenze di superamento climatologiche e relative ad ogni tipo di tempo. La prima soglia, indicata come Q_0 nella figura 8.4, è di 0.2 mm/giorno; in pratica indica la presenza o meno di precipitazione. La seconda soglia, indicata con Q_{20} , è data dal 20 quantile (percentile) della distribuzione di pioggia giornaliera di ogni stazione per ogni stagione, calcolata solamente sulle giornate di pioggia (con soglia 0.2 mm/giorno).

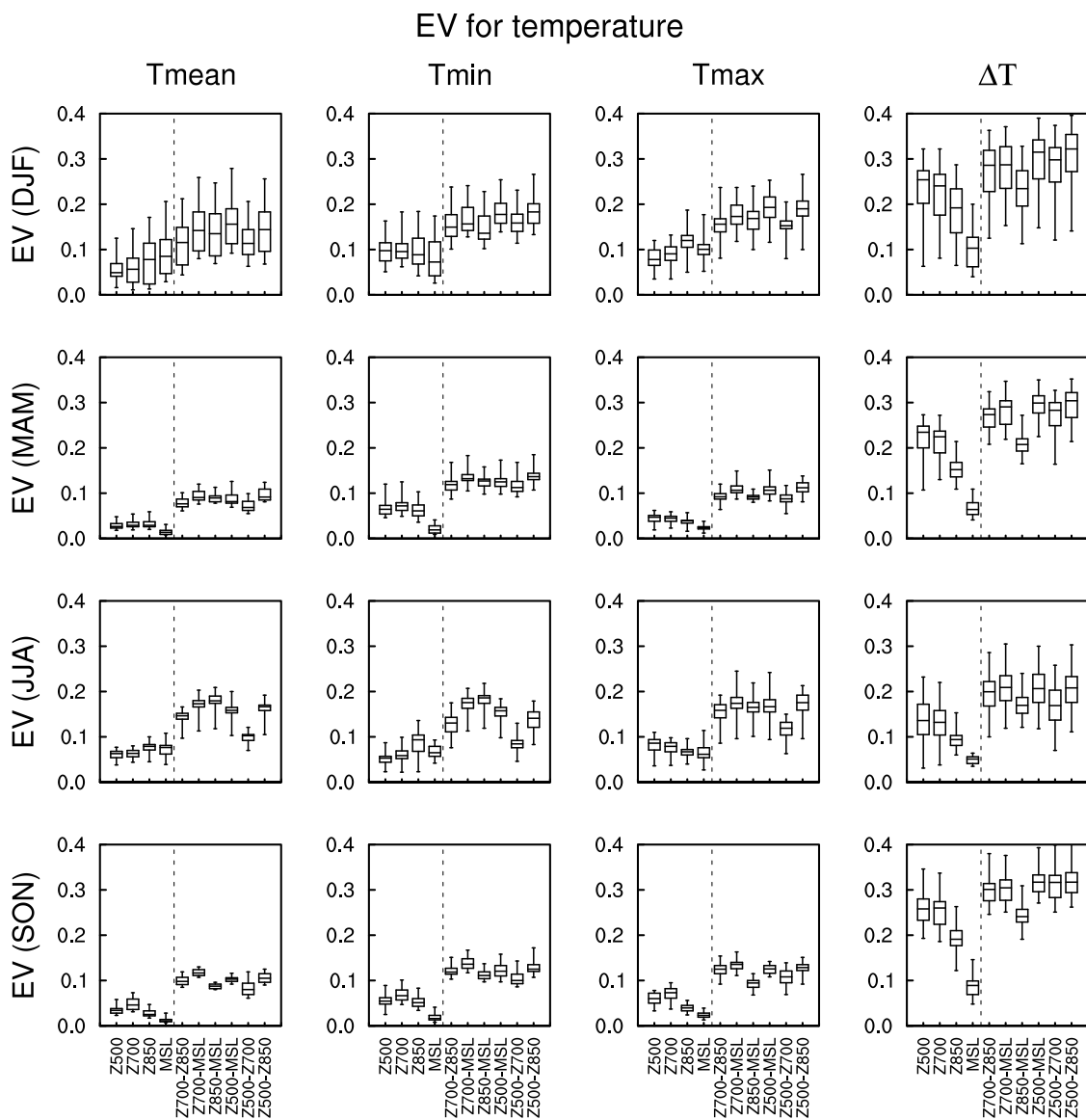


Figura 8.1: Box plot che mostrano le distribuzioni della varianza spiegata relative alla temperatura per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

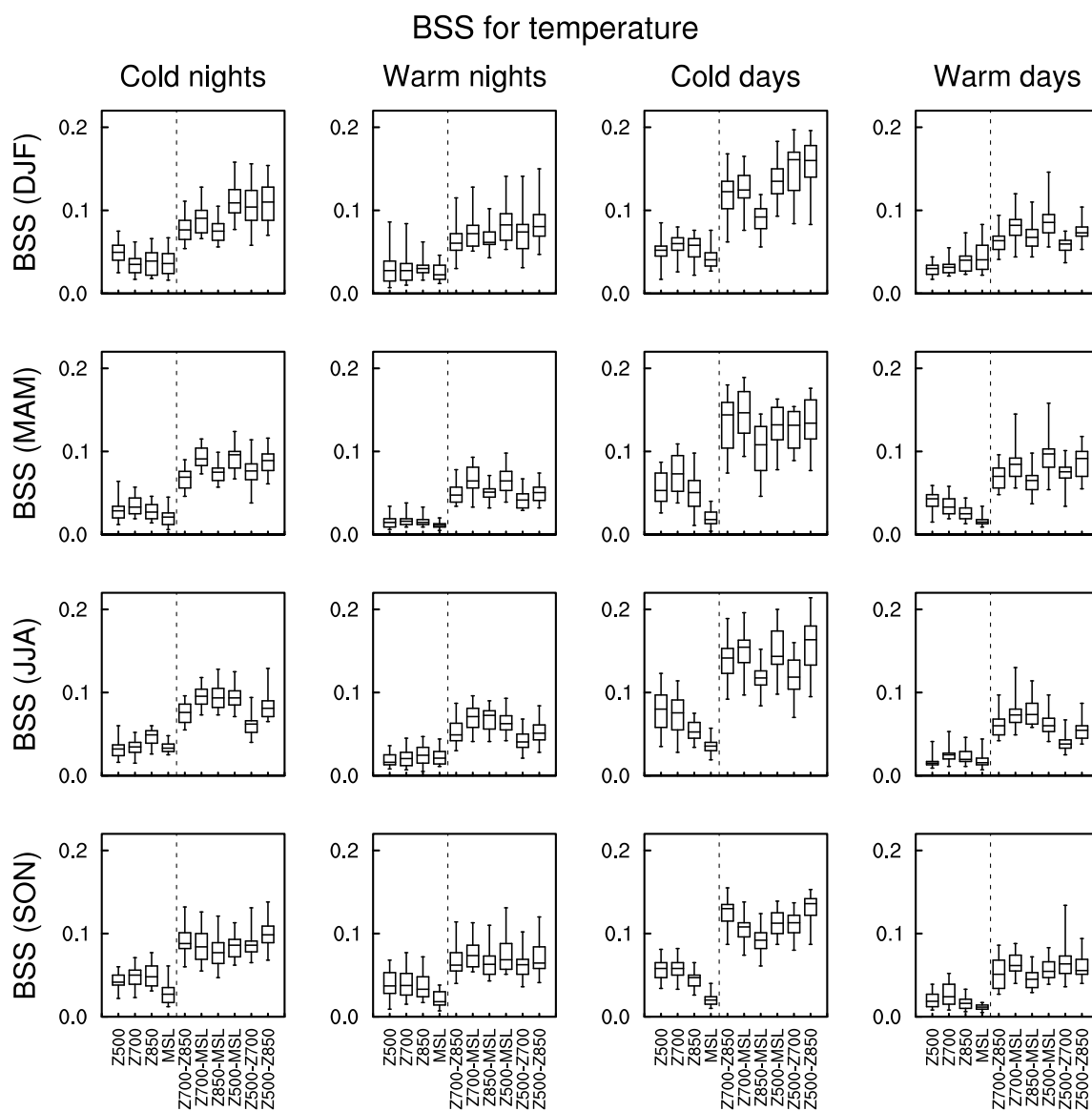


Figura 8.2: Box plot che mostrano le distribuzioni del Brier skill score relative alle giornate fredde e calde, e alle notti fredde e calde, per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

Quindi tale soglia rappresenta il verificarsi di pioggia debole. La terza soglia ($Q60$) è data dal 60 percentile della stessa distribuzione, e rappresenta la pioggia moderata. La quarta soglia ($Q90$) corrisponde al 90 percentile della stessa distribuzione, ed è associata a pioggia forte. Bisogna però considerare che si tratta sempre di soglie calcolate sulla pioggia accumulata in 24 ore, pertanto i valori di BSS sono da intendersi validi su scala giornaliera e non vanno interpretati per scale temporali più piccole in cui la pioggia può assumere caratteristiche diverse. La figura 8.4 mostra che i valori più elevati di BSS per le classificazioni singole sono quelli relativi al livello di 500 hPa per tutte le stagioni e per tutte le soglie, tranne per la soglia $Q90$ in inverno, quando la classificazione al suolo dà risultati migliori, e in primavera, quando anche la classificazione a 850 hPa presenta valori elevati. La buona performance della classificazione a 850 hPa in inverno è in accordo con l'analisi di EV. Considerando le combinazioni di classificazione, si nota che in generale per le soglie $Q0$, $Q20$ e $Q60$ i risultati migliori sono forniti da quelle che coinvolgono il livello di 500 hPa. Per la $Q90$, invece, questo segnale diminuisce e anche le classificazioni che coinvolgono la pressione al suolo presentano valori elevati. Come per i valori di EV, anche i valori di BSS sono minori in estate rispetto alle altre stagioni. Inoltre, essi tendono a diminuire in maniera significativa con l'aumentare della soglia di pioggia giornaliera, e tale diminuzione è meno marcata in estate rispetto alle altre stagioni. Riassumendo, la capacità predittiva del metodo di classificazione GWT per la pioggia giornaliera è maggiore per i tipi di tempo a 500 hPa rispetto ai tipi di tempo a livelli inferiori, ed è minore in estate rispetto alle altre stagioni; inoltre, la capacità predittiva di questo metodo è maggiore per soglie basse di precipitazione giornaliera.

8.1.2 Capacità predittiva per la radiazione solare

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi della capacità predittiva del metodo di classificazione della circolazione sinottica GWT per la radiazione solare cumulata giornaliera. Anche in questo caso l'analisi è stata condotta per mezzo delle metriche EV e BSS. La figura 8.5 mostra le distribuzioni di EV ottenute dai dati di radiazione solare cumulata giornaliera delle diverse stazioni per le diverse classificazioni e le diverse stagioni. Come nel caso della precipitazione, i risultati migliori tra le classificazioni singole sono forniti dal metodo GWT applicato ai campi di altezza geopotenziale a 500 hPa. Inoltre, in inverno si nota una variabilità tra le diverse stazioni che è maggiore rispetto a tutte le altre stagioni. Considerando le combinazioni di classificazioni sinottiche, invece, è difficile individuarne una che dia i risultati migliori, anche se sembra che quelle relative agli abbinamenti 500 hPa-suolo e 500-850 hPa presentino valori di EV leggermente superiori rispetto alle altre in autunno e in inverno. Anche in questo caso notiamo che la capacità predittiva del metodo GWT è minore in estate rispetto alle altre stagioni.

Il calcolo del BSS è stato eseguito utilizzando le frequenze climatologiche e per ogni tipo di tempo di giornate chiare e scure, definite secondo quanto riportato nella sezione 5.3. Quindi, anche in questo caso il BSS è stato utilizzato per analizzare la capacità predittiva del metodo di classificazione nei confronti degli estremi climatici. La figura 8.6 mostra che in generale la classificazione a 500 hPa ha una capacità predittiva maggiore rispetto alle altre, in accordo con quanto ottenuto dall'analisi dell'EV. Unica eccezione è la stagione estiva, in cui la classificazione a 700 hPa presenta simili valori di BSS per i giorni chiari, e la classificazione a 850 hPa fornisce i valori più alti di BSS per i giorni scuri. Notiamo anche che i valori di BSS per i giorni chiari sono minori rispetto a quelli per i giorni scuri, e che non vi sono importanti differenze stagionali tranne che in inverno, stagione in cui la capacità predittiva è leggermente superiore che nelle altre stagioni. Anche in questo caso la combinazione di classificazioni presenta una capacità predittiva maggiore rispetto alle classificazioni basate su un livello solamente, ma nessuna combinazione risulta essere migliore rispetto alle altre.

EV for rainfall

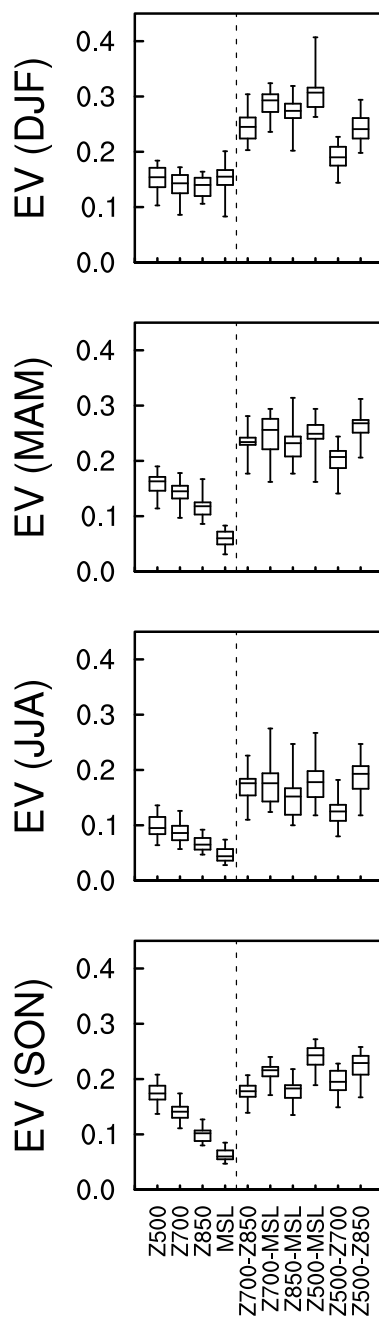


Figura 8.3: Box plot che mostrano le distribuzioni della varianza spiegata relativa alla precipitazione accumulata giornaliera per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

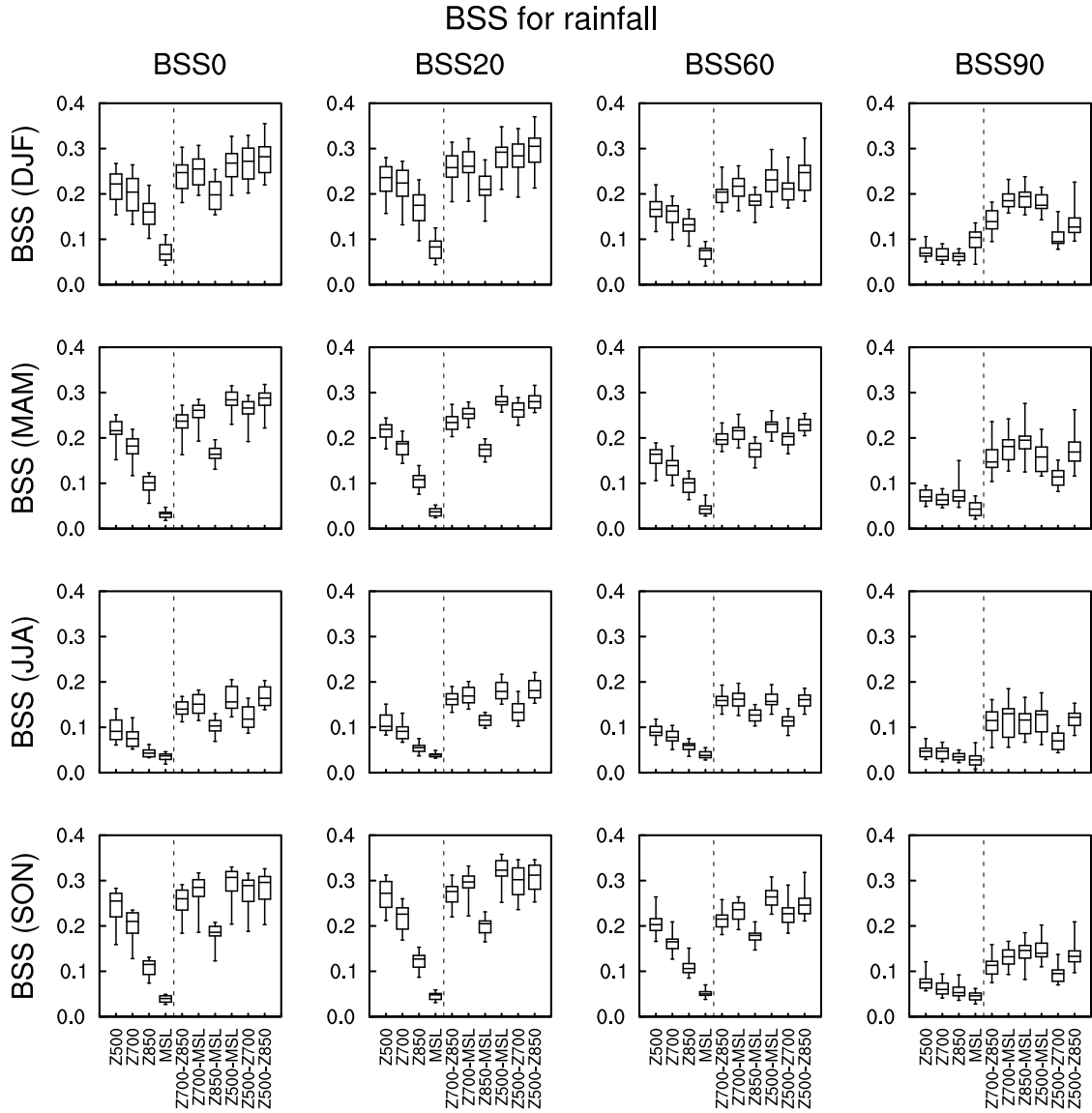


Figura 8.4: Box plot che mostrano le distribuzioni del Brier skill score relative alla precipitazione accumulata giornaliera per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni. Il BSS è stato calcolato utilizzando come soglia 0.2 mm/giorno (Q0), e il 20, 60 e 90 percentili della distribuzione di pioggia accumulata giornaliera climatologica stagionale condizionata sui giorni di pioggia (Q20, Q60 e Q90 rispettivamente).

EV for solar radiation

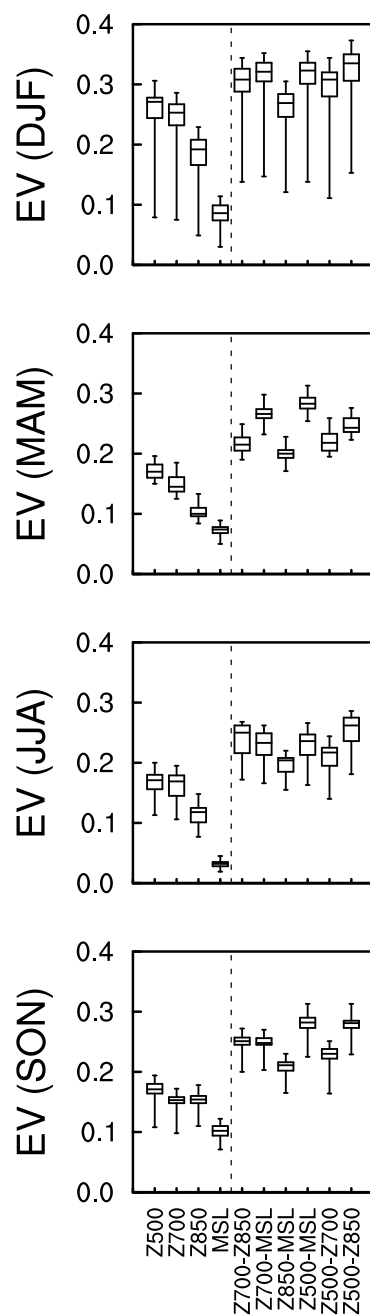


Figura 8.5: Box plot che mostrano le distribuzioni della varianza spiegata relative alla radiazione solare cumulata giornaliera per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

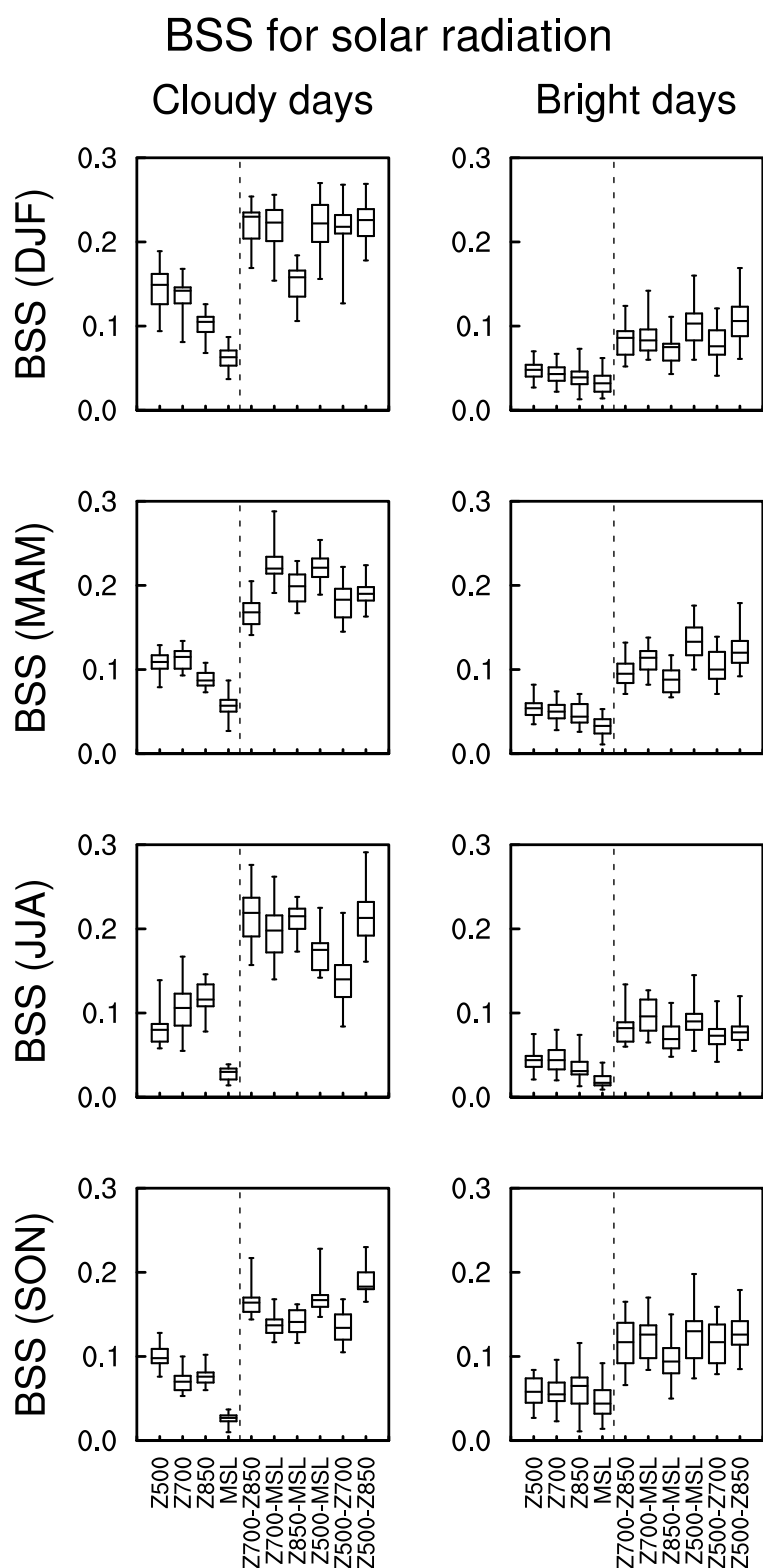


Figura 8.6: Box plot che mostrano le distribuzioni del Brier skill score relative alle giornate chiare e scure per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

8.1.3 Capacità predittiva per il vento

L'analisi della capacità predittiva del metodo di classificazione della circolazione sinottica GWT è stata condotta anche per l'intensità del vento medio giornaliero. La figura 8.7 presenta i box plot relativi alle distribuzioni di EV per le varie classificazioni sinottiche e loro combinazioni. Notiamo come in inverno e in autunno i valori di EV della classificazione al suolo siano superiori a quelli relativi alle altre classificazioni singole, mentre in estate e in primavera la classificazione al livello di 700 hPa sia quella che dà i risultati migliori. In estate, inoltre, i valori di EV sono sensibilmente inferiori rispetto a quelli delle altre stagioni. Questo vuol dire che il vento in estate dipende molto meno dalle condizioni sinottiche rispetto alle altre stagioni, comportamento spiegabile con la maggior influenza delle circolazioni locali nella stagione estiva. Per quanto riguarda le combinazioni dei tipi di tempo alle varie quote, anche in questo caso è difficile individuare una combinazione migliore delle altre, anche se i loro valori sono ancora una volta superiori a quelli delle classificazioni su singoli livelli.

Per il calcolo del BSS si sono utilizzate le frequenze dei giorni poco e molto ventosi definiti nella sezione 5.4; anche in questo caso, quindi, il BSS è stato utilizzato per analizzare la capacità predittiva del metodo GWT nei confronti dei fenomeni più intensi. I risultati di quest'analisi sono riportati nella figura 8.8, che mostra come vi sia un'elevata variabilità tra le varie stazioni trentine probabilmente dovuta al loro posizionamento a quote diverse. Le classificazioni singole forniscono tutte valori di BSS simili tra loro per i giorni poco ventosi, mentre per i giorni molto ventosi la classificazione a 500 hPa risulta essere la migliore in inverno e quella a 850 hPa la migliore nelle altre stagioni (anche se in autunno i valori sono molto simili alla 500 hPa). La stagione estiva presenta ancora una volta valori minori di BSS rispetto alle altre stagioni. La capacità predittiva del metodo GWT è maggiore per le giornate molto ventose rispetto a quelle poco ventose, tranne che in estate. Come di consueto, le combinazioni di classificazioni presentano valori di BSS più elevati rispetto alle classificazioni basate su un singolo livello, ma sono tutti abbastanza simili. I valori di BSS delle combinazioni sono particolarmente elevati in inverno e in autunno per le giornate molto ventose.

EV for wind

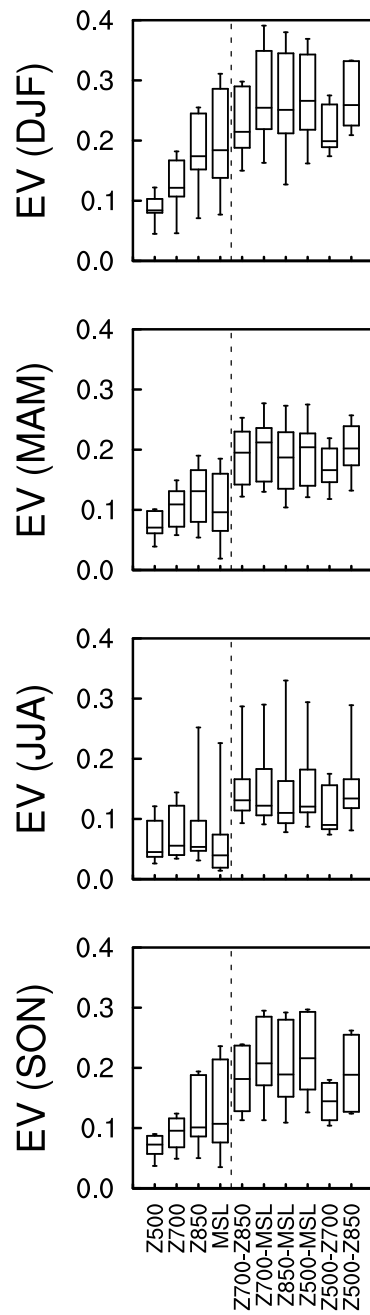


Figura 8.7: Box plot che mostrano le distribuzioni della varianza spiegata relative all'intensità del vento medio giornaliero per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

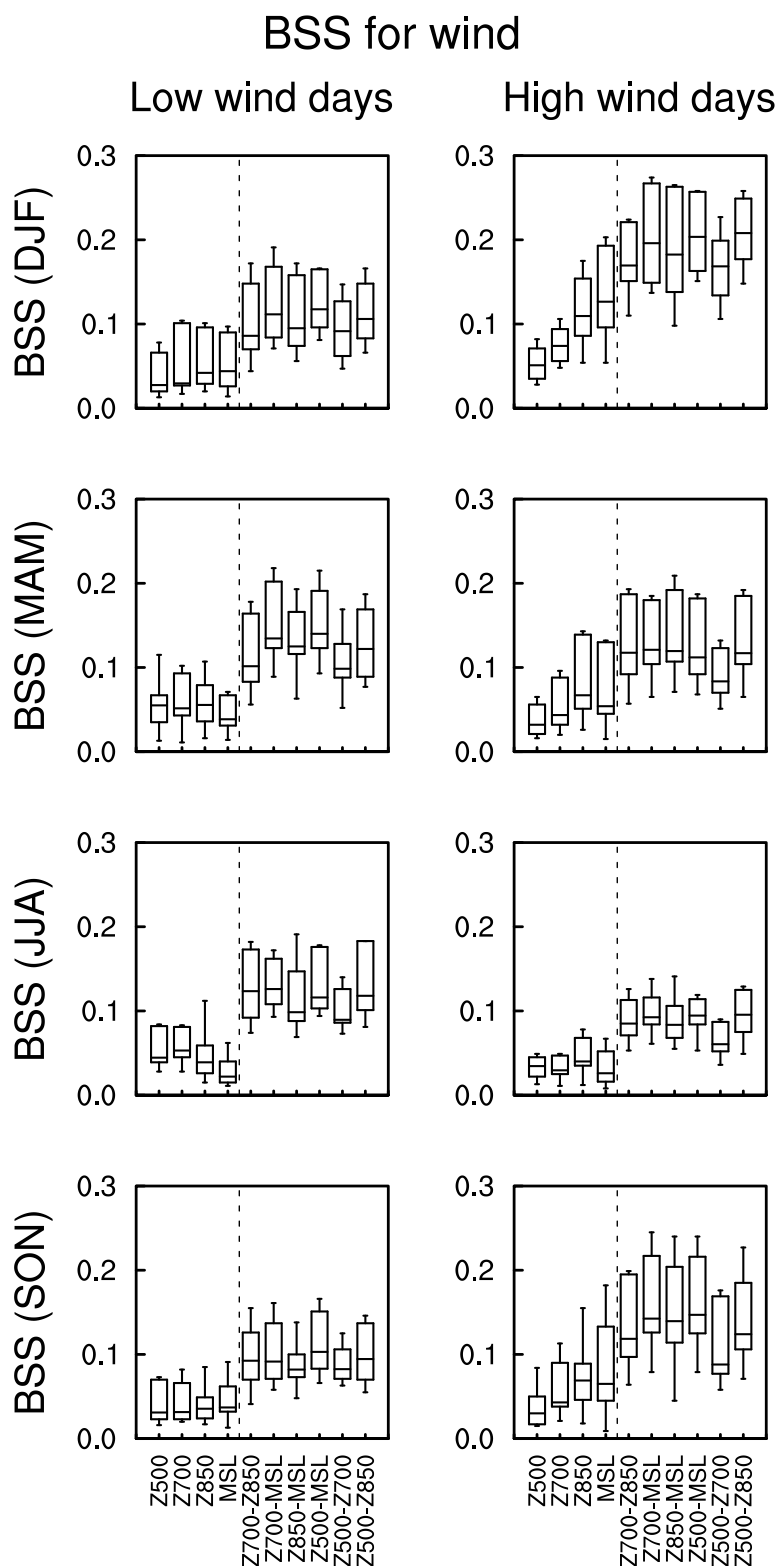


Figura 8.8: Box plot che mostrano le distribuzioni del Brier skill score relative alle giornate poco e molto ventose per le stazioni di rilevamento trentine per il metodo di classificazione sinottica GWT applicato a singoli livelli verticali e alle loro combinazioni.

Capitolo 9

Conclusioni

In questo studio è stata analizzata la relazione tra la circolazione sinottica presente sull'Europa centrale e le caratteristiche del tempo meteorologico sul Trentino. Il metodo GWT utilizzato per caratterizzare la circolazione sinottica, sviluppato da Beck (2000), è tra i più semplici presenti in letteratura, ed è stato scelto in quanto è di facile comprensione, è caratterizzato da un numero limitato di tipi di tempo, ha un significato fisico legato alla provenienza delle masse d'aria che raggiungono il Trentino, è oggettivo e non dispendioso in termini di potenza di calcolo. Il metodo, denominato GWT, è stato parzialmente modificato per tenere conto della posizione della bassa pressione rispetto al Trentino. Ogni giorno del periodo 1992-2013 è stato quindi associato ad un particolare tipo di tempo, e tutte le giornate appartenenti ad ogni tipo di tempo sono state analizzate per mezzo di quantità statistiche. Per descrivere il tempo del Trentino sono stati utilizzati dati di temperatura, precipitazione, radiazione solare e vento, misurati da due reti di rilevamento presenti sul territorio provinciale: quella della Fondazione Edmund Mach e quella dell'Ufficio Previsioni e Organizzazione della provincia. Per l'analisi della radiazione solare il periodo è stato limitato al 2004-2012, mentre per l'analisi del vento al 1999-2013.

Le grandezze statistiche presentate in questa relazione hanno mostrato come vi sia una relazione significativa tra la circolazione sinottica presente sulla regione alpina e le condizioni meteorologiche sul Trentino. Al fine di evidenziare tale relazione, la figura 9.1 rappresenta sotto forma di tabelle le anomalie standardizzate stagionali di temperatura media giornaliera, precipitazione accumulata giornaliera, radiazione solare cumulata giornaliera e velocità del vento medio giornaliero associate ad ogni tipo di tempo al suolo, a 850 hPa e a 500 hPa. I colori rappresentano l'intensità delle anomalie, mentre i punti indicano le anomalie che sono risultate statisticamente significative. Per alcuni tipi di tempo le anomalie danno un segnale chiaro e forte indipendentemente dalla stagione, mentre per altri esse possono variare anche di molto a dipendenza del livello verticale del tipo di tempo e della stagione.

La circolazione sinottica da Ovest non si discosta molto dalla climatologia. Essa provoca anomalie termiche negative e anomalie di pioggia positive nella stagione estiva, mentre in inverno e autunno essa tende a causare un tempo più caldo e meno piovoso del normale. La radiazione solare associata al tempo da Ovest è minore o in linea con quella climatologica, e anche la velocità del vento tende ad essere minore del normale. Anomalie generalmente negative di radiazione solare e intensità del vento sono associate anche al tipo di tempo da Sud-Ovest, il quale, però, è responsabile di anomalie di pioggia positive in tutte le stagioni. Questo studio ha anche mostrato che tale tipo di tempo è quello che contribuisce maggiormente alla precipitazione totale misurata sul Trentino, fino a oltre il 60% nella stagione invernale quando si verifica in quota. Inoltre, esso ha causato i massimi accumuli giornalieri di pioggia in inverno, estate e autunno per la maggior parte delle stazioni quando si è verificato in quota, e il maggior numero di giornate con precipitazione intensa. Con questo tipo di tempo piove in media un giorno su due. Le temperature tendono ad essere più calde del normale o in linea con la climatologia con il Sud-Ovest, e solo la primavera mostra un'anomalia negativa quando il tale circolazione si verifica a 500 hPa. Anche

le anomalie associate al tipo di tempo da Nord-Ovest sono abbastanza chiare e significative. In inverno e in primavera le temperature tendono ad essere leggermente più calde del normale, la precipitazione è sempre inferiore a quella climatologica, la radiazione solare presenta anomalie positive, e il vento tende ad essere coerente con i valori climatologici. La circolazione da Nord è associata ad anomalie termiche positive quando si verifica al suolo in inverno e in quota in estate, altrimenti le anomalie sono leggermente negative o nulle. Quando tale tipo di tempo si verifica in estate al suolo, la precipitazione tende ad essere maggiore del normale, la radiazione solare minore del valore climatico e il vento non si discosta dalla media stagionale. In tutti gli altri casi l'anomalia di pioggia è negativa, e le anomalie di radiazione solare e di vento sono positive. Anche il Nord-Est presenta anomalie significative, negative per quanto riguarda precipitazione e temperatura, positive in termini di radiazione solare e intensità del vento. Tuttavia, quando il Nord-Est si verifica al suolo in estate, si ha il maggior numero di giorni con precipitazione intensa. Con la circolazione da Est le temperature sono più fredde del normale, tranne quando tale tipo di tempo si manifesta in estate al suolo, e le precipitazioni meno intense del normale. In inverno la radiazione solare è leggermente maggiore dei valori medi stagionali, mentre in autunno leggermente inferiore o in linea con essi. Il vento non presenta particolari anomalie con tale tipo di tempo. Radiazione solare e vento presentano invece anomalie negative con il Sud-Est, mentre l'anomalia di pioggia è per lo più positiva quando il Sud-Est si verifica in quota, vicina a zero quando si verifica al suolo. Le temperature non presentano un segnale chiaro, con anomalie negative associate a tale tipo di tempo in primavera e in estate quando si verifica in quota, e in inverno quando è presente nei bassi strati, e anomalie positive quando il Sud-Est si verifica in estate al suolo. Il tipo di tempo da Sud provoca precipitazioni più abbondanti del normale, associate ai massimi precipitativi giornalieri in primavera. In inverno, la frequenza di giorni piovosi con tale tipo di tempo è più alta che negli altri casi. L'anomalia termica è positiva in autunno e in estate su tutti i livelli, tranne in estate a 500 hPa quando risulta essere negativa. In inverno è positiva se il Sud si verifica in quota, altrimenti negativa o non statisticamente significativa. Le anomalie associate alle basse pressioni sono generalmente positive per quanto riguarda la pioggia giornaliera, negative per quanto riguarda le temperature medie giornaliere e la radiazione solare cumulata giornaliera, mentre per il vento si ha una maggiore variabilità. Le condizioni di alta pressione, infine, sono associate ad anomalie termiche positive (tranne in inverno al suolo) e ad anomalie di pioggia negative. La radiazione solare tende ad essere maggiore della climatologia, e l'intensità del vento inferiore ai valori medi stagionali.

In questo studio è stata analizzata anche la capacità predittiva del metodo di classificazione sinottica GWT sul Trentino, ossia la capacità del metodo di classificare la circolazione sinottica in tipi di tempo in cui i valori delle grandezze meteorologiche si discostano da quelli climatologici stagionali. Generalmente questo accade per tutte le grandezze analizzate e per tutti i livelli verticali a cui è stato applicato il metodo GWT. Inoltre, la capacità predittiva della combinazione del metodo GWT su due livelli verticali diversi è risultata maggiore rispetto a quella della classificazione eseguita considerando un solo livello. La capacità predittiva del metodo GWT nei confronti della temperatura media giornaliera risulta maggiore in inverno rispetto alle altre stagioni. Tuttavia, non vi è un livello verticale che mostra una capacità predittiva maggiore rispetto agli altri in tutte le stagioni. Infatti, se in inverno il metodo GWT al suolo mostra la maggior capacità predittiva, in autunno questo accade per il livello 700 hPa, mentre nelle altre stagioni i valori sono molto vicini tra loro. L'analisi del Brier Skill Score ha permesso inoltre di analizzare la capacità predittiva del metodo GWT nei confronti di eventi estremi. Per la temperatura, sono state analizzate le frequenze associate al verificarsi di notti calde e fredde, e giorni caldi e freddi. Laddove le frequenze associate ad ogni tipo di tempo si discostano da quelle climatologiche stagionali, la capacità predittiva risulta maggiore di quella climatologica. Questo accade sia per le notti fredde e calde che per le giornate fredde e calde, anche se è difficile individuare una classificazione che mostri una capacità predittiva maggiore rispetto alle altre in tutte le stagioni. Si è poi notato che la capacità predittiva del metodo di classificazione GWT è maggiore per i giorni freddi rispetto ai giorni caldi e alle

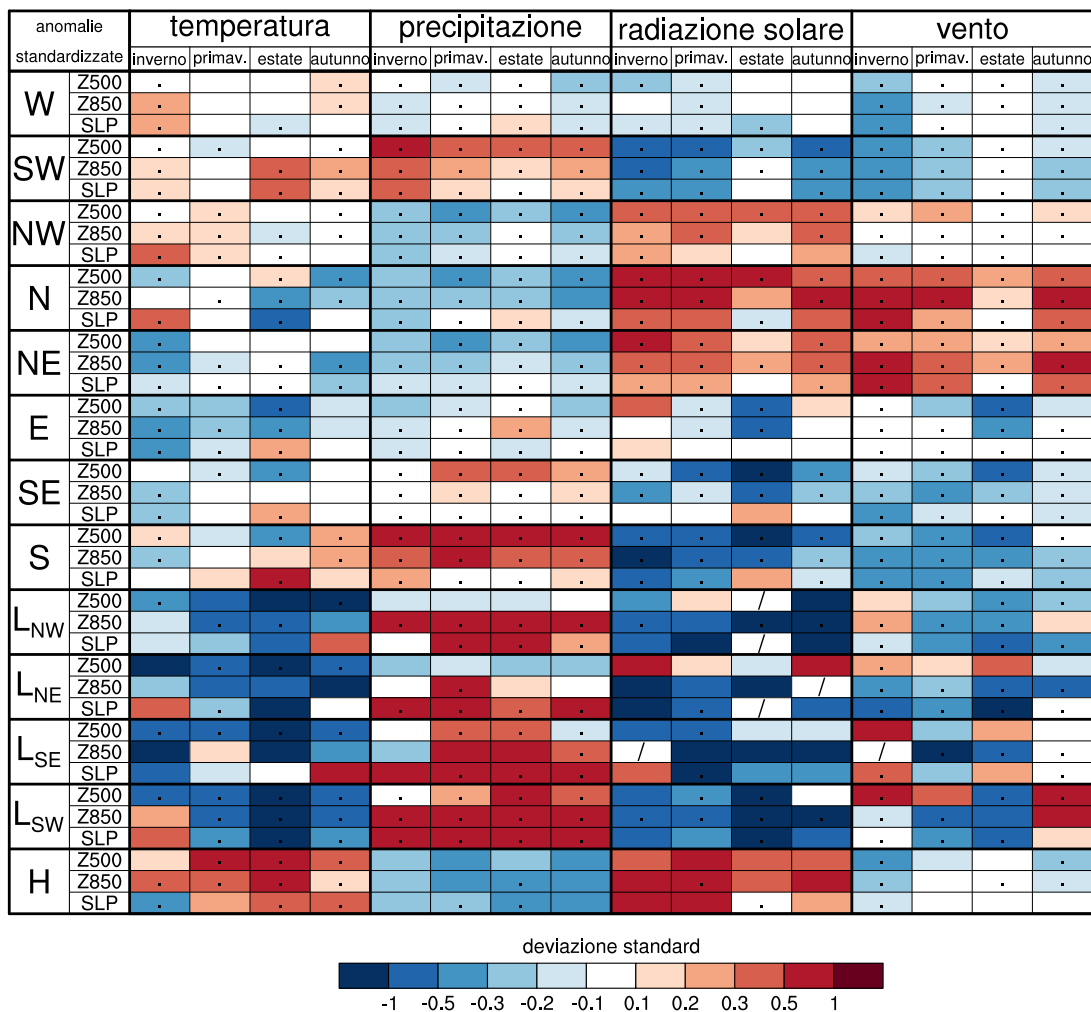


Figura 9.1: Tabella riassuntiva che mostra le anomalie di temperatura media giornaliera, precipitazione e radiazione solare cumulata giornaliera, e velocità del vento medio giornaliero per ogni tipo di tempo su tre livelli verticali (suolo, 850 e 500 hPa) e per ogni stagione. I punti indicano le anomalie statisticamente significative. I valori di anomalia sono quelli della mediana della distribuzione delle anomalie di tutte le stazioni.

notti fredde e calde.

Nel caso della precipitazione giornaliera, la capacità predittiva del metodo GWT applicato a 500 hPa è chiaramente maggiore rispetto a quella degli altri livelli verticali. Inoltre, questo lavoro ha mostrato come in estate essa sia minore rispetto alle altre stagioni. Questo comportamento è stato notato anche nell'analisi del Brier Skill Score per gli eventi estremi, nel caso di precipitazioni giornaliere maggiori del 90 percentile della distribuzione climatologica. Si è anche mostrato come aumentando la soglia di precipitazione giornaliera la capacità predittiva tenda a diminuire.

Anche nel caso della radiazione solare cumulata giornaliera la capacità predittiva del metodo GWT a 500 hPa è maggiore rispetto a quella dello stesso metodo applicato su livelli più bassi; in inverno, in particolare, essa risulta maggior rispetto alle altre stagioni. Inoltre, nel caso dei giorni nuvolosi con poca radiazione la capacità predittiva è maggiore rispetto a quella dei giorni chiari caratterizzati da molta radiazione.

La capacità predittiva del metodo GWT per l'intensità del vento medio giornaliero è maggiore per i tipi di tempo al suolo e 850 hPa rispetto a quelli in quota, tranne che in estate quando non vi sono particolari differenze tra i vari livelli verticali. Anche per i giorni molto ventilati essa è maggiore per i tipi di tempo al suolo e a 850 hPa rispetto agli altri livelli, tranne che in estate. Nel caso dei giorni poco ventilati, invece, non è possibile identificare un livello che presenti una capacità predittiva superiore agli altri.

Le distribuzioni delle grandezze atmosferiche corrispondenti ad ogni tipo di circolazione sinottica ottenute per questo progetto hanno un elevato potenziale previsionale. Infatti, esse possono essere utilizzate per sviluppare dei sistemi di previsioni probabilistiche a lunga scadenza basate sul metodo degli analoghi. I risultati presentati in questa relazione hanno mostrato che un tale approccio potrebbe fornire previsioni concretamente utilizzabili, dato che la relazione tra le configurazioni sinottiche e il clima del Trentino è piuttosto stretta. L'effettivo valore di tali previsioni andrebbe comunque studiato più nel dettaglio, simulando delle previsioni per i casi passati, per cui si hanno le osservazioni, con il metodo degli analoghi e confrontando tali previsioni con quelle di un modello numerico e con i valori osservati.

Appendice: divulgazione dei risultati

I risultati della ricerca condotta per questo progetto sono stati divulgati alle seguenti conferenze internazionali:

1. *European Geophysical Union general Assembly 2014, 28 Aprile - 2 Maggio, Vienna (Austria)*, presentazione di un poster
2. *American Meteorological Society Conference on Mountain Meteorology 2014, 18-22 Agosto, San Diego (California)*, presentazione orale.

Inoltre, due articoli scientifici sono in preparazione:

- Panziera, L., L. Giovannini, L. Laiti and D. Zardi, 2014: The relation between synoptic circulation types and regional weather: an Alpine example. *International Journal of Climatology*.
- Panziera, L., L. Giovannini, L. Laiti and D. Zardi, 2014: The predictive capability of synoptic circulation types: an Alpine example. *International Journal of Climatology*.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ufficio Previsioni e Organizzazione Meteotrentino, la Fondazione Edmund Mach e l'Università di Trento per aver fornito i dati per questo progetto. Inoltre, si ringrazia l'ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) per aver fornito le rianalisi necessarie alla classificazione sinottica.

Bibliografia

- Baur, F., 1949: *Einführung in die Grosswetterkunde*. Wiesbaden, Germany.
- Beck, C., 2000: *Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780*, vol. 95. Würzburger Geographische Arbeiten.
- Beck, C. and A. Philipp, 2010: Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 374–387.
- Beck, C., J. Jacobeit and P. D. Jones, 2007: Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in central europe since 1780. *International Journal of Climatology*, **27**, 473–491.
- Beck, C., A. Philipp and F. Streicher, 2013: The effect of domain size on the relationship between circulation type classifications and surface climate. *International Journal of Climatology*, pp. published online, doi: 10.1002/joc.3688.
- Bissolli, P. and E. Dittmann, 2004: *Objective Wetterlagenklassen*. Klimastatusbericht 2003. DWD (Hrsg.). Offenbach, Germany.
- Brinkmann, W. A. R., 1999: Within-type variability of 700 hPa winter circulation patterns over the Lake Superior Basin. *International Journal of Climatology*, **19**, 41–58.
- Casado, M. J., M. A. Pastor and F. J. Doblas-Reyes, 2010: Links between circulation types and precipitation over Spain. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 437–447.
- Chávez-Arroyo, R. and O. Probst, 2013: Quality assurance of near-surface wind velocity measurements in Mexico. *Meteorological Applications*, pp. published online, doi: 10.1002/met.1432.
- Dee, D. P., and co authors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597.
- Demuzere, M., P. Kassomenos and A. Philipp, 2011: The COST733 circulation type classification software: an example for surface ozone concentrations in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, **105**, 143–166.
- Dittmann, E., S. Barth, J. Lang and G. Müller-Westermeier, 1977: *Objective Wetterlagenklassifikation*, vol. 197. Ber. Dt. Wetterd., Offenbach a. M., Germany.
- Fleig, A., L. M. Tallaksen, H. Hisdal, K. Stahl and D. M. Hannah, 2010: Inter-comparison of weather and circulation type classifications for hydrological drought development. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 507–515.
- Frei, C. and C. Schär, 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, **18**, 873–900.

- Gerstengarbe, F. and P. Werner, 1999: *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-1998), nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky*. Potsdam, Germany.
- Gerstengarbe, F. W. and P. C. Werner, 1993: *Katalog der Grosswetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowski 1881–1992.*, vol. 113. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. M.
- Hess, P. and H. Brezowsky, 1952: Katalog der Groswwetterlagen Europas. Ber. Dt. Wetterd. in der US-Zone 33. *Bad Kissingen, Germany*.
- Hofierka, J. and M. Sùri, 2002: The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference – Trento, Italy, 11-13 September 2002*.
- Hollander, M. and D. A. Wolfe, 1999: *Nonparametric Statistical Methods*. Wiley, New York, 787 pp.
- Huth, R., 2010: Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST 733 collection: first results. . *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 388–394.
- James, P., 2007a: An objective classification for hess and brezowsky grosswetterlagen over europe. *Theoretical and Applied Climatology*, **88**, 17–42.
- James, P. M., 2007b: Second generation lamb weather types – a new generic classification with evenly tempered type frequencies. In *Sixth Annual Meeting of the EMS/Sixth ECAC, EMS2006A00441*, vol. 35, pp. 75–77. Ljubljana, Slovenia.
- Jenkinson, A. F. and B. P. Collison, 1977: *An initial climatology of Gales over the North Sea*, vol. 62. Synop. Climatol. branch, Memo, Meteorological Office, London, UK.
- Jiménez, P. A., J. F. González-Rouco, J. Navarro and J. P. Montávez, 2010: Quality Assurance of Surface Wind Observations from Automated Weather Stations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **27**, 1101–1122.
- Journèe, M. and C. Bertrand, 2011: Quality control of solar radiation data within the RMIB sola measurements network. *Solar Energy*, **85**, 72–86.
- Laiti, L., L. Giovannini and D. Zardi, 2014: *Atlante solare del Trentino*. Relazione PAT.
- Lamb, H., 1950: Types and spells of weather around the year in the British Isles: annual trends, seasonal structure of years, singularities. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **76**, 393–438.
- Lauscher, F., 1985: *Klimatologische Synoptik Österreichs mittels der ostalpinen Wetterlagenklassifikation*, vol. 64. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Nr. 302.
- Litynski, J., 1969: *A numerical classification of circulation patterns and weather types in Poland*, vol. 97. Prace Panstwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego.
- Longman, R. J., T. W. Giambelluca and M. A. Nullet, 2013: Use of a clear-day solar radiation model to homogenize solar radiation measurements in Hawaii. *Solar Energy*, **91**, 102–110.
- Panziera, L. and U. Germann, 2010: The relation between airflow and orographic precipitation on the southern side of the Alps as revealed by weather radar. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 222–238.
- Perret, R., 1987: *Une classification des situations météorologiques à l'usage de la prévision*, vol. 46. Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt.

- Philipp, A., J. Bartholy, C. Beck, M. Erpicum, P. Esteban, X. Fettweis, R. Huth, P. James, S. Jourdain, F. Kreienkamp, T. Krennert, S. Lykoudis, S. C. Michalides, K. Pianko-Kluczynska, P. Post, D. R. Álvarez, R. Schiemann, A. Spekat and F. S. Tymvios, 2010: Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 360–373.
- Pianko-Kluczynska, K., 2007: *New Calendar of Atmosphere Circulation Types According to J. Litynski*, vol. 95. *Wiadomosci Meteorologii Hydrologii Gospodarki Wodnej*.
- Péczely, G., 1957: *Grosswetterlagen in Ungarn. Kleinere Veröffentlichungen der Zentralanstalt für Meteorologie, N° 30*. Budapest, Hungary.
- Remund, J. and J. Page, 2002: *Advanced parameters. Chain of algorithms. Part I: shortwave radiation..* Report to the European Commission, SoDa project IST-1999-12245.
- Rigollier, C., O. Bauer and L. Wald, 2000: On the clear sky model of the fourth European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, **68**, 33–48.
- Scharmer, K. and J. Greif, 2000: *The European solar radiation atlas. Vol. 1: Fundamentals and maps..* Les Presses de l'École des Mines, Paris, 88 pp.
- Schiemann, R. and C. Frei, 2010: How to quantify the resolution of surface climate by circulation types: an example for Alpine precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 403–410.
- Schüepp, M., 1957: Klassifikationsschema, Beispiele und Probleme der Alpenwetterstatistik . *La Meteorologie*, **4**, 291–299.
- Schüepp, M., 1968: *Kalender der Wetter- und Witterungslagen von 1955 bis 1967*, vol. 11. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Switzerland.
- Schüepp, M., 1979: *Witterungsklimatologie – Klimatologie der Schweiz III*. Beihefte zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt 1978.
- Stöckli, R., 2013: *The HelioMont Surface Solar Radiation Processing.*, vol. 93. Scientific Report MeteoSwiss, 122 pp.
- Tveito, O. E., 2010: An assessment of circulation type classifications for precipitation distribution in Norway. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 395–402.
- Uppala, S. M., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961–3012.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press. 467pp.
- Yarnal, B., 1993: *Synoptic Climatology In Environmental Analysis*. Belhaven Press, London, UK.