



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

---

Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Ambientale e Meccanica

# Atlante Eolico del Trentino

Relazione finale sull'attività svolta

Ing. Lorenzo Giovannini

Ing. Gianluca Antonacci

Prof. Dino Zardi



## Sommario

Premessa.....	1
1. Introduzione .....	2
2. Analisi della letteratura .....	5
3. Implementazione del sistema di calcolo .....	8
3.1 Generalità.....	8
3.2 Modelli di calcolo adottati .....	9
3.3 Descrizione geografica .....	10
3.3.1 <i>Dominio di calcolo</i> .....	10
3.3.2 <i>Proiezione geografica</i> .....	14
3.3.3 <i>Range temporale</i> .....	15
3.3.4 <i>Configurazione di calcolo</i> .....	15
3.4 Assimilazione dati .....	17
3.4.1 <i>Sistema di assimilazione</i> .....	17
3.4.2 <i>Dati anemometrici nella Provincia di Trento</i> .....	18
3.5 Esecuzione del modello di calcolo .....	21
3.6 File di output.....	21
4. Risultati .....	22
4.1 Presentazione degli output.....	22
4.1.1 <i>Distribuzione di Weibull</i> .....	22
4.2 <i>Mappatura</i> .....	43
5. Validazione.....	107
5.2 Velocità media e parametri di Weibull.....	109
5.3 Distribuzioni di probabilità.....	115
6. Conclusioni .....	122
7. Bibliografia .....	124
Allegato - Schede stazioni.....	127







## Premessa

La presente relazione contiene la descrizione delle attività svolte nell'ambito del progetto "Atlante Eolico del Trentino" commissionato dalla Provincia Autonoma di Trento, Dipartimento Protezione Civile all'Università degli studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (Protocollo n. P001/561308/29-2013-20/FD/AR/ET/lv).

Scopo del presente progetto era l'elaborazione di un atlante eolico per il territorio della Provincia Autonoma di Trento, basato sui risultati di simulazioni numeriche ad alta risoluzione su un periodo climatologicamente significativo. I risultati di questo progetto hanno portato alla determinazione di valori climatologici rappresentativi di velocità del vento a diverse altezze dal suolo sul territorio provinciale con una risoluzione spaziale di 500 m.

Le attività sono state svolte dal Gruppo di Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento in collaborazione con la società CISMA S.r.l. ([www.cisma.it](http://www.cisma.it)), che è stata coinvolta nello svolgimento del presente progetto in virtù della consolidata esperienza in studi per la valutazione del potenziale eolico mediante strumenti modellistici. La presente relazione integra quindi contributi sia del Gruppo di Fisica dell'Atmosfera, sia del personale della società CISMA S.r.l.

## 1. Introduzione

Come previsto dalla Convenzione, le attività svolte nell'ambito del presente progetto sono state le seguenti.

*1. Acquisizione dei dati di direzione e intensità del vento registrati presso le stazioni meteorologiche al suolo sul territorio provinciale e, se disponibili, dal profilatore di vento di Mattarello.*

Inizialmente si sono acquisiti i dati di velocità e direzione del vento provenienti dalle stazioni meteorologiche al suolo dislocate sul territorio provinciale aventi un dataset sufficientemente lungo (10 anni) da fornire statistiche climatologicamente significative. I dati sono stati forniti dalla Fondazione Edmund Mach e da Meteotrentino. I dati del profilatore di vento installato da Meteotrentino presso l'aeroporto di Trento Sud sono stati analizzati, ma non presi in considerazione per l'elaborazione dell'atlante eolico a causa della lunghezza troppo ridotta del dataset (il profilatore è stato installato nel 2012) e dei molti buchi presenti nel dataset stesso.

*2. Analisi e validazione dei dati.*

I dati delle stazioni al suolo sono stati analizzati e validati seguendo procedure e test adottati da casi analoghi in letteratura. In particolare sono state seguite le indicazioni contenute in Jiménez et al. (2010) e in Chávez-Arroyo e Probst (2013). Tale validazione ha consentito di valutare la bontà dei dati a disposizione e di eliminare dal dataset le stazioni che non avevano un numero sufficientemente elevato di dati di buona qualità. In particolare si è deciso di non utilizzare per l'assimilazione all'interno delle simulazioni numeriche le stazioni con meno dell'80% di dati validi. Questo processo ha portato alla selezione di 23 stazioni meteorologiche.

*3. Acquisizione delle rianalisi (dal National Centers for Environmental Prediction, NCEP, degli USA o dall'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF).*

Per fornire le condizioni iniziali e al contorno per le simulazioni numeriche per la realizzazione dell'atlante eolico si è deciso di utilizzare le rianalisi fornite dal National Centers for Environmental Prediction (NCEP) con una risoluzione spaziale di  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ .

*4. Effettuazione delle simulazioni numeriche mediante combinazione dei modelli WRF e CALMET.*

Sono state effettuate simulazioni numeriche mediante combinazione del modello meteorologico prognostico WRF (fino a una risoluzione di 2 km) e del modello meteorologico diagnostico CALMET raggiungendo una risoluzione finale di 500 m. Tali simulazioni hanno coperto un arco temporale di 10 anni (2004-2013), allo scopo di ottenere statistiche della velocità del vento climatologicamente significative. La catena di modelli di calcolo implementata assimila sia i dati di grande scala (approccio top-down), sia i dati misurati dalle stazioni meteorologiche al suolo sul territorio provinciale (approccio bottom-up).

### *5. Verifica di qualità dei campi prodotti dalle simulazioni.*

I risultati delle simulazioni numeriche sono stati verificati tramite confronto con misure di stazioni meteorologiche al suolo. In particolare si è verificata l'aderenza delle principali statistiche e delle distribuzioni di probabilità della velocità del vento simulate dal modello con quelle ottenute a partire dai dati misurati al suolo.

### *6. Elaborazione dei risultati.*

Gli output delle simulazioni numeriche sono stati analizzati e post-processati allo scopo di calcolare statistiche della velocità del vento sul territorio provinciale. Inoltre a partire dai dati provenienti dalle stazioni al suolo sono state prodotte delle schede per ciascuna delle 23 stazioni assimilate all'interno della catena modellistica, nelle quali sono state riassunte le informazioni principali relative alle statistiche di velocità e direzione del vento.

### *7. Produzione di mappe di intensità e direzione del vento a diverse quote e in diverse condizioni stagionali.*

A partire dalle elaborazioni degli output delle simulazioni numeriche sono state prodotte mappe di velocità del vento a 10, 25, 50 e 75 m al di sopra del livello del suolo annuali e stagionali. Per quanto riguarda la direzione del vento si è deciso di non produrre mappe, in quanto poco significative, ma di mostrare le rose del vento annuali e stagionali delle 23 stazioni al suolo assimilate all'interno della catena modellistica.

### *8. Produzione di curve rappresentative delle proprietà statistiche del vento.*

Infine, sempre a partire dalle elaborazioni degli output delle simulazioni numeriche, sono state prodotte mappe annuali e stagionali dei due coefficienti della distribuzione statistica di Weibull, che viene utilizzata solitamente per rappresentare la distribuzione di probabilità della velocità del vento e per valutare il potenziale eolico di un sito.

La relazione è organizzata come segue. Nel Capitolo 2 viene riportata un'indagine della letteratura scientifica rilevante per il presente progetto ed in particolare vengono valutate le metodologie adottate in analoghi studi volti a ricostruire campi di vento su periodi climatologicamente significativi. Nel Capitolo 3 vengono descritti i dettagli della catena di calcolo implementata. Nel Capitolo 4 vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche e vengono mostrate le mappe annuali e stagionali di velocità del vento a 10, 25, 50 e 75 m sopra il livello del suolo e dei due coefficienti caratteristici della distribuzione di Weibull. Nel Capitolo 5 i risultati delle simulazioni sono confrontati con le osservazioni di alcune stazioni meteorologiche poste sul territorio provinciale, al fine di validare i risultati ottenuti. Il Capitolo 6 è dedicato a delle brevi

conclusioni, mentre in Appendice sono riportate le schede di tutte le stazioni al suolo analizzate, con un riassunto delle statistiche annuali e stagionali di velocità e direzione del vento.

## 2. Analisi della letteratura

L'analisi della letteratura si è concentrata sull'individuazione degli strumenti attualmente disponibili per strutturare una catena modellistica per la produzione di campi di vento su un periodo climatologicamente significativo. Le aree di analisi sono state le seguenti:

- modelli fluidodinamici di tipo prognostico;
- modelli idrostatici di tipo diagnostico;
- modelli di interpolazione del vento;
- accoppiamento fra modelli;
- acquisizione di dati all'interno di algoritmi per la ricostruzione dei campi di vento;
- complessità orografica e implicazione sulla modellazione del vento;
- analisi dei pattern di vento;
- predisposizione di atlanti eolici o basi dati di vento.

Da un punto di vista generale Landberg et al. (2003) offre una panoramica interessante per comprendere quali siano le scale spazio-temporali di riferimento per la creazione di un atlante eolico e quali siano gli strumenti adatti, inclusi gli algoritmi e le misure dirette. Le scale spaziali alle quali si fa riferimento vanno dai moti di grande scala (e ai dati atti a rappresentarli come le analisi dei modelli di circolazione globale) fino a quelli di piccola scala che tipicamente vanno gestiti con integrazione tra modelli e misure. Tra tutte le tecniche esposte, una delle più promettenti è quella di effettuare simulazioni meteorologiche accoppiando modelli a diversa scala, con in aggiunta l'inserimento dei dati effettivamente misurati al suolo. L'acquisizione di dati da inserire come input nei modelli di calcolo è evidentemente una questione primaria. Un set di dati è quello di tipo geografico (uso del suolo, scabrezza, orografia) che descrive di fatto le condizioni al contorno inferiore del volume di calcolo. Questi dati, seppur in formati non sempre uniformi, sono disponibili per tutto il continente europeo a risoluzioni più che sufficienti per l'applicazione necessaria, pertanto il problema si riduce ad una questione meramente informatica di conversione di formati. Ben diversa è invece la situazione per quanto riguarda i dati riguardanti l'atmosfera nei suoi parametri di interesse (pressione, temperatura, vento, contenuto d'acqua e rispettivi gradienti orizzontali e verticali). Fra le varie tecniche usate per l'assimilazione di dati in modelli che lavorano alla mesoscala quelle attualmente più utilizzate sono 3DVAR, 4DVAR e ETKF, descritti in Wang et al (2008) e Schwitalla et al (2011). In Bannister (2008) vengono invece analizzate in maniera dettagliata quali siano le fonti di errore insite nelle procedure di assimilazione di dati meteorologici. Nel caso del 3DVAR i dati assimilabili sono riferiti ad un istante temporale sempre coincidente con le condizioni meteorologiche al contorno date dalle rianalisi a grande scala, mentre nel 4DVAR le informazioni possono essere distribuite su tutta la finestra temporale. Lorenc (2003) e Lorenc e Rawlins (2005) affermano che la seconda tecnica è quella che porta a risultati migliori nel caso in cui i modelli meteorologici vengano utilizzati in modalità prognostica.

In letteratura sono presenti diversi esempi nei quali modelli meteorologici sono stati utilizzati per ricavare atlanti del vento o campi di vento al suolo su un periodo climatologicamente significativo. Nel 2002 il Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI) e il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova hanno prodotto un "Atlante Eolico dell'Italia" (CESI, 2002), utilizzando il modello mass consistent Windfield Interpolation by Non Divergent Schemes (WINDS), inizializzato con un input statistico ottenuto dalle rianalisi dello European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) per un periodo di 10 anni e integrando i risultati modellistici ottenuti con misure da stazioni meteorologiche al suolo. Più recentemente un atlante eolico per la Regione Toscana (Busillo et al., 2008) è stato sviluppando integrando modellazione meteorologica multiscala con dati misurati al suolo da stazioni meteorologiche della rete regionale. Uno degli strumenti modellistici più utilizzati negli ultimi anni per tali scopi è il modello meteorologico alla mesoscala Weather Research and Forecasting (WRF, Skamarock et al., 2008), sviluppato presso il National Center for Atmospheric Research a Boulder, Colorado. Sono numerosi gli esempi presenti in letteratura nei quali questo modello è stato utilizzato per ricavare campi di vento climatologici ad alta risoluzione. Per esempio Nawri et al. (2013) hanno utilizzato questo modello per produrre un atlante eolico per l'Islanda, con una risoluzione spaziale di 3 km, mentre Boilley et al. (2013) per un analogo studio in Marocco con una risoluzione spaziale di 2 km. Jimenez et al. (2010) e Jimenez e Dudhia (2013) hanno dimostrato che il modello WRF, con una risoluzione di 2 km, è in grado di riprodurre con buona accuratezza velocità e direzione del vento in un territorio ad orografia complessa su un periodo climatologicamente significativo. In questi articoli si afferma che la tecnica migliore per simulazioni su un lungo periodo temporale è quella di effettuare brevi run di 48 h, per i quali solo le ultime 24 h vengono utilizzate per l'analisi dei risultati, in quanto le prime ore sono troppo influenzate dall'inizializzazione.

In alcuni lavori presenti in letteratura nei quali sono state prodotte mappe del vento ad alta risoluzione, modelli atmosferici prognostici sono stati accoppiati a modelli diagnostici o "mass consistent". Tale scelta è legata soprattutto a questioni operazionali, dal momento che allo stato attuale lo scoglio del costo computazionale non consente di scendere sotto una certa soglia di risoluzione spaziale con modelli fluidodinamici completi. Pertanto, anche se esistono indicazioni sul fatto che un downscaling "spinto" anche relativo alla componente vento sia fattibile con modelli prognostici (Varvayanni et al. 1998 e più recentemente Storm et al. 2008), la dimensione del dominio di interesse pone dei limiti e impone alcune scelte di compromesso. Sull'accoppiamento tra modelli prognostici e diagnostici di tipo "mass consistent" si può fare riferimento ai lavori di Finardi et al (1998), Ludwig et al. (2006) e Yim et al (2007). Quest'ultimo in particolare pone l'accento sullo sviluppo di una mappa di vento ad alta risoluzione su terreno ad orografia complessa. Applicazioni di modelli mass-consistent nella valutazione del flusso su orografia complessa sono descritti per esempio nei lavori di Desiato et al. (1998) e Cox et al (1998), entrambi con l'utilizzo del modello CHIMERE. Più recentemente lavori analoghi condotti con il modello CALMET (Scire et al., 2000) sono quelli di Cox et al. (2005) e Wang et al (2008). In essi si ritrovano anche indicazioni precise su quali siano le parametrizzazioni più critiche nel suddetto modello e su quali parametri sia opportuno operare per minimizzare lo scarto tra valori simulati e misurati. In particolare si fa riferimento alla peggior performance del modello nella simulazione di

direzione e intensità del vento man mano che si sale in quota. Infine di particolare interesse è l'articolo di Wang e Shaw (2009), in cui viene confrontato l'output di CALMET con quello di un sistema solo prognostico: maggiori differenze sono state riscontrate dove il modello mass-consistent ha meno informazioni (ovvero in quota) e dove non riesce a compensare questa carenza non disponendo di equazioni che risolvano la complessità del moto e degli scambi di calore. Il dettaglio spaziale raggiungibile è comunque più elevato; di conseguenza l'accoppiata dei due sistemi rimane probabilmente la soluzione comunque più ragionevole.

### 3. Implementazione del sistema di calcolo

#### 3.1 Generalità

Il sistema software destinato alla produzione dell'Atlante Eolico del Trentino è strutturato in maniera tale da produrre il calcolo delle variabili meteorologiche, ed in particolare del vento, su tutta l'area di interesse, combinando due approcci differenti che facciano uso dello stato dell'arte attuale delle tecniche modellistiche. Nello specifico si tratta di una catena di modelli di calcolo per l'atmosfera che assimilano sia i dati di grande scala (approccio top-down) che i dati misurati al suolo (approccio bottom-up). La catena modellistica è basata su due software di pubblico dominio (WRF e CALMET) intorno ai quali sono stati costruiti tools di pre- e post-processing destinati all'automazione della procedura. Lo schema è riportato in Figura 3.1. Il sistema funziona in ambiente operativo Linux. Lo schema è progettato per essere eseguito per blocchi di un mese (720 h).

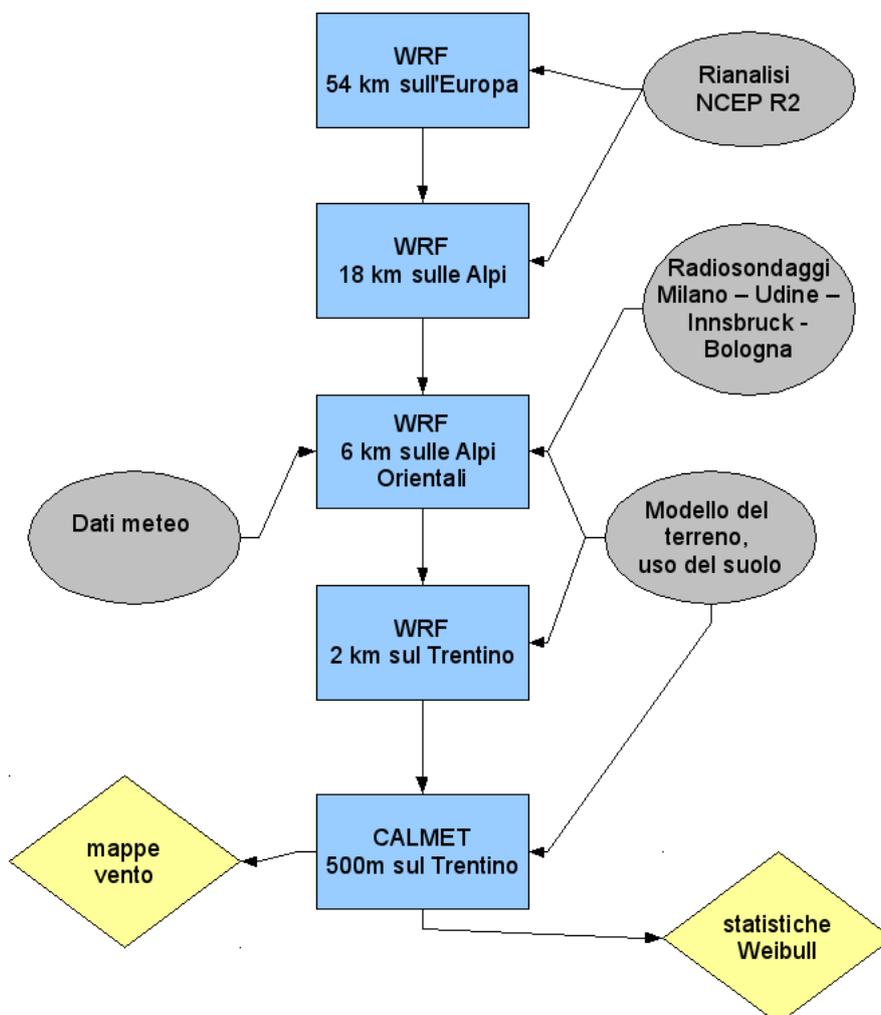


Figura 3.1: Catena modellistica.

## 3.2 Modelli di calcolo adottati

Il modello WRF è sviluppato e mantenuto dall'NCAR (<http://wrf-model.org/>), ed è distribuito con licenza pubblica in forma di codice sorgente. Il modello è concepito per operare su sistema operativo Linux, in modalità command-line, quindi senza interfaccia grafica. Le sue caratteristiche operative sono:

- risoluzione completa delle equazioni del moto e dell'energia;
- possibilità di nesting con se stesso e altri modelli utilizzando il formato di scambio dati con codifica apposita;
- possibilità di elaborazione in parallelo per abbattere i tempi di calcolo;
- configurazione tramite file di testo;
- I/O dati: binario con formati standard (formato standard NETcdf);
- possibilità di scripting e automazione dei processi di calcolo.

Esso, così come tutti gli altri modelli meteorologici a mesoscala, ha bisogno di condizioni iniziali e al contorno. Esse sono ricavate, nell'implementazione dell'atlante eolico, dalle cosiddette "rianalisi" distribuite dall'ente americano NCEP con risoluzione temporale di 6 ore e spaziale pari a 1° di latitudine/longitudine. Nel presente caso il modello WRF è stato implementato utilizzando quattro domini innestati con una risoluzione di 54, 18, 6 e 2 km di lato e intervallo temporale di 1 ora.

Per la scala inferiore si è adottato il modello CALMET, che è mantenuto e distribuito da TRC Solutions (<http://www.src.com>) e distribuito con licenza aperta ma vincolata, che consente l'utilizzo anche in contesti commerciali a patto di comunicare agli sviluppatori eventuali modifiche apportate nel codice originale. Nel caso specifico non sono state apportate modifiche al codice del modello medesimo ma sono stati sviluppati ex-novo alcuni moduli software per l'acquisizione dei dati al suolo che hanno formato differente da quello previsto dal modello CALMET. Il modello CALMET è in grado di assimilare i risultati orari della simulazione a scala maggiore e generare campi di vento ad una risoluzione spaziale orizzontale molto più elevata sull'area di interesse, con frequenza oraria. I campi di vento così calcolati risultano consistenti con le forzanti orografiche locali. Il modello CALMET assimila, oltre agli eventuali dati sopra citati, anche i dati al suolo, essenziali per una buona ricostruzione dei campi di vento. Infatti l'utilizzo di stime da modello dinamico prognostico rispetto a misure da stazione non compensa semplicemente la mancanza di dati misurati benché possa portare ad una migliore descrizione delle variabili legate alla turbolenza. Il calcolo dei profili di vento in un modello mass-consistent non è semplicemente una estrapolazione verticale ma viene eseguito secondo lo schema di similarità che fa dipendere il profilo verticale anche dalla stabilità atmosferica, ovvero il suo contenuto energetico turbolento. Questo assicura anche che il campo di vento possa tenere conto dei diversi flussi radiativi dovuti all'insolazione, così come anche ai diversi flussi di calore al livello del terreno dovuti all'uso del suolo (es. aree abitate vs. coltivate). I dati meteorologici assimilabili si dividono in:

- “upper air” che nel caso specifico sono l’extrapolazione verso il basso ottenuto attraverso il nesting all’interno dell’output di WRF;
- “surface stations”, cioè le stazioni meteorologiche al suolo che possono fornire come parametri i seguenti dati: velocità del vento, direzione del vento, temperatura, pressione, umidità relativa, copertura nuvolosa, pioggia, quota delle nuvole; solo i primi 4 parametri sono obbligatori; il modulo di input è stato predisposto per assimilare i dati da stazioni al suolo della Fondazione Edmund Mach e di Meteotrentino.

Inoltre sono stati calcolate e predisposte le mappature delle seguenti grandezze per tutto il territorio italiano sul quale vengono eseguite le simulazioni:

- modello digitale del terreno
- mappa di uso del suolo
- mappa della scabrezza
- mappa dell’albedo

Nel presente caso il modello CALMET è stato utilizzato con una griglia regolare quadrata di 0.5 km di lato e intervallo temporale di 1 ora.

### 3.3 Descrizione geografica

#### 3.3.1 *Dominio di calcolo*

I 4 domini di calcolo di WRF coprono rispettivamente l’Europa (risoluzione 54 km), l’intera catena alpina (risoluzione 18 km), le Alpi nord-orientali (risoluzione 6 km) e la Provincia di Trento (estesa fino al margine meridionale del lago di Garda, risoluzione 2 km), il dominio di calcolo adottato per CALMET (risoluzione 500 m) è coincidente con quello più interno di WRF con l’eccezione di alcune celle di bordo, al solo fine di evitare errori numerici. Le aree coperte dai 4+1 domini innestati hanno le caratteristiche geometriche descritte in Figura 3.2 e Tabella 3.1.

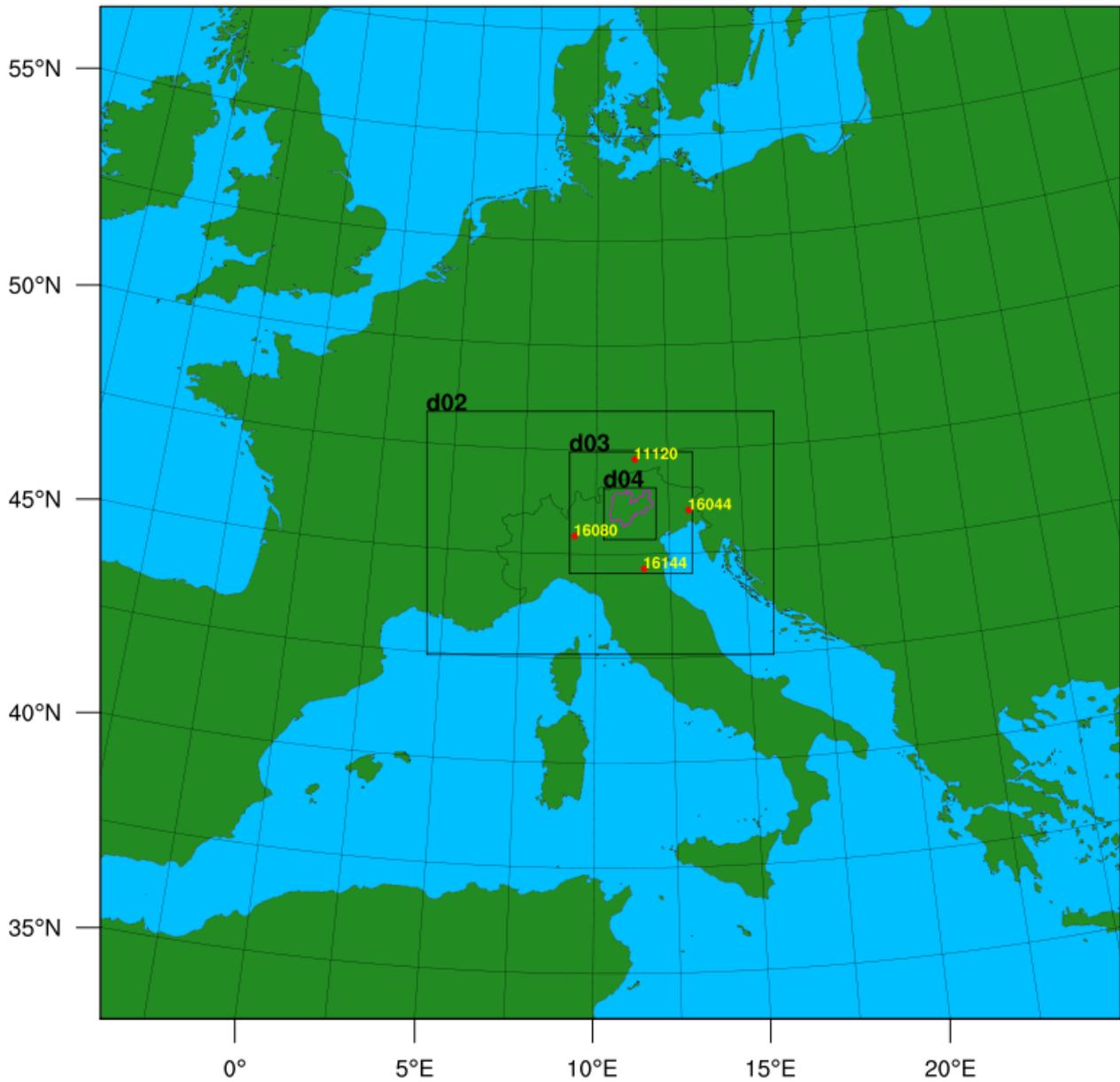


Figura 3.2: Domini di calcolo.

Tabella 3.1: Caratteristiche geometriche domini.

Dominio	Descrizione	Estensione [km <sup>2</sup> ]	Celle	Risoluzione [km]
WRF1	Europa	2754x2754	51x51	54
WRF2	Nord Italia	936x666	52x37	18
WRF3	Alpi orientali	330x330	55x55	6
WRF4	Trentino	138x138	69x69	2
CALMET	Trentino	135x115	270x230	0.5

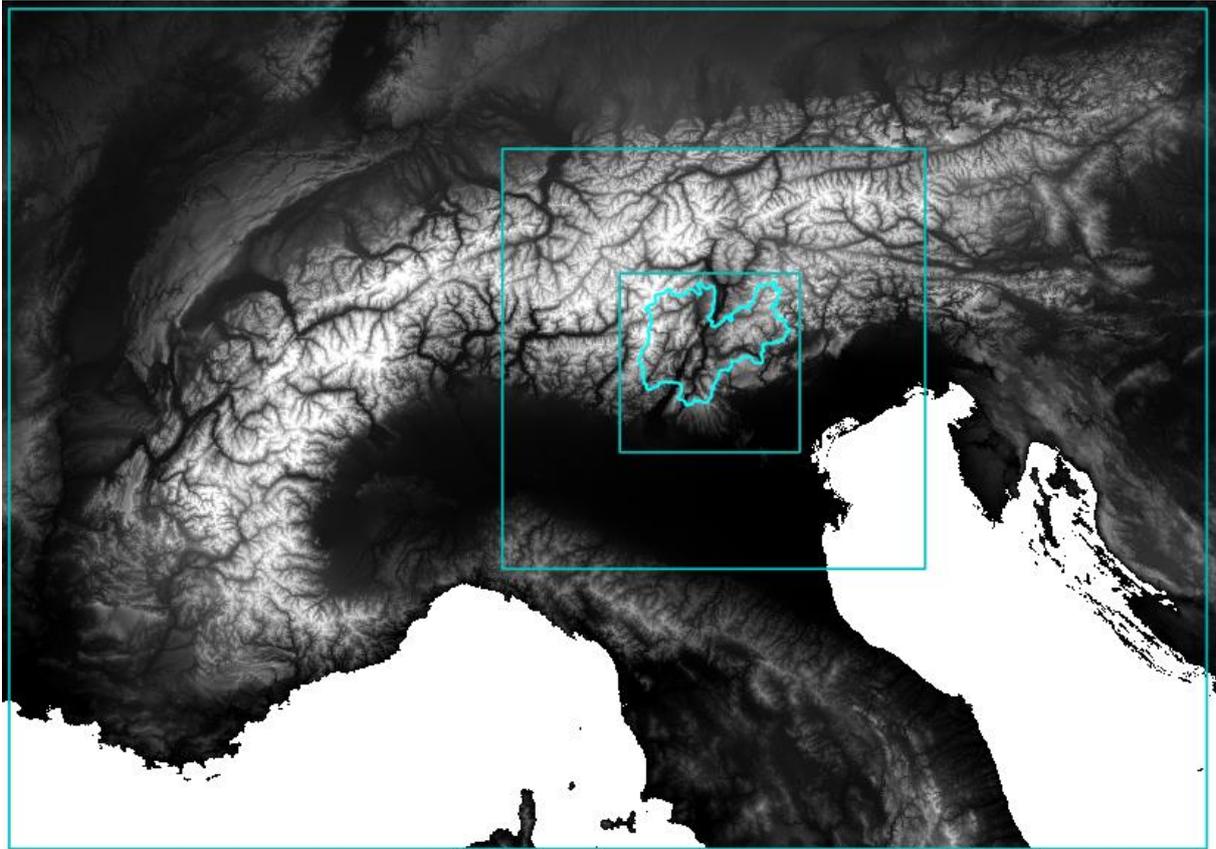


Figura 3.3: Domini innestati WRF2 (Nord Italia), WRF3 (Alpi Orientali), WRF4 (Trentino).

L'assimilazione dei dati a grande scala (rianalisi) è stata prevista per il dominio più esterno, che fornisce poi a cascata le condizioni al contorno per i domini inferiori. L'assimilazione dei dati da radiosondaggio e stazioni al suolo è stata prevista per il dominio intermedio WRF3. Si noti che quest'ultima scelta non è solamente legata all'algoritmo ma anche alla disponibilità di dati al suolo omogenei che coprono il dominio interno.

Le stazioni di radiosondaggio utilizzate per l'assimilazione dei dati sono quelle di Innsbruck, S. Pietro Capofiume (BO), Udine e Milano Linate, indicate in Fig. 3.2. Si è quindi proceduto al reperimento e all'analisi dei dati dei radiosondaggi provenienti da queste 4 località per tutto il periodo delle simulazioni numeriche. In Fig. 3.3 è riportato uno zoom dei domini 2, 3, 4 utilizzati per le simulazione tramite modello WRF.

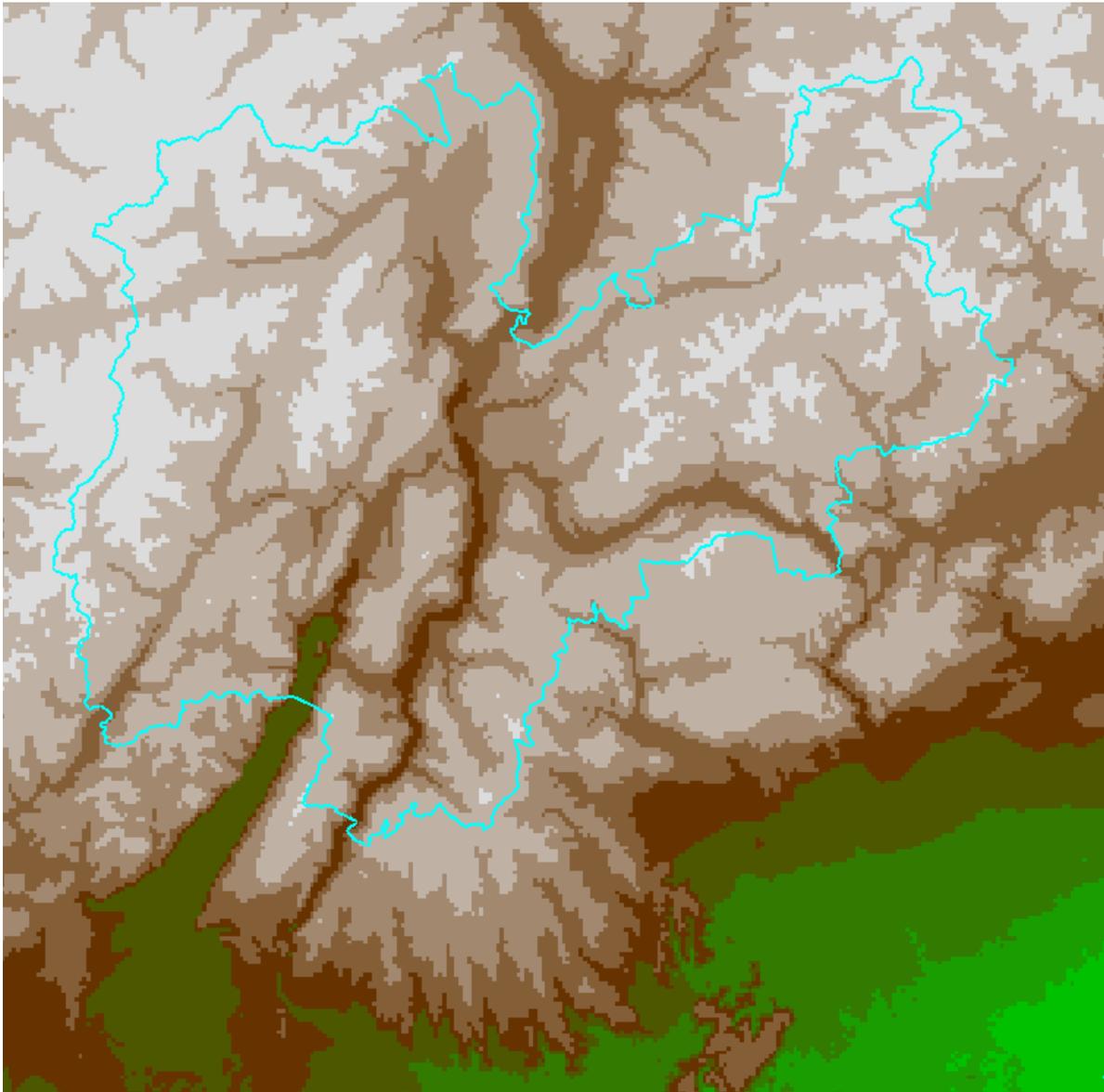


Figura 3.4: Modello digitale del terreno a risoluzione 0.5 km (modello CALMET).

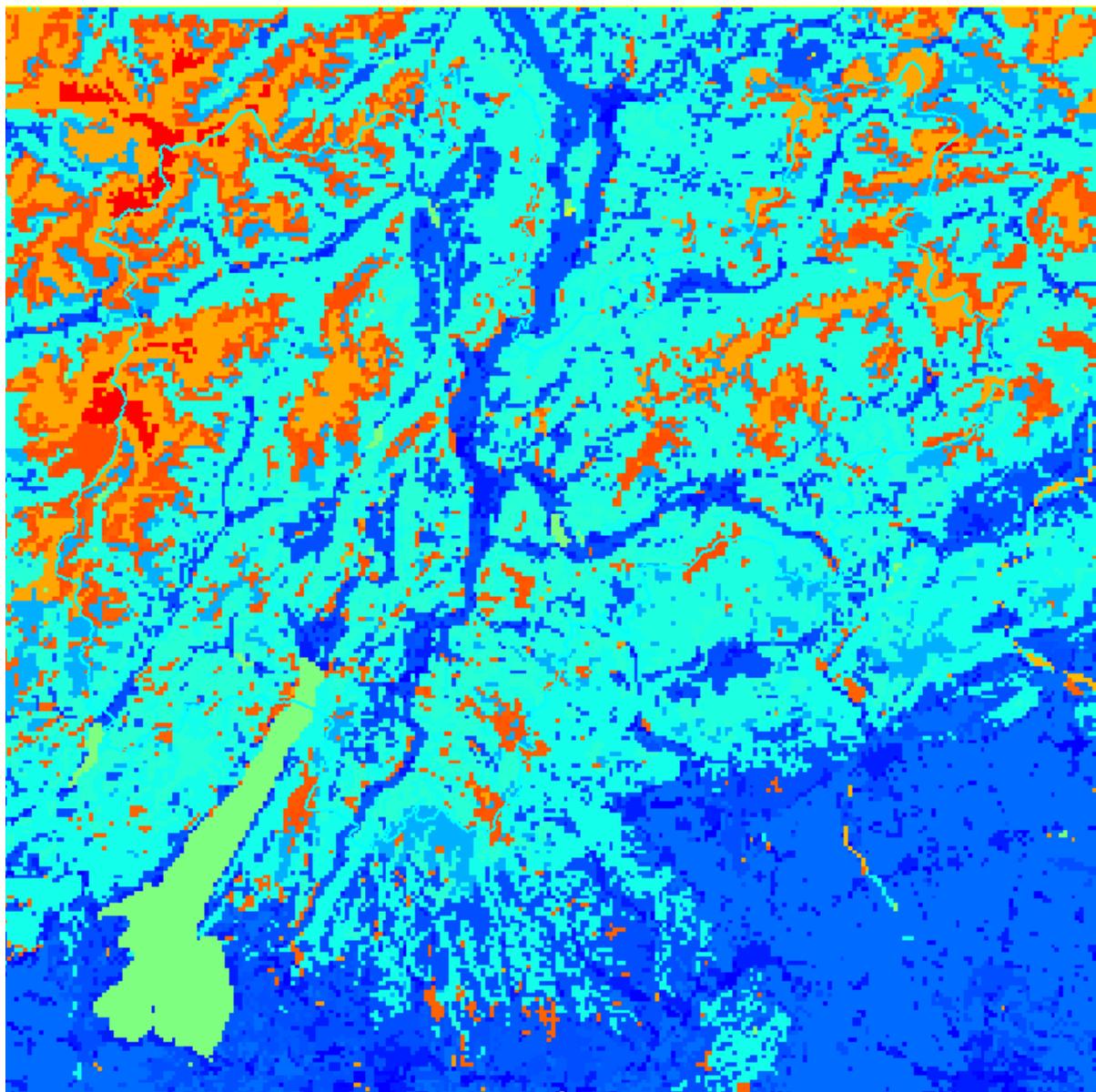


Figura 3.5: Mappa di uso del suolo 0.5 km (modello CALMET).

### 3.3.2 Proiezione geografica

La proiezione geografica utilizzata in fase di calcolo, sia per il modello WRF, sia per il modello CALMET, è una LCC (Lambert Conica Conforme) caratterizzata dai seguenti parametri: proiezione su sfera di raggio 6370 km, paralleli di riferimento 44.5 °N e 47.5 °N, punto centrale di coordinate 10.5 °E e 46.0 °N. La proiezione scelta è quella che fra le possibilità di utilizzo in entrambi i modelli WRF e CALMET minimizzava la distorsione media della proiezione piana su tutta l'area dovuta alla curvatura terrestre. Il calcolo viene eseguito quindi in proiezione piana con celle quadrate.

Le mappe sintetiche prodotte all'ultimo stadio della catena modellistica (elencate nel successivo Paragrafo 4.2) sono state riproiettate nel sistema geografico di riferimento standard adottato dalla Provincia di Trento, ovvero WGS84-UTM32 Nord.

### 3.3.3 Range temporale

Le simulazioni sono state eseguite su un lasso di tempo di 10 anni, al fine di ottenere una buona significatività statistica sui risultati, nello specifico dall'01/01/2004 al 31/12/2013, con scansione oraria su tutti i domini di simulazione. È stata valutata anche la possibilità di estendere all'indietro il periodo di simulazione, tuttavia la minore disponibilità di dati (sia misurazioni al suolo che rianalisi e radiosondaggi) hanno determinato la scelta di limitarsi al periodo meglio coperto.

### 3.3.4 Configurazione di calcolo

Sulla base delle tecniche di assimilazione dati riscontrate in letteratura sono state testate differenti tecniche di nesting e assimilazione dati, riassunte nello schema riportato in Fig. 3.6.

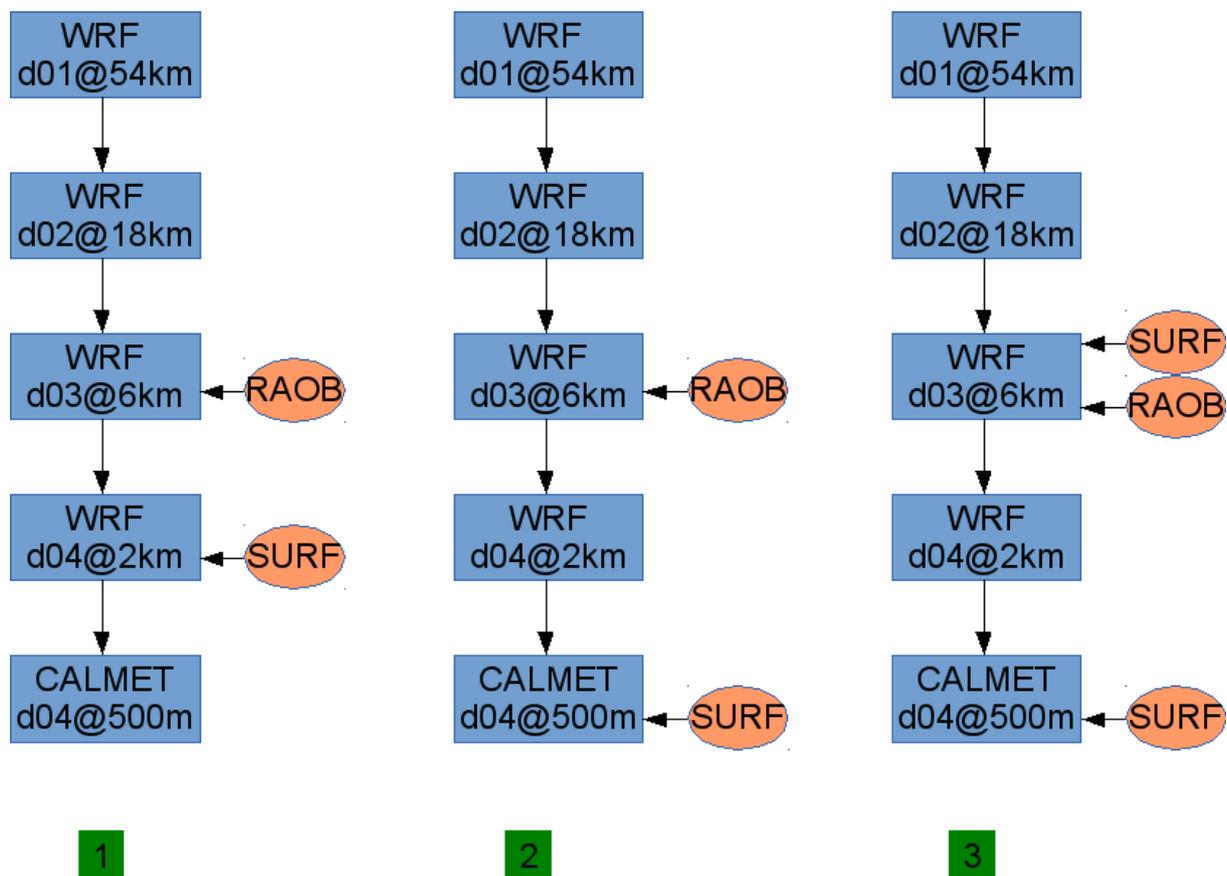


Figura 3.6: Configurazioni di calcolo testate.

Le tre configurazioni testate si differenziano per la scelta del punto in cui assimilare i dati dei radiosondaggi (RAOB) e delle stazioni al suolo (SURF). Ognuno di essi presenta vantaggi e svantaggi che vengono qui sinteticamente riportati:

1. Nella prima configurazione i radiosondaggi vengono assimilati nel dominio WRF3 (6 km) e i dati delle stazioni al suolo nel dominio WRF4 (2 km). Questa scelta sembrava la più naturale in quanto prevedeva l'inserimento dei dati meteorologici alla scala spaziale in cui i due set di dati sono significativi. Questo ha però comportato alcuni problemi numerici, dal punto di vista modellistico, in quanto la vorticità nel dominio più interno risultata così elevata (e non realistica) da portare ad errori su circa 1/3 delle simulazioni. Il motivo è da ricercarsi verosimilmente ad un sistema che sarebbe adatto ad assimilare una densità spaziale di dati molto più bassa. D'altra parte nel caso specifico della Provincia di Trento, l'elevata complessità orografica richiedeva un discreto numero di stazioni meteorologiche per caratterizzare correttamente le condizioni di vento.
2. Nella seconda configurazione i radiosondaggi vengono assimilati nel dominio WRF3 (6 km), nel dominio WRF4 non si esegue alcun inserimento di dati limitandosi al nesting, mentre i dati al suolo vengono assimilati nel modello CALMET. Questa configurazione è la più semplice dal punto di vista modellistico ma sconta il problema che CALMET è un modello "mass-consistent", che quindi non risolve propriamente le equazioni del moto ma si limita a minimizzare la divergenza del campo di vento su tutti gli input disponibili (down-scaling da WRF + stazioni al suolo). L'effetto negativo è che si perdono alcune caratteristiche peculiari dei campi di vento tipici della dinamica su terreno complesso (es. incanalamento, accelerazione, ecc...)
3. La terza configurazione è la più complessa e tenta di dare una risposta ai problemi riscontrati negli altri due setup. Sia i radiosondaggi che le stazioni al suolo vengono assimilati nel dominio WRF3 (6 km), nel dominio WRF4 non si esegue alcun inserimento di dati limitandosi al nesting, mentre i dati al suolo vengono nuovamente assimilati nel modello CALMET, indicando però di utilizzare queste informazioni solo per lo strato al suolo, lasciando per il resto degli strati verticali l'influenza del dominio WRF4. Questo sistema, che è quello implementato in maniera definitiva, consente l'eliminazione di problemi numerici nella catena modellistica ed una buona rispondenza dei dati al suolo con il dato simulato.

Gli schemi fisici utilizzati per le simulazioni con il modello WRF sono stati scelti al termine di alcune simulazioni di prova e sulla base dell'esperienza precedente nell'uso di questo modello. In particolare sono stati adottati lo schema di strato limite sviluppato dalla Yonsei University (YSU, Hong et al. 2006), il modello superficiale Noah (Chen e Dudhia 2001), lo schema microfisico WRF Single-Moment 3-class (Hong et al. 2004) e la parametrizzazione di Kain-Fritsch (Kain and Fritsch 1993) per il trattamento dei cumuli. Per quanto riguarda la radiazione sono stati utilizzati il modello Rapid Radiative Transfer (Mlawer et al. 1997) per la componente ad onda lunga e il modello di Dudhia (1989) per la componente ad onda corta, includendo gli effetti associati all'inclinazione dei versanti e all'ombreggiamento dovuto alla topografia. Inoltre è stata utilizzata la correzione per la

velocità del vento in terreno complesso proposta da Jiménez and Dudhia (2012), che parametrizza gli effetti causati dalle caratteristiche del terreno non esplicitamente risolte dal modello.

Infine va riportato che sono stati eseguiti dei test con risoluzione del dominio WRF4 a 1.2 km invece che 2 km. Il risultato al termine della catena, ovvero l'output del modello CALMET, non è risultato particolarmente influenzato da questa scelta, pertanto si è valutato di mantenere la griglia del dominio più interno di WRF con dimensione di 2 km, anche per limitare l'onere di calcolo, che è decisamente significativo.

### 3.4 Assimilazione dati

#### 3.4.1 Sistema di assimilazione

Il sistema di assimilazione dati utilizzato da WRF con tecnica FDDA (Four Dimensional Data Assimilation) si basa su una utility – denominata “obsgrid” - che produce output di due tipologie utilizzabili poi nelle simulazioni vere e proprie:

- i dati meteorologici delle stazioni con il contenuto informativo originario ma convertiti in un formato atto all'assimilazione da parte del software, con lo scopo di forzare il campo meteorologico calcolato a passare per punti noti;
- una assegnazione del dato alla cella della griglia in cui ricade la stazione meteorologica, da usare come “first guess” nel processo di minimizzazione dello scarto tra dato simulato e calcolato.

Tecnicamente le due modalità potrebbero essere utilizzate insieme, come anche confermato dal manuale utente del software WRF, tuttavia si ritiene che questo corrisponda ad una duplicazione della medesima informazione, per cui si è preferito scegliere quella più opportuna per il contesto. Dal punto di vista concettuale la prima modalità forza in maniera stringente il campo di vento a comportarsi localmente (nel tempo e nello spazio) esattamente in maniera conforme al dato misurato; la seconda modalità invece tenta di rendere globalmente il campo simulato più vicino all'effettivo, minimizzando gli scarti complessivi. La prima modalità parrebbe la più corretta, tuttavia richiede che non ci siano mai significativi scostamenti fra dato misurato e simulato. Scostamenti eccessivi relativi alla direzione del vento portano spesso ad errori numerici e conseguente interruzione della simulazione effettuata tramite il modello WRF, situazione via via più frequente all'aumentare della risoluzione spaziale. A seguito di vari tentativi si è potuto verificare che, perlomeno per simulazioni su periodi molto lunghi (per le quali è necessario disporre di un sistema modellistico “solido”), è opportuno utilizzare il secondo sistema che produce un campo più “smooth” ma non soffre di problemi di stabilità numerica. Si sottolinea comunque che il problema non è però solamente informatico / numerico, bensì modellistico. Infatti l'assimilazione FDDA secondo la prima modalità implicitamente assume che il dato simulato debba convergere al misurato come valore *istantaneo*, e non *medio*. Questo pone pertanto un problema dal momento che i dati delle stazioni al suolo e dei radiosondaggi sono forniti come valori medi orari.

### 3.4.2 *Dati anemometrici nella Provincia di Trento*

I dati al suolo delle stazioni meteorologiche della Fondazione Edmund Mach (FEM) e di Meteotrentino (MT) costituiscono l'unico input che deve essere manualmente posizionato all'interno della directory apposita, mentre il resto viene automaticamente scaricato. La procedura di calcolo prevede, prima della conversione di formato, la validazione e marcatura di record di dati non validi. Si suppone in realtà che la validazione venga fatta a monte. Tuttavia, si riterrebbe utile inserire un controllo ulteriore automatico o manuale che dovrebbe essere in ogni caso inteso come complementare e non sostitutivo. In merito a questo va sottolineato che nel sistema in cui si forzano il campo di vento del modello con i dati registrati al suolo è assolutamente necessario che questi siano validati. Dati non corretti o insensati, infatti, non solo non migliorano il risultato ma anzi probabilmente contribuiscono a peggiorarlo. Dati di velocità del vento anomali o non realistici possono generare errori non solo nella cella in cui risiede l'anemometro, ma anche quelle circostanti per diverse decine di km. Per questo motivo è stata implementata una rigorosa procedura di validazione dei dati di velocità e direzione del vento, prima del loro utilizzo all'interno della catena modellistica. In particolare sono stati utilizzati i criteri proposti da Jiménez et al. (2010) e da Chávez-Arroyo e Probst (2013) per la velocità (WS) e la direzione (WD) del vento, applicati a 36 stazioni poste sul Provincia di Trento, i cui dati coprivano il periodo delle simulazioni 2004-2013:

- controllo dei valori fisicamente plausibili per la velocità del vento:  $0 < WS < 30 \text{ m s}^{-1}$ ;
- controllo dei valori fisicamente plausibili per la direzione del vento:  $0 < WD < 360 \text{ }^\circ\text{N}$ ;
- ripetizione di misure di velocità del vento uguali consecutive: in condizioni di calma di vento ( $WS \leq 0.5 \text{ m s}^{-1}$ ) i dati sono stati controllati manualmente quando erano presenti più di 12 misure uguali consecutive, mentre i dati sono stati automaticamente scartati con più di 24 misure uguali consecutive; in condizioni non di calma di vento ( $WS > 0.5 \text{ m s}^{-1}$ ) i dati sono stati scartati con più di 5 misure uguali consecutive. La divisione tra situazioni di calma e di non calma di vento si rende necessaria perché nei periodi di calma di vento situazioni con velocità del vento costante sono molto più frequenti;
- ripetizione di misure di direzione del vento costanti: i dati sono stati scartati con più di 3 misure uguali consecutive;
- step test: i dati sono stati scartati quando la differenza tra due misure consecutive di velocità del vento era più grande di  $10 \text{ m s}^{-1}$ ;
- controllo della frequenza delle calme di vento, allo scopo di identificare periodi sospetti con lunghe condizioni di calma;
- controllo di medie e varianza mobile della velocità del vento, allo scopo di identificare errori sistematici.

Le soglie utilizzate nei test per il riconoscimento di misure identiche consecutive sospette sono state decise sulla base di un'analisi della frequenza di occorrenza di ripetizioni consecutive. In modo simile le soglie per lo step test sono state stabilite analizzando la distribuzione di frequenza della differenza tra due misure consecutive.

Tabella 3.2: Stazioni utilizzate nella catena modellistica.

<b>Stazione</b>	<b>Longitudine [°E]</b>	<b>Latitudine [°N]</b>	<b>Altezza anemometro [m]</b>	<b>Quota [m s.l.m.]</b>	<b>Ente</b>
Ala	11.000	45.760	10	160	FEM
Arco	10.887	45.910	10	82	FEM
Bezzecca	10.729	45.896	10	763	FEM
Borgo	11.475	46.055	10	387	FEM
Caldes	10.961	46.379	10	785	FEM
Cavedine	10.981	45.985	10	556	FEM
Cembra	11.220	46.171	10	653	MT
Cles	11.040	46.389	10	555	FEM
Denno	11.056	46.267	10	320	FEM
Faedo	11.170	46.195	10	700	FEM
Fondo	11.130	46.438	10	918	FEM
Lavazè	11.494	46.358	5	1805	FEM
Lomaso	10.867	46.014	10	489	FEM
Paneveggio	11.748	46.310	5	1560	FEM
Polsa	10.947	45.782	5	1300	FEM
Rabbi	10.809	46.412	5	1416	FEM
Riva del Garda	10.856	45.878	5	62	FEM
Ronzo Chienis	10.944	45.886	10	943	FEM
Rovereto	11.020	45.878	10	170	FEM
San Michele	11.135	46.190	10	201	FEM
Telve	11.477	46.058	10	408	FEM
Trento Sud	11.127	46.023	10	183	FEM
Vigolo Vattaro	11.195	45.998	10	721	FEM

Al termine di questa procedura di validazione, dalle 36 stazioni di partenza sono state selezionate 23 stazioni per l'assimilazione all'interno della catena modellistica (Tabella 3.2). In particolare sono state selezionate le stazioni con più dell'80% di dati validi nel periodo 2004-2013. Come si può osservare dalla Figura 3.7, le stazioni selezionate sono distribuite abbastanza omogeneamente sul territorio provinciale, anche se coprono maggiormente le zone di fondovalle rispetto a quelle in quota, rispecchiando la distribuzione delle stazioni meteorologiche sul territorio provinciale.

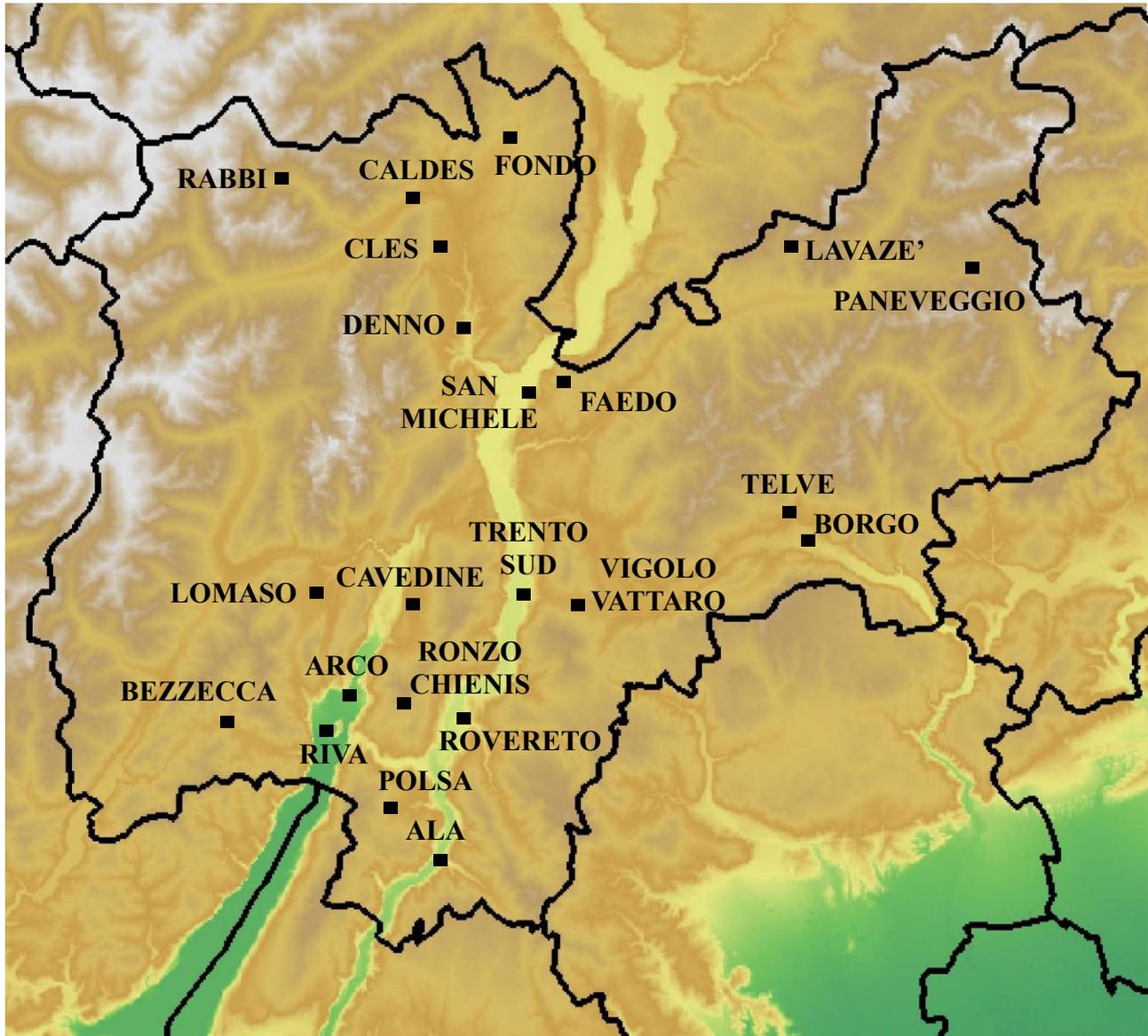


Figura 3.7: Stazioni utilizzate nella catena modellistica.

L'orario nei dati al suolo è sempre l'ora solare centrale europea CET (UTC+1) per tutto il dominio di calcolo italiano e per ogni stagione (quindi senza passaggio all'ora legale). Il riferimento di tempo per il sistema di calcolo è invece il GMT (UTC+0) per compatibilità con le rianalisi NCEP. La conversione CET -> GMT viene eseguita dal preprocessore di CALMET internamente, per cui non è necessario alterare l'ora nei file che possono essere usati nel loro formato originale.

### 3.5 Esecuzione del modello di calcolo

La catena modellistica può essere eseguita in passi separati procedendo in maniera sequenziale. I passi, da eseguire in sequenza, sono relativi a blocchi di 1 mese ciascuno e sono i seguenti:

- download delle rianalisi NCEP\_R2 di grande scala;
- elaborazione del subset delle rianalisi relative al mese selezionato;
- effettuazione del run del modello WRF su tutto il dominio 1, 2;
- effettuazione del run del modello WRF su tutto il dominio 3 inglobando i dati dei radiosondaggi e delle stazioni al suolo;
- effettuazione del run del modello WRF sul 4 come semplice nesting rispetto al dominio 3;
- conversione dell'output di WRF in input di CALMET;
- generazione dei file di input per CALMET;
- esecuzione del modello CALMET;
- estrazione dei file netCDF dal modello CALMET;
- calcolo delle statistiche relative alla velocità del vento sui layer di riferimento (10, 25, 50, 75 m dal suolo).

### 3.6 File di output

I file di output delle simulazioni, in formato NETCDF, sono stati organizzati sia per gli output di WRF che per quelli di CALMET come file relativi ad un mese di simulazione, distintamente per ognuno dei domini di calcolo (e relativa risoluzione spaziale).

Gli output del modello WRF e CALMET, spezzati secondo "slice" temporali, sono accompagnati da un header contenente i metadati. Usando l'intera directory è possibile alimentare una base dati con file che hanno tutti la medesima struttura. Il suddetto database sarà poi interrogabile fornendo come input coordinate spaziali e temporali, ottenendo quindi serie storiche puntuali nello spazio.

## 4. Risultati

### 4.1 Presentazione degli output

#### 4.1.1 Distribuzione di Weibull

Per la valutazione eolica riveste una certa importanza la possibilità di descrivere in termini statistici (usualmente con riferimento ad almeno un anno, ma meglio ad una serie più lunga come nel presente caso) la distribuzione nel tempo della velocità del vento in un determinato sito. Questo è utile per esempio in fase di localizzazione e progettazione degli impianti eolici, fasi in cui si necessita delle informazioni per ottimizzare le turbine eoliche e minimizzare così i costi della generazione. Anche nella valutazione della convenienza dell'investimento è importante avere le informazioni per poter stimare i guadagni dalla generazione di energia elettrica in base alla tipologia di macchina prevista.

La distribuzione temporale della velocità del vento per un sito o per una griglia di punti viene tipicamente descritta utilizzando la funzione di distribuzione statistica di Weibull (a due parametri), la cui densità di probabilità è data dalla seguente formula:

$$p(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

dove

- $v$  [m/s]: velocità del vento alla quota di riferimento;
- $c$  [m/s]: parametro di scala alla quota di riferimento;
- $k$  [-]: parametro di forma alla quota di riferimento.

La distribuzione di Weibull è comunemente ritenuta adeguata per la rappresentazione della statistica delle velocità medie del vento campionato su un periodo relativamente breve (indicativamente da 10 minuti a 1 ora) e per periodi dell'ordine degli anni, al fine di ottenere un campione numericamente significativo. La suddetta distribuzione è stata adottata per calcolare le statistiche per ognuna delle celle di calcolo del dominio interno (CALMET) ai livelli di riferimento di 10, 25, 50, 75 m dal suolo, al fine di ottenere, per ognuna di esse, non solo la velocità media su tutto il periodo di simulazione (10 anni, corrispondenti a 87600 ore), ma anche i parametri di scala e forma utili per le applicazioni eoliche.

Nel seguito sono riportate le tabelle della velocità media del vento e dei due parametri di Weibull con riferimento ai punti delle 23 stazioni utilizzate per l'assimilazione dei dati. Per la quota di 10 m dal suolo è possibile fare un confronto tra dati simulati e misurati, mentre per gli strati superiori si dispone solo delle stime da modello. I valori si avvicinano molto a quelli misurati ma non sono identici dal momento che il sistema di calcolo, così come configurato, nel suo complesso non si comporta come un interpolatore esatto ma come un algoritmo di minimizzazione degli scarti. Si sottolinea che questa non è una validazione dei risultati della catena modellistica, in quanto questo

confronto non è basato su un set di dati indipendente. Una validazione della catena modellistica basata su un set indipendente di dati è presentata nel Capitolo 5.

Tabella 4.1: Velocità del vento e parametri di Weibull annuali, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Ala	1.8	2.0	2.0	2.1	1.4	1.1
Arco	1.6	1.6	1.8	1.7	1.3	1.2
Bezzecca	1.1	1.2	1.3	1.3	1.5	1.4
Borgo	0.9	0.9	1.0	0.9	1.1	1.0
Caldes	1.3	1.4	1.5	1.5	1.4	1.3
Cavedine	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4	1.3
Cembra	1.3	1.3	1.4	1.3	1.2	1.0
Cles	0.9	0.9	1.0	0.8	1.0	0.8
Denno	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0
Faedo	1.2	1.1	1.3	1.1	1.2	1.0
Fondo	2.1	2.0	2.4	2.1	1.4	1.1
Lavazè	1.5	1.5	1.7	1.7	1.5	1.4
Lomaso	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	0.7
Paneveggio	0.9	0.9	1.0	1.0	1.3	1.3
Polsa	1.7	1.7	1.9	1.7	1.1	1.0
Rabbi	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.3
Riva del Garda	2.0	1.9	2.0	1.9	1.0	1.0
Ronzo Chienis	1.5	1.5	1.7	1.7	1.6	1.5
Rovereto	1.5	1.5	1.7	1.5	1.3	1.1
San Michele	1.9	1.9	2.0	1.9	1.1	1.0
Telve	1.1	1.2	1.2	1.3	1.1	1.1
Trento Sud	1.5	1.5	1.6	1.2	0.9	0.7
Vigolo Vattaro	1.0	1.0	1.1	1.0	1.5	1.3

Tabella 4.2: Velocità del vento e parametri di Weibull in inverno, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Ala	1.2	2.0	1.1	2.0	0.9	1.0
Arco	1.0	1.2	1.0	1.2	1.0	1.1
Bezzecca	0.9	0.8	0.9	0.9	1.2	1.3
Borgo	0.7	0.6	0.6	0.6	0.9	1.0
Caldes	1.1	0.9	1.1	0.9	1.2	1.2
Cavedine	0.7	0.9	0.7	0.9	1.2	1.3
Cembra	1.0	1.1	1.0	1.1	0.9	0.9
Cles	0.8	0.5	0.8	0.4	0.8	0.7
Denno	0.8	0.6	0.8	0.6	0.9	1.0
Faedo	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8
Fondo	1.9	1.8	1.9	1.7	1.1	0.9
Lavazè	1.1	1.3	1.1	1.4	1.2	1.3
Lomaso	0.7	0.6	0.7	0.5	0.7	0.8
Paneveggio	0.7	0.8	0.7	0.9	1.1	1.4
Polsa	1.1	1.4	1.0	1.4	0.9	0.9
Rabbi	1.0	1.2	1.0	1.2	1.2	1.0
Riva del Garda	1.3	1.5	1.2	1.6	0.8	1.1
Ronzo Chienis	1.0	1.1	1.0	1.2	1.3	1.2
Rovereto	0.9	1.2	0.8	1.3	1.0	1.0
San Michele	1.3	1.4	1.0	1.3	0.8	0.8
Telve	0.8	0.8	0.7	0.8	1.0	1.0
Trento Sud	1.1	1.0	1.0	0.7	0.7	0.6
Vigolo Vattaro	0.8	0.7	0.7	0.8	1.0	1.1

Tabella 4.3: Velocità del vento e parametri di Weibull in primavera, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Ala	2.1	2.2	2.2	2.2	1.2	1.0
Arco	2.0	1.9	2.1	2.0	1.3	1.2
Bezzecca	1.3	1.4	1.4	1.6	1.4	1.4
Borgo	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.0
Caldes	1.5	1.7	1.6	1.9	1.3	1.5
Cavedine	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3	1.3
Cembra	1.6	1.6	1.7	1.7	1.2	1.2
Cles	1.0	1.2	1.0	1.1	0.8	0.8
Denno	1.2	1.3	1.2	1.4	1.0	1.1
Faedo	1.4	1.3	1.5	1.3	1.2	1.1
Fondo	2.4	2.3	2.4	2.4	1.1	1.2
Lavazè	1.8	1.6	1.9	1.8	1.4	1.5
Lomaso	1.3	1.4	1.2	1.1	0.9	0.7
Paneveggio	1.1	1.0	1.2	1.1	1.3	1.3
Polsa	2.1	2.0	2.1	2.0	1.1	1.1
Rabbi	1.5	1.5	1.5	1.6	1.2	1.3
Riva del Garda	2.3	2.1	2.3	2.0	1.0	0.9
Ronzo Chienis	1.9	1.8	2.0	2.0	1.6	1.7
Rovereto	1.9	1.7	1.9	1.6	1.1	1.0
San Michele	2.4	2.2	2.1	2.3	0.9	1.1
Telve	1.4	1.5	1.4	1.6	1.1	1.2
Trento Sud	1.8	1.9	1.8	1.6	0.9	0.7
Vigolo Vattaro	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5

Tabella 4.4: Velocità del vento e parametri di Weibull in estate, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Ala	2.3	2.1	2.5	2.2	1.7	1.3
Arco	2.1	2.0	2.3	2.2	1.5	1.4
Bezzecca	1.4	1.5	1.5	1.7	1.7	1.8
Borgo	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2
Caldes	1.5	1.9	1.7	2.1	1.5	1.7
Cavedine	1.5	1.3	1.6	1.5	1.6	1.5
Cembra	1.6	1.4	1.8	1.5	1.4	1.3
Cles	1.0	1.3	1.1	1.4	1.0	1.2
Denno	1.3	1.4	1.3	1.6	1.2	1.3
Faedo	1.4	1.5	1.6	1.6	1.5	1.3
Fondo	2.4	2.3	2.5	2.6	1.3	1.7
Lavazè	1.9	1.8	2.1	2.0	1.7	1.7
Lomaso	1.4	1.5	1.4	1.2	1.0	0.7
Paneveggio	1.2	1.0	1.3	1.1	1.5	1.3
Polsa	2.3	2.0	2.5	2.1	1.4	1.2
Rabbi	1.6	1.4	1.7	1.6	1.4	1.5
Riva del Garda	2.5	2.4	2.6	2.4	1.2	1.0
Ronzo Chienis	2.0	1.9	2.3	2.1	1.9	2.1
Rovereto	2.0	1.7	2.2	1.9	1.5	1.2
San Michele	2.5	2.4	2.4	2.6	1.1	1.4
Telve	1.4	1.5	1.5	1.7	1.3	1.4
Trento Sud	1.9	2.0	2.0	1.9	1.1	0.9
Vigolo Vattaro	1.1	1.2	1.2	1.3	1.6	1.8

Tabella 4.5: Velocità del vento e parametri di Weibull in autunno, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Ala	1.4	1.8	1.4	1.9	1.1	1.1
Arco	1.3	1.3	1.4	1.7	1.2	1.2
Bezzecca	1.0	1.0	1.0	1.1	1.5	1.5
Borgo	0.7	0.7	0.8	0.7	1.1	1.1
Caldes	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3
Cavedine	0.9	0.9	0.9	1.0	1.3	1.4
Cembra	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	0.9
Cles	0.8	0.6	0.8	0.5	0.9	0.8
Denno	0.9	0.8	0.9	0.8	1.0	1.1
Faedo	0.9	0.9	1.0	0.9	1.1	1.0
Fondo	1.9	1.7	1.9	1.8	1.1	1.0
Lavazè	1.2	1.3	1.3	1.5	1.4	1.4
Lomaso	0.9	0.7	0.8	0.6	0.8	0.7
Paneveggio	0.8	0.9	0.8	1.0	1.2	1.3
Polsa	1.4	1.4	1.3	1.4	1.0	0.9
Rabbi	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.5
Riva del Garda	1.6	1.7	1.6	1.7	0.9	1.0
Ronzo Chienis	1.3	1.4	1.3	1.6	1.4	1.5
Rovereto	1.1	1.3	1.1	1.4	1.1	1.1
San Michele	1.4	1.5	1.0	1.6	0.8	1.1
Telve	0.9	1.0	0.9	1.1	1.1	1.2
Trento Sud	1.2	1.1	1.2	0.8	0.8	0.6
Vigolo Vattaro	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2	1.4

Tabella 4.6: Velocità del vento e parametri di Weibull annuali, calcolati a 25 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.2	2.5	1.4
Arco	2.0	2.2	1.3
Bezzecca	1.5	1.7	1.5
Borgo	1.2	1.3	1.1
Caldes	1.6	1.7	1.4
Cavedine	1.3	1.5	1.3
Cembra	1.6	1.8	1.2
Cles	1.1	1.2	1.0
Denno	1.3	1.4	1.1
Faedo	1,4	1.5	1.1
Fondo	2.5	2.8	1.3
Lavazè	1.9	2.1	1.5
Lomaso	1.4	1.4	0.9
Paneveggio	1.2	1.3	1.4
Polsa	2.2	2.3	1.1
Rabbi	1.6	1.8	1.3
Riva del Garda	2.5	2.6	1.0
Ronzo Chienis	1.9	2.1	1.6
Rovereto	1.9	2.1	1.2
San Michele	2.3	2.4	1.1
Telve	1.4	1.5	1.1
Trento Sud	1.9	1.9	0.9
Vigolo Vattaro	1.2	1.4	1.5

Tabella 4.7: Velocità del vento e parametri di Weibull in inverno, calcolati a 25 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	1.5	1.4	1.0
Arco	1.3	1.3	1.1
Bezzecca	1.1	1.1	1.2
Borgo	0.8	0.8	1.0
Caldes	1.2	1.2	1.2
Cavedine	0.8	0.8	1.1
Cembra	1.2	1.2	0.9
Cles	0.9	0.9	0.8
Denno	1.0	0.9	0.9
Faedo	1.0	1.0	0.9
Fondo	2.1	2.1	1.1
Lavazè	1.3	1.3	1.2
Lomaso	0.9	0.8	0.8
Paneveggio	0.8	0.8	1.2
Polsa	1.3	1.2	0.9
Rabbi	1.2	1.2	1.2
Riva del Garda	1.6	1.5	0.8
Ronzo Chienis	1.1	1.1	1.4
Rovereto	1.1	1.0	1.0
San Michele	1.5	1.1	0.8
Telve	0.9	0.9	1.0
Trento Sud	1.3	1.2	0.7
Vigolo Vattaro	1.0	0.9	1.1

Tabella 4.8: Velocità del vento e parametri di Weibull in primavera, calcolati a 25 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.7	2.8	1.2
Arco	2.5	2.6	1.2
Bezzecca	1.8	1.9	1.4
Borgo	1.5	1.6	1.0
Caldes	1.8	1.9	1.2
Cavedine	1.7	1.8	1.2
Cembra	2.0	2.2	1.2
Cles	1.3	1.2	0.8
Denno	1.5	1.5	0.9
Faedo	1.7	1.8	1.1
Fondo	2.9	2.9	1.0
Lavazè	2.3	2.4	1.3
Lomaso	1.7	1.7	0.8
Paneveggio	1.5	1.5	1.3
Polsa	2.7	2.7	1.1
Rabbi	1.8	1.9	1.2
Riva del Garda	3.1	3.0	1.0
Ronzo Chienis	2.4	2.5	1.6
Rovereto	2.4	2.5	1.1
San Michele	2.9	2.5	0.9
Telve	1.8	1.8	1.1
Trento Sud	2.2	2.3	0.9
Vigolo Vattaro	1.5	1.6	1.4

Tabella 4.9: Velocità del vento e parametri di Weibull in estate, calcolati a 25 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.9	3.3	1.6
Arco	2.7	3.0	1.4
Bezzecca	1.8	2.0	1.6
Borgo	1.6	1.7	1.2
Caldes	1.9	2.0	1.4
Cavedine	1.8	2.0	1.4
Cembra	2.1	2.3	1.4
Cles	1.3	1.4	0.9
Denno	1.6	1.7	1.1
Faedo	1.7	1.9	1.3
Fondo	2.9	3.1	1.3
Lavazè	2.4	2.6	1.6
Lomaso	1.8	1.9	1.0
Paneveggio	1.5	1.7	1.5
Polsa	3.0	3.2	1.3
Rabbi	2.0	2.1	1.3
Riva del Garda	3.3	3.4	1.1
Ronzo Chienis	2.6	2.9	1.9
Rovereto	2.7	2.9	1.4
San Michele	3.2	3.0	1.0
Telve	1.8	2.0	1.3
Trento Sud	2.4	2.6	1.0
Vigolo Vattaro	1.5	1.6	1.6

Tabella 4.10: Velocità del vento e parametri di Weibull in autunno, calcolati a 25 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	1.7	1.7	1.1
Arco	1.6	1.7	1.2
Bezzecca	1.2	1.3	1.5
Borgo	0.9	0.9	1.1
Caldes	1.3	1.4	1.2
Cavedine	1.0	1.1	1.2
Cembra	1.3	1.3	1.1
Cles	1.0	1.0	0.8
Denno	1.1	1.1	1.0
Faedo	1.1	1.1	1.1
Fondo	2.2	2.2	1.1
Lavazè	1.5	1.5	1.4
Lomaso	1.1	1.0	0.9
Paneveggio	0.9	1.0	1.3
Polsa	1.7	1.6	1.0
Rabbi	1.3	1.4	1.2
Riva del Garda	2.1	2.0	0.9
Ronzo Chienis	1.5	1.6	1.5
Rovereto	1.4	1.4	1.1
San Michele	1.6	1.2	0.8
Telve	1.1	1.1	1.1
Trento Sud	1.5	1.5	0.8
Vigolo Vattaro	1.0	1.0	1.2

Tabella 4.11: Velocità del vento e parametri di Weibull annuali, calcolati a 50 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.5	2.5	1.4
Arco	2.2	2.2	1.3
Bezzecca	1.6	1.6	1.5
Borgo	1.3	1.3	1.1
Caldes	1.7	1.7	1.4
Cavedine	1.5	1.5	1.3
Cembra	1.7	1.7	1.2
Cles	1.1	1.1	1.0
Denno	1.3	1.3	1.1
Faedo	1.4	1.4	1.1
Fondo	2.6	2.6	1.4
Lavazè	2.0	2.0	1.5
Lomaso	1.3	1.3	0.9
Paneveggio	1.3	1.3	1.4
Polsa	2.3	2.3	1.2
Rabbi	1.8	1.7	1.3
Riva del Garda	2.5	2.5	1.0
Ronzo Chienis	2.1	2.1	1.6
Rovereto	2.0	2.0	1.2
San Michele	2.3	2.3	1.1
Telve	1.5	1.5	1.2
Trento Sud	1.8	1.8	0.9
Vigolo Vattaro	1.3	1.3	1.5

Tabella 4.12: Velocità del vento e parametri di Weibull in inverno, calcolati a 50 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	1.5	1.4	0.9
Arco	1.2	1.2	1.1
Bezzecca	1.1	1.1	1.2
Borgo	0.8	0.8	1.0
Caldes	1.2	1.2	1.2
Cavedine	0.8	0.8	1.1
Cembra	1.1	1.1	0.9
Cles	0.9	0.8	0.8
Denno	0.9	0.9	0.9
Faedo	0.9	0.9	0.8
Fondo	2.0	2.0	1.1
Lavazè	1.3	1.3	1.3
Lomaso	0.9	0.8	0.8
Paneveggio	0.8	0.8	1.2
Polsa	1.3	1.2	0.9
Rabbi	1.2	1.2	1.2
Riva del Garda	1.5	1.4	0.8
Ronzo Chienis	1.1	1.1	1.3
Rovereto	1.0	1.0	1.0
San Michele	1.4	1.1	0.8
Telve	0.9	0.9	1.0
Trento Sud	1.3	1.1	0.7
Vigolo Vattaro	0.9	0.8	1.1

Tabella 4.13: Velocità del vento e parametri di Weibull in primavera, calcolati a 50 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.7	2.7	1.2
Arco	2.4	2.5	1.2
Bezzecca	1.7	1.8	1.4
Borgo	1.5	1.6	1.1
Caldes	1.7	1.8	1.2
Cavedine	1.7	1.7	1.2
Cembra	1.9	2.0	1.2
Cles	1.2	1.2	0.8
Denno	1.4	1.4	0.9
Faedo	1.6	1.7	1.1
Fondo	2.7	2.7	1.1
Lavazè	2.2	2.3	1.4
Lomaso	1.6	1.5	0.9
Paneveggio	1.4	1.5	1.3
Polsa	2.7	2.7	1.1
Rabbi	1.8	1.9	1.2
Riva del Garda	2.9	2.8	1.0
Ronzo Chienis	2.3	2.4	1.6
Rovereto	2.3	2.3	1.1
San Michele	2.8	2.4	0.9
Telve	1.8	1.8	1.1
Trento Sud	2.0	2.1	0.9
Vigolo Vattaro	1.4	1.5	1.4

Tabella 4.14: Velocità del vento e parametri di Weibull in estate, calcolati a 50 m dal suolo.

<b>Stazione</b>	<b>Velocità media [m/s]</b>	<b>Fattore di scala <math>c</math> [m/s]</b>	<b>Fattore di forma <math>k</math></b>
Ala	2.9	3.2	1.6
Arco	2.6	2.9	1.5
Bezzecca	1.7	1.9	1.6
Borgo	1.6	1.7	1.3
Caldes	1.8	1.9	1.4
Cavedine	1.8	2.0	1.4
Cembra	1.9	2.1	1.4
Cles	1.2	1.3	1.0
Denno	1.5	1.5	1.1
Faedo	1.6	1.8	1.3
Fondo	2.7	2.9	1.3
Lavazè	2.3	2.5	1.7
Lomaso	1.7	1.7	1.0
Paneveggio	1.5	1.6	1.6
Polsa	2.9	3.1	1.4
Rabbi	2.0	2.1	1.3
Riva del Garda	3.1	3.2	1.1
Ronzo Chienis	2.5	2.8	1.9
Rovereto	2.5	2.7	1.4
San Michele	3.0	2.8	1.0
Telve	1.8	2.0	1.3
Trento Sud	2.2	2.4	1.1
Vigolo Vattaro	1.4	1.5	1.7

Tabella 4.15: Velocità del vento e parametri di Weibull in autunno, calcolati a 50 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	1.7	1.7	1.1
Arco	1.6	1.6	1.2
Bezzecca	1.2	1.3	1.5
Borgo	0.9	1.0	1.1
Caldes	1.3	1.3	1.2
Cavedine	1.0	1.1	1.2
Cembra	1.2	1.2	1.1
Cles	0.9	0.9	0.8
Denno	1.0	1.0	1.0
Faedo	1.0	1.1	1.0
Fondo	2.1	2.1	1.1
Lavazè	1.4	1.5	1.4
Lomaso	1.0	1.0	0.9
Paneveggio	0.9	1.0	1.3
Polsa	1.7	1.7	1.0
Rabbi	1.3	1.4	1.2
Riva del Garda	2.0	1.9	0.9
Ronzo Chienis	1.5	1.6	1.4
Rovereto	1.4	1.3	1.1
San Michele	1.6	1.2	0.8
Telve	1.1	1.1	1.1
Trento Sud	1.4	1.4	0.8
Vigolo Vattaro	0.9	0.9	1.2

Tabella 4.16: Velocità del vento e parametri di Weibull annuali, calcolati a 75 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.3	2.6	1.3
Arco	2.1	2.4	1.3
Bezzecca	1.5	1.7	1.4
Borgo	1.3	1.4	1.1
Caldes	1.6	1.7	1.3
Cavedine	1.4	1.5	1.3
Cembra	1.7	1.8	1.1
Cles	1.1	1.2	0.9
Denno	1.3	1.4	1.0
Faedo	1.4	1.5	1.0
Fondo	2.7	3.0	1.3
Lavazè	1.8	2.1	1.3
Lomaso	1.5	1.5	0.9
Paneveggio	1.3	1.4	1.4
Polsa	2.2	2.3	1.1
Rabbi	1.6	1.8	1.3
Riva del Garda	2.6	2.7	1.0
Ronzo Chienis	1.9	2.2	1.6
Rovereto	2.0	2.2	1.2
San Michele	2.4	2.5	1.1
Telve	1.5	1.6	1.1
Trento Sud	2.0	2.1	0.9
Vigolo Vattaro	1.3	1.4	1.4

Tabella 4.17: Velocità del vento e parametri di Weibull in inverno, calcolati a 75 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	1.6	1.5	0.9
Arco	1.4	1.3	1.0
Bezzecca	1.2	1.2	1.1
Borgo	0.9	0.8	0.9
Caldes	1.3	1.3	1.0
Cavedine	0.8	0.9	1.1
Cembra	1.2	1.2	0.9
Cles	1.0	0.9	0.7
Denno	1.0	1.0	0.9
Faedo	1.0	1.0	0.8
Fondo	2.3	2.3	1.1
Lavazè	1.3	1.3	1.1
Lomaso	1.0	0.9	0.8
Paneveggio	0.9	0.9	1.2
Polsa	1.3	1.2	0.8
Rabbi	1.3	1.3	1.2
Riva del Garda	1.7	1.6	0.8
Ronzo Chienis	1.2	1.2	1.3
Rovereto	1.2	1.1	0.9
San Michele	1.6	1.2	0.8
Telve	1.0	1.0	0.9
Trento Sud	1.5	1.3	0.6
Vigolo Vattaro	1.0	0.9	1.0

Tabella 4.18: Velocità del vento e parametri di Weibull in primavera, calcolati a 75 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	2.8	2.9	1.2
Arco	2.6	2.7	1.2
Bezzecca	1.8	1.9	1.3
Borgo	1.6	1.6	1.0
Caldes	1.8	1.9	1.1
Cavedine	1.8	1.9	1.2
Cembra	2.1	2.2	1.1
Cles	1.3	1.2	0.7
Denno	1.6	1.5	0.9
Faedo	1.7	1.8	1.1
Fondo	3.0	3.0	1.1
Lavazè	2.2	2.4	1.2
Lomaso	1.8	1.7	0.8
Paneveggio	1.6	1.6	1.3
Polsa	2.7	2.7	1.0
Rabbi	1.9	1.9	1.1
Riva del Garda	3.2	3.2	1.0
Ronzo Chienis	2.4	2.6	1.5
Rovereto	2.5	2.5	1.1
San Michele	3.1	2.6	0.9
Telve	1.9	1.9	1.1
Trento Sud	2.3	2.4	0.9
Vigolo Vattaro	1.6	1.7	1.4

Tabella 4.19: Velocità del vento e parametri di Weibull in estate, calcolati a 75 m dal suolo.

<b>Stazione</b>	<b>Velocità media [m/s]</b>	<b>Fattore di scala <math>c</math> [m/s]</b>	<b>Fattore di forma <math>k</math></b>
Ala	3.0	3.4	1.5
Arco	2.8	3.1	1.4
Bezzecca	1.9	2.0	1.6
Borgo	1.7	1.8	1.2
Caldes	1.9	2.0	1.3
Cavedine	1.9	2.1	1.4
Cembra	2.1	2.3	1.3
Cles	1.3	1.3	0.9
Denno	1.7	1.7	1.1
Faedo	1.8	1.9	1.3
Fondo	3.1	3.2	1.3
Lavazè	2.3	2.6	1.5
Lomaso	1.9	1.9	1.0
Paneveggio	1.6	1.8	1.5
Polsa	3.0	3.1	1.2
Rabbi	2.0	2.2	1.3
Riva del Garda	3.5	3.5	1.1
Ronzo Chienis	2.6	2.9	1.8
Rovereto	2.8	3.0	1.4
San Michele	3.3	3.1	1.0
Telve	2.0	2.1	1.3
Trento Sud	2.5	2.7	1.0
Vigolo Vattaro	1.5	1.7	1.6

Tabella 4.20: Velocità del vento e parametri di Weibull in autunno, calcolati a 75 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]	Fattore di scala $c$ [m/s]	Fattore di forma $k$
Ala	1.8	1.8	1.0
Arco	1.7	1.8	1.1
Bezzecca	1.3	1.4	1.4
Borgo	1.0	1.0	1.1
Caldes	1.4	1.4	1.1
Cavedine	1.1	1.1	1.2
Cembra	1.3	1.4	1.0
Cles	1.0	1.0	0.8
Denno	1.1	1.1	1.0
Faedo	1.1	1.2	1.0
Fondo	2.3	2.4	1.1
Lavazè	1.5	1.6	1.2
Lomaso	1.2	1.1	0.8
Paneveggio	1.0	1.1	1.3
Polsa	1.7	1.7	0.9
Rabbi	1.4	1.5	1.1
Riva del Garda	2.2	2.2	0.9
Ronzo Chienis	1.6	1.7	1.4
Rovereto	1.5	1.5	1.0
San Michele	1.8	1.3	0.8
Telve	1.2	1.2	1.1
Trento Sud	1.6	1.6	0.8
Vigolo Vattaro	1.0	1.0	1.2

Con riferimento al profilo verticale del vento si può notare, sia dalle tabelle precedenti che dalle mappe riportate nel seguito, come la maggiore variabilità sulla verticale si abbia vicino al suolo, mentre le differenze di velocità stimate tra 50 e 75 m tendono ad assottigliarsi. Questo è ovviamente correlato alla condizione di aderenza al suolo del profilo di vento, la cui forma è fortemente condizionata dalla scabrezza locale. La forte variabilità di scabrezza (ordini di grandezza) che esiste per esempio tra zone di ghiacciaio e boschi di alto fusto, concorrono a spiegare la differente forma del profilo di vento sopra al suolo. A titolo di esempio in Figura 4.1 è riportato l'esempio teorico della variazione del profilo di vento logaritmico (valido per condizioni ideali di atmosfera neutra) al variare della scabrezza del suolo e a parità di tutti gli altri parametri.

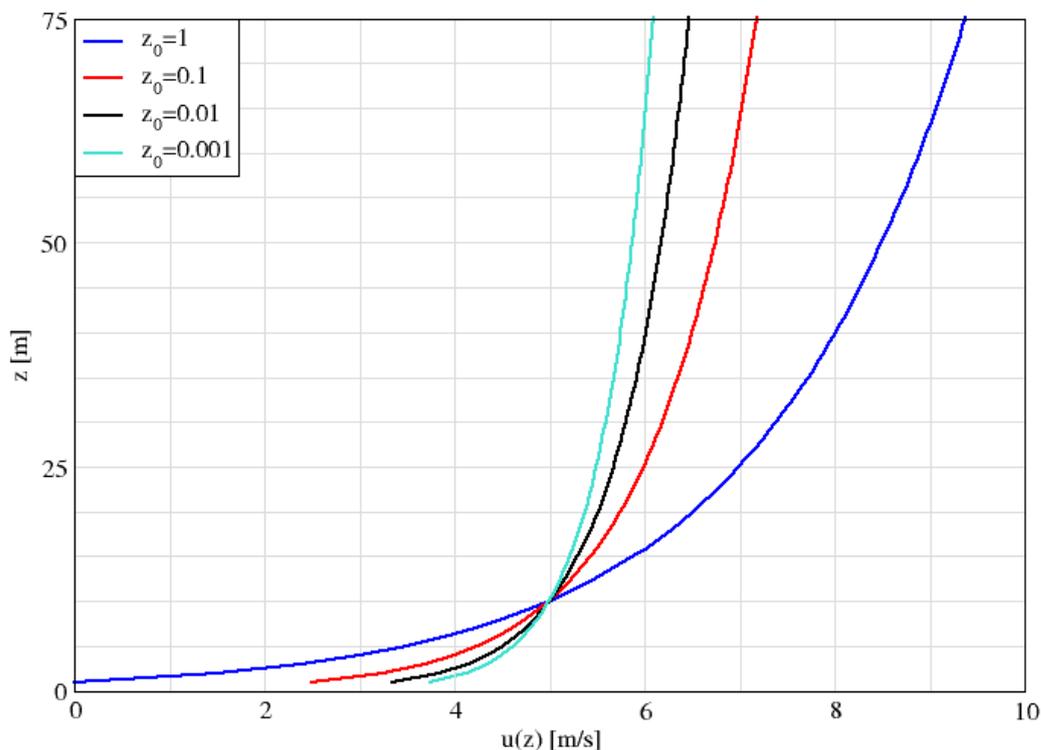


Figura 4.1: Variazione del profilo di vento sulla verticale in funzione della scabrezza del terreno.

#### 4.2 Mappatura

Nel seguito sono riportate le mappe di velocità media, parametri di Weibull (forma e scala) per le quattro altezze di riferimento adottate (10, 25, 50 e 75 m dal suolo). Le seguenti mappe sono quelle ottenute dal post-processamento dei dati al termine della catena modellistica, corrispondenti quindi all'output del modello CALMET alla risoluzione spaziale orizzontale di 500 m.

I medesimi output sintetici sono forniti in formato PDF, nonché come immagine TIFF georeferenziata utilizzabile in software GIS per l'interrogazione della mappa.

Le mappe mostrano come generalmente le velocità del vento più elevate siano localizzate nelle aree in quota, soprattutto nella parte occidentale della Provincia. Inoltre anche i monti al confine con la Lessinia presentano velocità del vento piuttosto alte, pur non essendo particolarmente elevati. Per quanto riguarda le zone di fondovalle si può notare come le velocità del vento più elevate si trovino al di sopra del lago di Garda, nella zona a nord di Trento, dove giunge l'Orca del Garda dalle valli dei Laghi e nella parte più meridionale della val d'Adige e della val Giudicarie. Tuttavia la validazione dei risultati modellistici (Capitolo 5), ha evidenziato come le velocità del vento simulate siano sovrastimate a Storo, nella parte meridionale della val Giudicarie. Velocità del vento molto basse sono invece presenti in Valsugana, in val di Non e in val di Fiemme.

La velocità del vento è più elevata in primavera e in estate rispetto all'autunno e all'inverno, soprattutto nei fondovalle. Questo è dovuto alla presenza nella stagione calda di circolazioni forzate termicamente, soprattutto venti di valle, che influenzano profondamente la climatologia dei fondovalle trentini. Infatti si può notare come in inverno la velocità media del vento sia molto bassa in tutta la Provincia, ad eccezione delle zone più in quota.

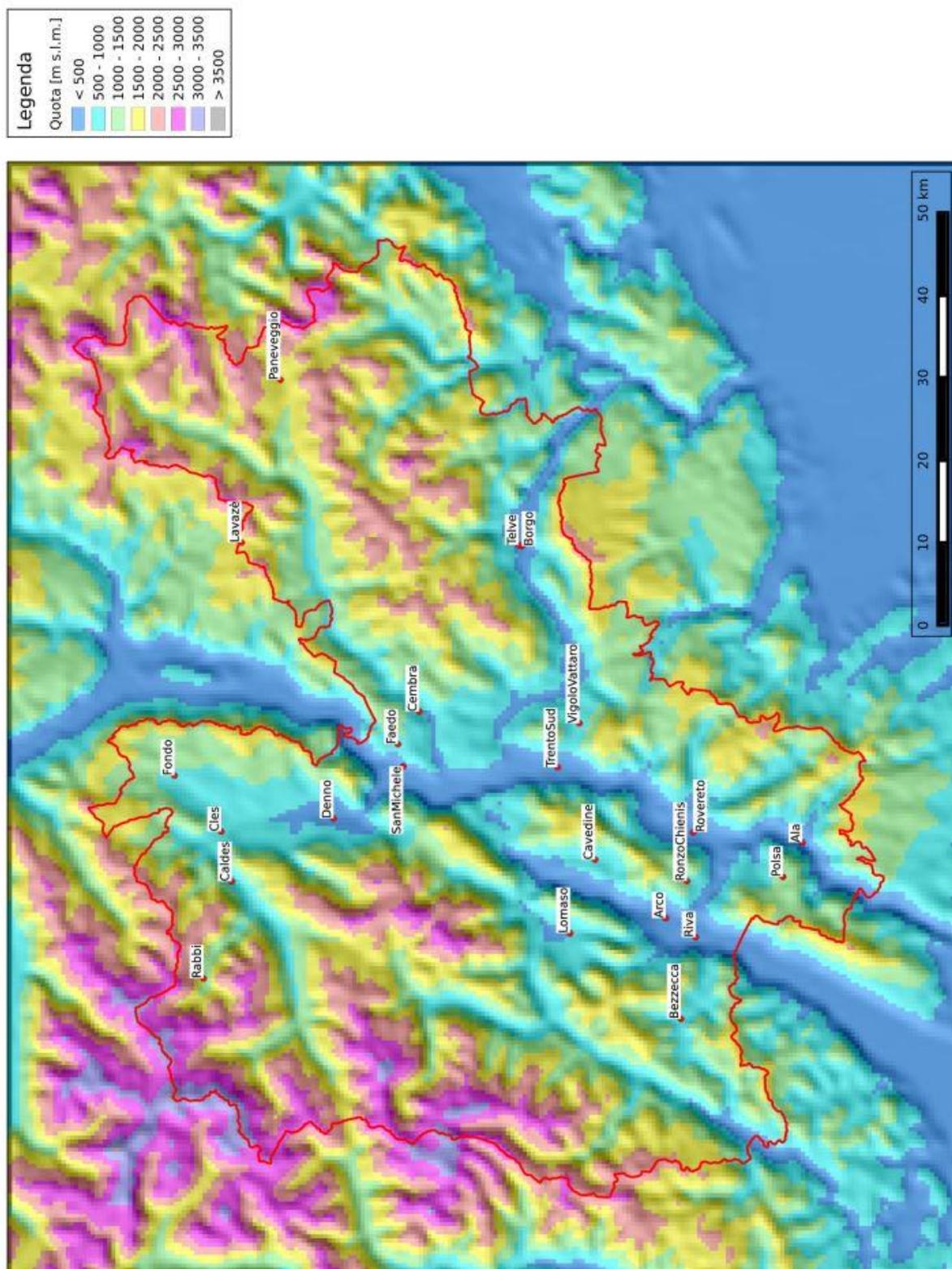


Figura 4.2: Modello digitale del terreno dell'area di studio.

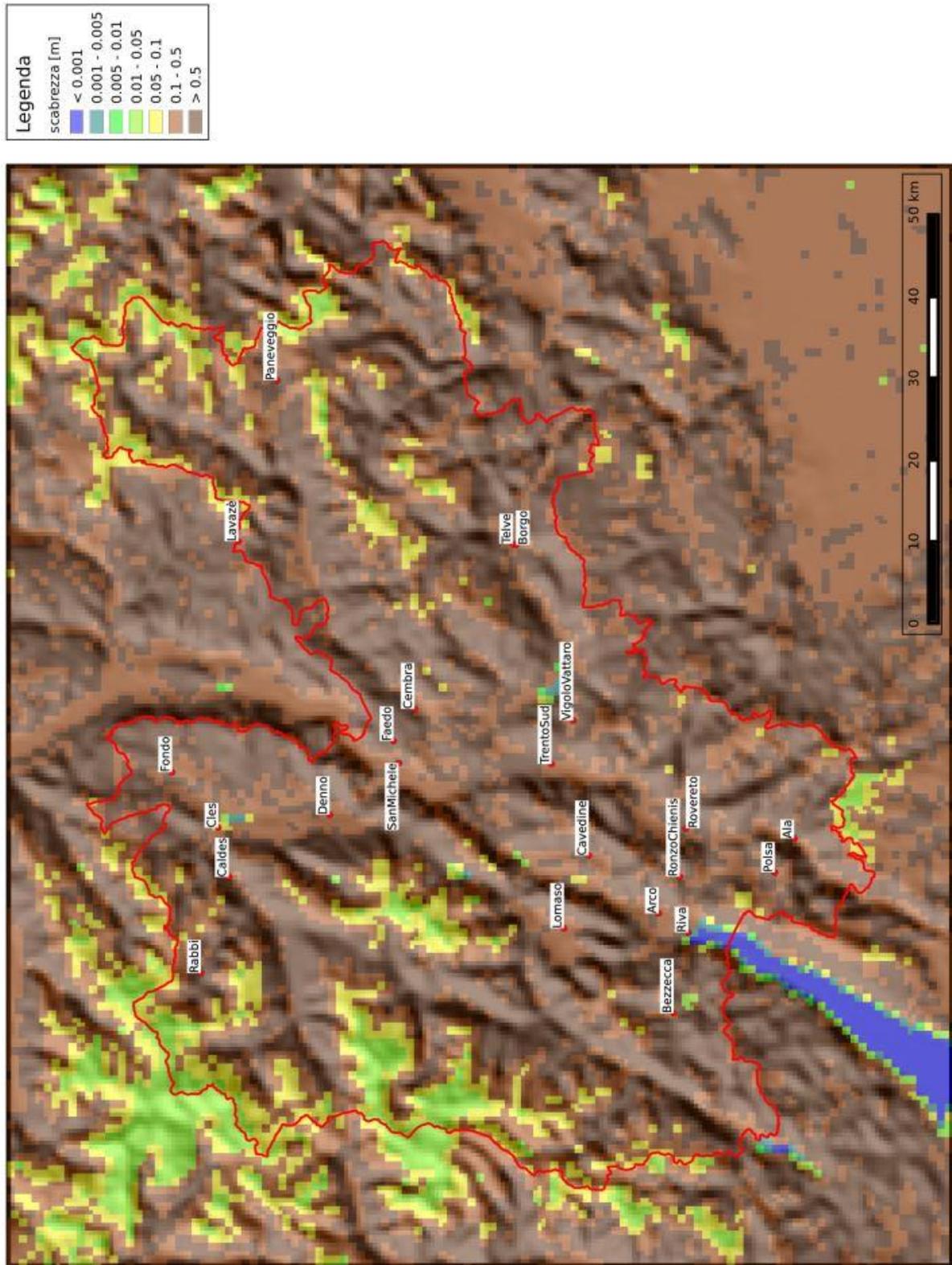


Figura 4.3: Mappa della scabrezza dell'area di studio.

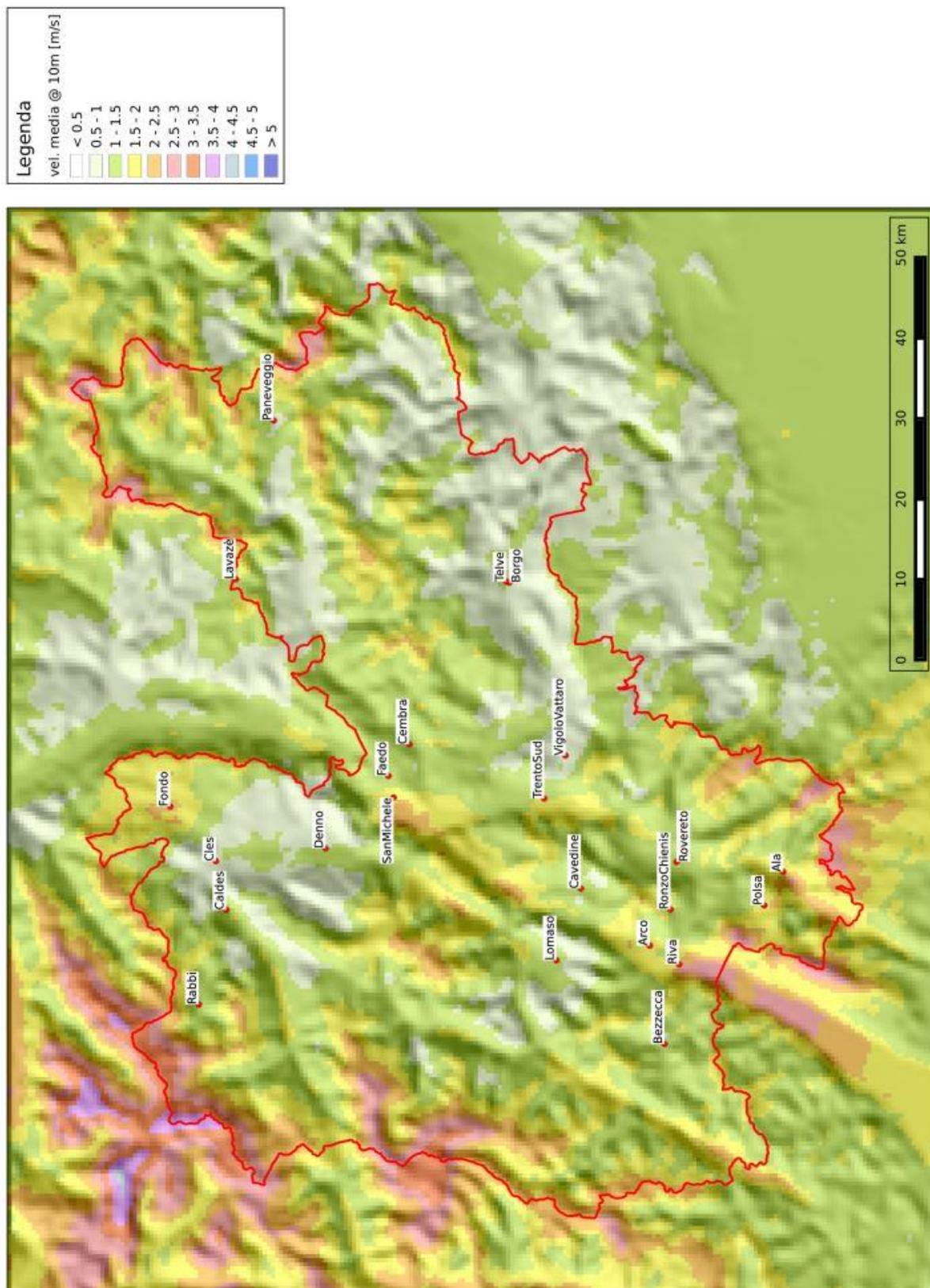


Figura 4.4: Velocità media annua a 10 m dal suolo.

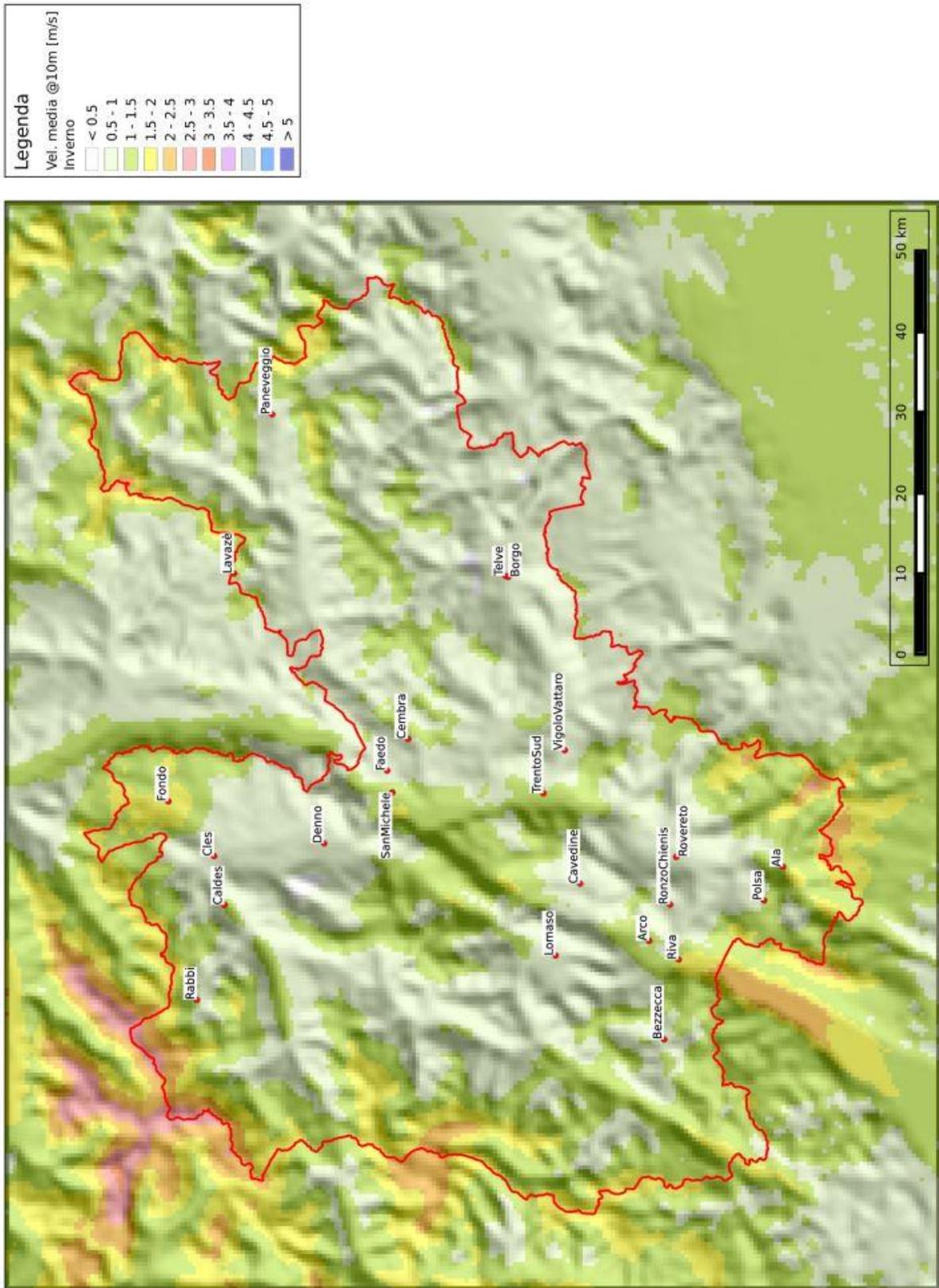


Figura 4.5: Velocità media in inverno a 10 m dal suolo.

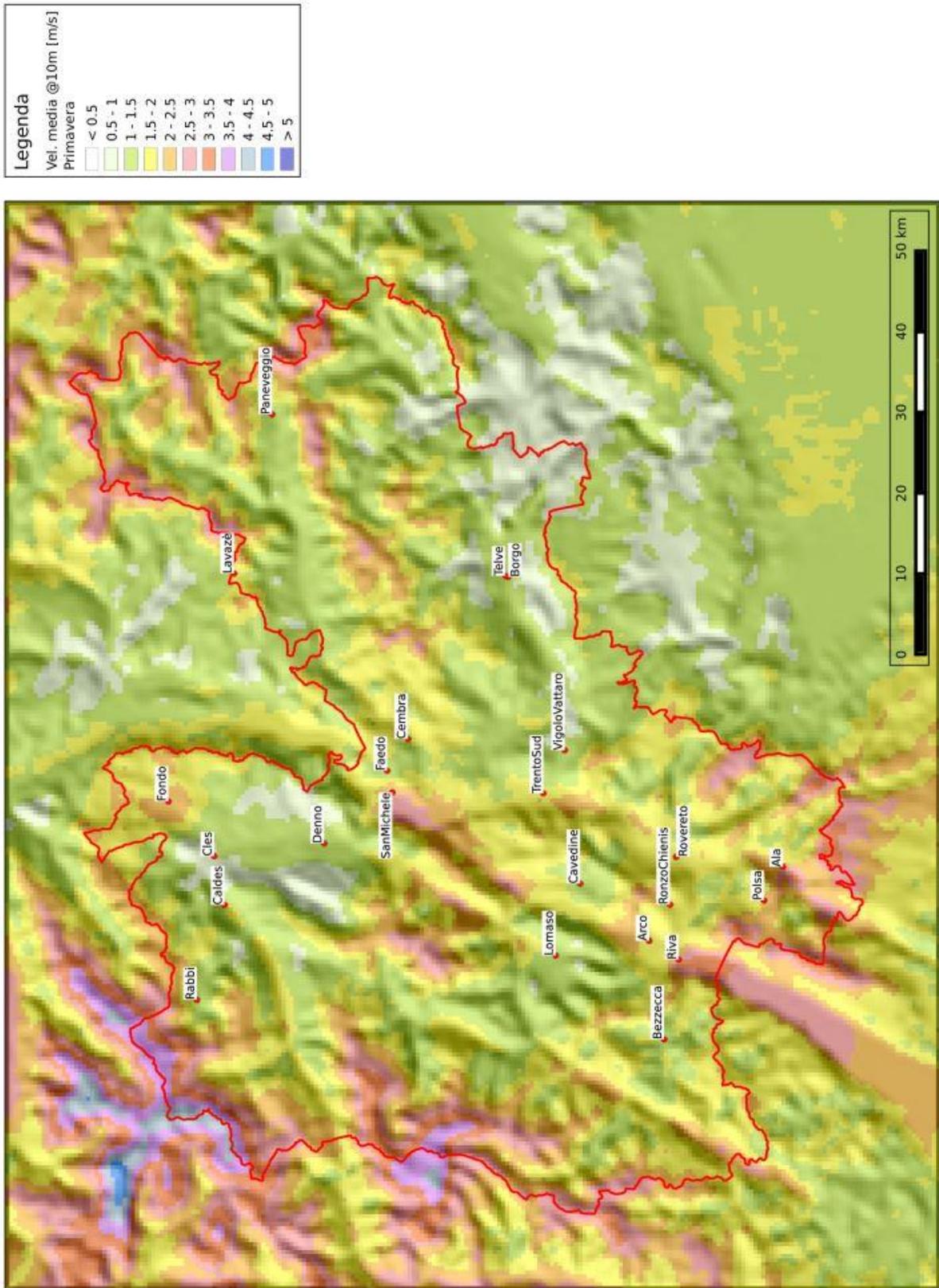


Figura 4.6: Velocità media in primavera a 10 m dal suolo.

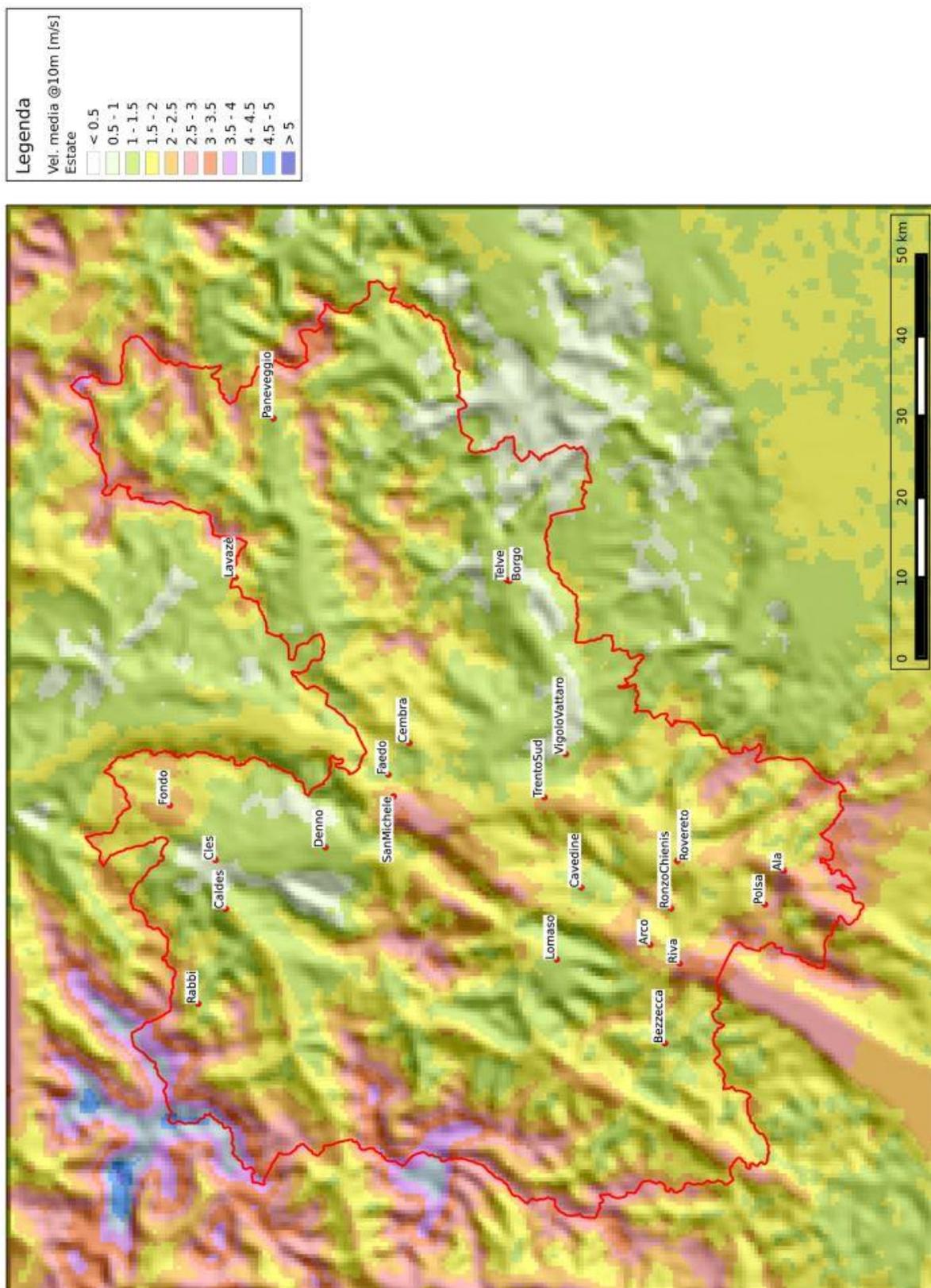


Figura 4.7: Velocità media in estate a 10 m dal suolo.

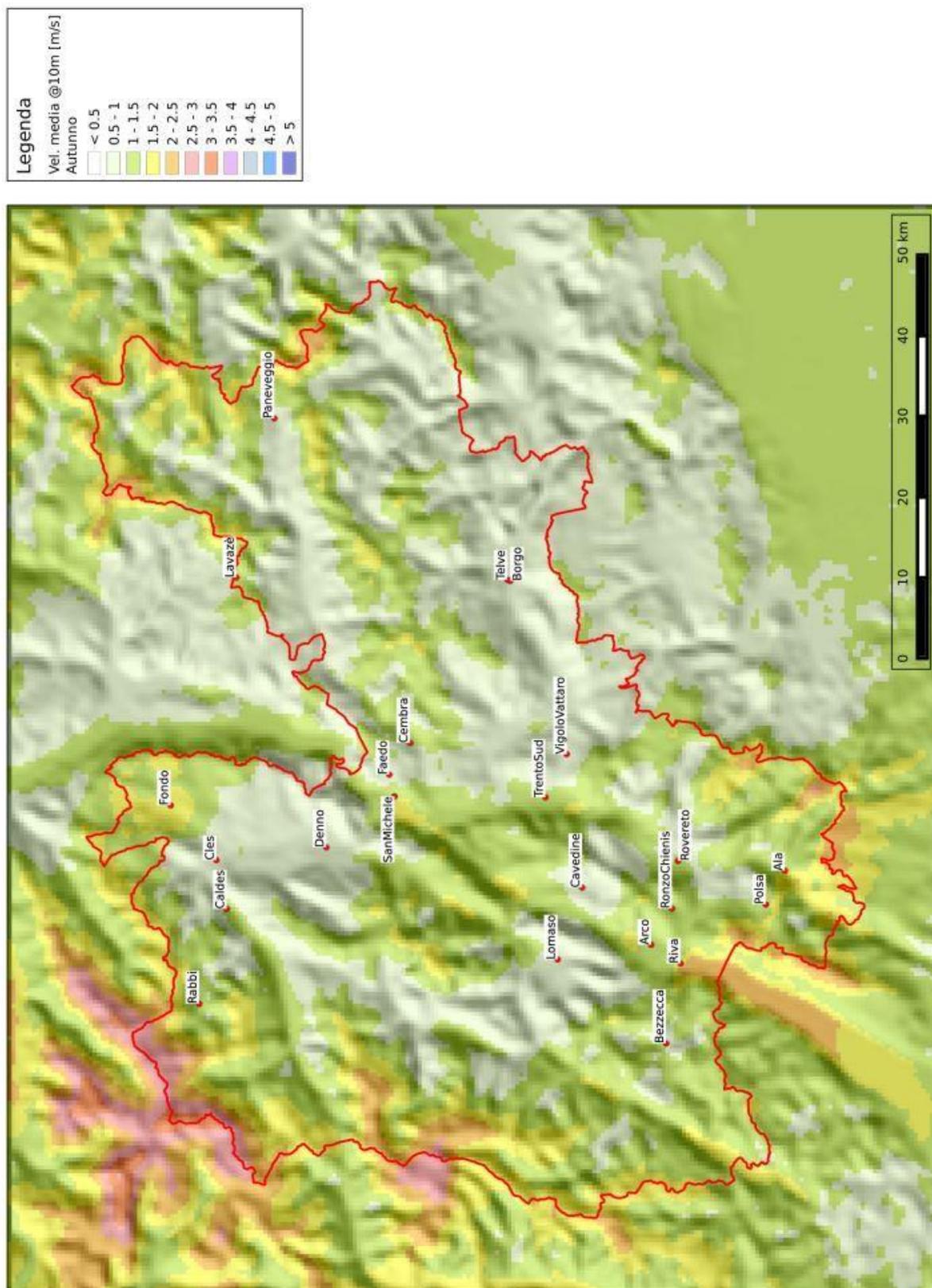


Figura 4.8: Velocità media in autunno a 10 m dal suolo.

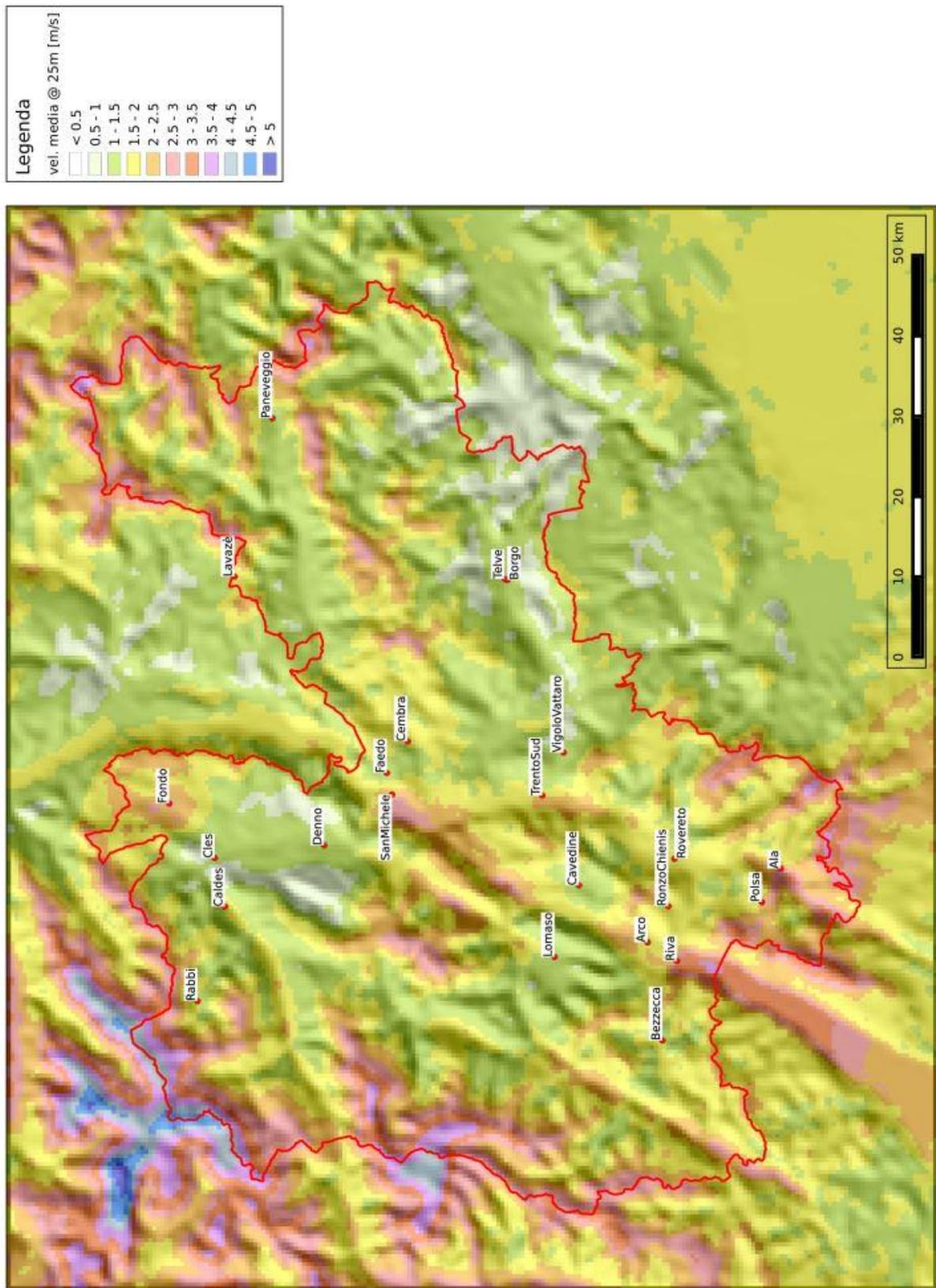


Figura 4.9: Velocità media annua a 25 m dal suolo.

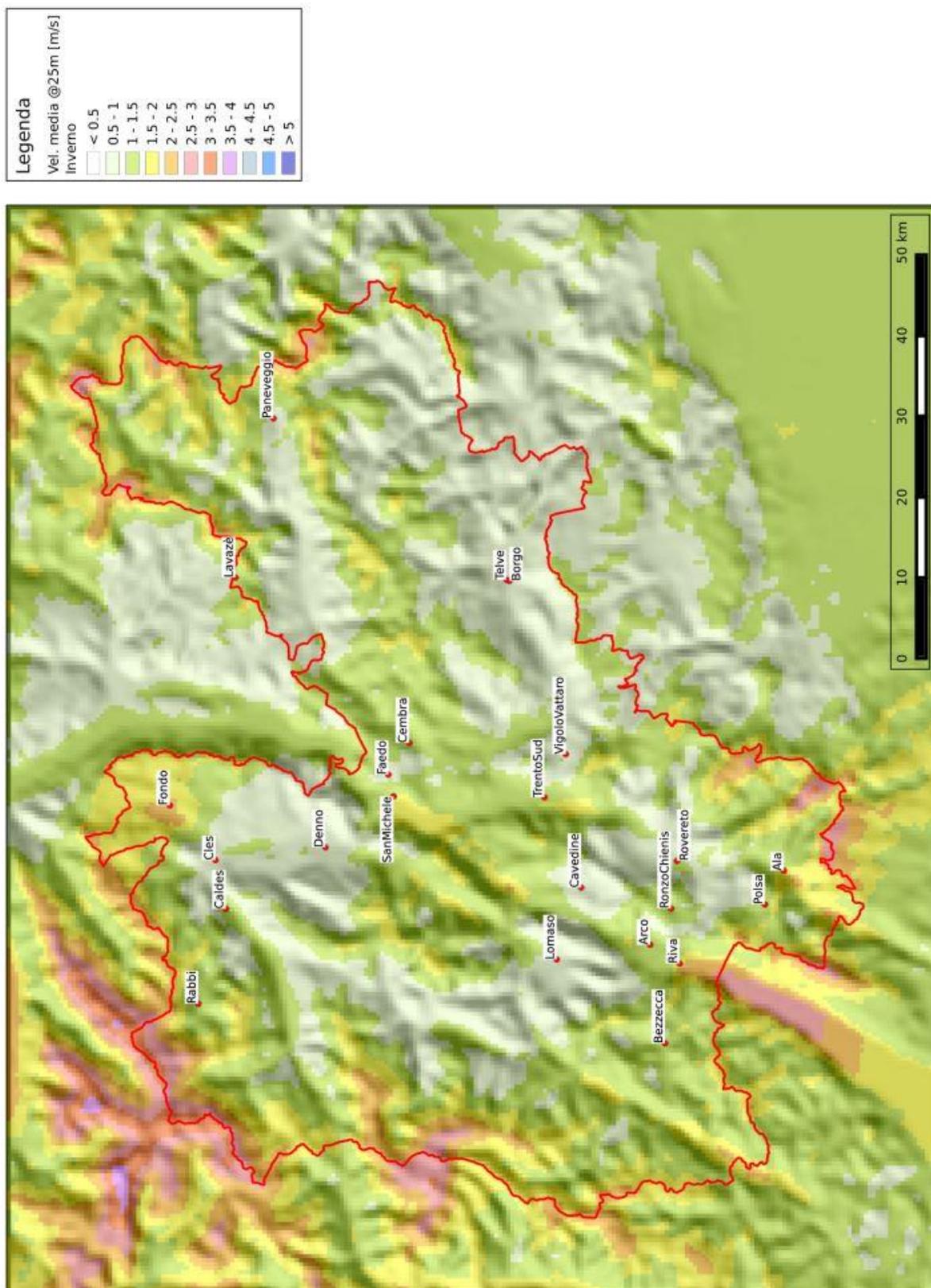


Figura 4.10: Velocità media in inverno a 25 m dal suolo.

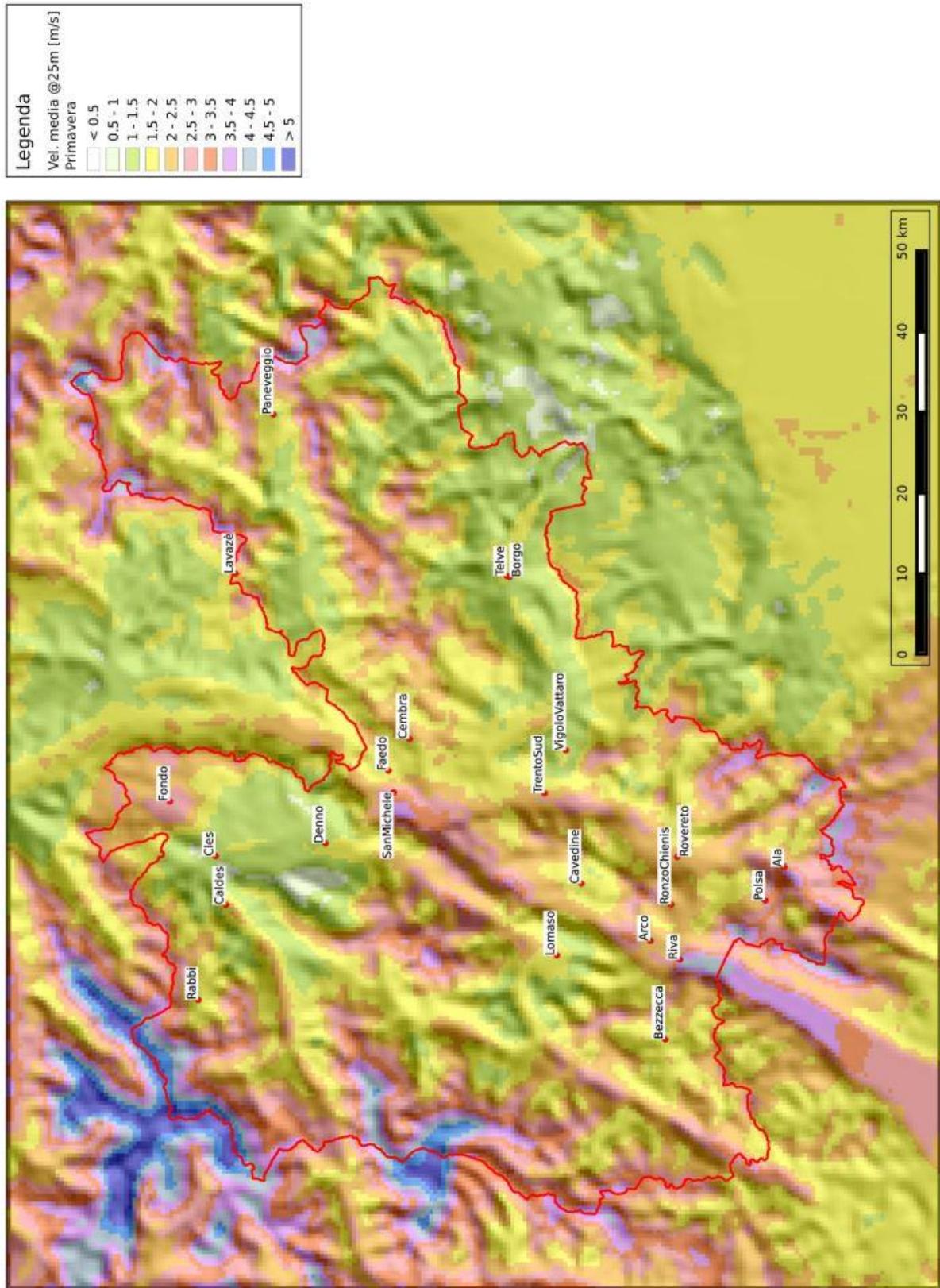


Figura 4.11: Velocità media in primavera a 25 m dal suolo.

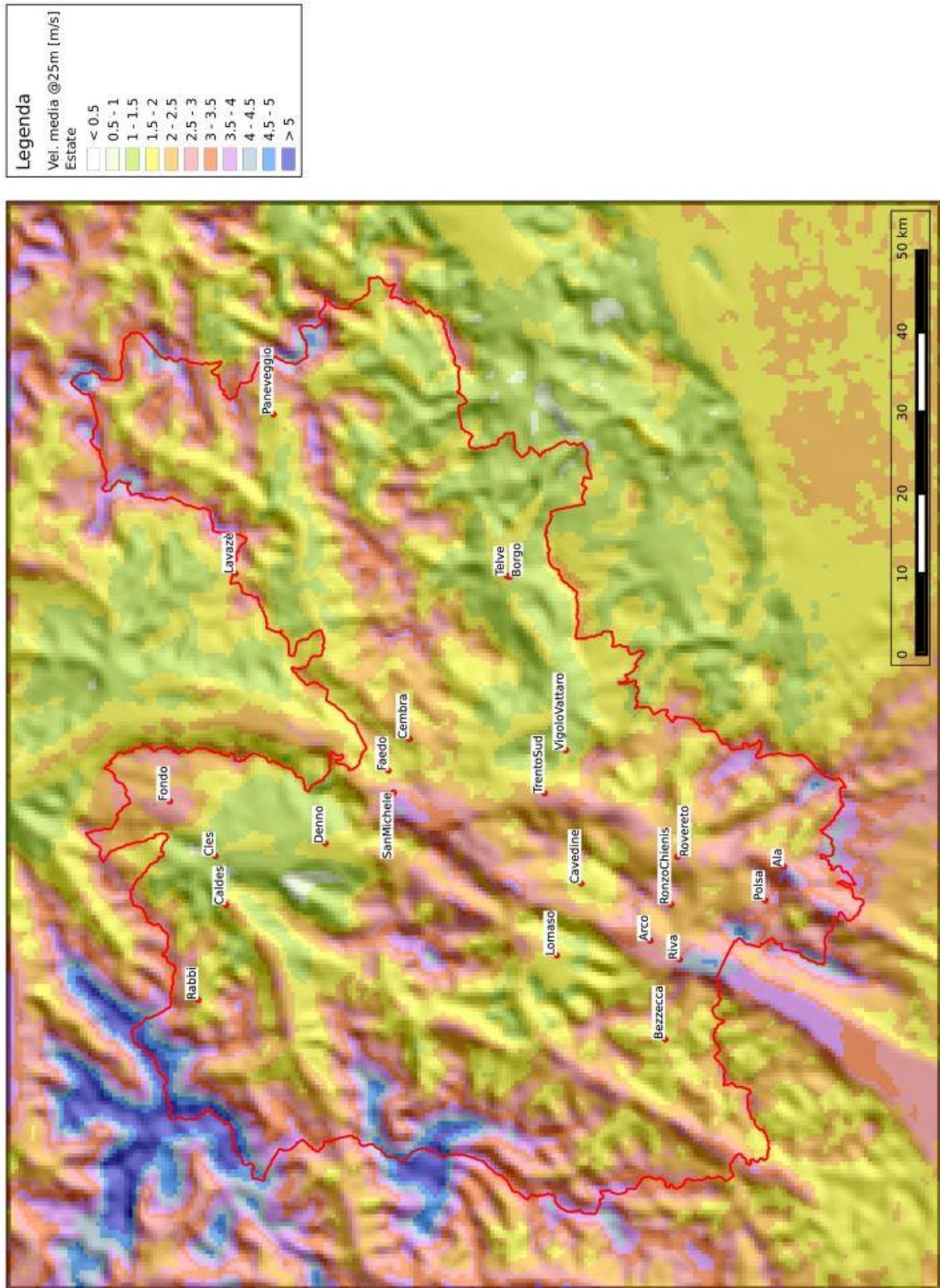


Figura 4.12: Velocità media in estate a 25 m dal suolo.

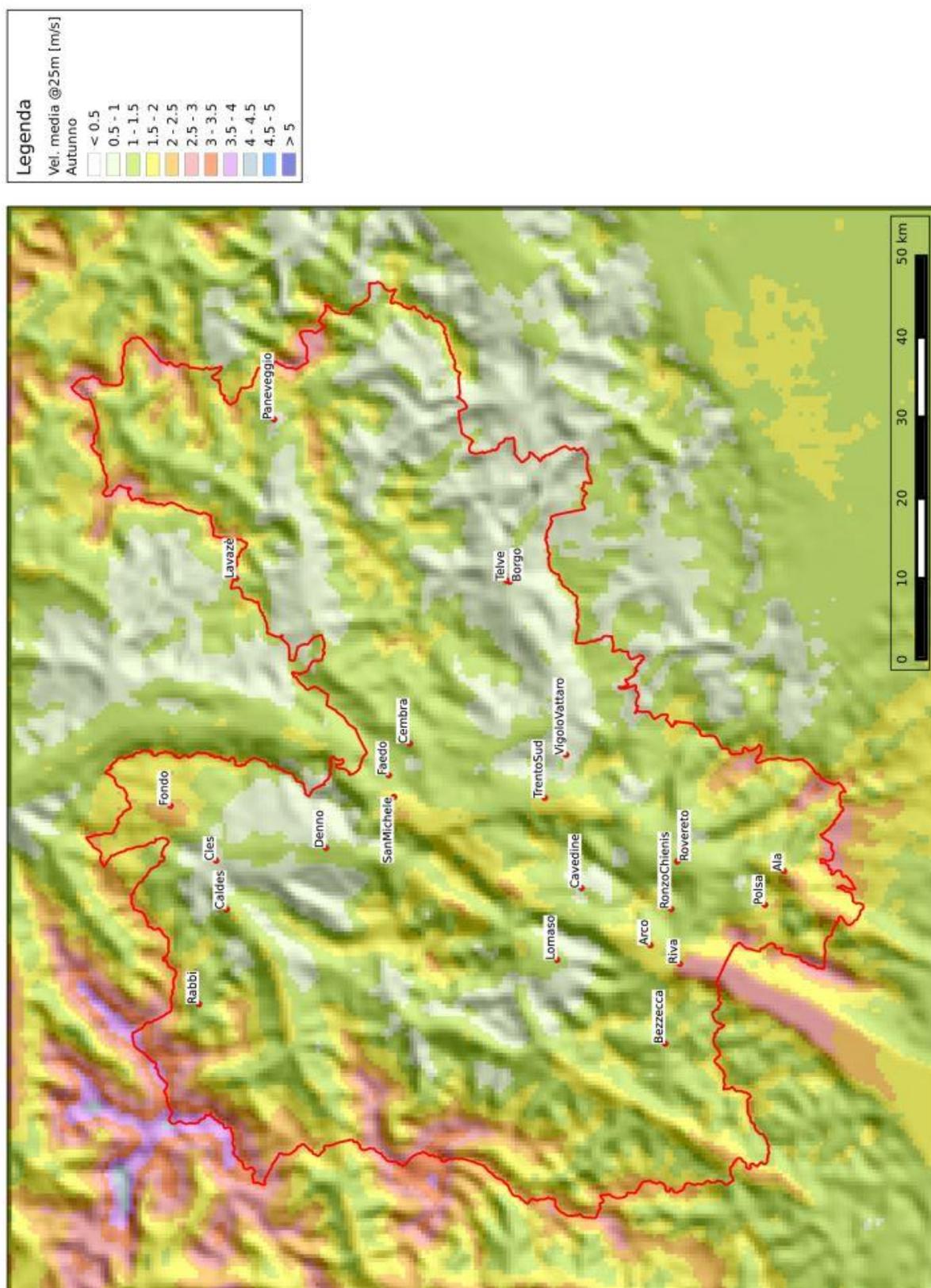


Figura 4.13: Velocità media in autunno a 25 m dal suolo.

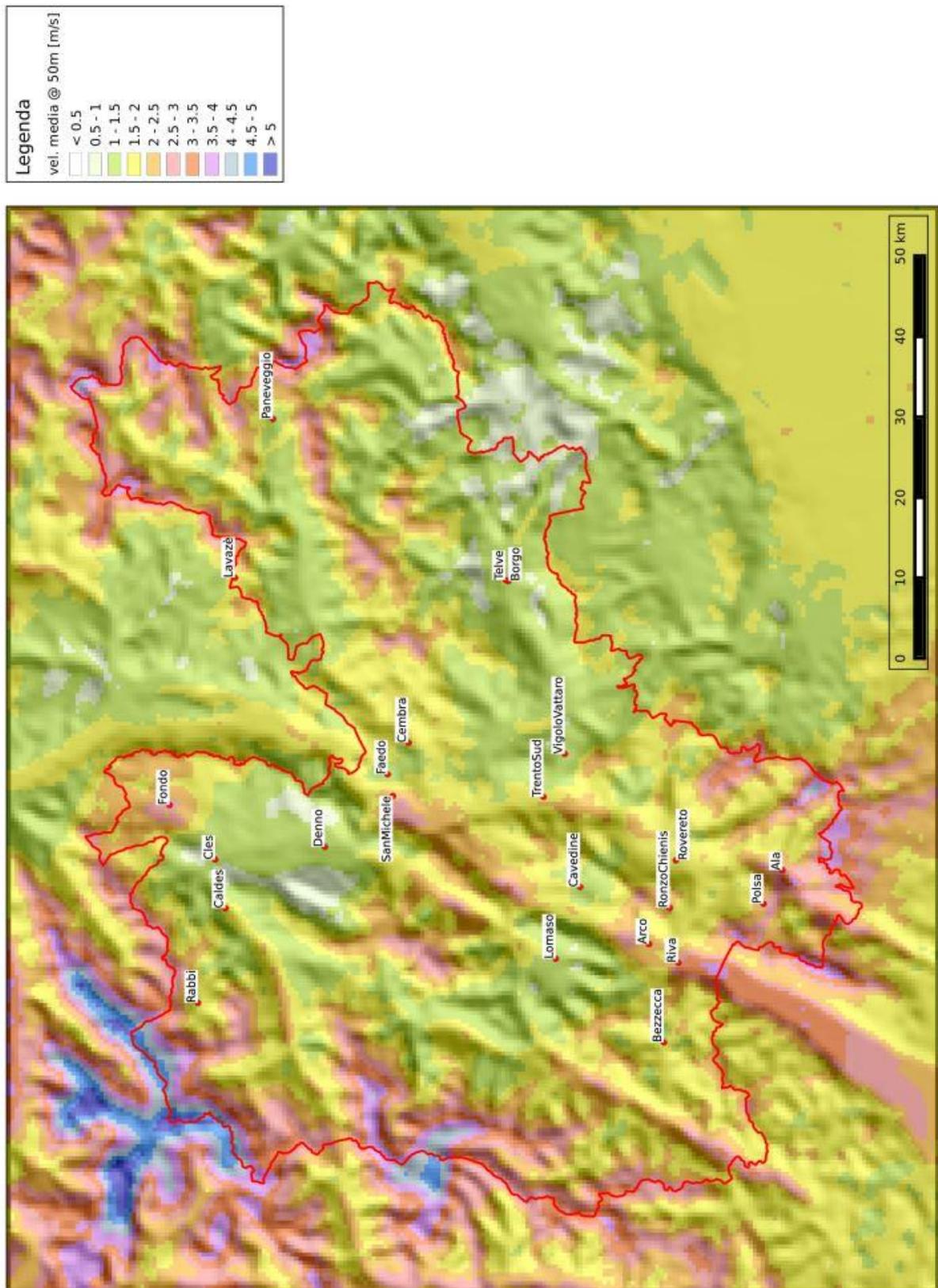


Figura 4.14: Velocità media annua a 50 m dal suolo.

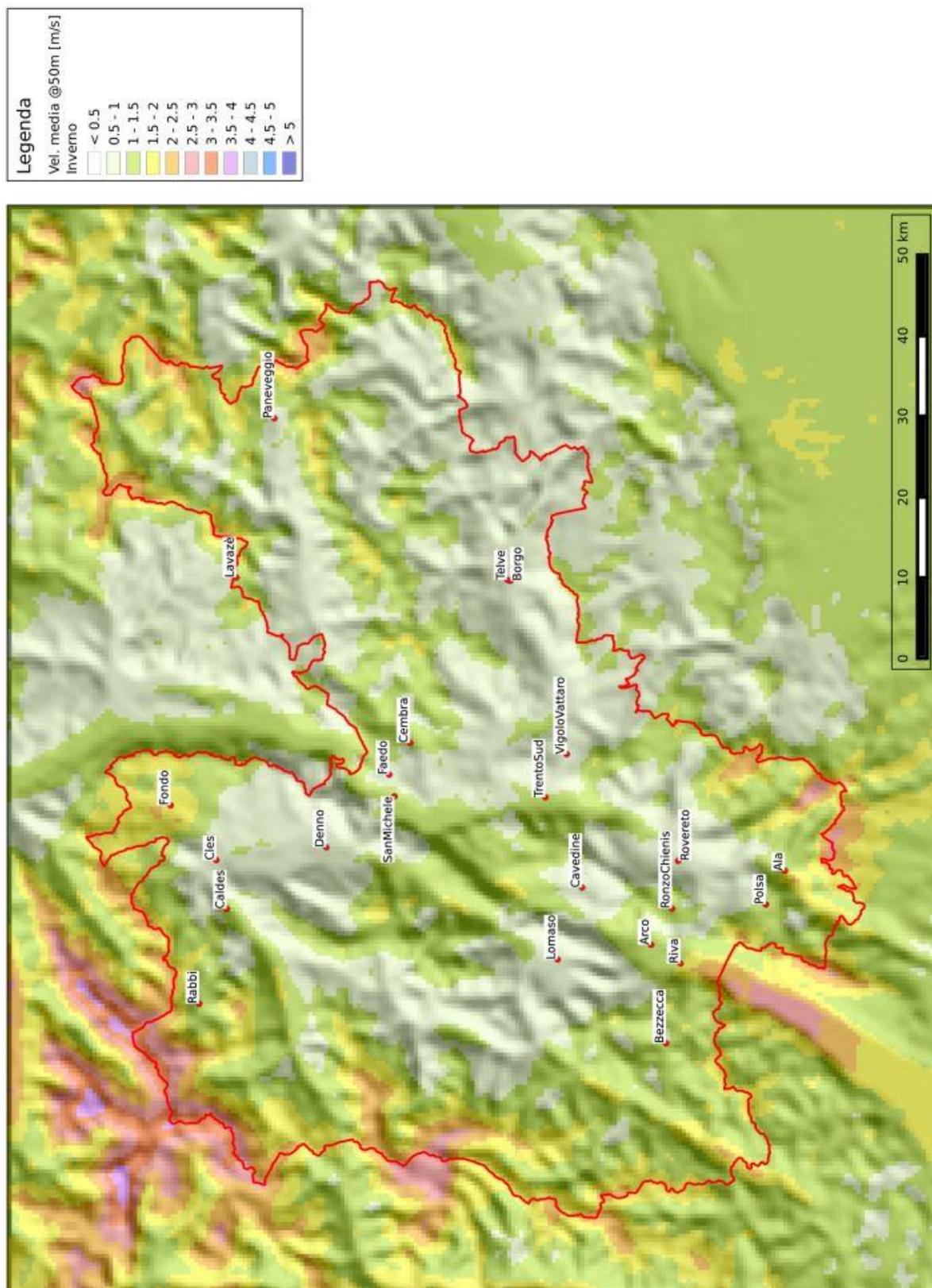


Figura 4.15: Velocità media in inverno a 50 m dal suolo.

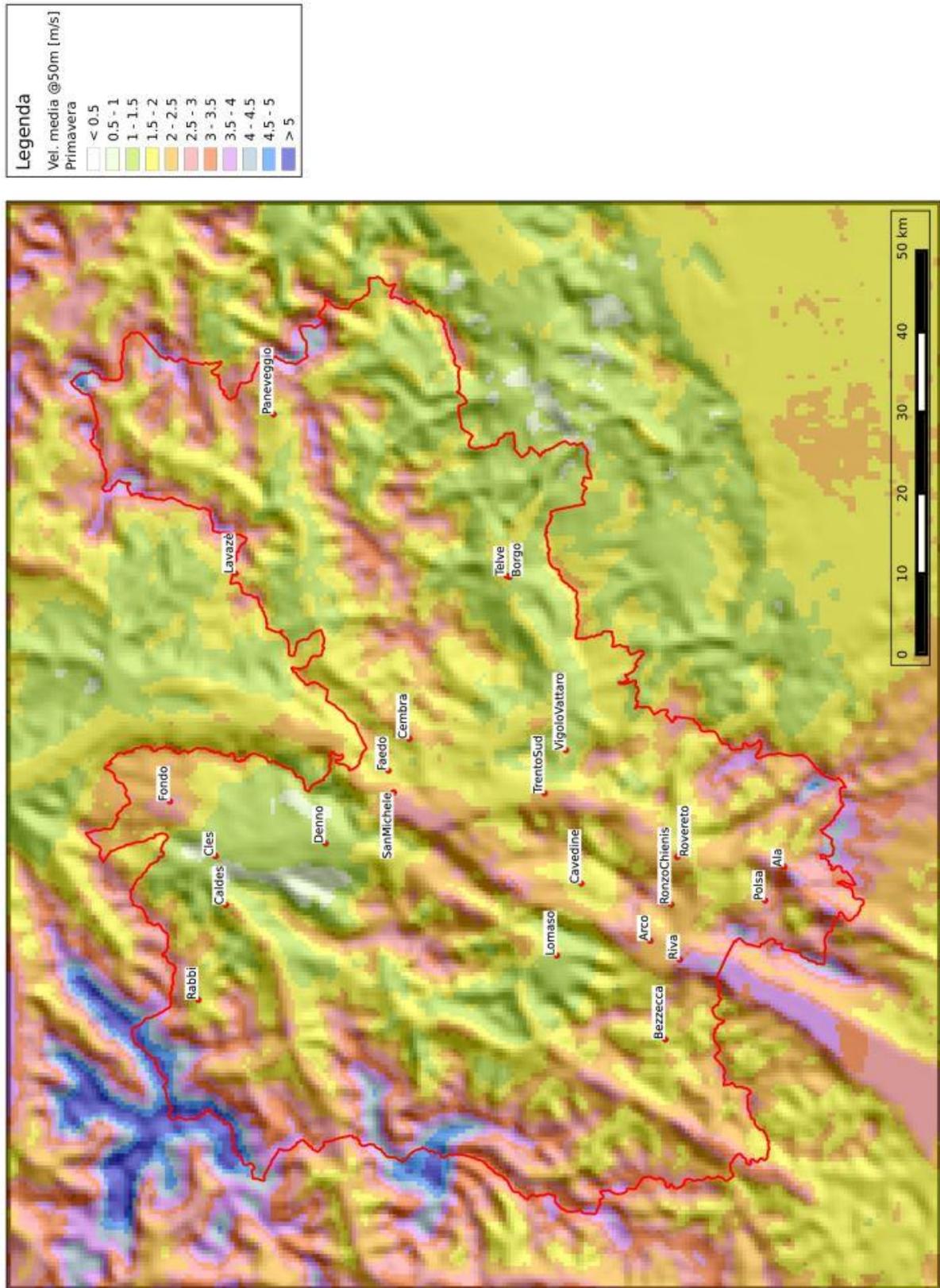


Figura 4.16: Velocità media in primavera a 50 m dal suolo.

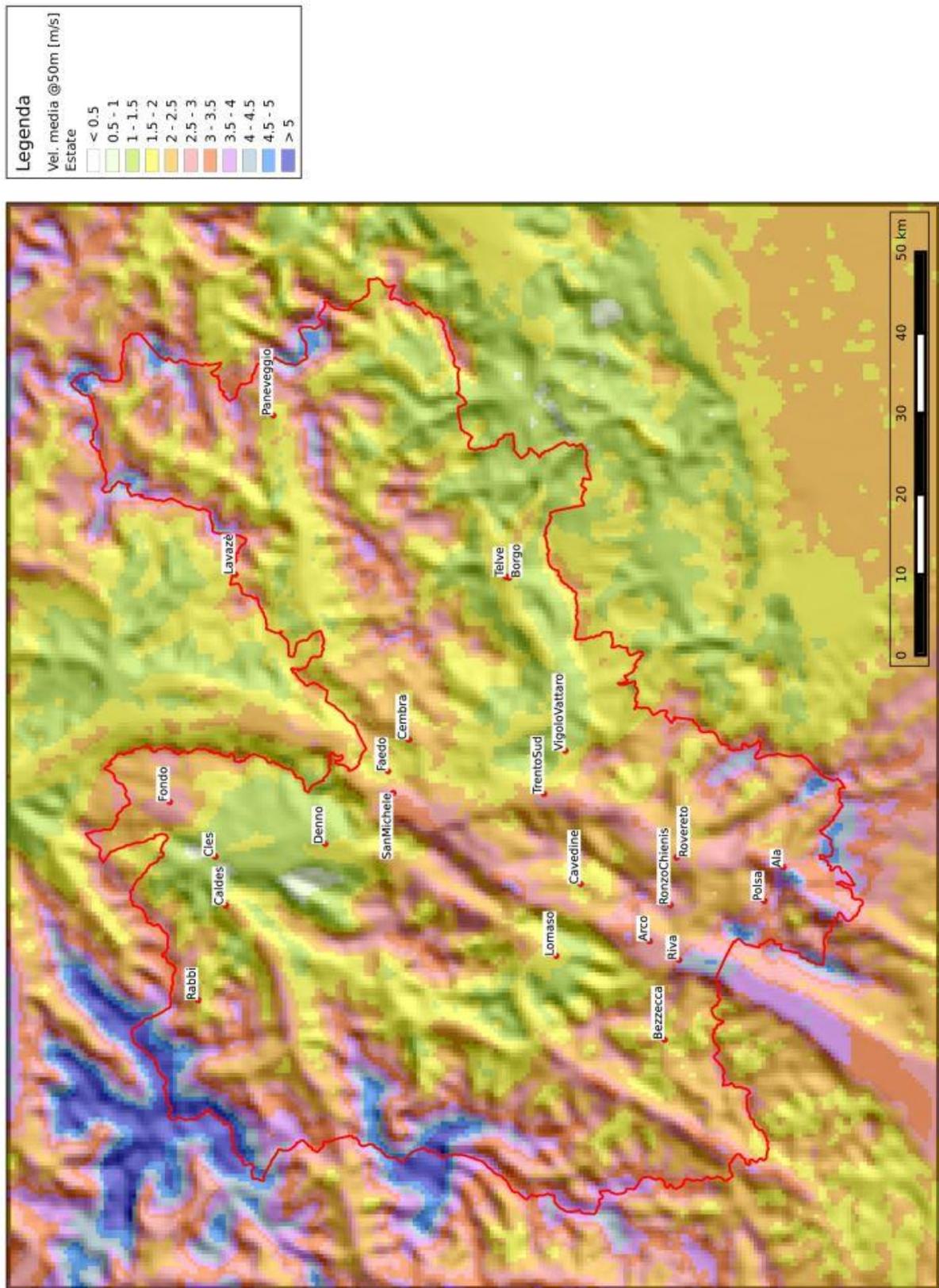


Figura 4.17: Velocità media in estate a 50 m dal suolo.

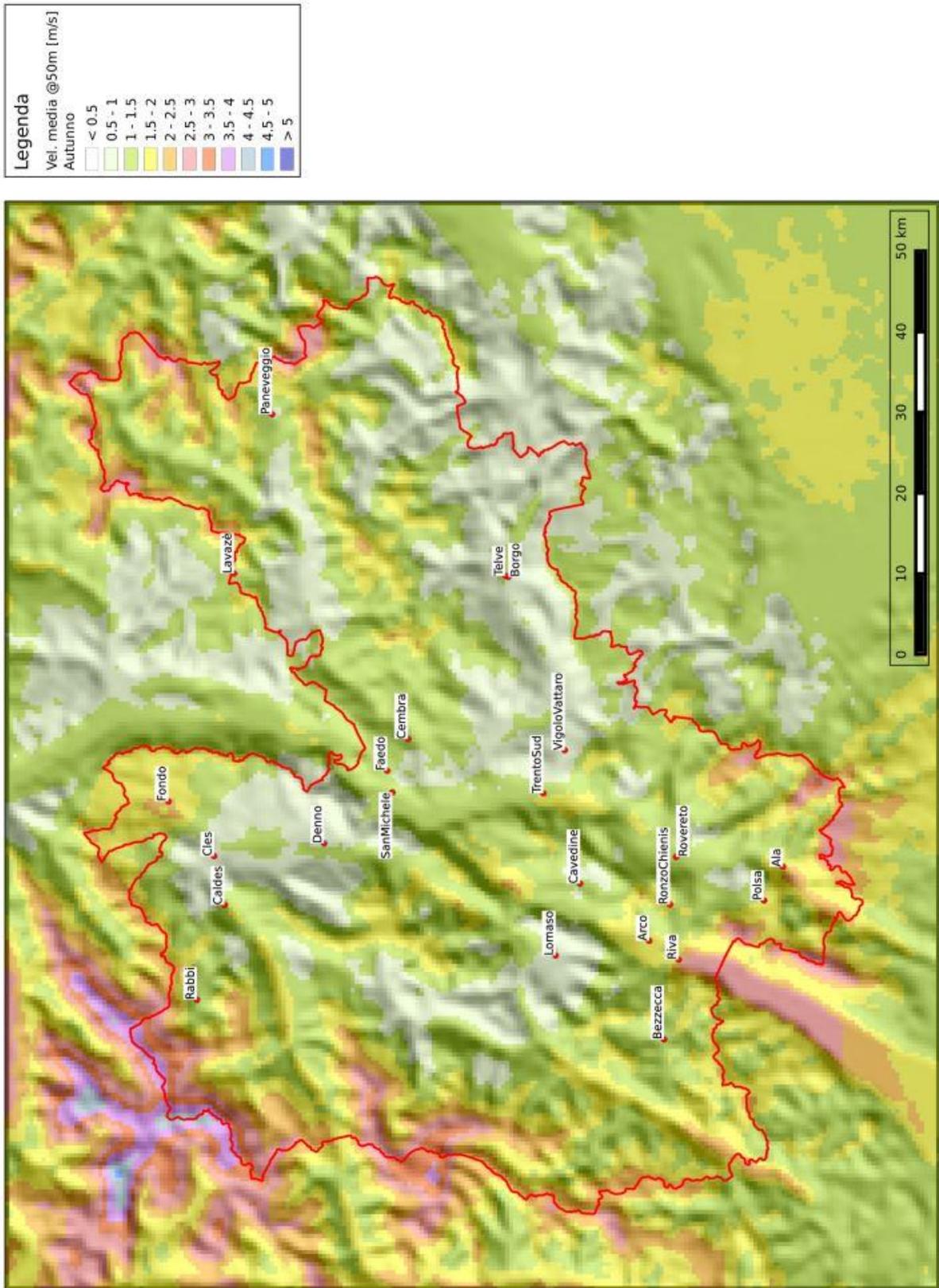


Figura 4.18: Velocità media in autunno a 50 m dal suolo.

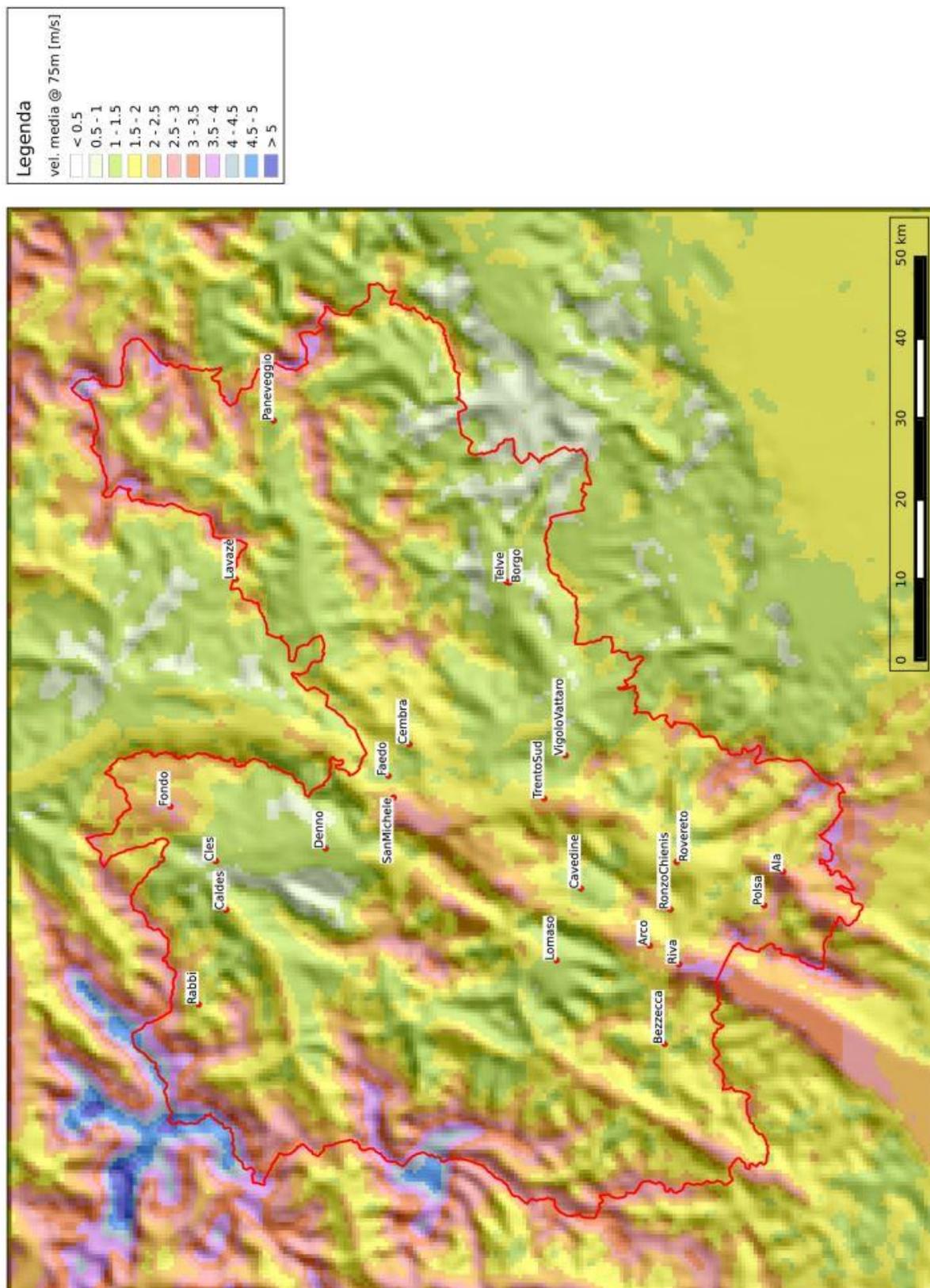


Figura 4.19: Velocità media annua a 75 m dal suolo.

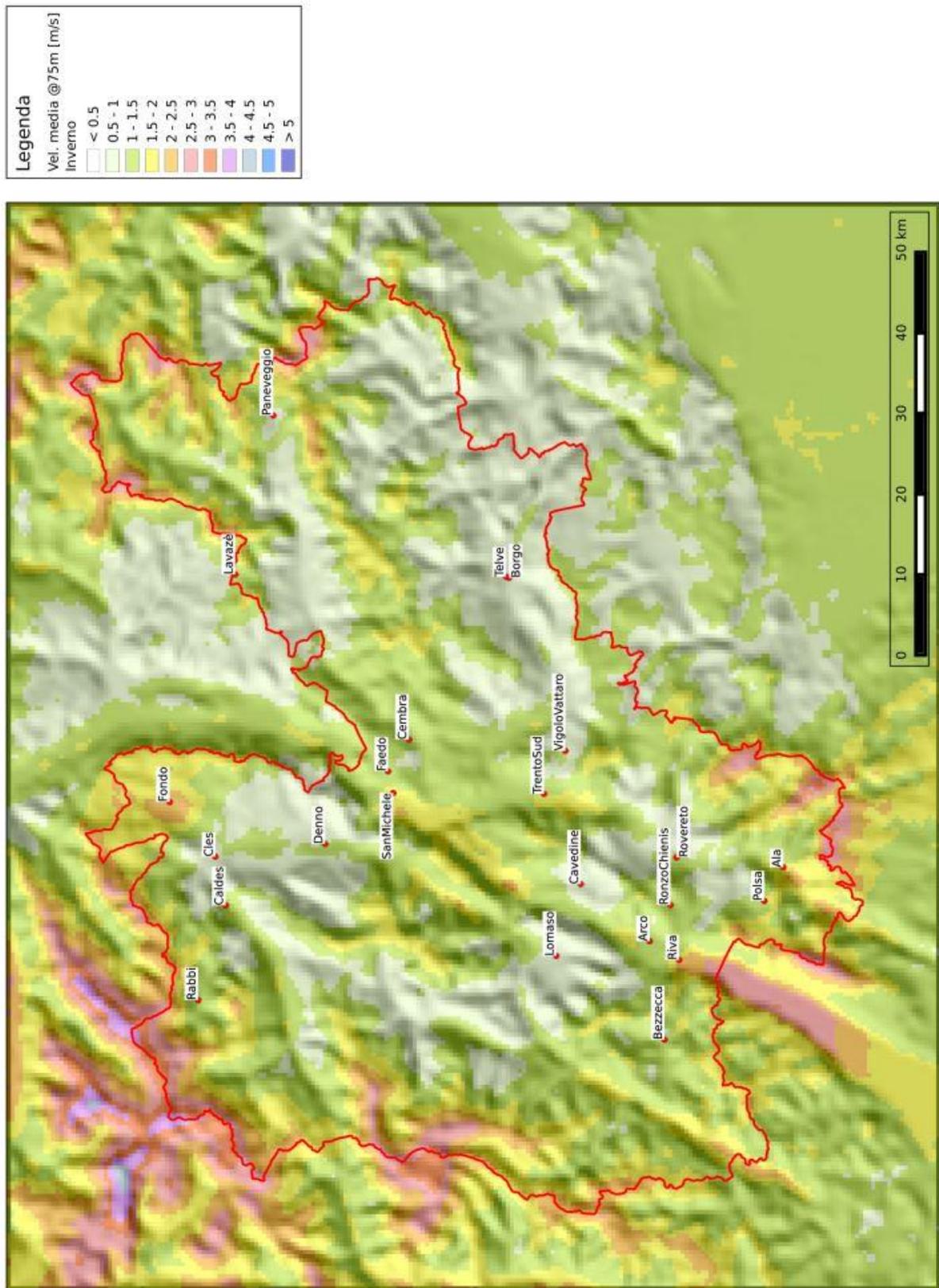


Figura 4.20: Velocità media in inverno a 75 m dal suolo.

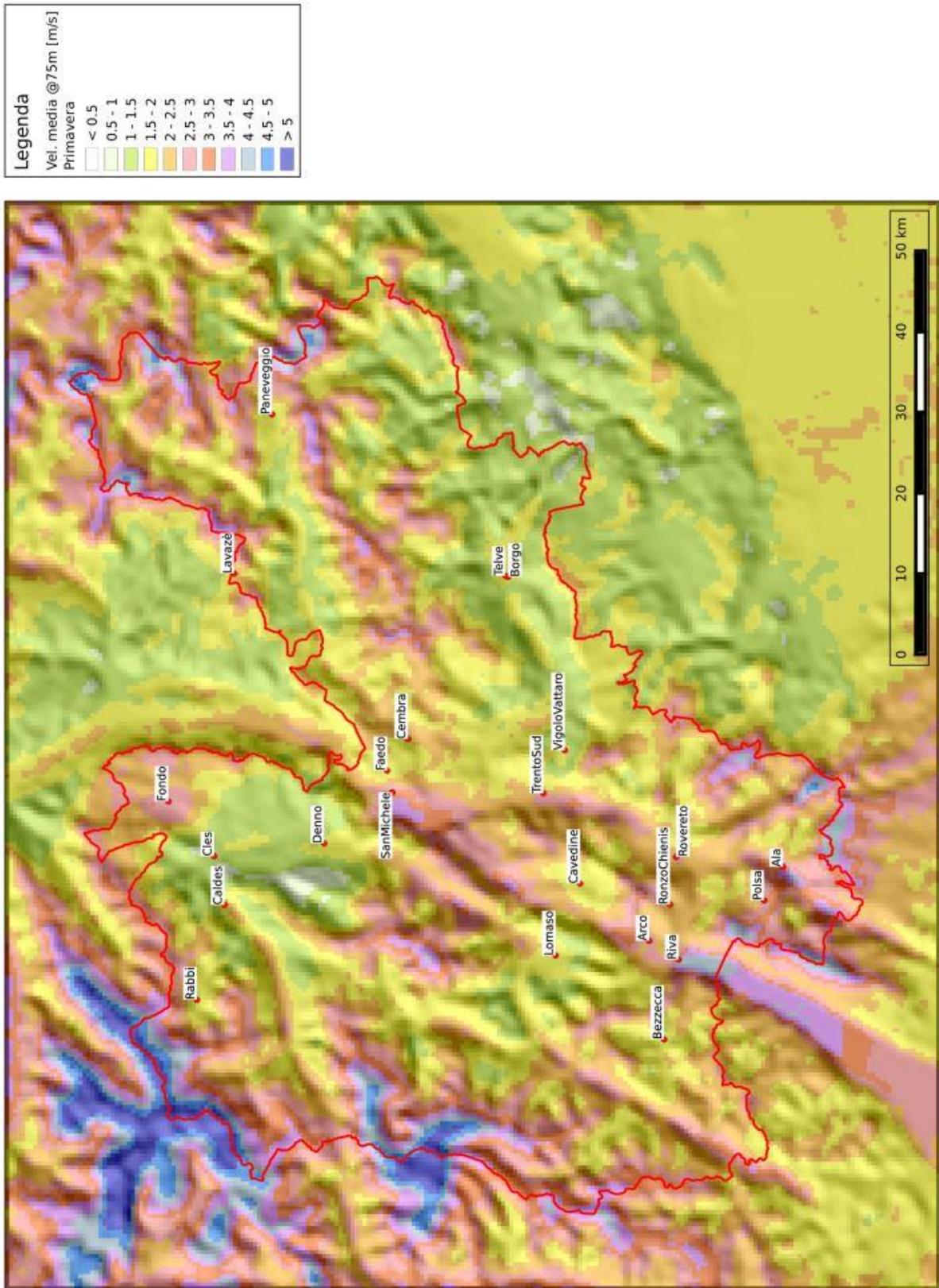


Figura 4.21: Velocità media in primavera a 75 m dal suolo.

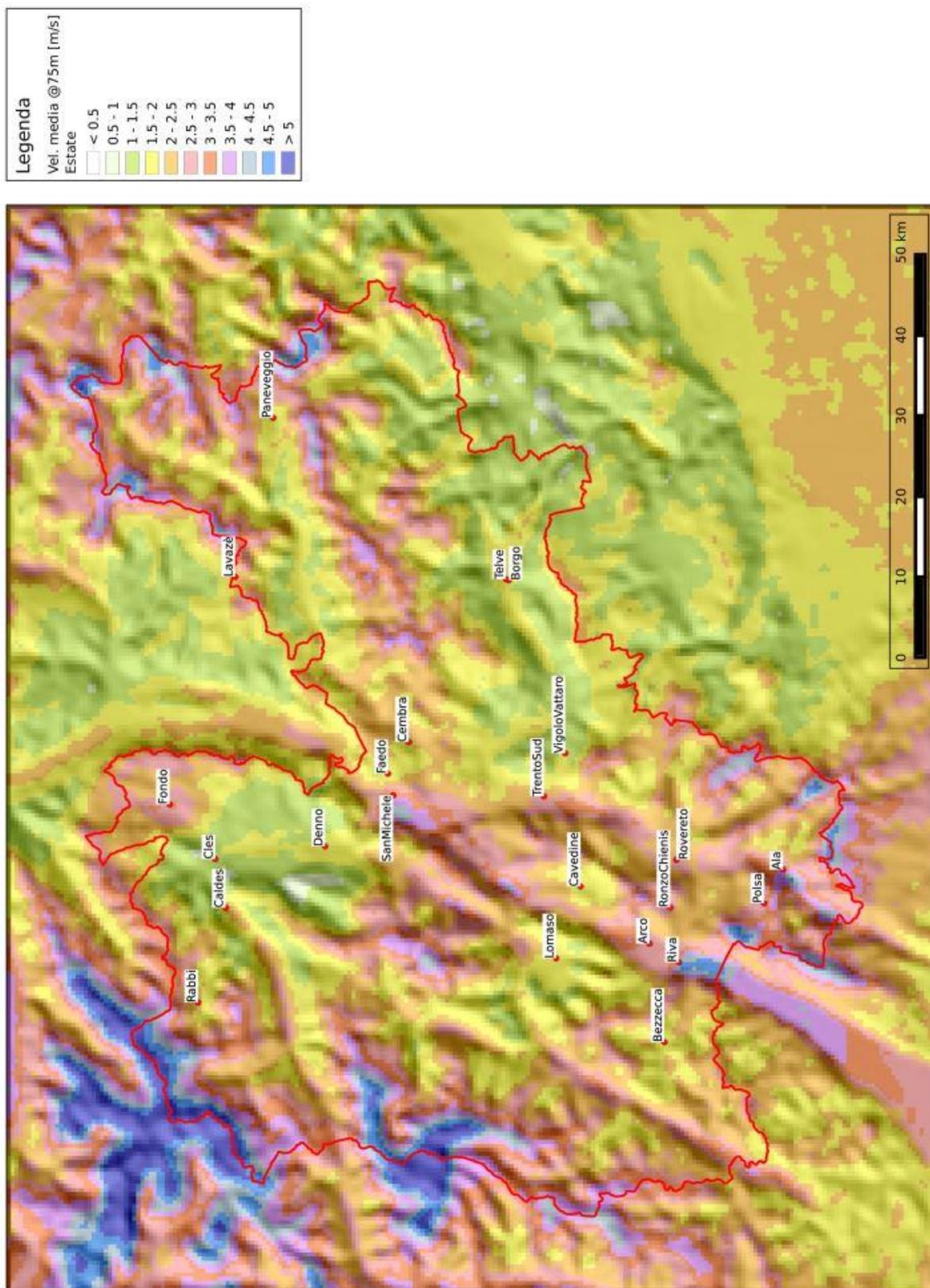


Figura 4.22: Velocità media in estate a 75 m dal suolo.

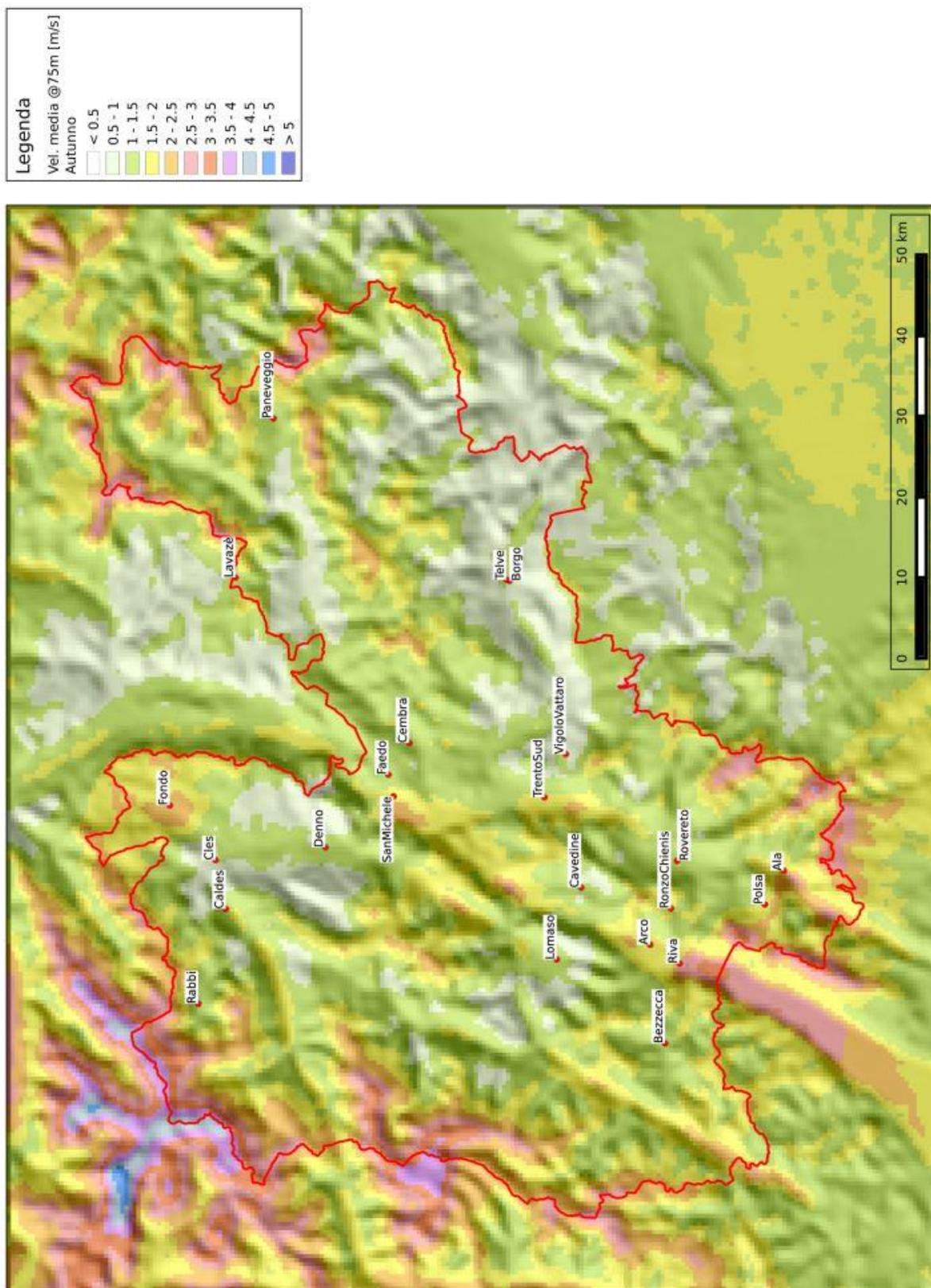


Figura 4.23: Velocità media in autunno a 75 m dal suolo.

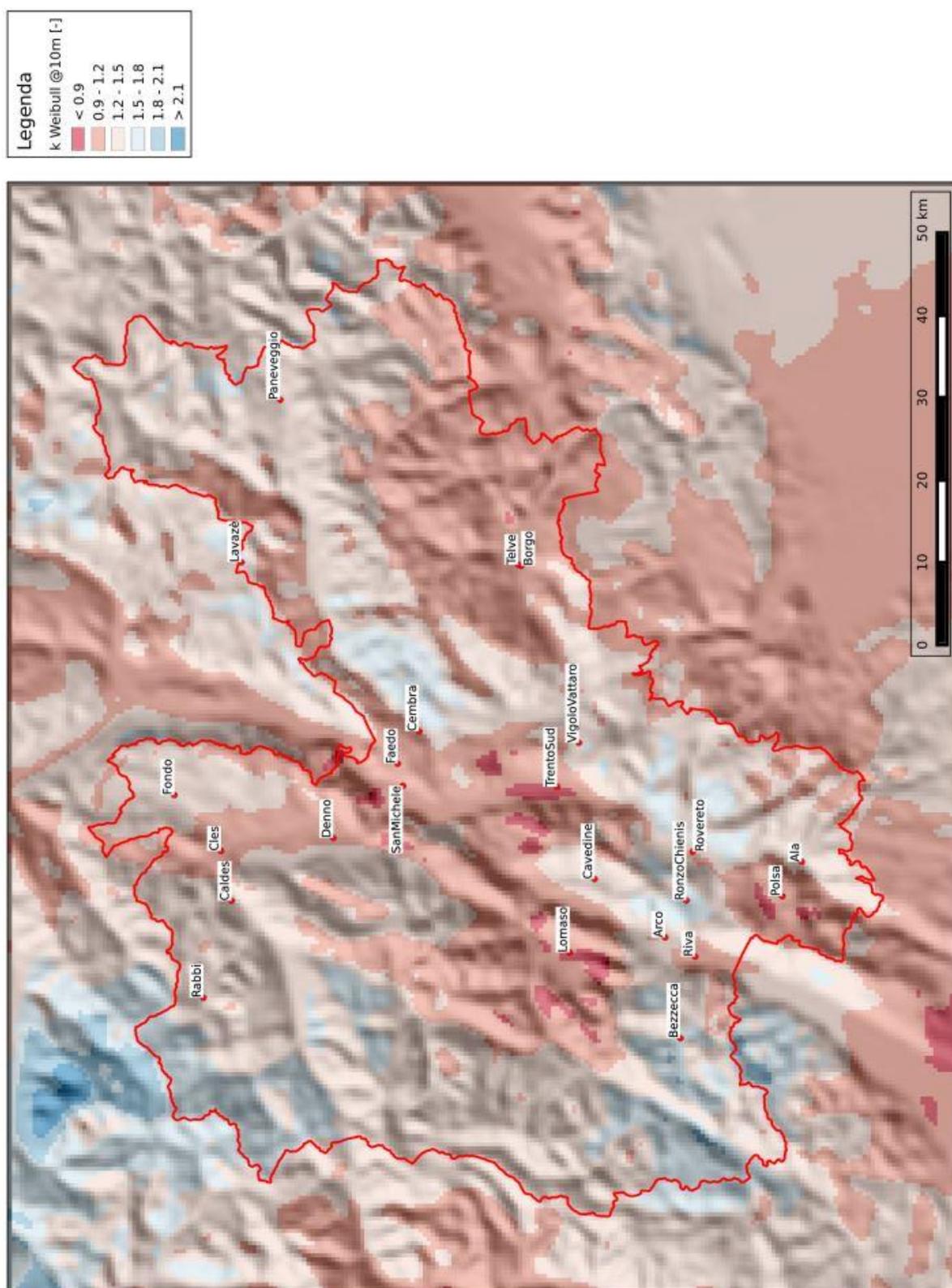


Figura 4.24: Parametro di forma  $k$  annuale a 10 m dal suolo.

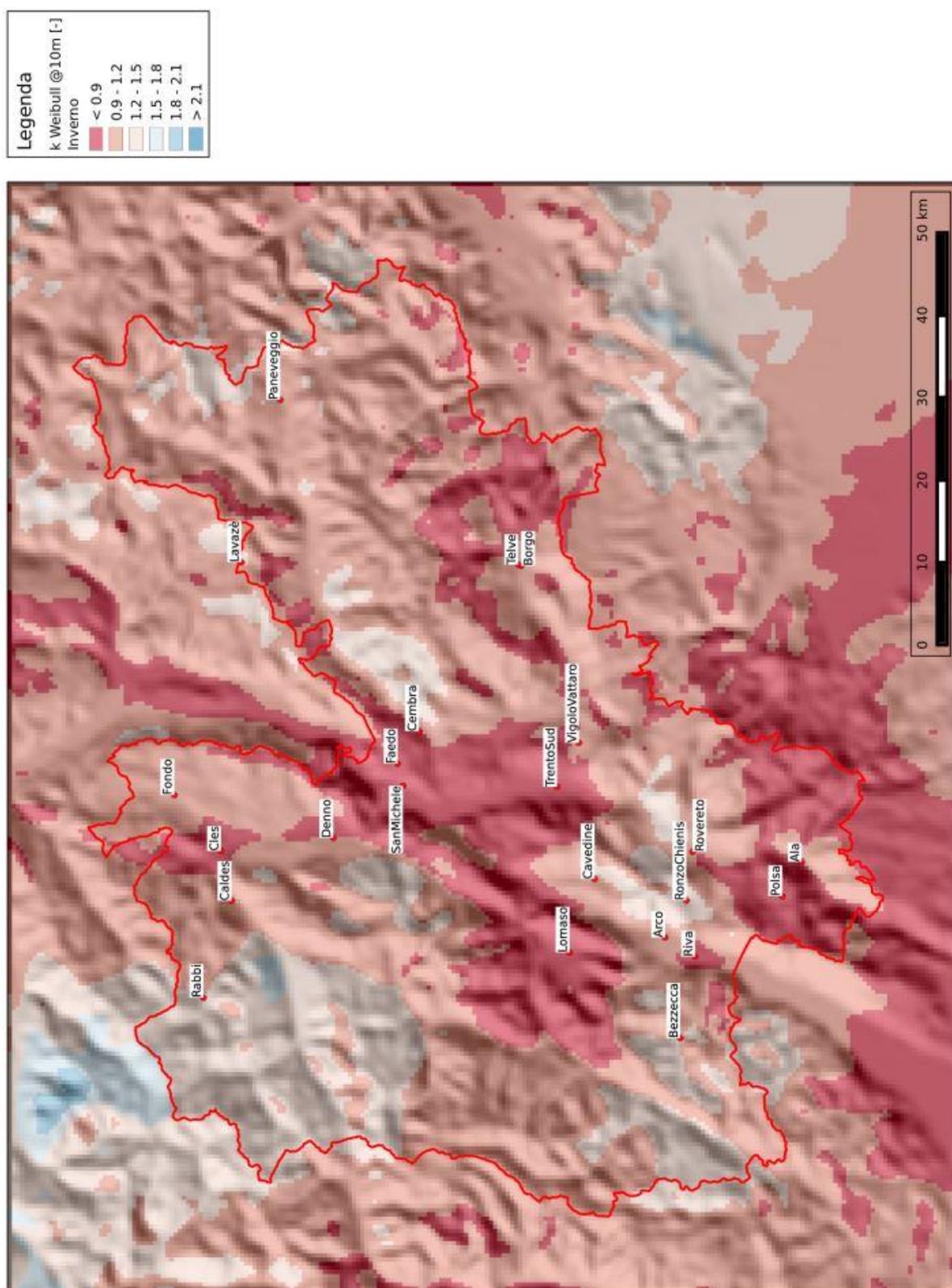


Figura 4.25: Parametro di forma  $k$  in inverno a 10 m dal suolo.

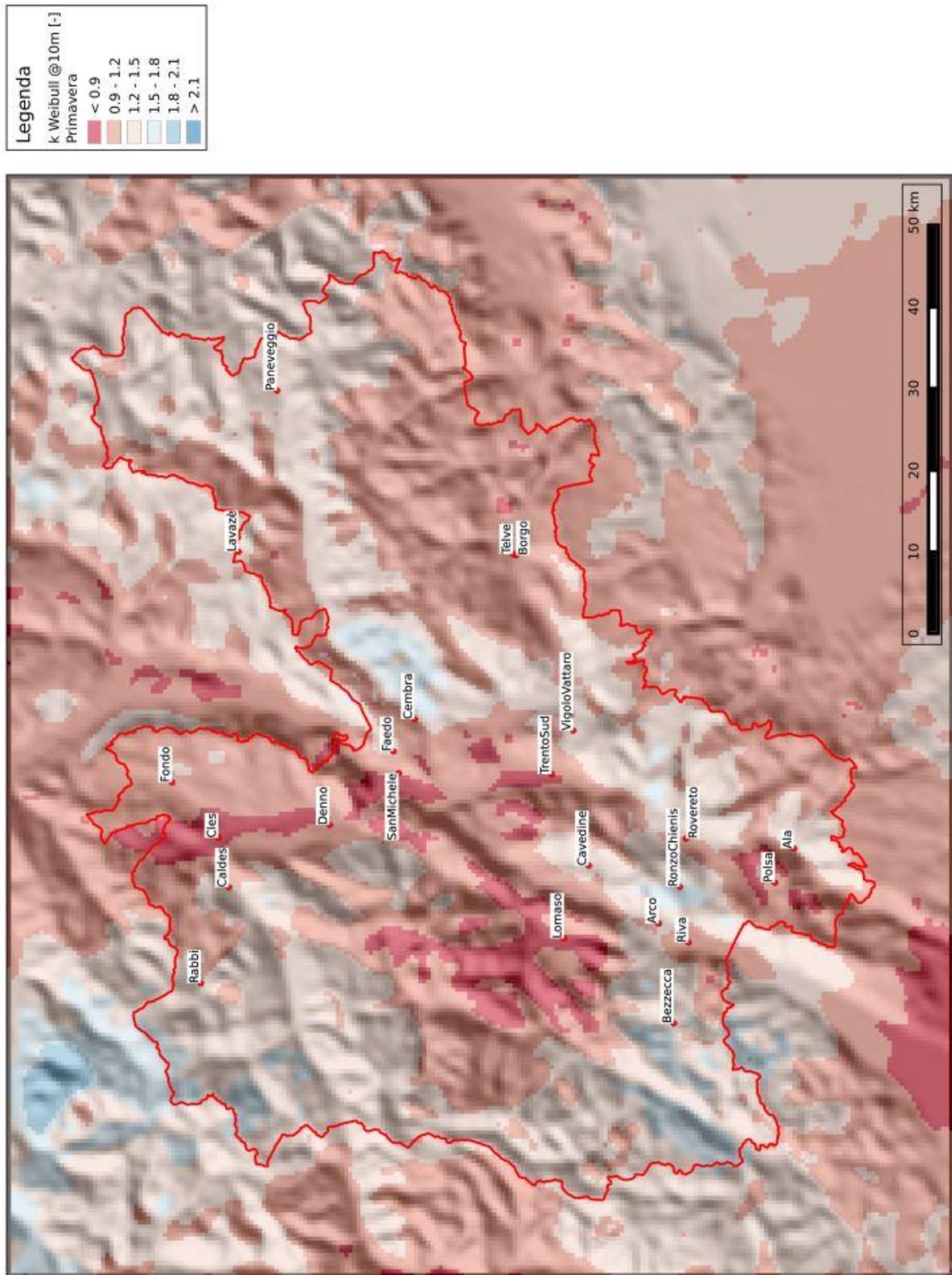


Figura 4.26: Parametro di forma  $k$  in primavera a 10 m dal suolo.

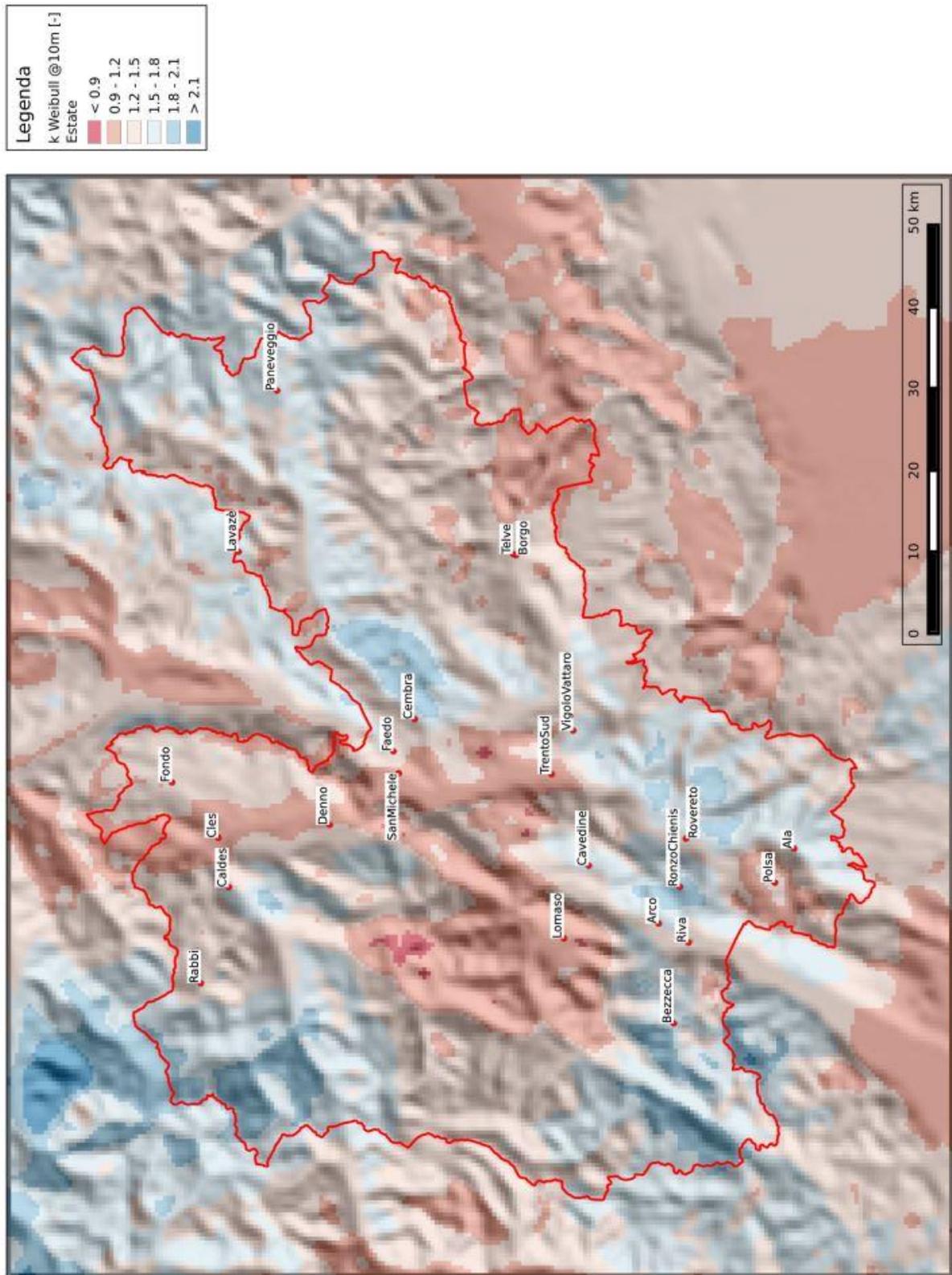


Figura 4.27: Parametro di forma  $k$  in estate a 10 m dal suolo.

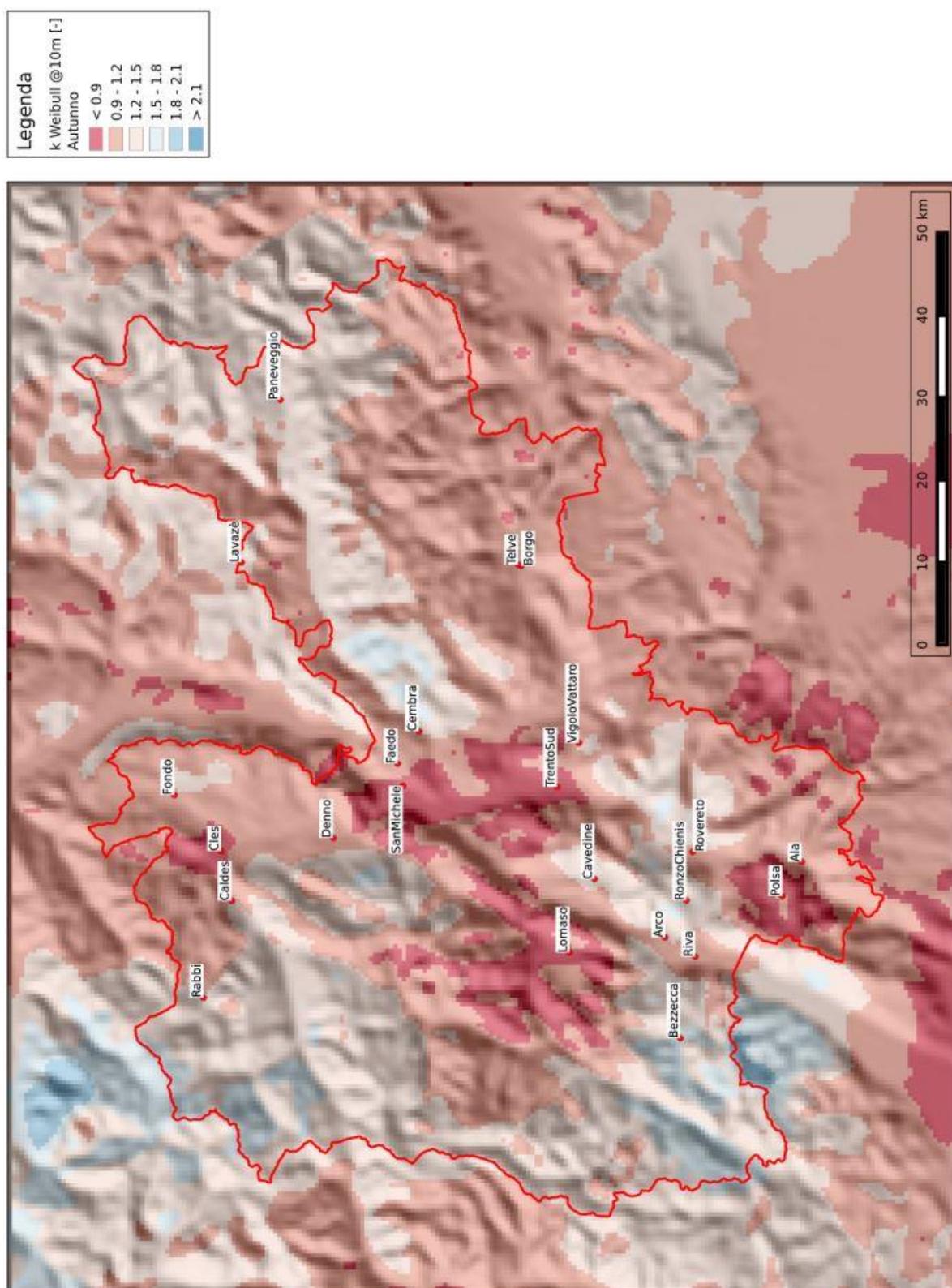


Figura 4.28: Parametro di forma  $k$  in autunno a 10 m dal suolo.

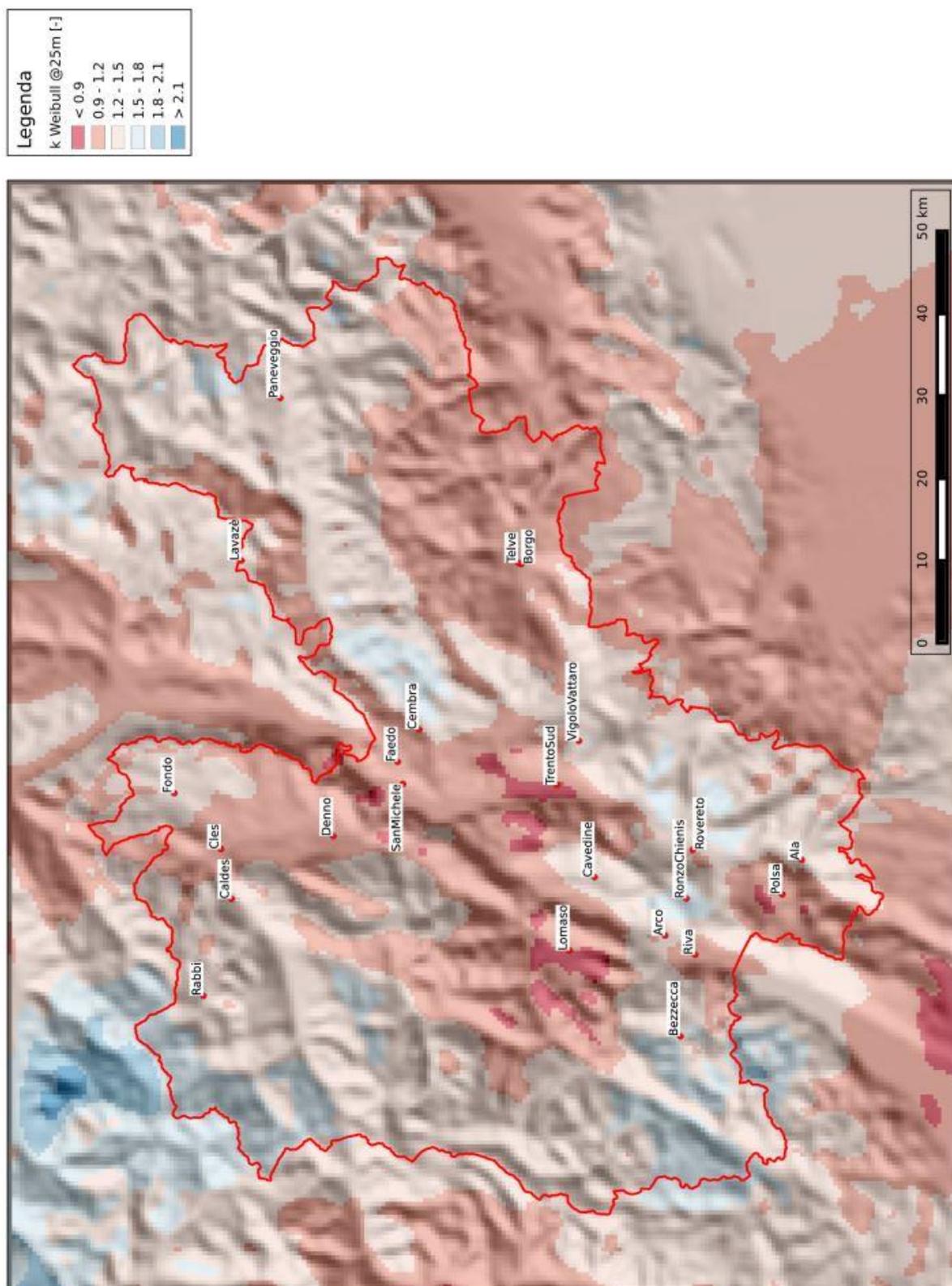


Figura 4.29: Parametro di forma  $k$  annuale a 25 m dal suolo.

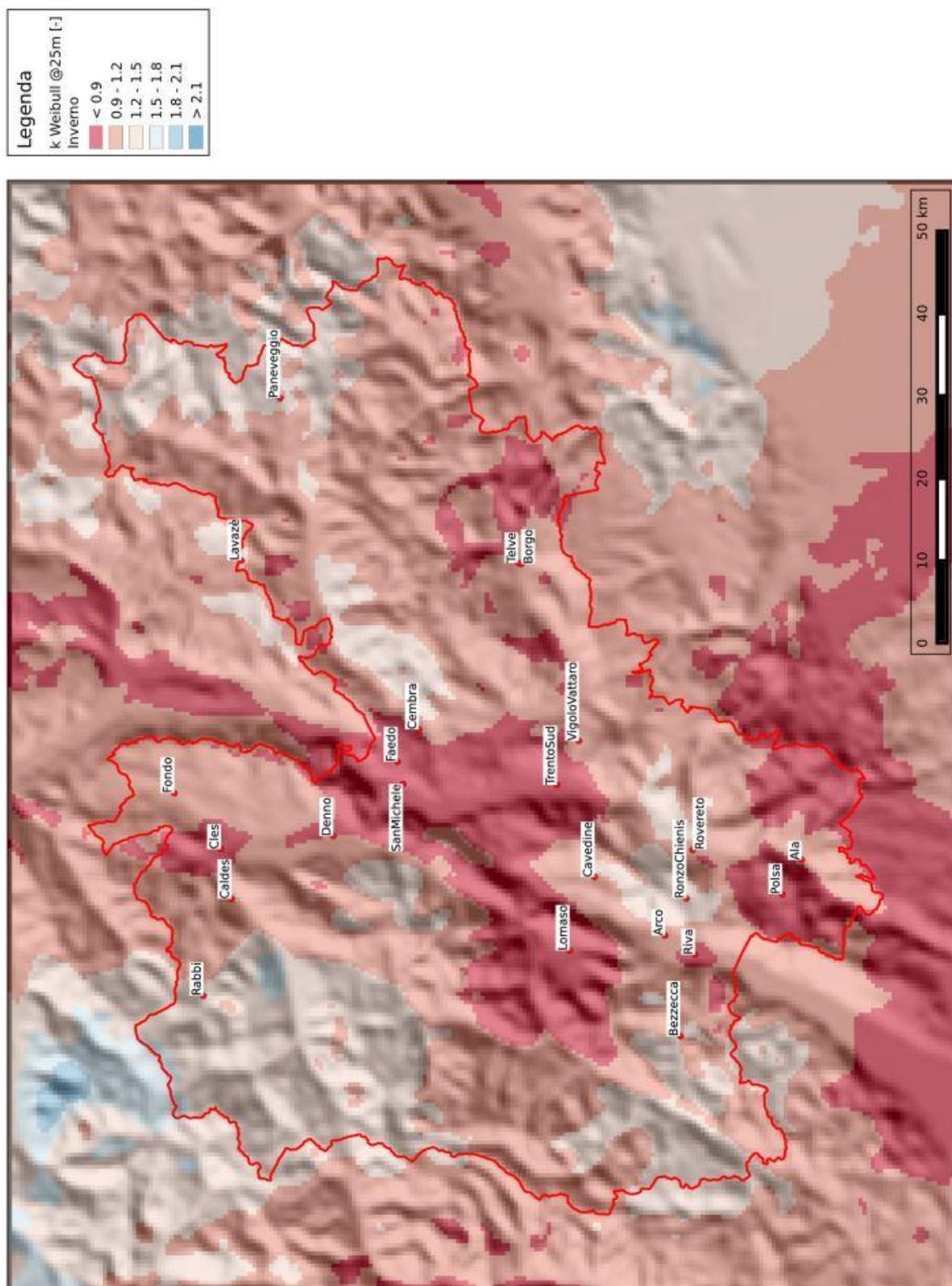


Figura 4.30: Parametro di forma  $k$  in inverno a 25 m dal suolo.

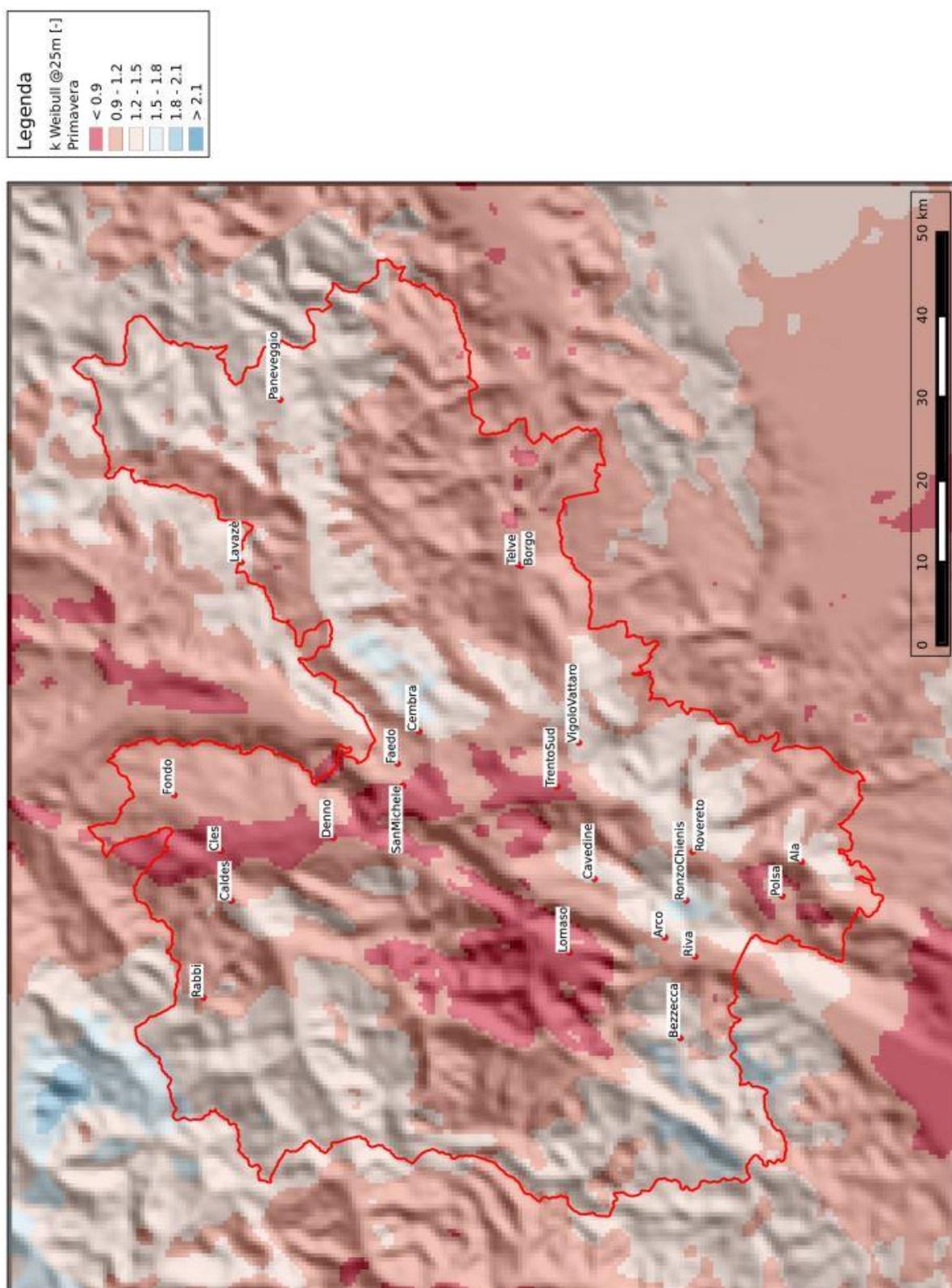


Figura 4.31: Parametro di forma  $k$  in primavera a 25 m dal suolo.

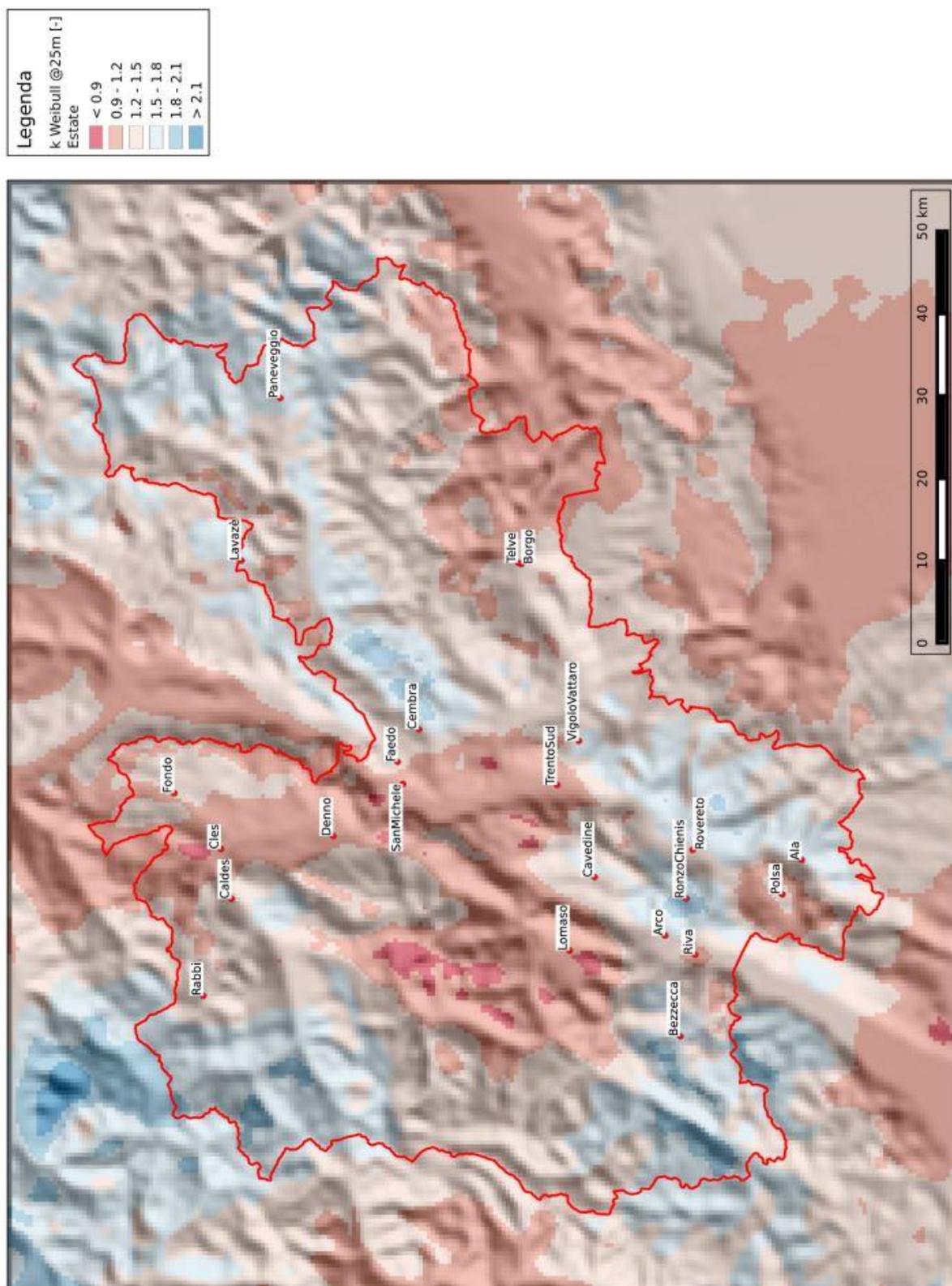


Figura 4.32: Parametro di forma  $k$  in estate a 25 m dal suolo.

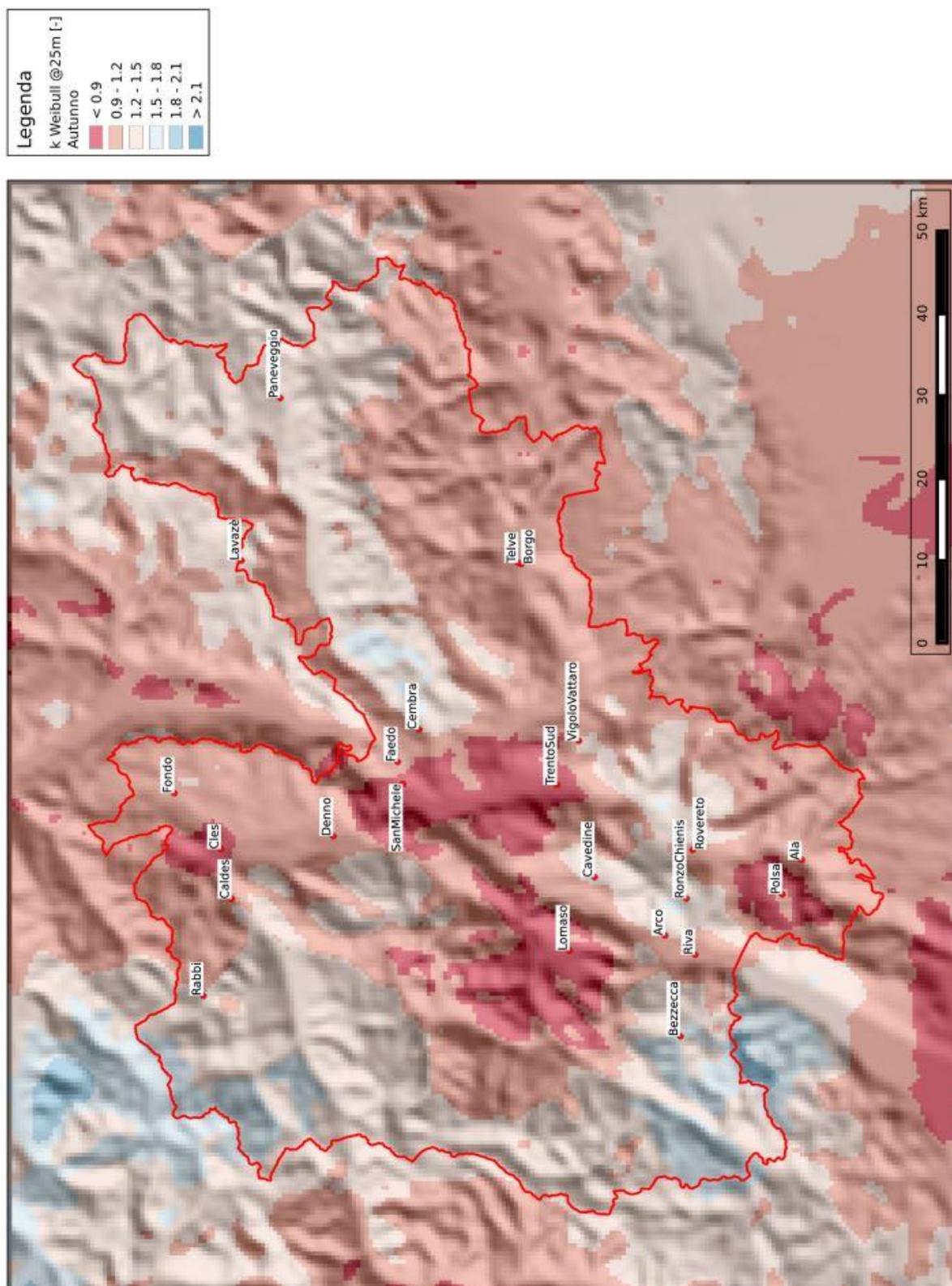


Figura 4.33: Parametro di forma  $k$  in autunno a 25 m dal suolo.

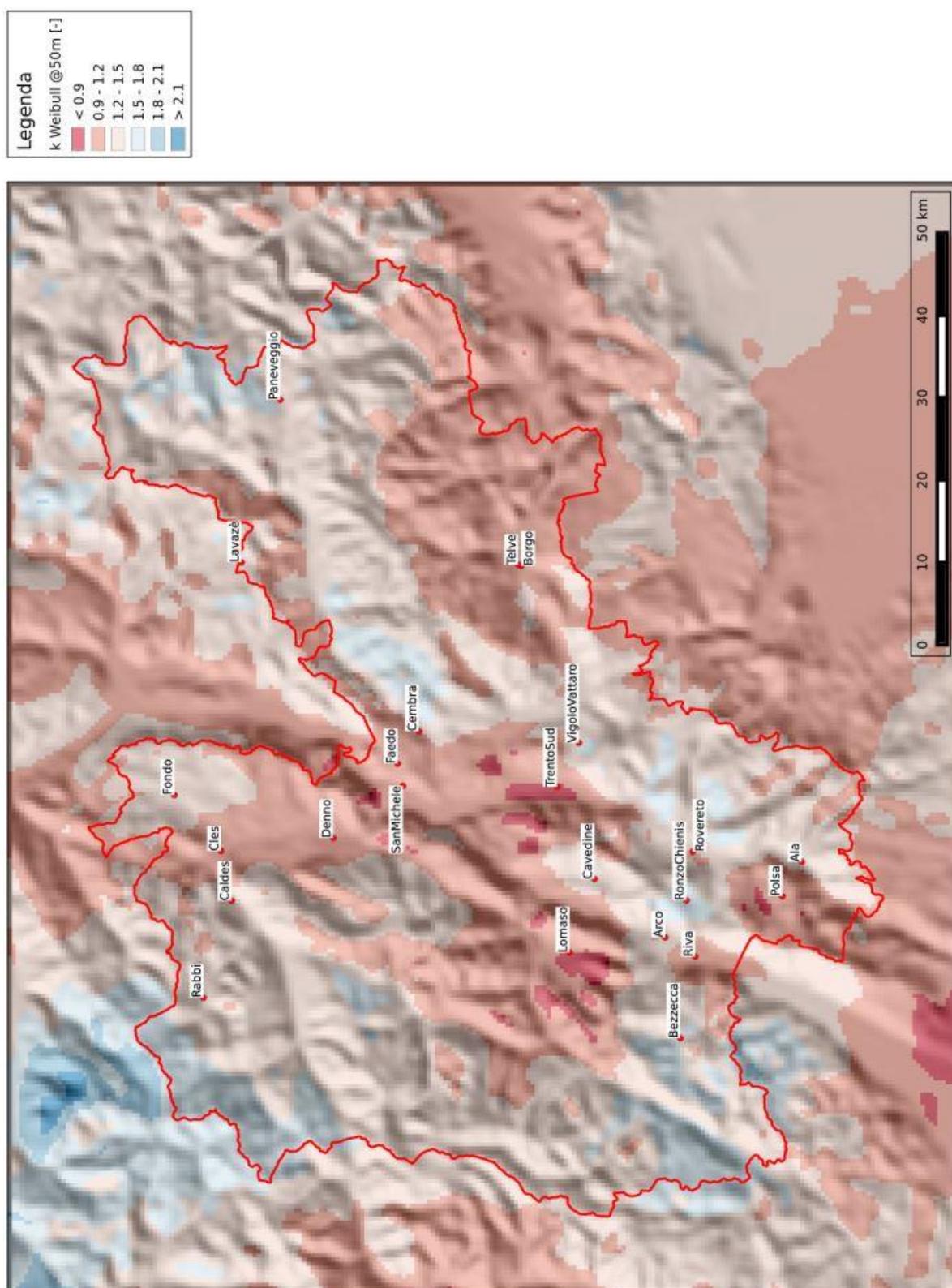


Figura 4.34: Parametro di forma  $k$  annuale a 50m dal suolo.

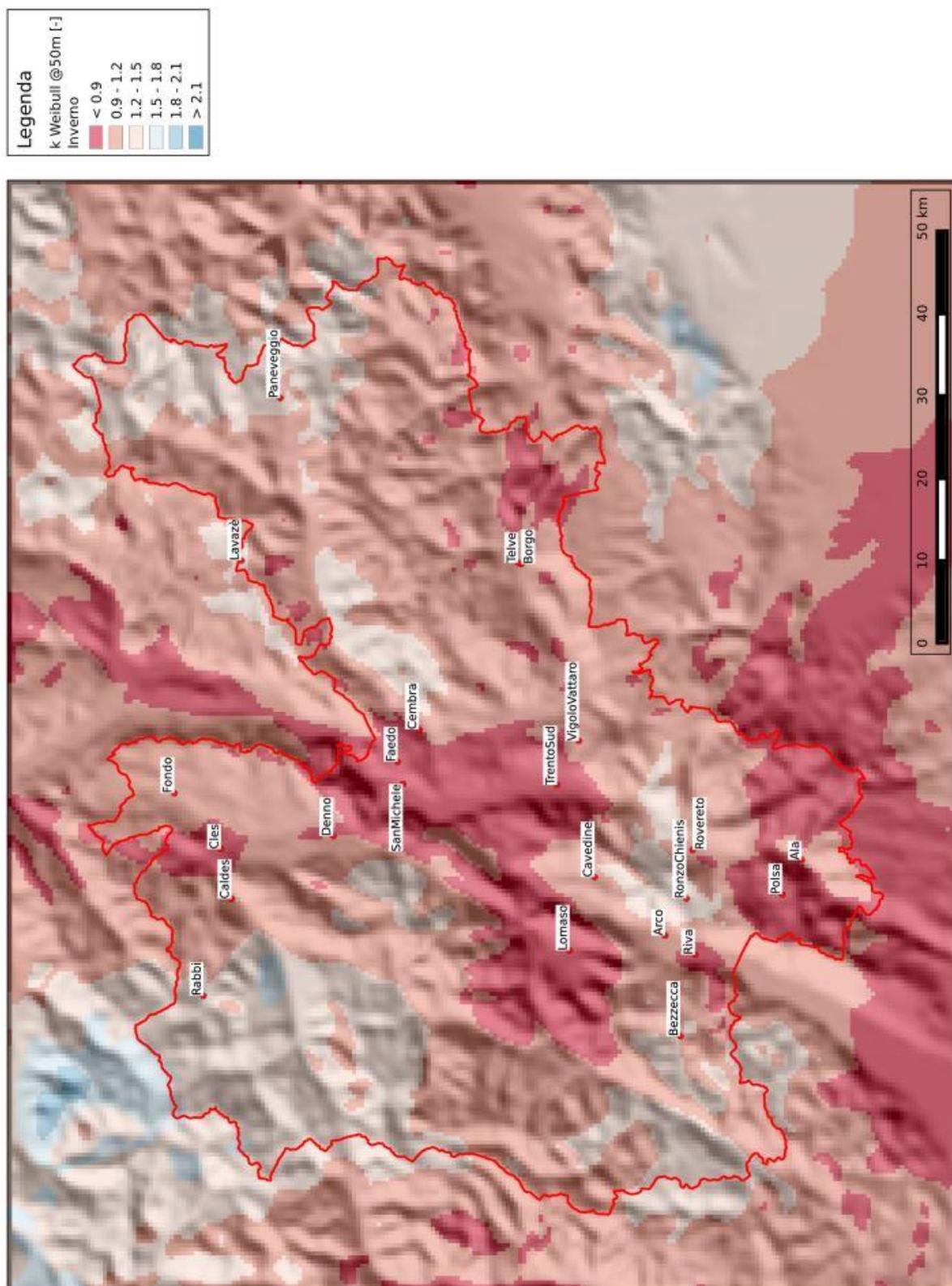


Figura 4.35: Parametro di forma  $k$  in inverno a 50 m dal suolo.

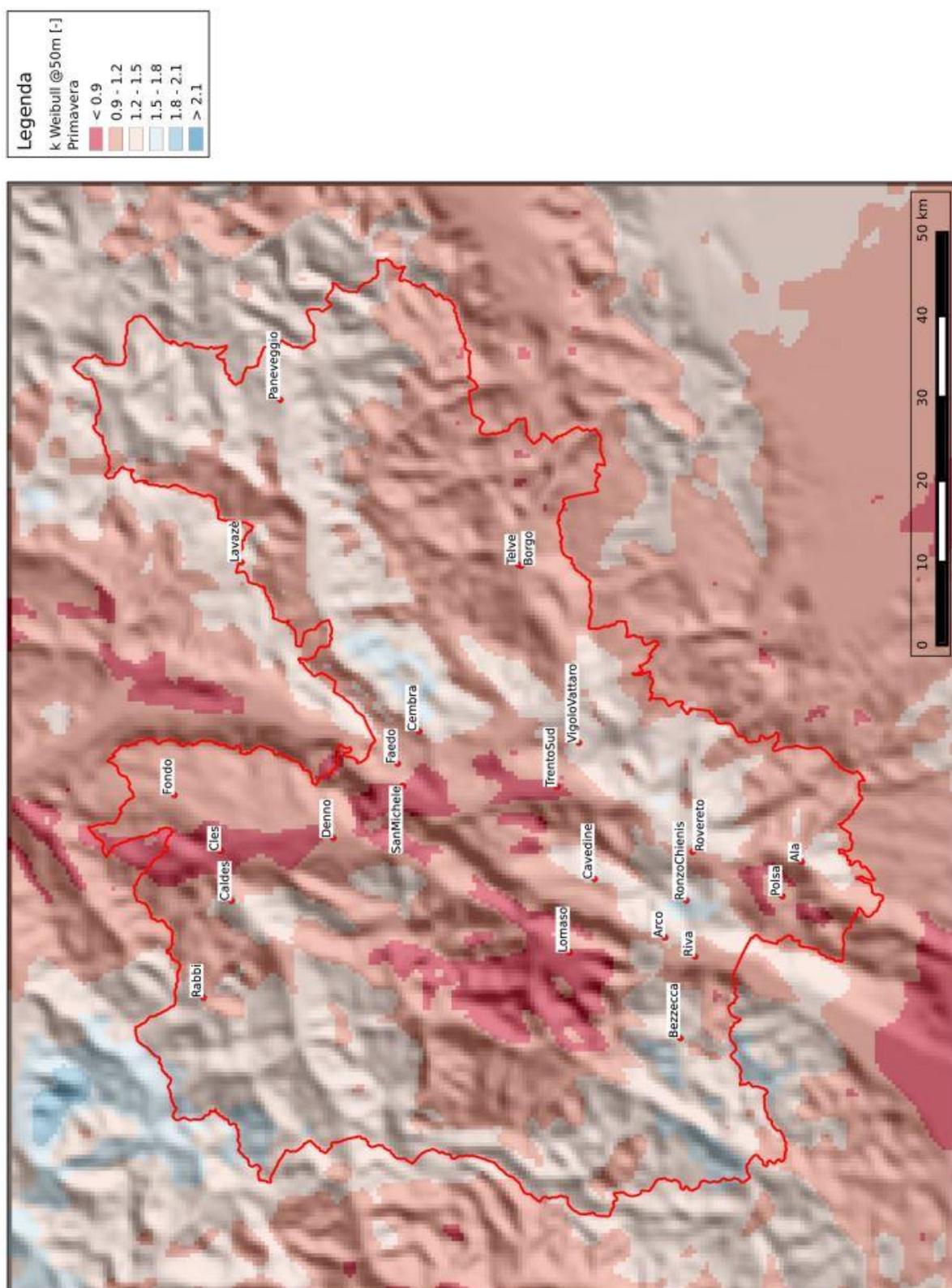


Figura 4.36: Parametro di forma  $k$  in primavera a 50 m dal suolo.



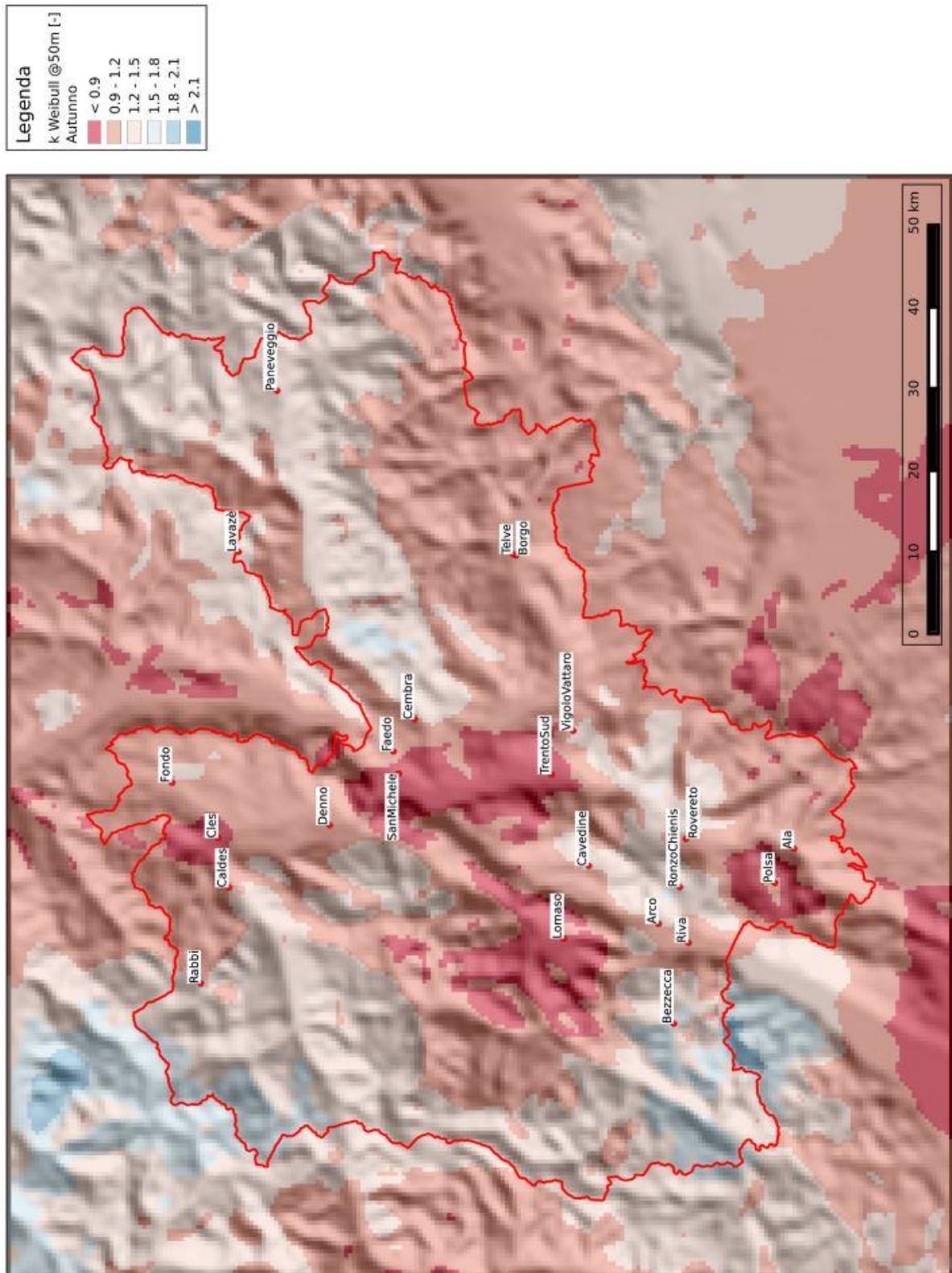


Figura 4.38: Parametro di forma  $k$  in autunno a 50 m dal suolo.

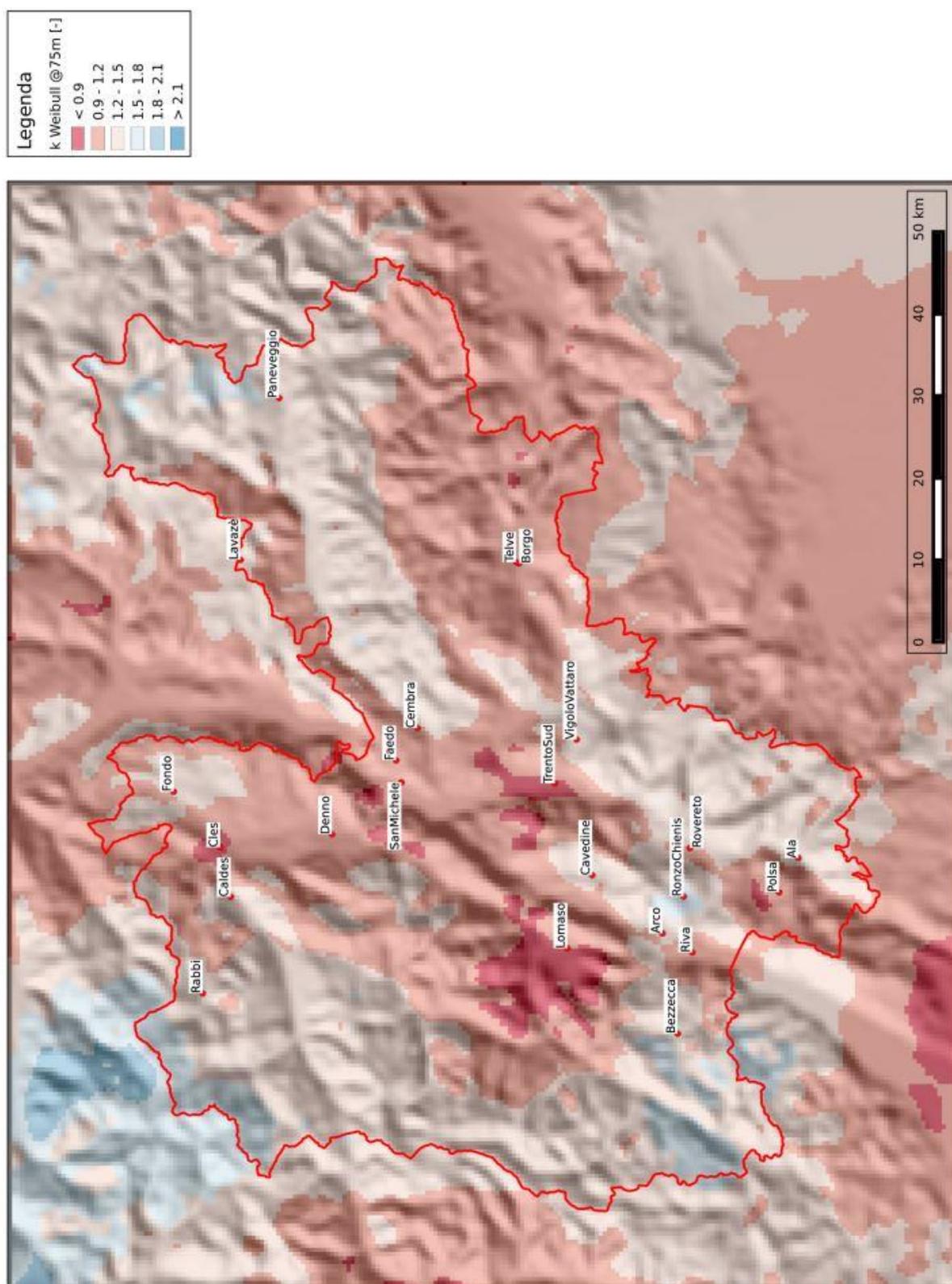


Figura 4.39: Parametro di forma  $k$  annuale a 75 m dal suolo.

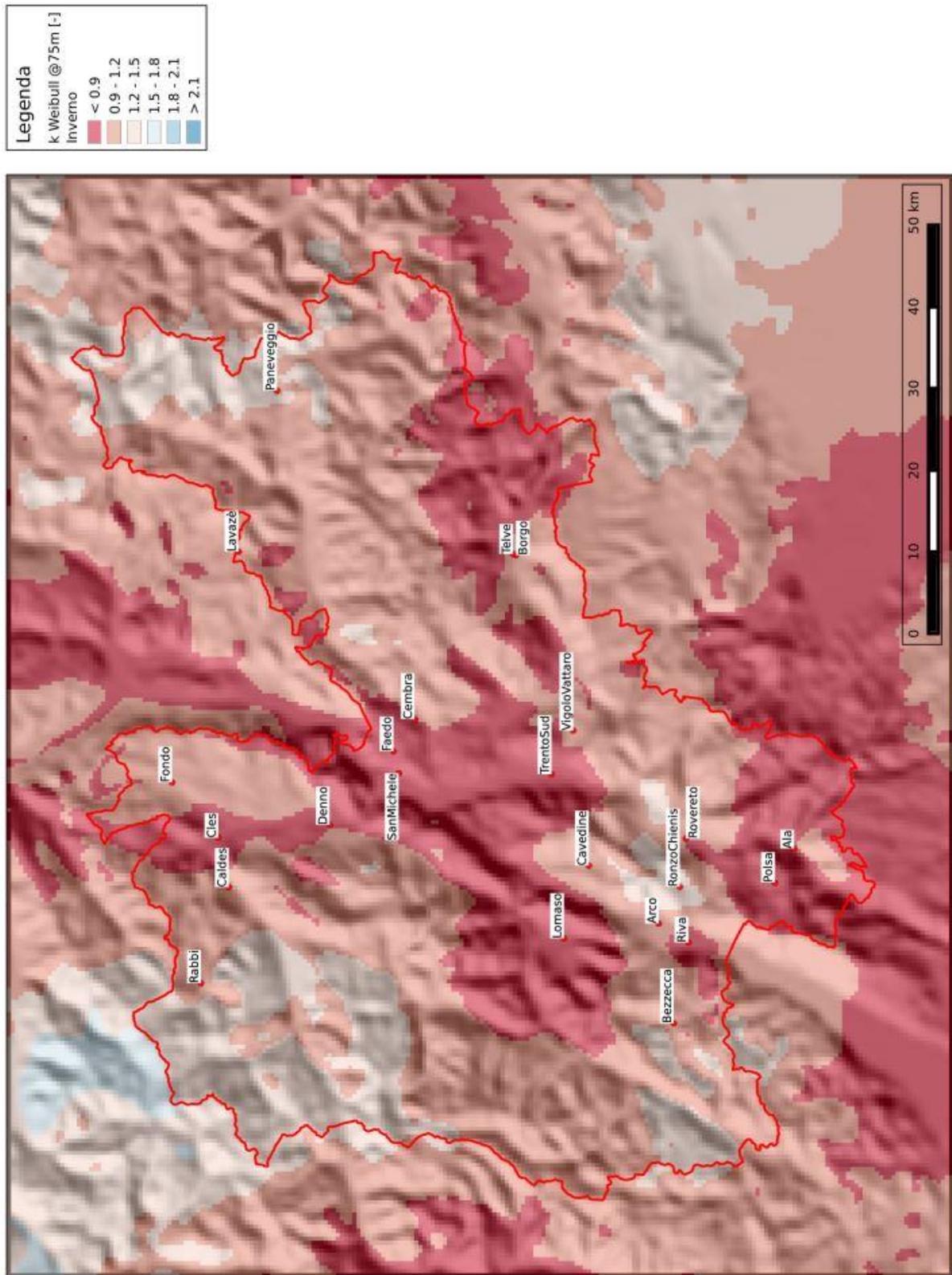


Figura 4.40: Parametro di forma  $k$  in inverno a 75 m dal suolo.

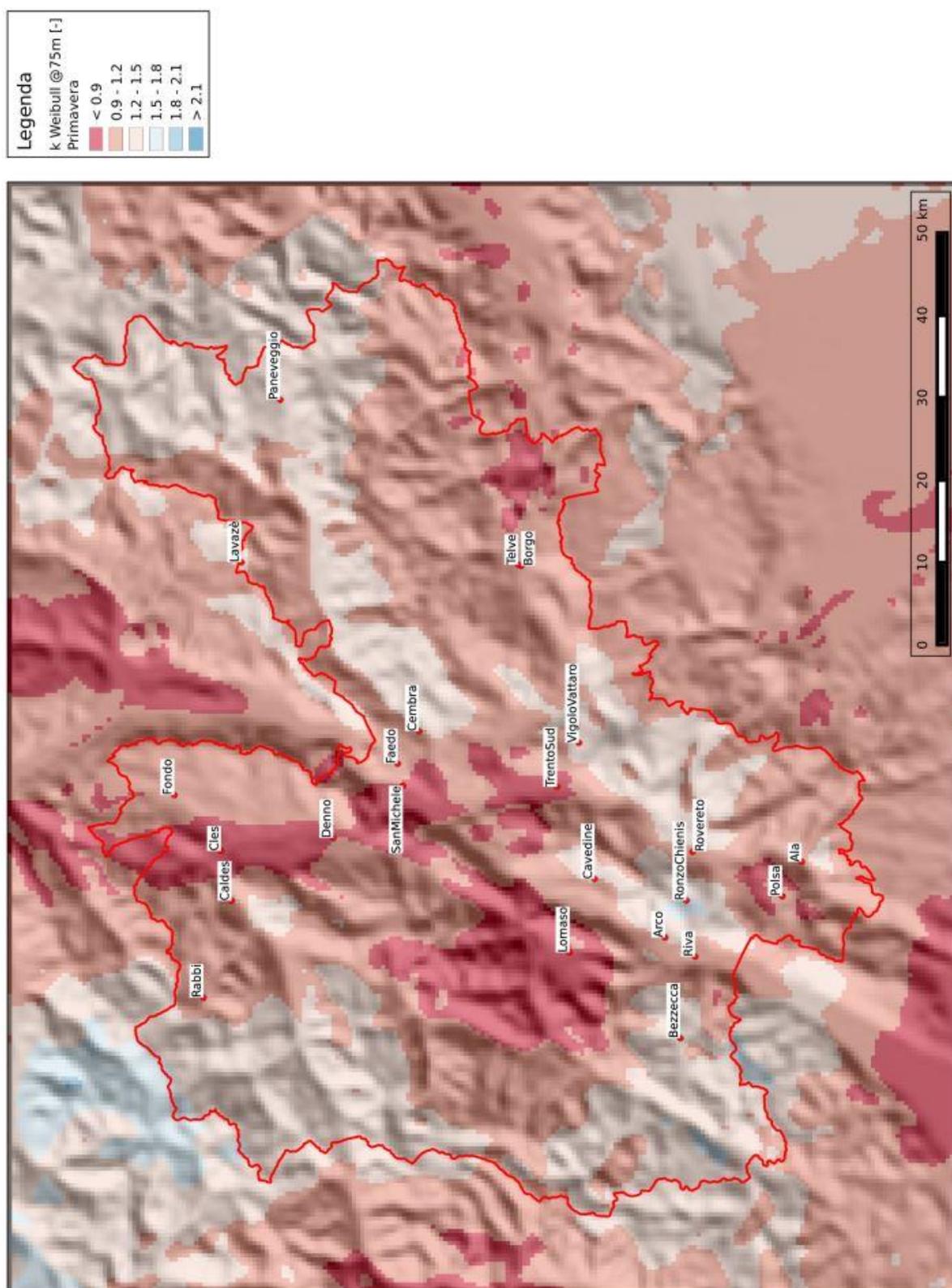


Figura 4.41: Parametro di forma  $k$  in primavera a 75 m dal suolo.

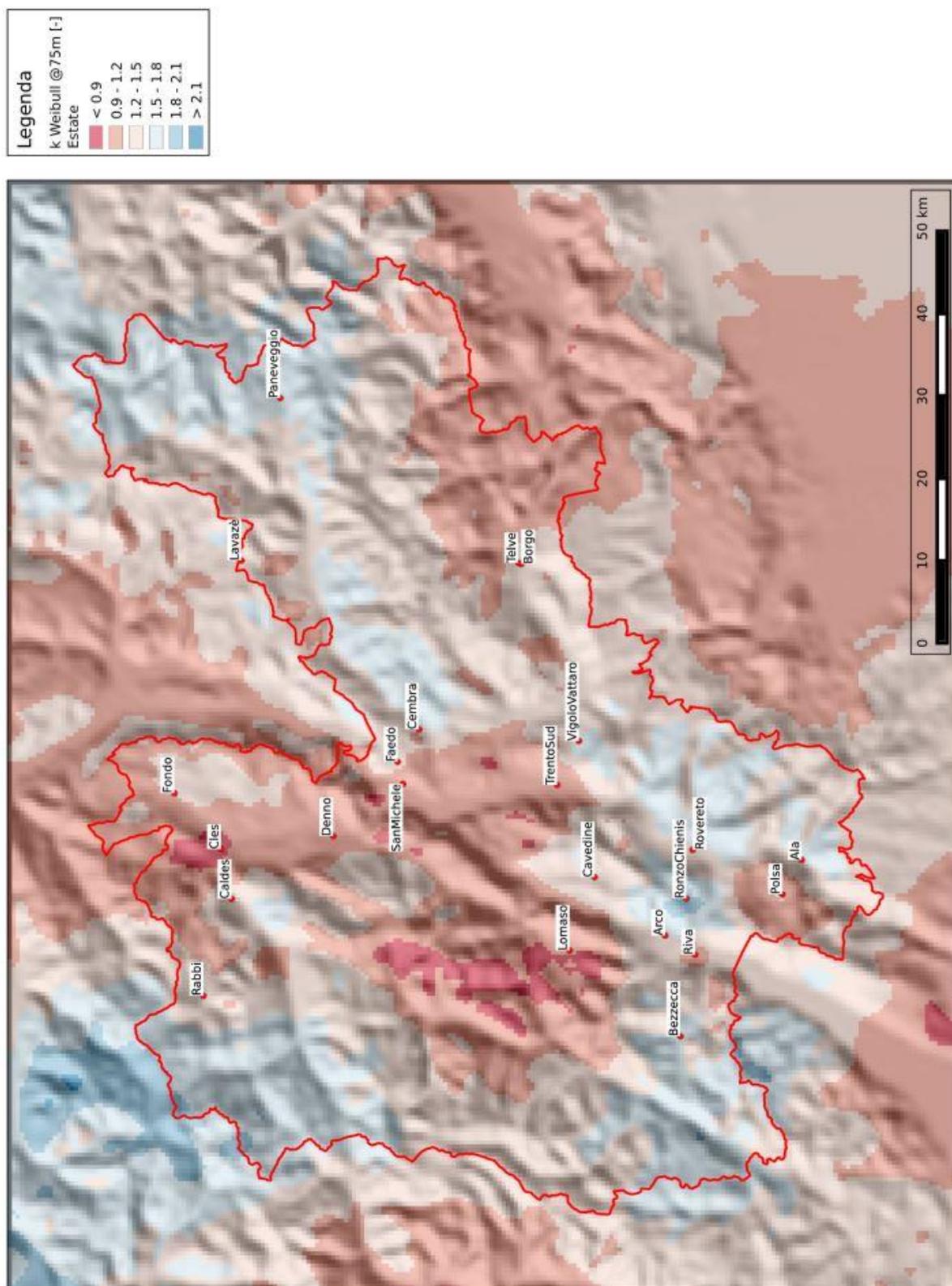


Figura 4.42: Parametro di forma  $k$  in estate a 75 m dal suolo.

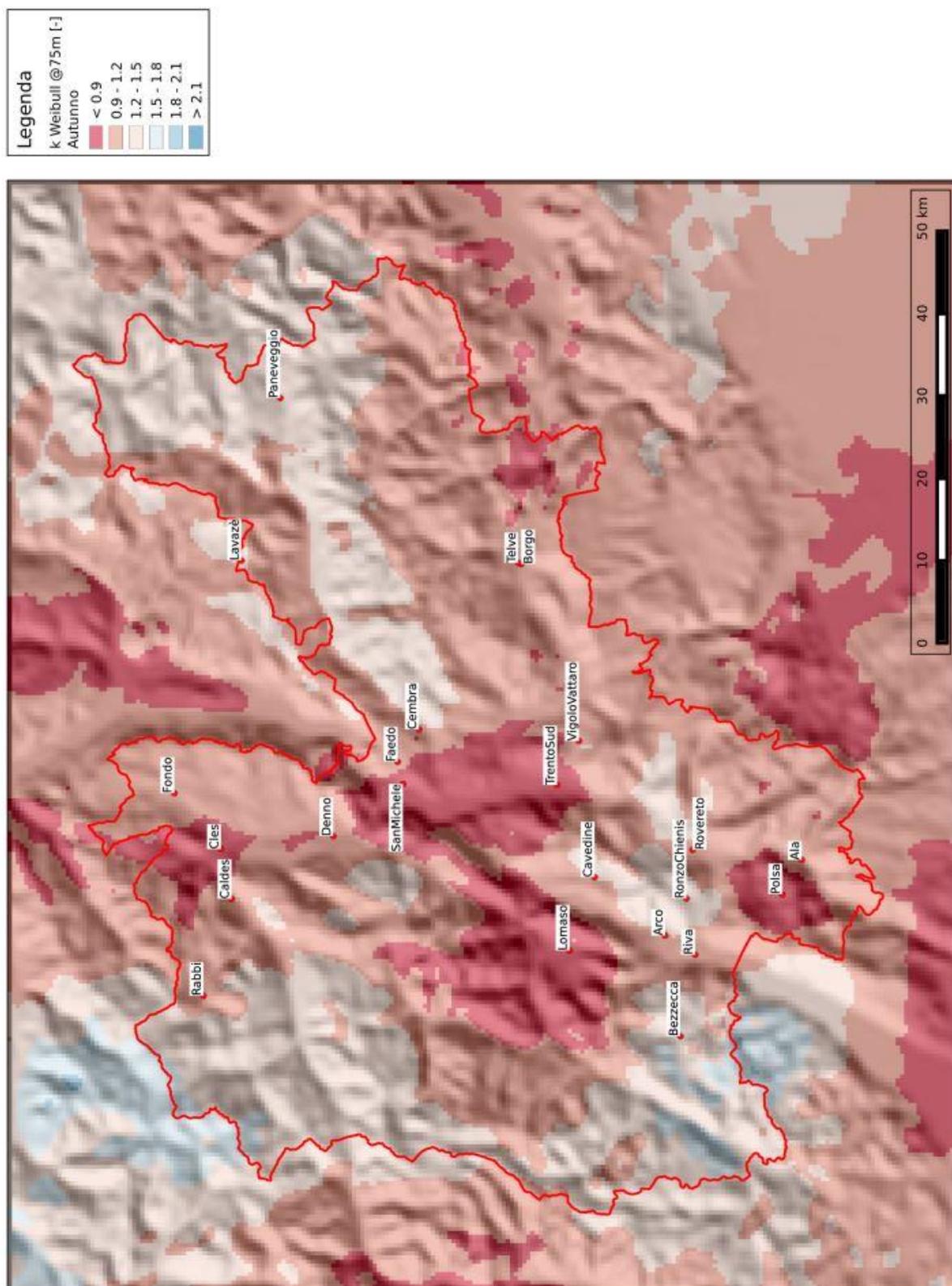


Figura 4.43: Parametro di forma  $k$  in autunno a 75 m dal suolo.

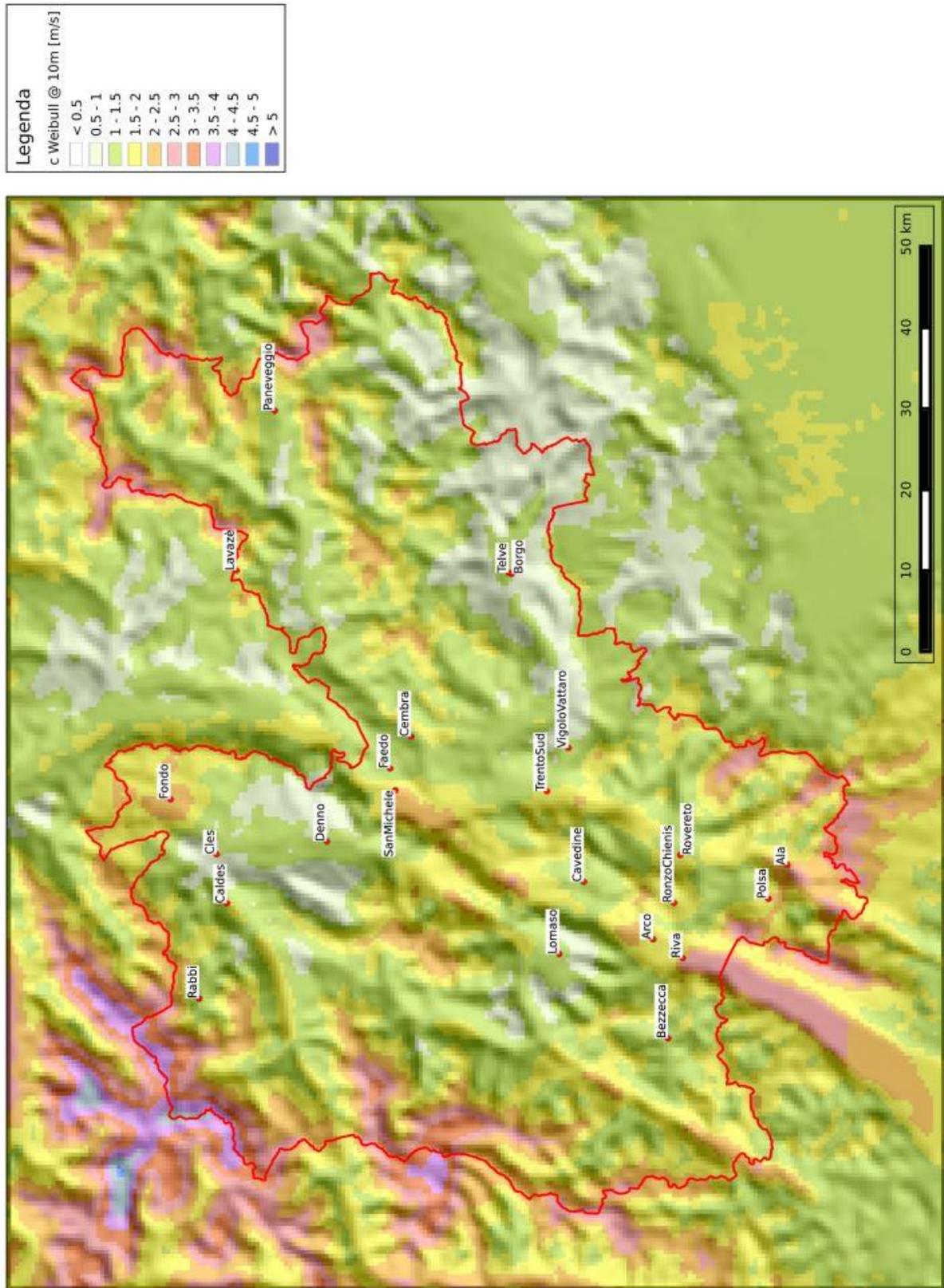


Figura 4.44: Parametro di scala  $c$  annuale a 10 m dal suolo.

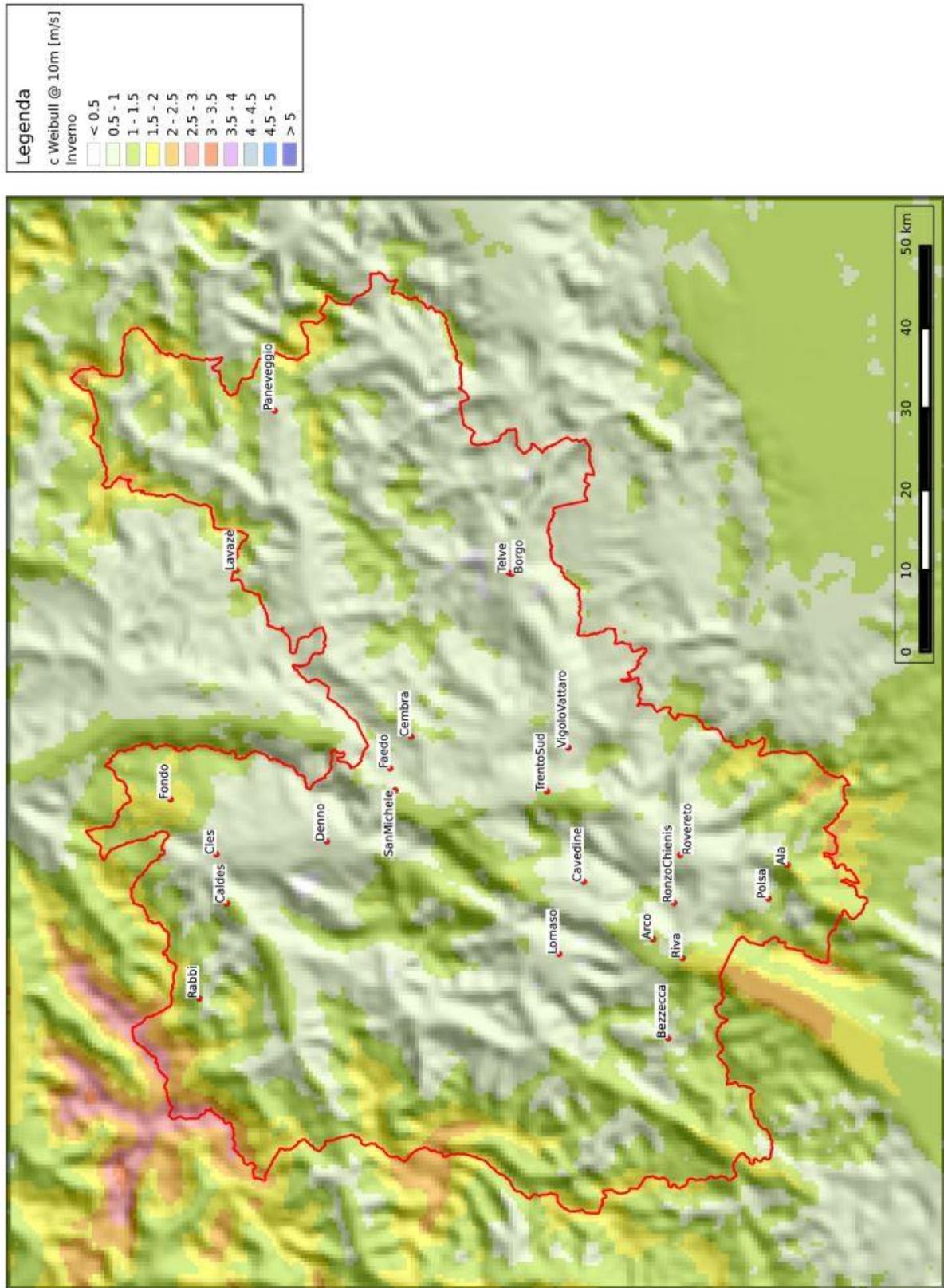


Figura 4.45: Parametro di scala  $c$  in inverno a 10 m dal suolo.

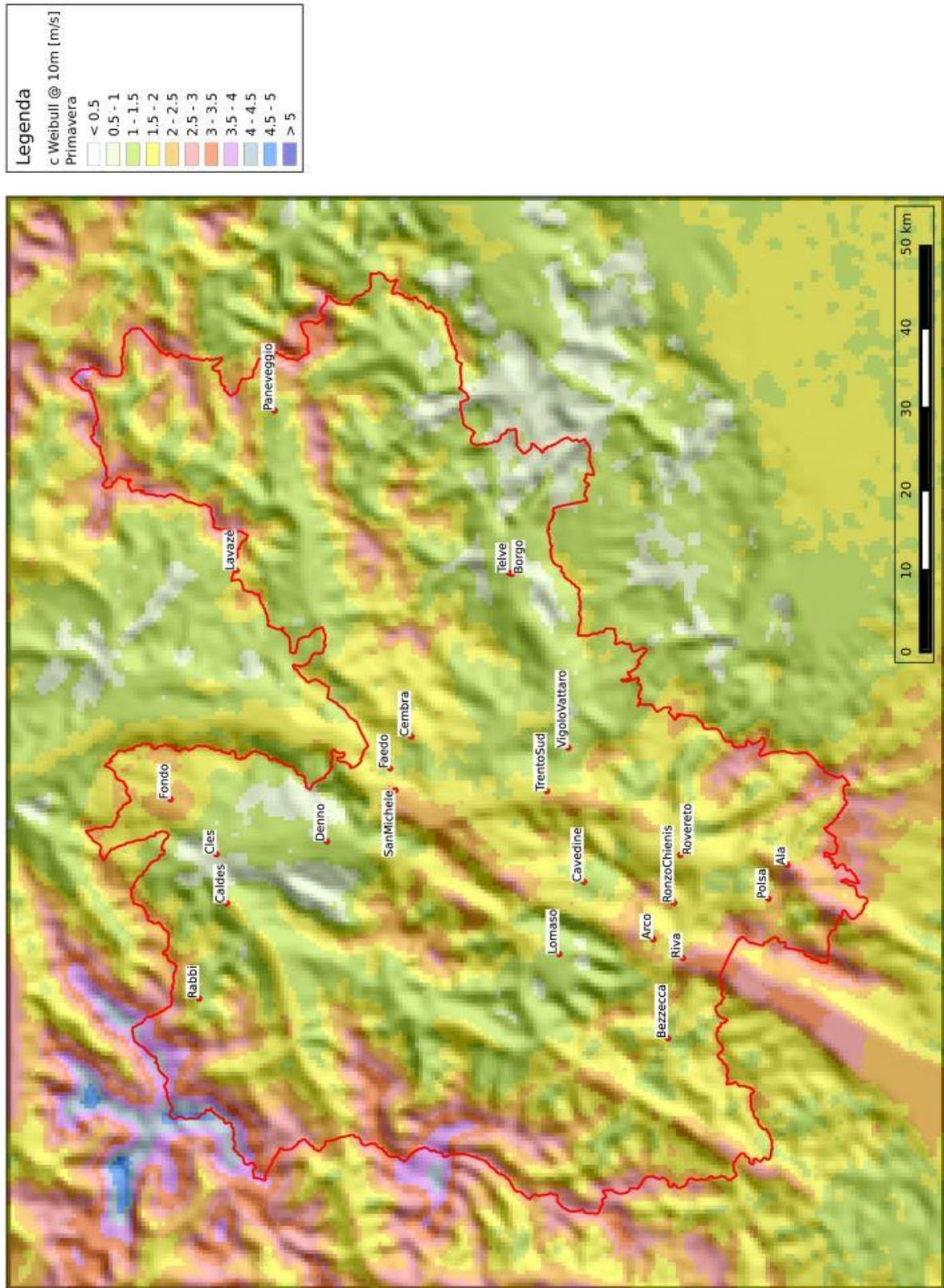


Figura 4.46: Parametro di scala  $c$  in primavera a 10 m dal suolo.

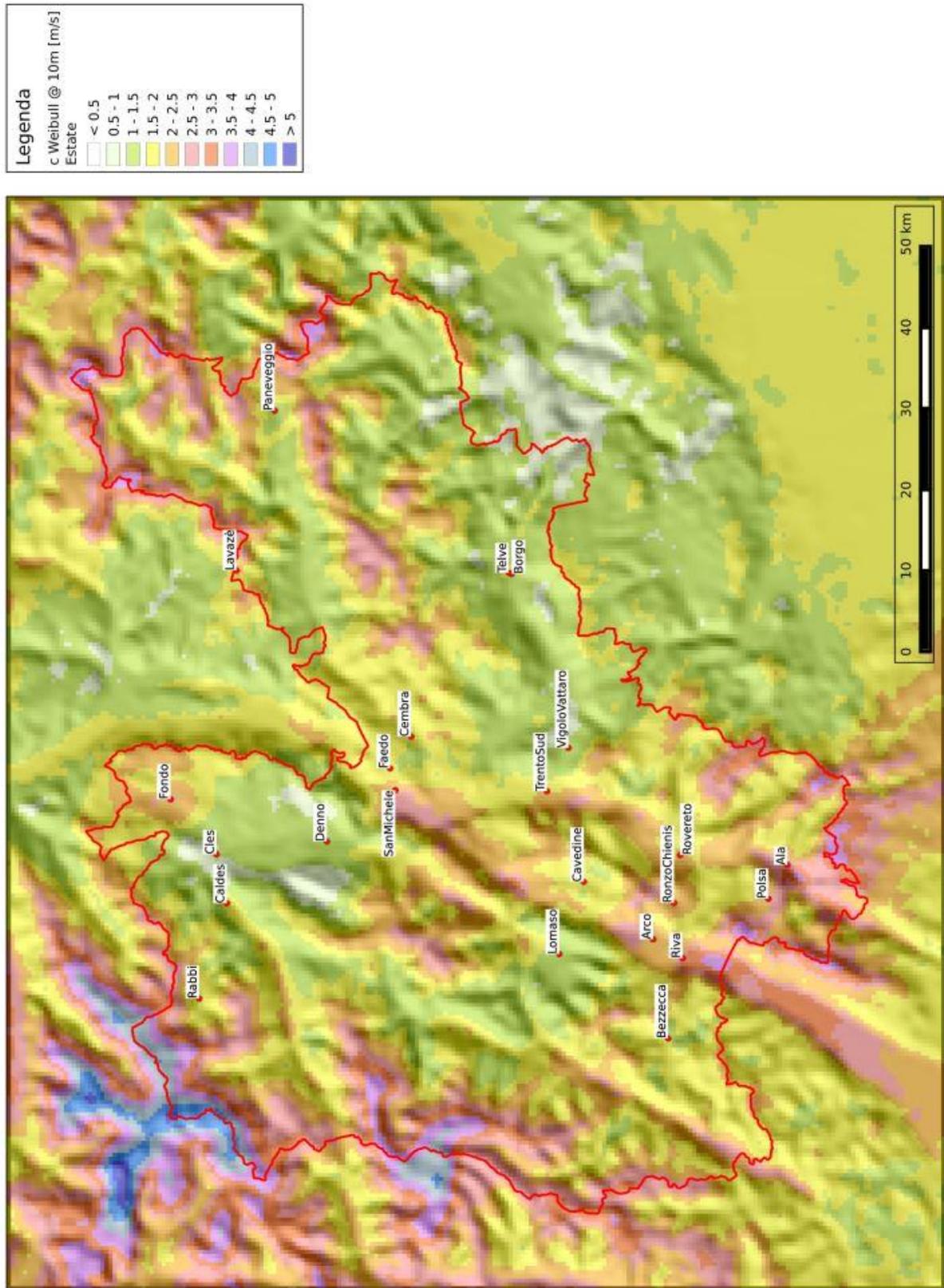


Figura 4.47: Parametro di scala  $c$  in estate a 10 m dal suolo.

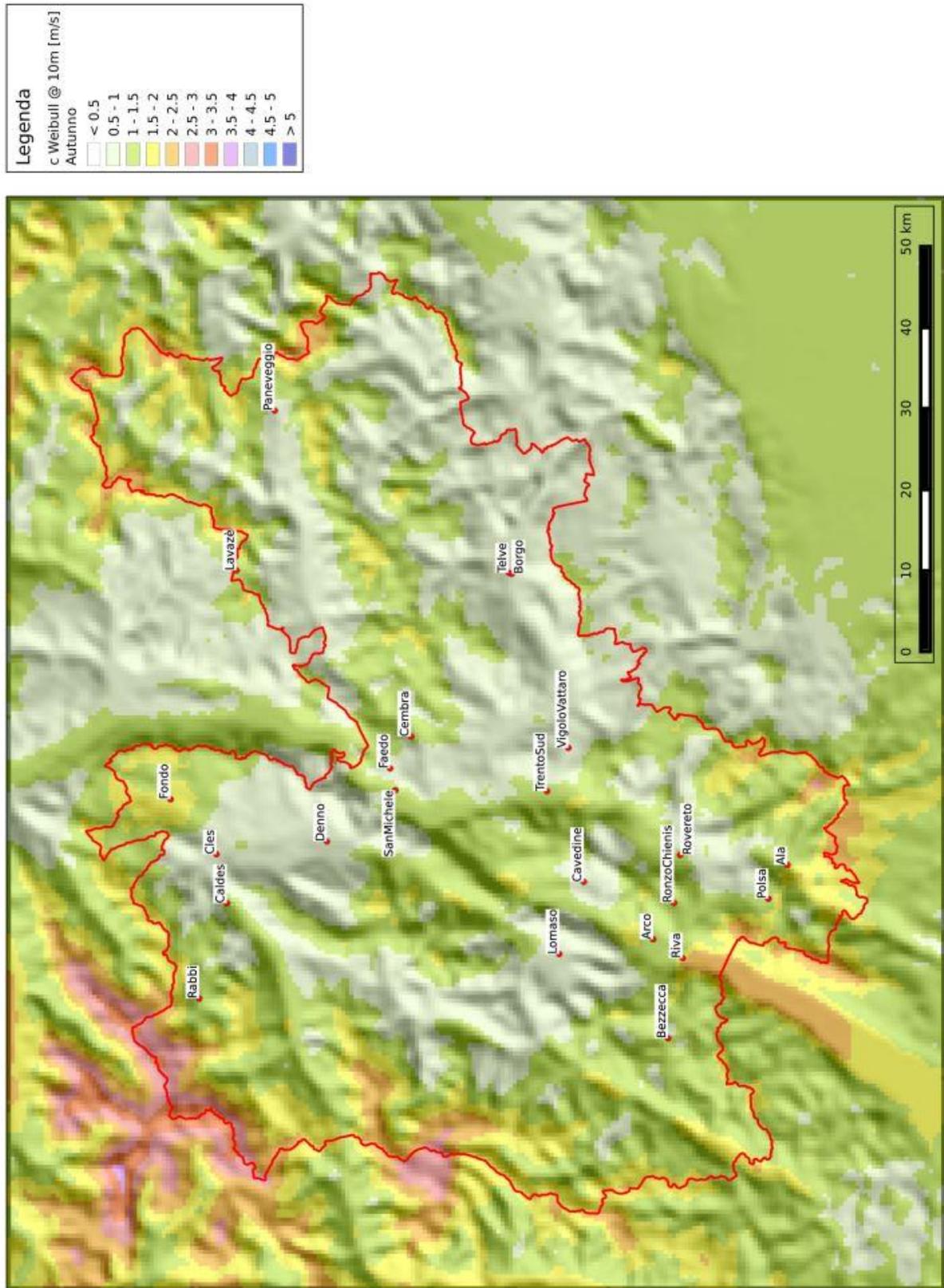


Figura 4.48: Parametro di scala  $c$  in autunno a 10 m dal suolo.

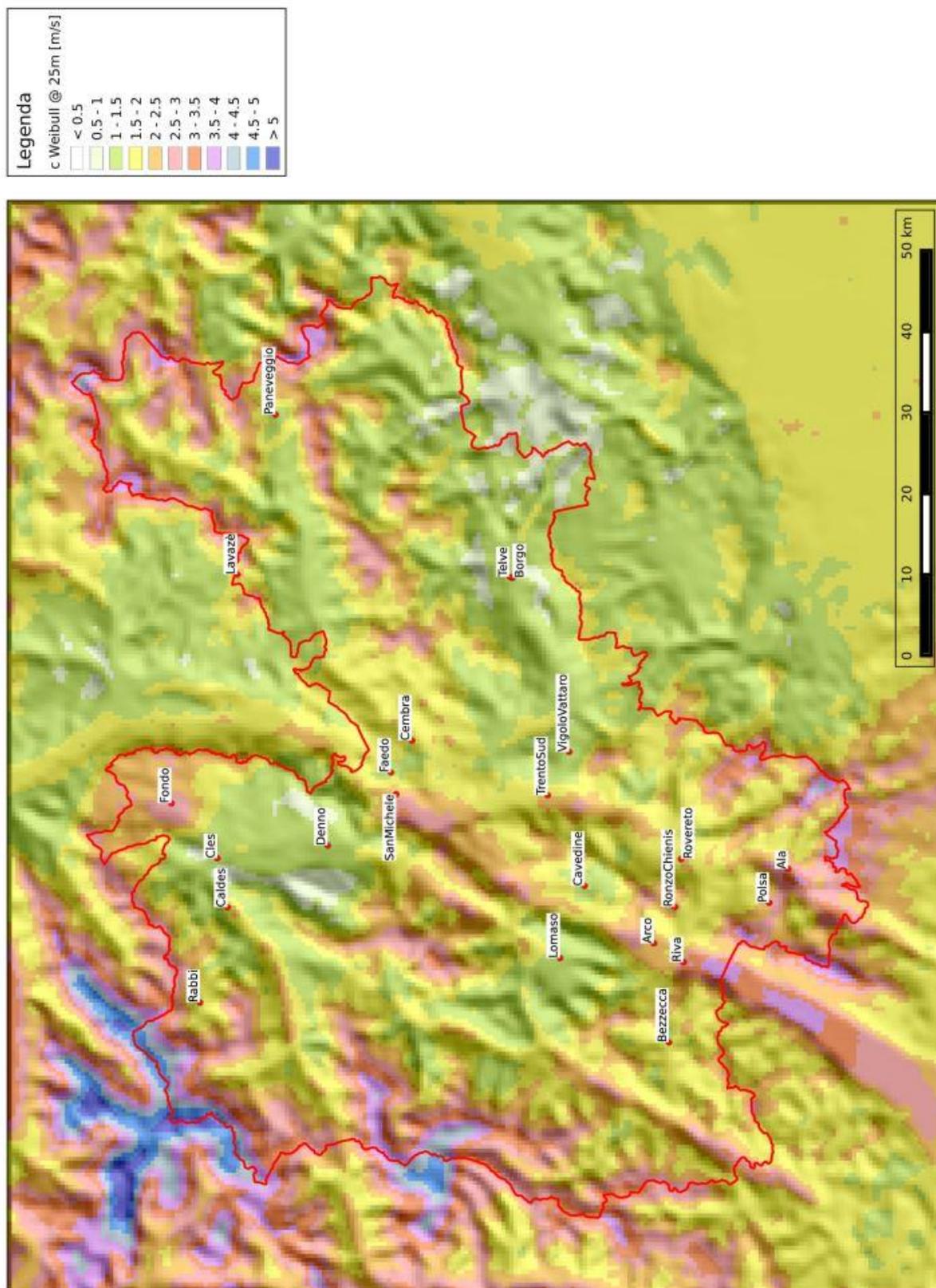


Figura 4.49: Parametro di scala  $c$  annuale a 25 m dal suolo.

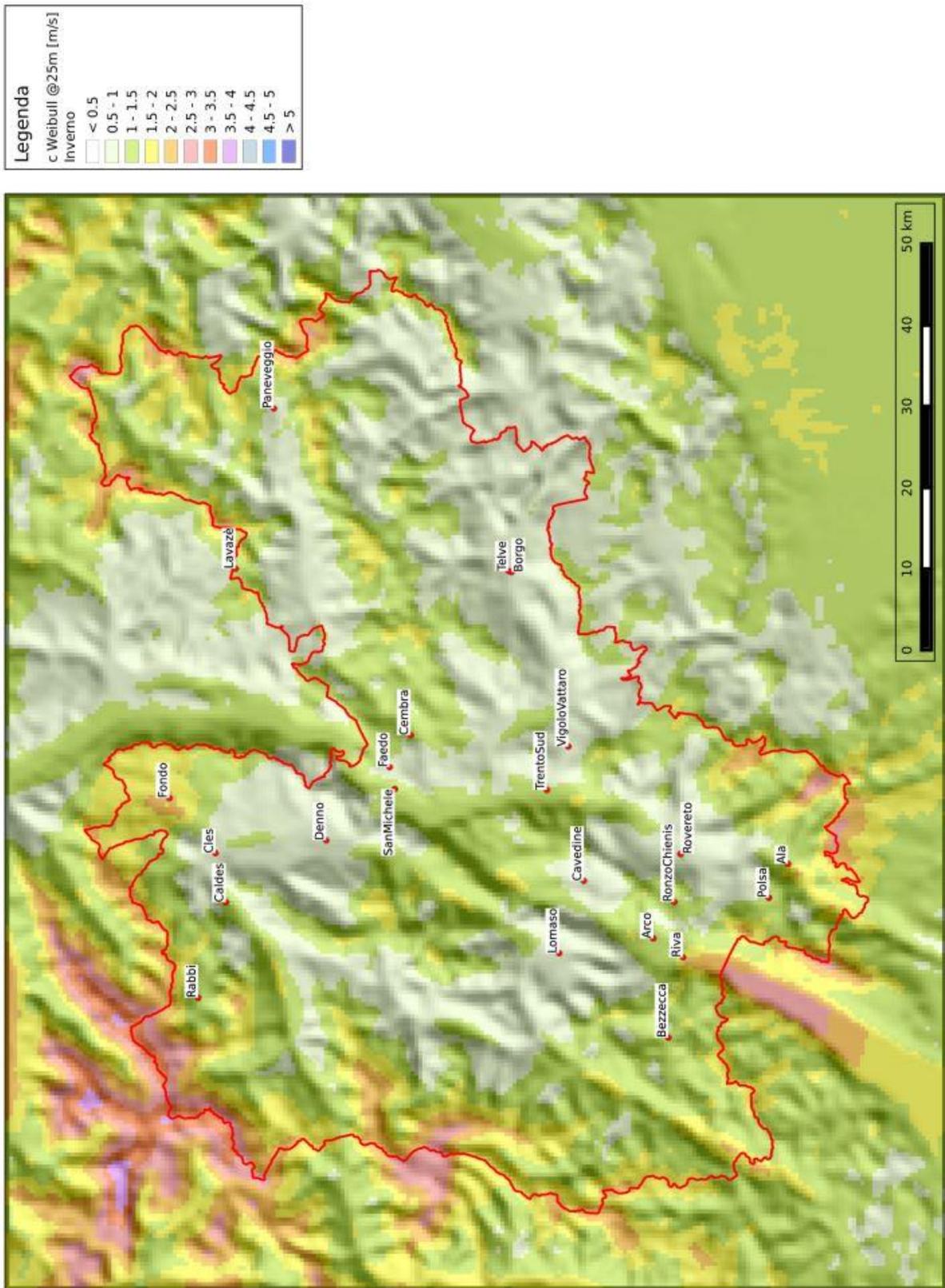


Figura 4.50: Parametro di scala  $c$  in inverno a 25 m dal suolo.

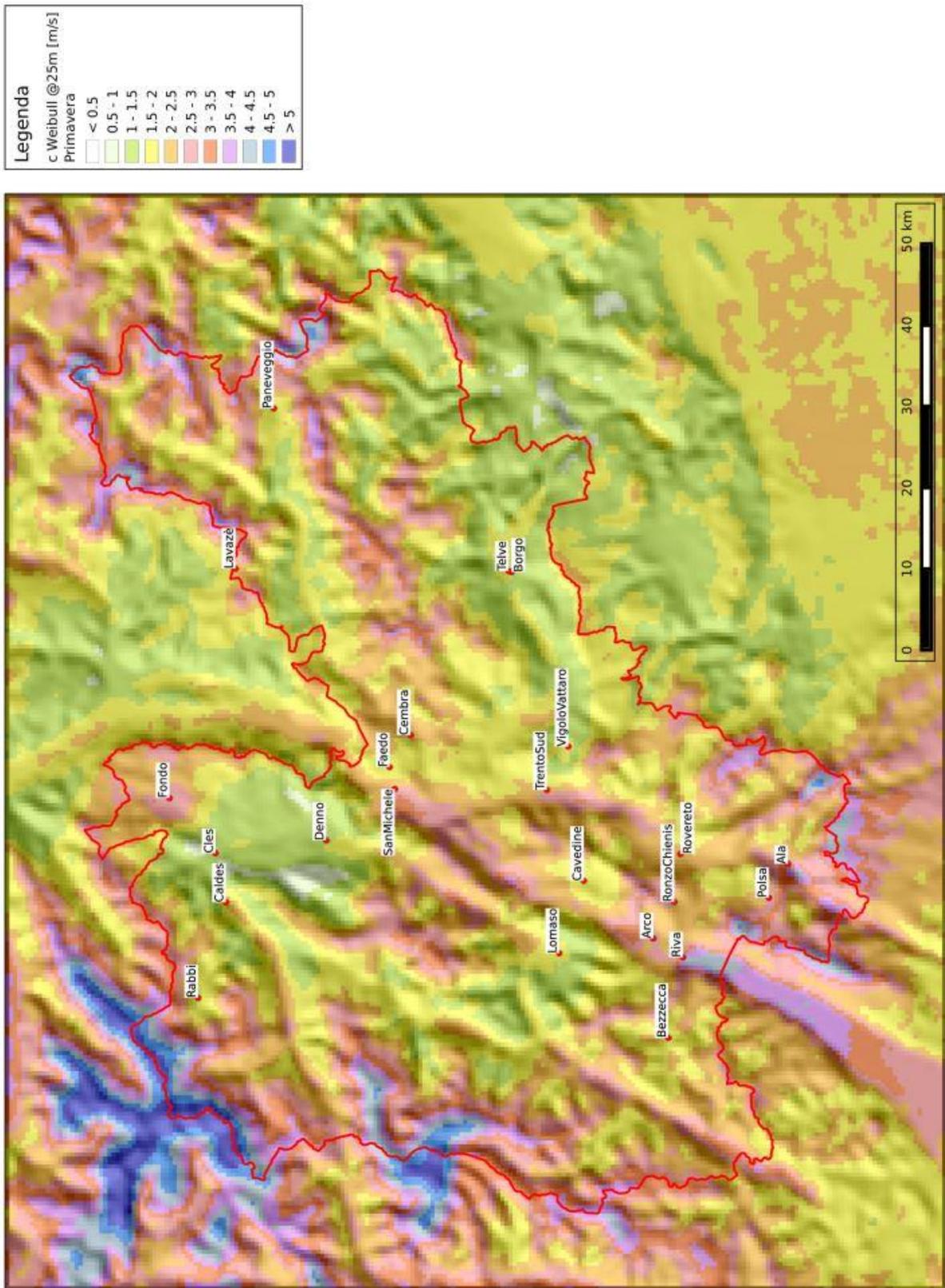


Figura 4.51: Parametro di scala  $c$  in primavera a 25 m dal suolo.

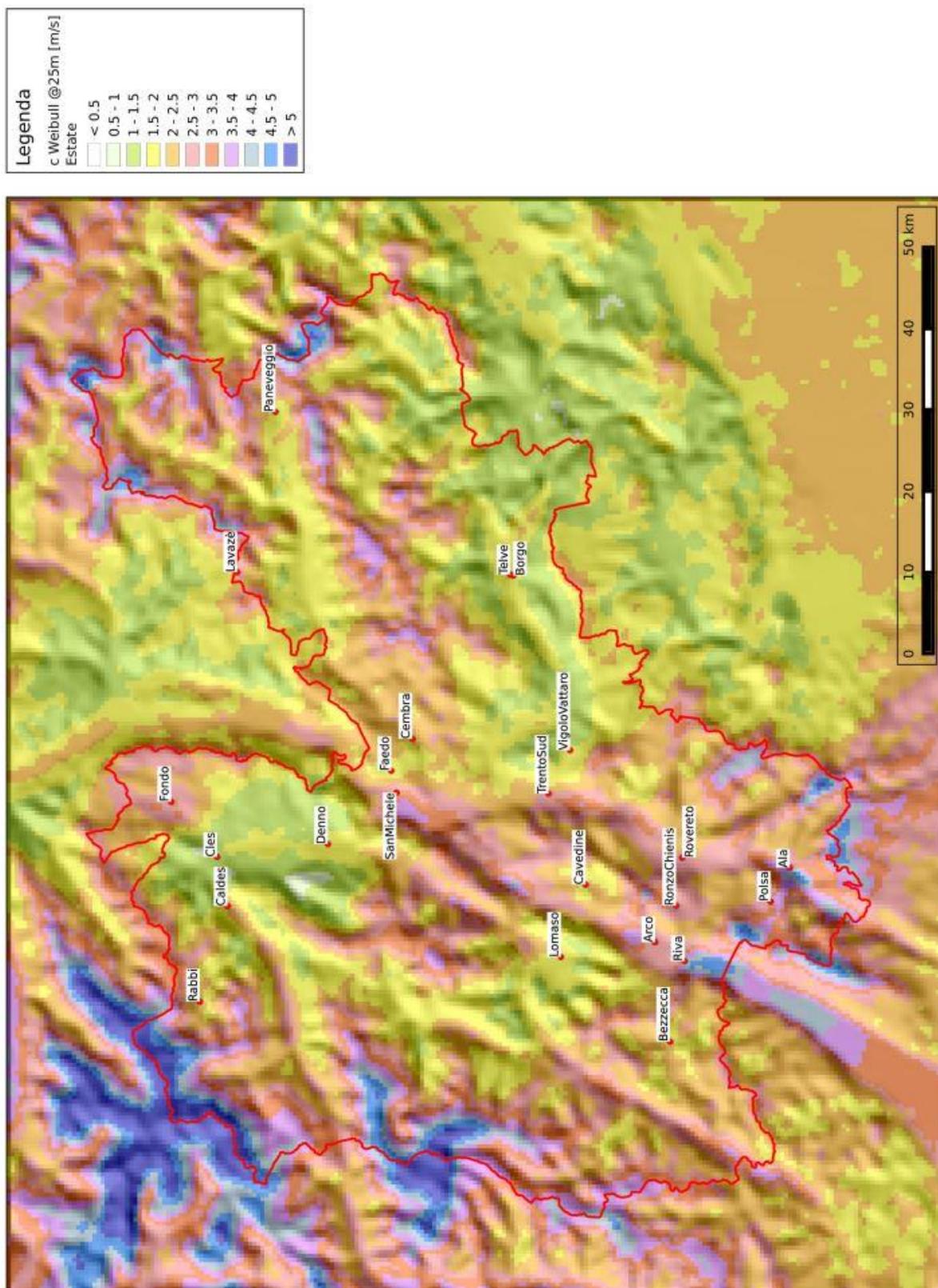


Figura 4.52: Parametro di scala  $c$  in estate a 25 m dal suolo.

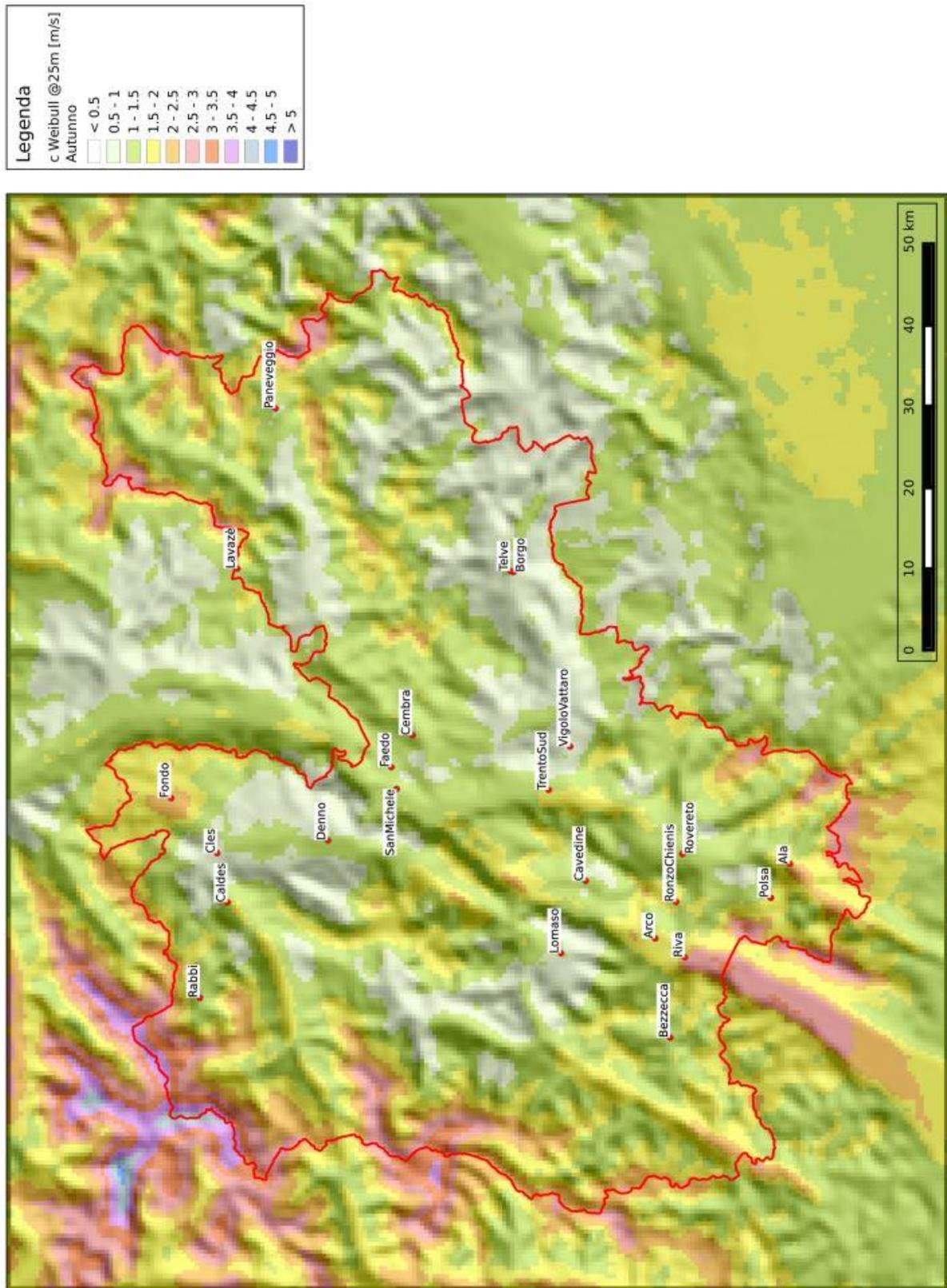


Figura 4.53: Parametro di scala  $c$  in autunno a 25 m dal suolo.

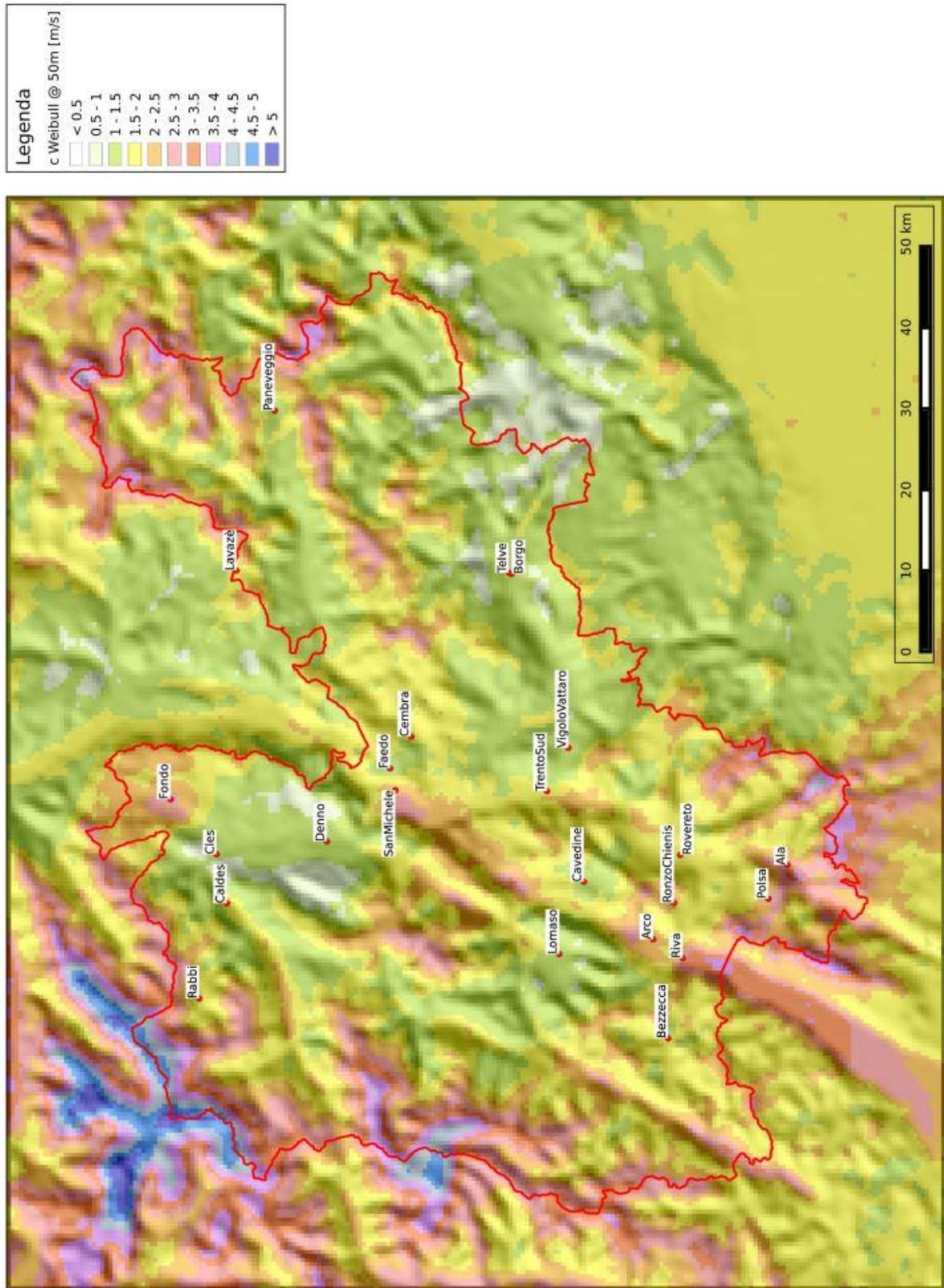


Figura 4.54: Parametro di scala  $c$  annuale a 50 m dal suolo.

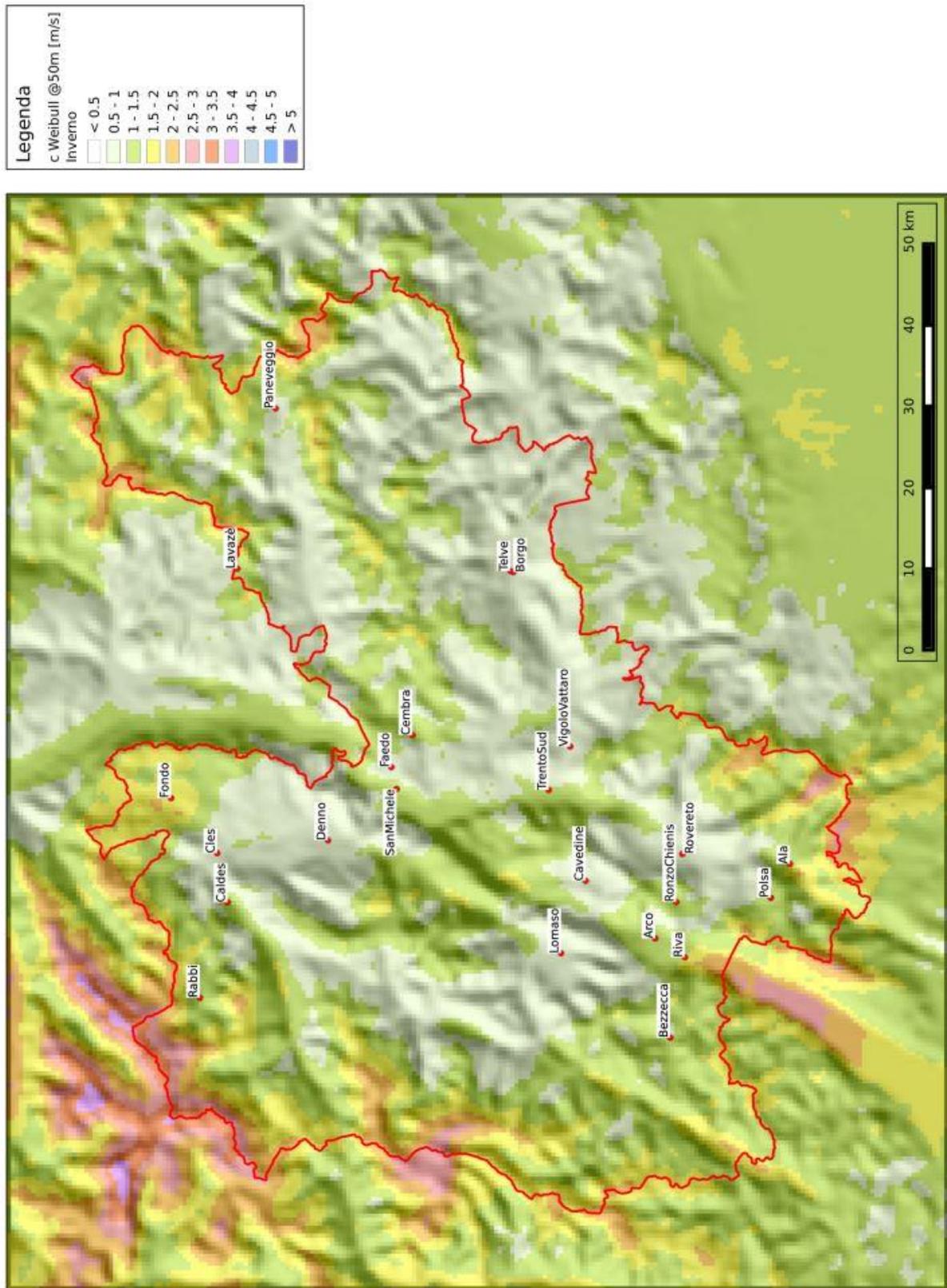


Figura 4.55: Parametro di scala  $c$  in inverno a 50 m dal suolo.

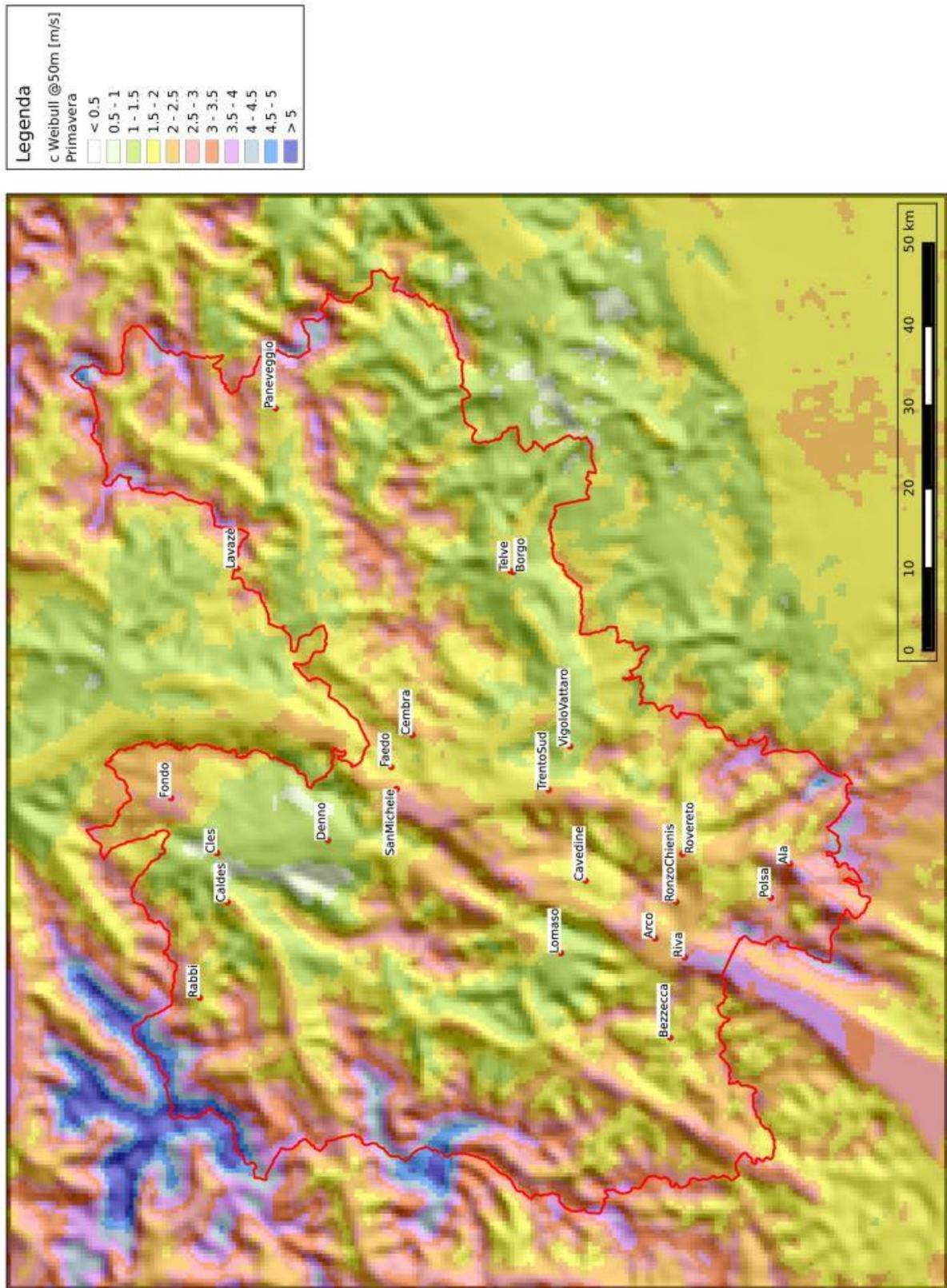


Figura 4.56: Parametro di scala  $c$  in primavera a 50 m dal suolo.

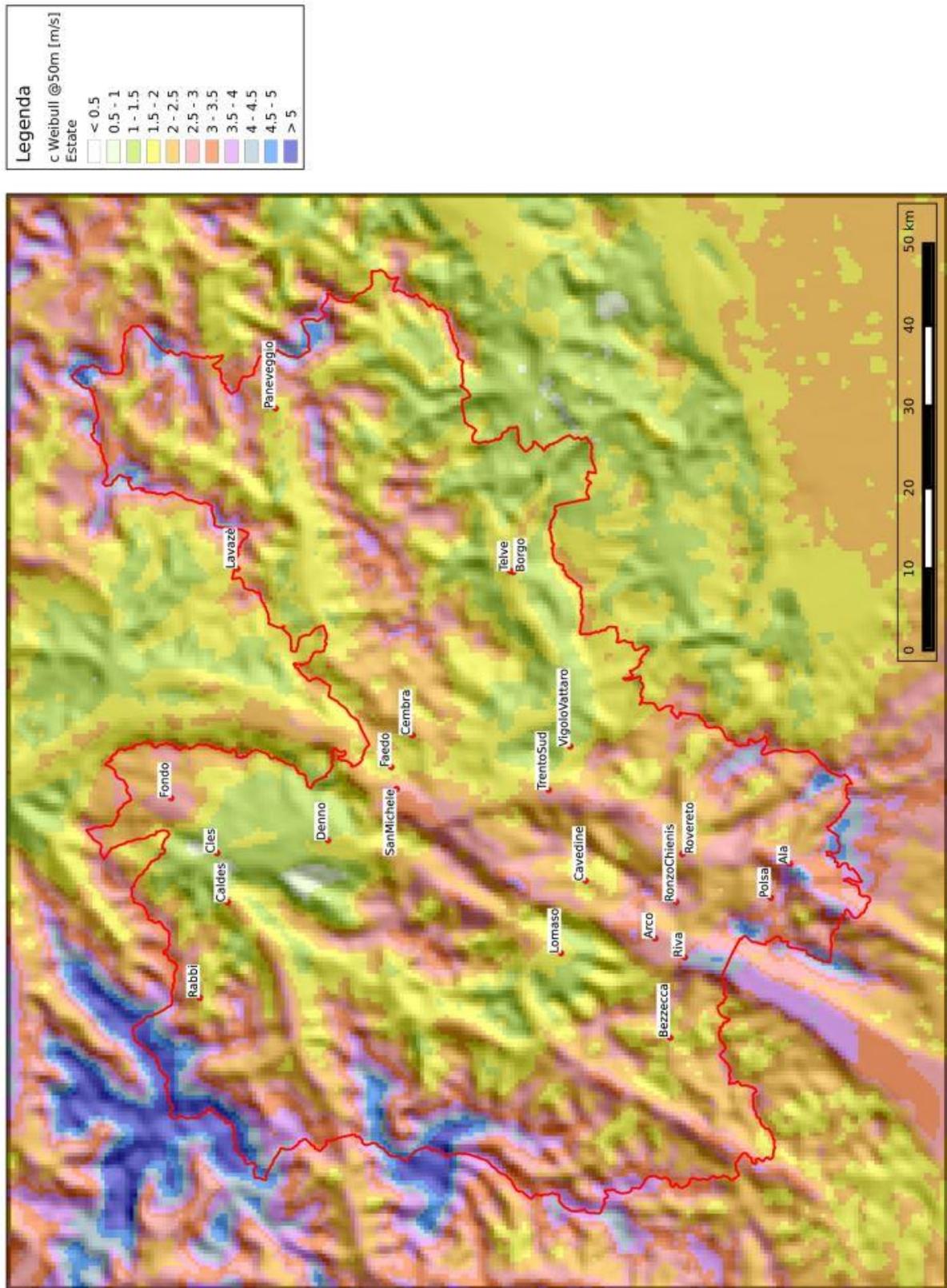


Figura 4.57: Parametro di scala  $c$  in estate a 50 m dal suolo.

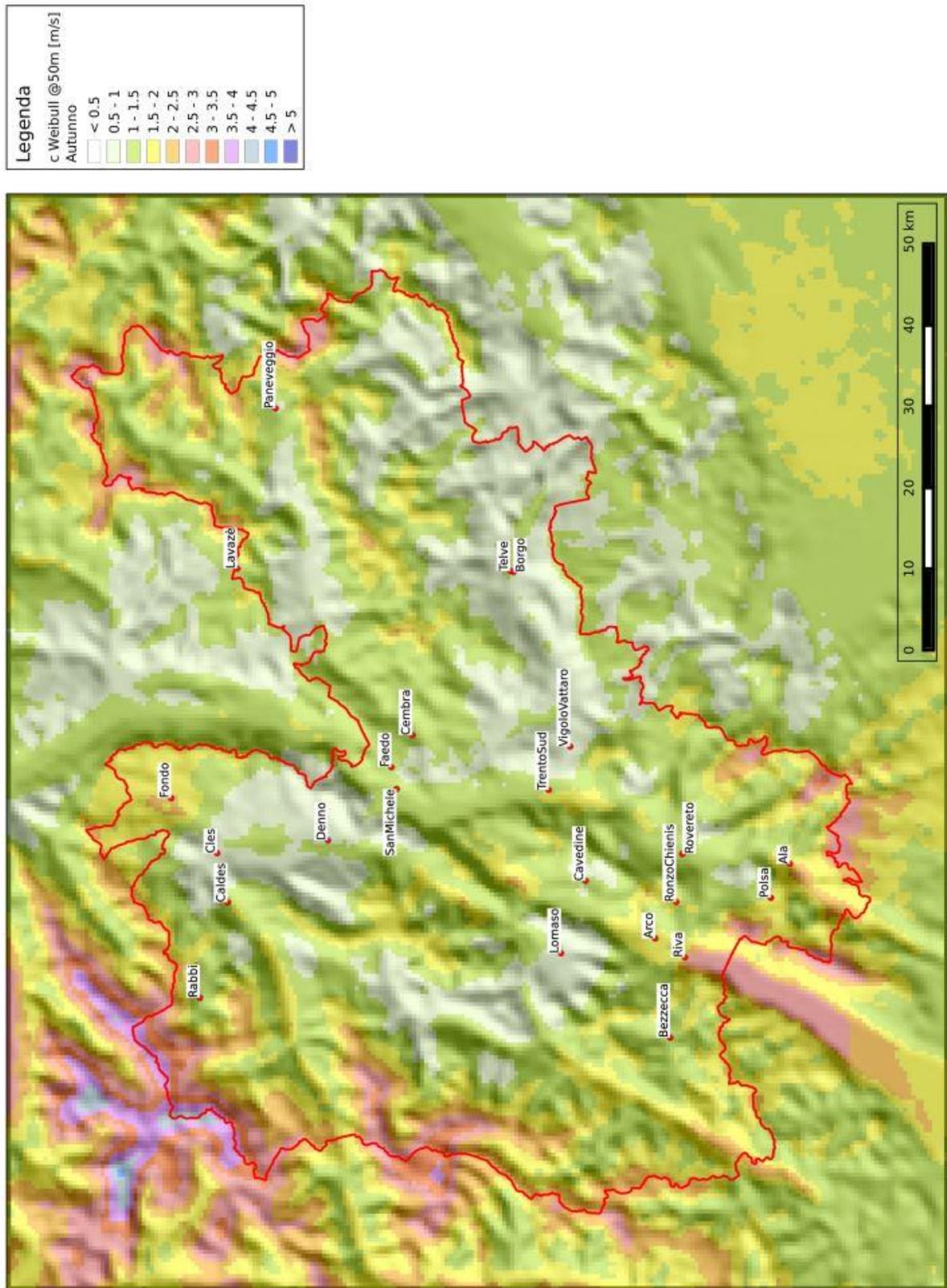


Figura 4.58: Parametro di scala  $c$  in autunno a 50 m dal suolo.

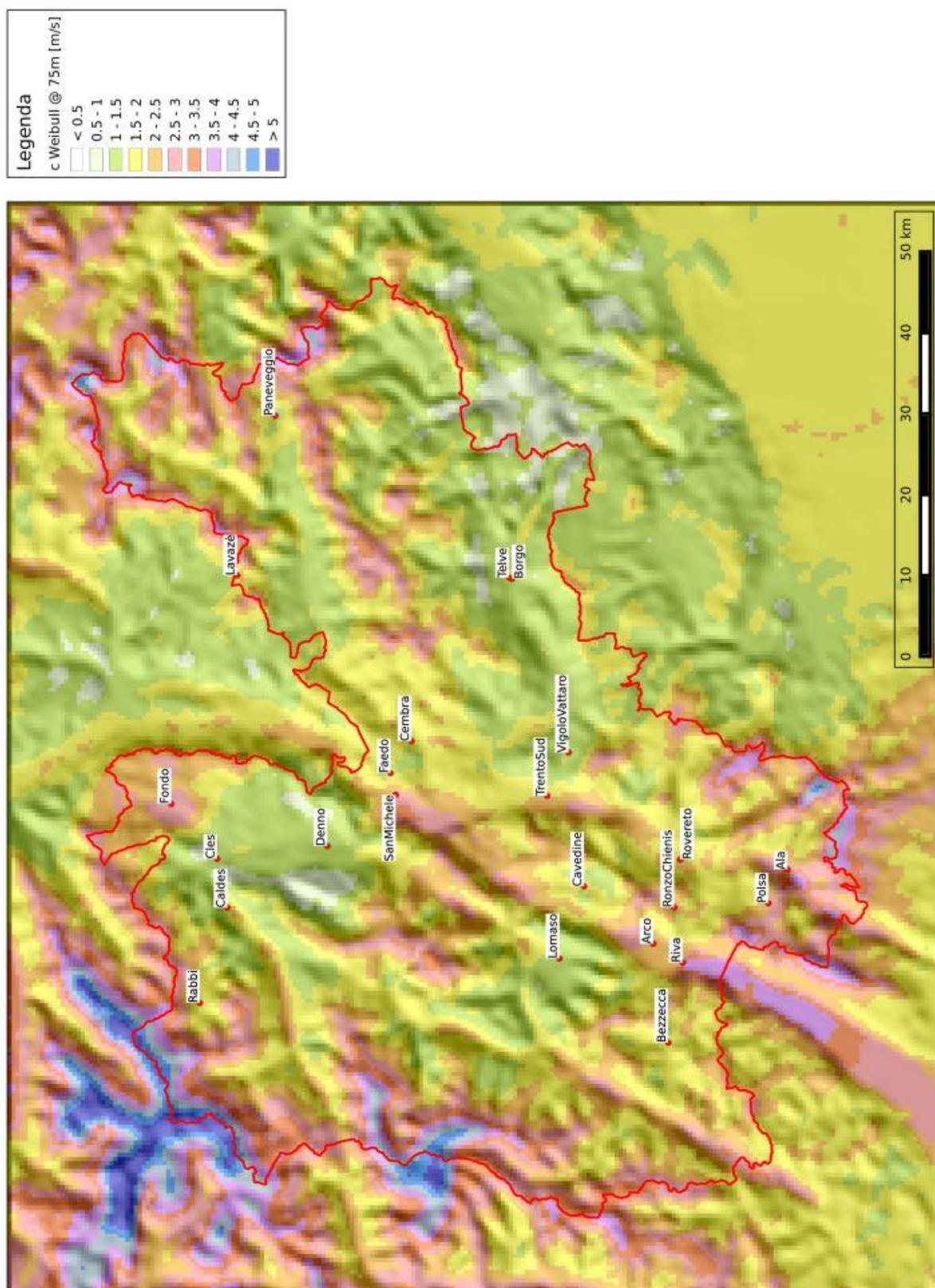


Figura 4.59: Parametro di scala  $c$  annuale a 75 m dal suolo.

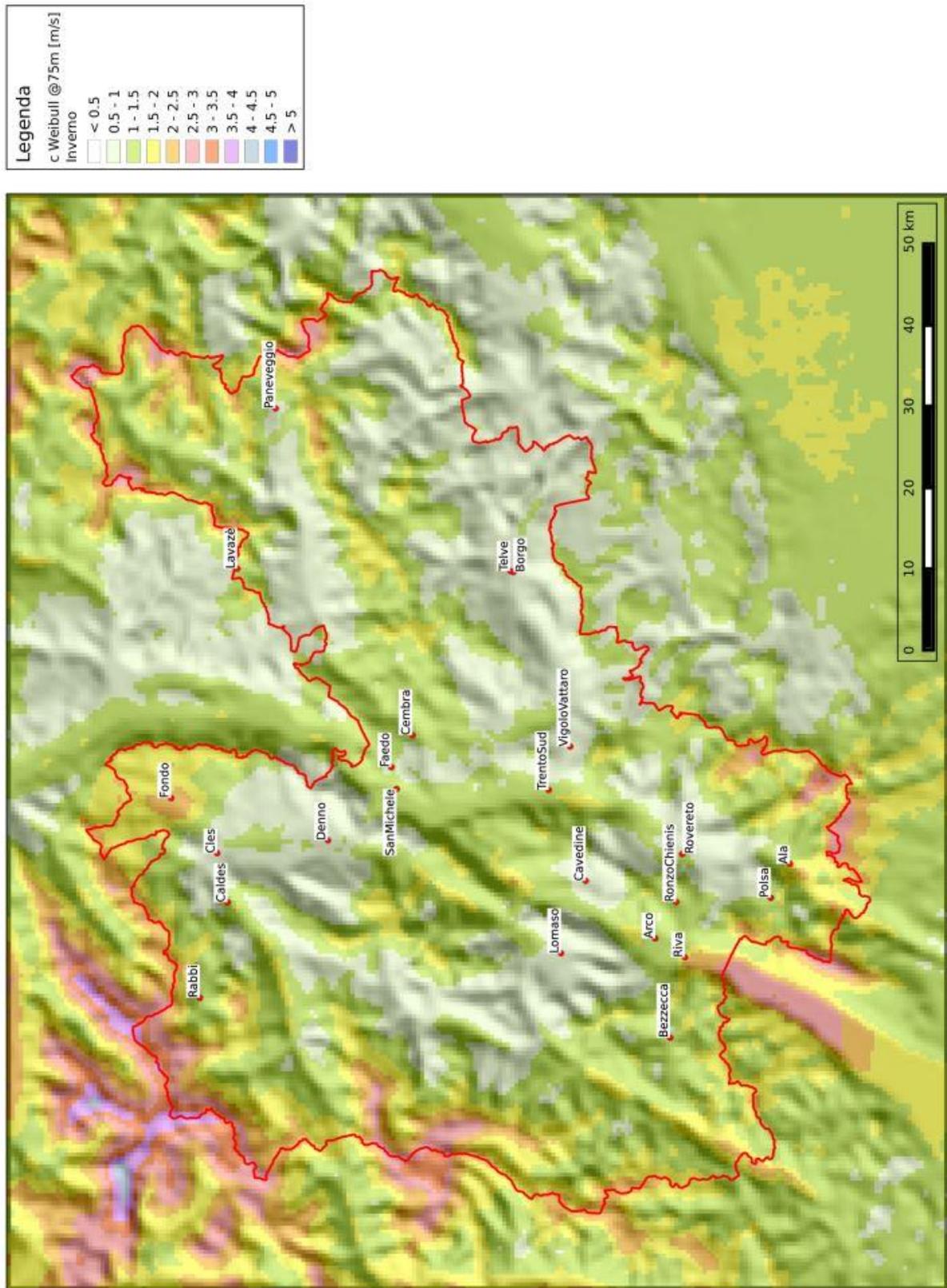


Figura 4.60: Parametro di scala  $c$  in inverno a 75 m dal suolo.

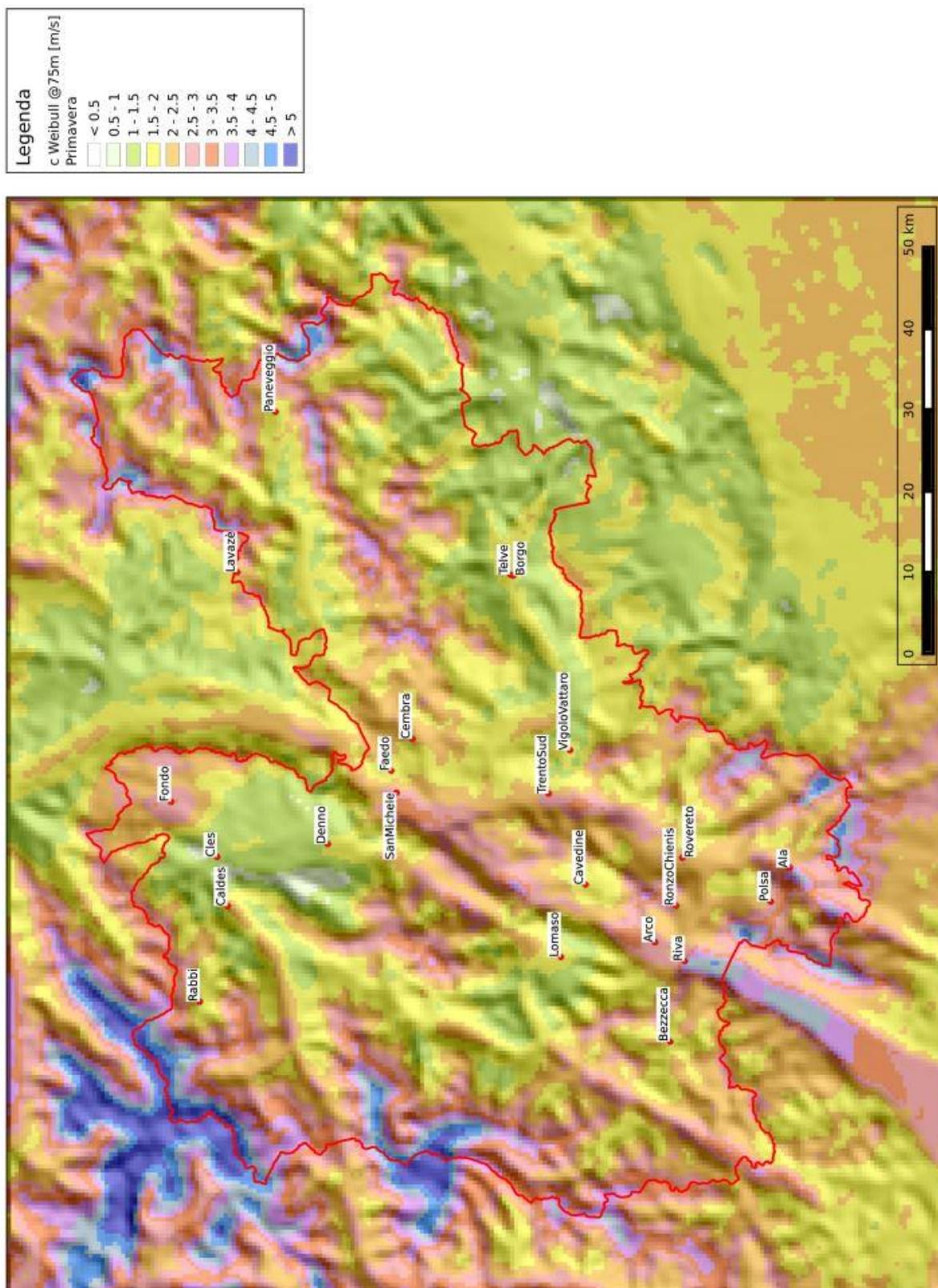


Figura 4.61: Parametro di scala  $c$  in primavera a 75 m dal suolo.

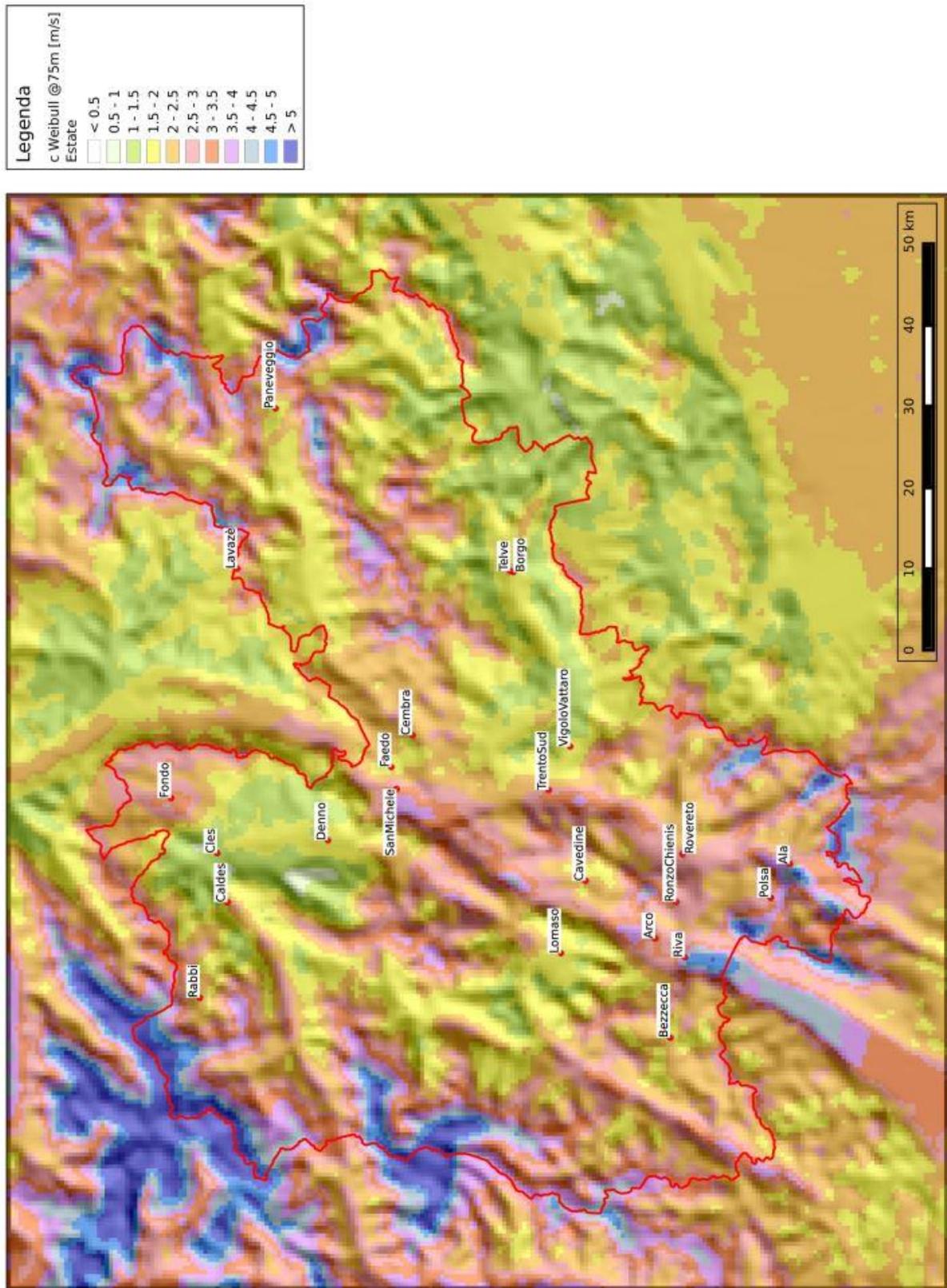


Figura 4.62: Parametro di scala  $c$  in estate a 75 m dal suolo.

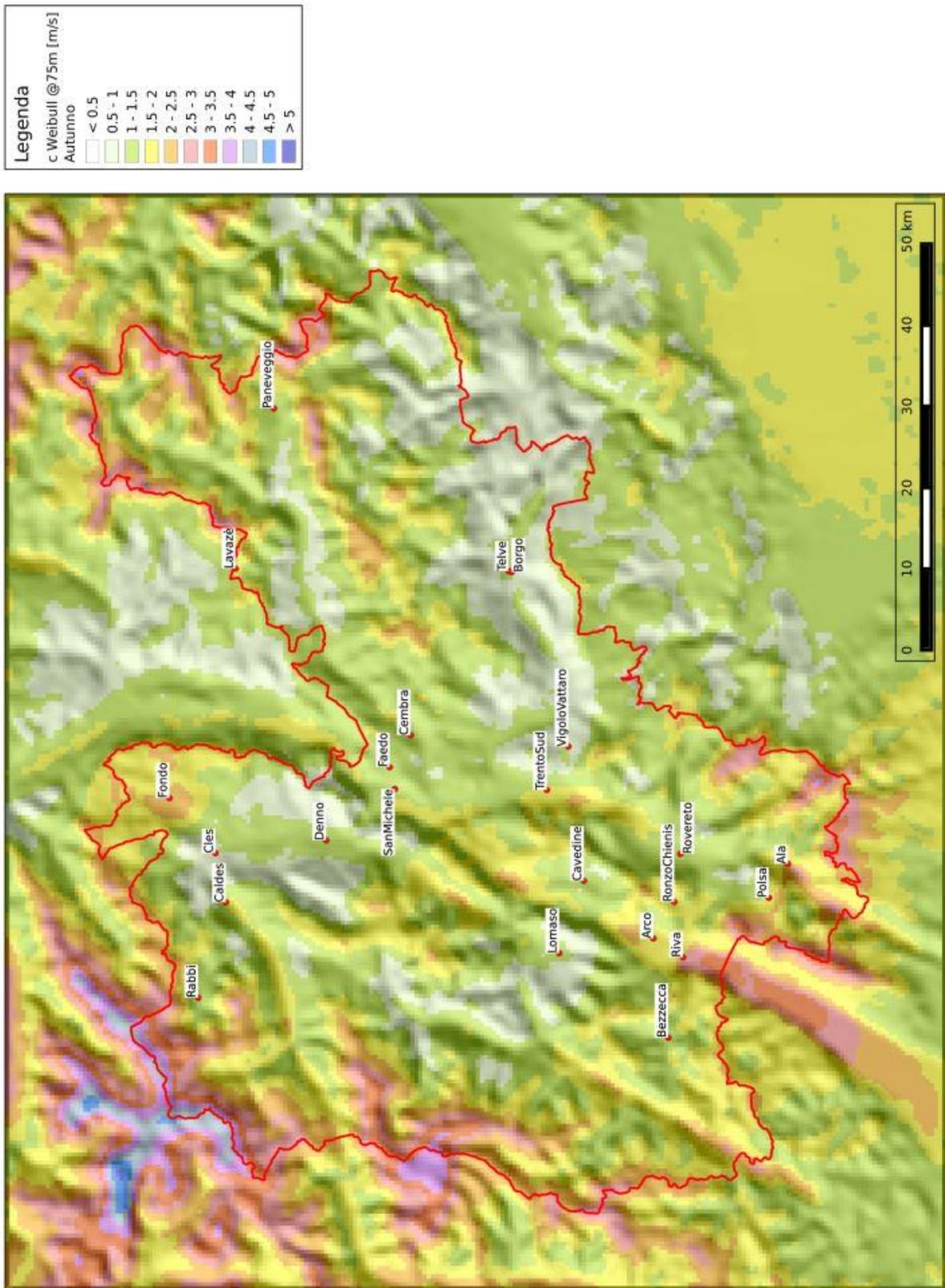


Figura 4.63: Parametro di scala  $c$  in autunno a 75 m dal suolo.

## 5. Validazione

Gli output delle simulazioni numeriche sono stati confrontati con misure da stazioni al suolo non assimilate all'interno della catena modellistica, al fine di ottenere una valutazione della qualità dei risultati ottenuti basata su un dataset indipendente. Le stazioni meteorologiche utilizzate in questa fase di validazione sono quelle che non sono state prese in considerazione per l'assimilazione all'interno della catena modellistica perché o più brevi di 10 anni o perché non presentavano almeno l'80% di dati validi nel periodo di riferimento, avendo comunque una qualità sufficiente per poter essere utilizzati per la validazione. In Tabella 5.1 sono elencate le stazioni utilizzate per la validazione, mentre la loro dislocazione spaziale è mostrata nella Figura 5.1. Si può notare come le stazioni utilizzate per la validazione siano posizionate abbastanza omogeneamente sul territorio provinciale ed inoltre ricoprono un vasto range di altitudini, andando dai fondovalle fino all'alta quota (Vioz, 2975 m s.l.m.)

Tabella 5.1: Stazioni utilizzate per la validazione dei risultati.

Stazione	Longitudine [°E]	Latitudine [°N]	Altezza anemometro [m]	Quota [m s.l.m.]
Aldeno	11.091	45.969	10	182
Baselga di Pinè	11.251	46.126	10	983
Cavalese	11.452	46.285	10	958
Levico	11.304	46.011	10	502
Monte Bondone	11.041	46.021	10	1490
Nomi	11.098	45.954	3	179
Passo Vezzena	11.314	45.962	3	1368
Pinzolo Prà Rodont	10.785	46.168	3	1498
Predazzo	11.598	46.299	10	1001
Segonzano	11.290	46.211	5	660
Storo	10.561	45.848	10	385
Trento Roncafort	11.101	46.096	10	194
Vioz	10.632	46.384	5	2975

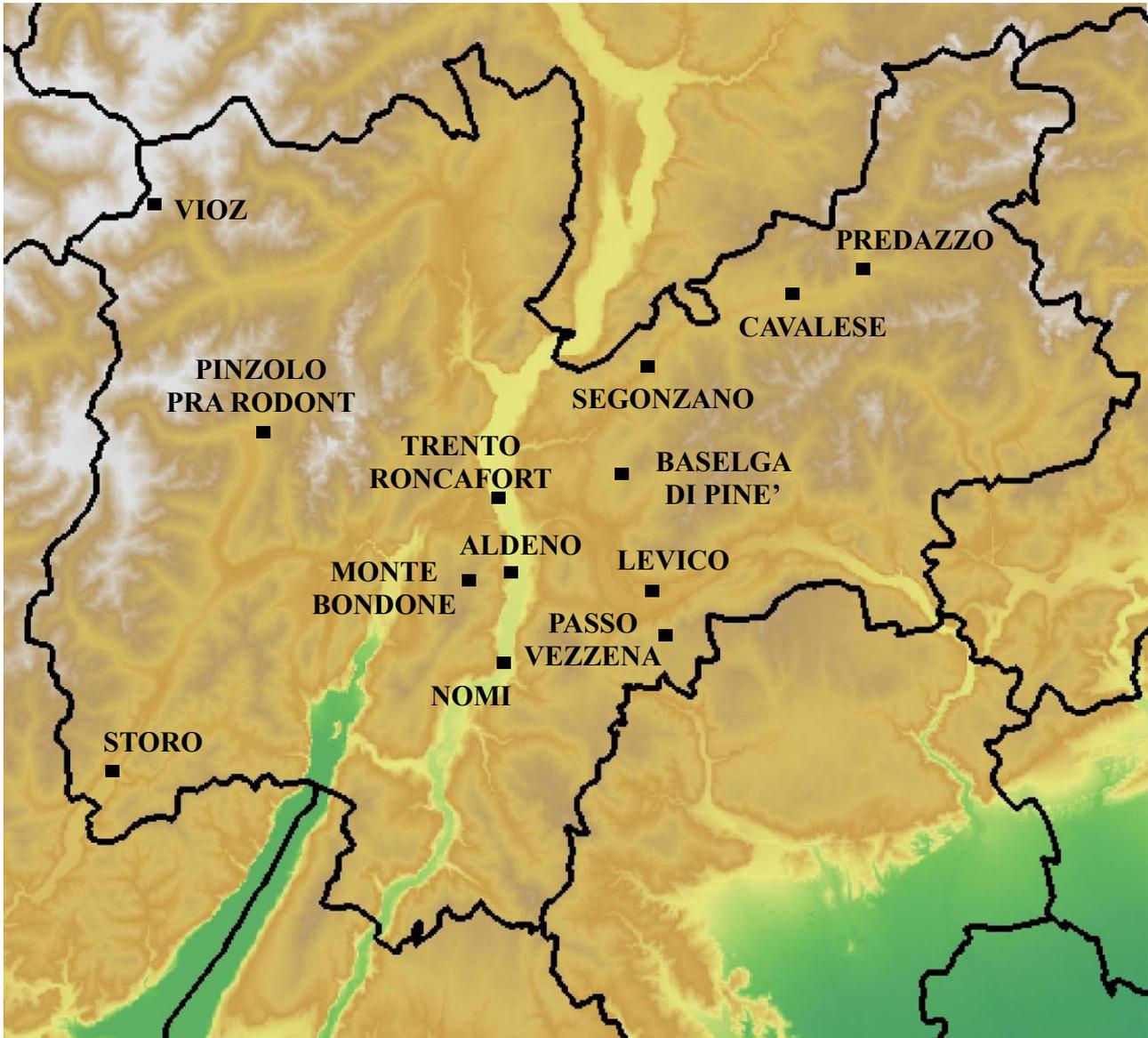


Figura 5.1: Stazioni utilizzate per la validazione dei risultati.

Si ricorda inoltre che una validazione preliminare dei risultati della catena modellistica, volta soprattutto ad individuare il set-up e la risoluzione ottimale per le simulazioni era stato effettuata nel corso del progetto “Attività propedeutiche alla realizzazione di un atlante eolico per la Provincia di Trento”. Inoltre parte di questa attività di validazione è confluita in una pubblicazione sulla rivista Energy Procedia (Giovannini et al. 2014) ed è stata presentata ai convegni internazionali EGU General Assembly 2014, (Vienna, Austria, 27 Aprile- 2 Maggio 2014) e III International Conference Energy and Meteorology (Boulder, Colorado, 22 – 26 Giugno 2015).

## 5.2 Velocità media e parametri di Weibull

Le Tabelle 5.2 – 5.6 mostrano il confronto tra valori misurati nelle stazioni elencate in Tabella 5.1 e gli output delle simulazioni numeriche per quanto riguarda velocità media del vento e parametri  $c$  e  $k$  della distribuzione di Weibull. La Tabella 5.2 mostra il confronto per i valori medi annuali, mentre le Tabelle 5.3-5.6 per le medie stagionali. Si può notare come in generale ci sia un buon accordo tra misure e output della catena modellistica, con discrepanze per quanto riguarda la velocità media che si posizionano quasi sempre al di sotto di  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ . In particolare l'accordo tra misure e output modellistici è generalmente buono sia nei fondovalle che nelle stazioni in quota. Gli errori più elevati sono stati riscontrati per le stazioni di Baselga di Pinè e di Storo: in entrambi i casi i risultati della catena modellistica sovrastimano i valori ottenuti dalle misure. Comunque questi risultati sono molto soddisfacenti, tenendo in considerazione le notevoli difficoltà che si incontrano nella simulazione del campo di vento con un modello meteorologico, soprattutto in terreno complesso, e gli errori sperimentali nelle misure, che in parte possono sfuggire alla procedura di validazione e che possono introdurre ulteriore incertezza sia nella catena modellistica che nel processo di validazione. Soprattutto le misure effettuate in quota sono soggette ad errori sperimentali, a causa del frequente ghiacciamento dell'anemometro a coppe nel periodo invernale. A questo proposito si sottolinea che la maggior parte dei dati del periodo invernale al Vioz sono stati eliminati durante la procedura di validazione per il ripetersi di velocità del vento nulle (probabile ghiacciamento dello strumento). Per questo motivo il confronto tra misure e risultati del modello in questa stazione in inverno sono probabilmente poco significativi. Si tiene a precisare inoltre che il confronto tra misure puntuali e risultati di simulazioni numeriche comporta sempre problematiche nell'interpretazione dei risultati, legate soprattutto alla rappresentatività delle misure nei confronti degli output modellistici, che in questo caso si riferiscono a celle quadrate con lato di 500 m. Questo è ancor più vero in un territorio ad alta complessità orografica come quello della Provincia di Trento, dove il campo di vento ha una variabilità spaziale molto elevata e le misure puntuali possono non essere completamente rappresentative del campo di vento nell'area circostante la stazione.

Tabella 5.2: Velocità del vento e parametri di Weibull annuali, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Aldeno	1.6	1.8	1.7	1.8	1.1	1.0
Baselga di Pinè	1.3	0.9	1.4	0.7	1.5	0.7
Cavalese	0.9	1.3	1.0	1.4	1.3	1.2
Levico	0.8	0.8	0.9	0.9	1.2	1.6
Monte Bondone	1.5	1.5	1.7	1.7	1.2	2.1
Nomi	1.7	1.9	1.8	1.9	1.2	1.0
Passo Vezzena	1.1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3
Pinzolo Prà Rodont	1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	1.1
Predazzo	0.9	1.2	1.0	1.3	1.4	1.3
Segonzano	1.3	1.5	1.4	1.6	1.4	1.1
Storo	2.1	1.4	2.3	1.3	1.7	0.9
Trento Roncafort	1.6	1.5	1.7	1.5	1.0	1.1
Vioz	3.0	3.6	3.3	3.4	1.6	0.9

Tabella 5.3: Velocità del vento e parametri di Weibull per l'inverno, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Aldeno	1.1	1.7	1.0	1.7	0.83	1.0
Baselga di Pinè	1.0	1.0	0.9	0.5	1.12	0.5
Cavalese	0.7	1.0	0.7	1.1	1.03	1.3
Levico	0.7	0.6	0.6	0.7	0.88	1.5
Monte Bondone	1.1	1.5	1.0	1.7	0.89	2.0
Nomi	1.2	1.9	1.1	1.9	0.95	1.0
Passo Vezzena	0.9	1.2	0.8	1.3	1.02	1.1
Pinzolo Prà Rodont	0.7	1.2	0.7	1.2	0.98	0.9
Predazzo	0.7	0.8	0.7	0.9	1.12	1.2
Segonzano	0.9	1.3	0.9	1.4	1.09	1.2
Storo	1.6	0.9	1.6	0.8	1.32	0.8
Trento Roncafort	1.2	1.3	1.0	1.4	0.75	1.3
Vioz	2.1	4.8	2.2	4.6	1.38	0.9

Tabella 5.4: Velocità del vento e parametri di Weibull per la primavera, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Aldeno	1.9	2.1	2.0	2.1	1.06	1.1
Baselga di Pinè	1.6	1.0	1.7	0.8	1.44	0.7
Cavalese	1.1	1.5	1.2	1.6	1.20	1.4
Levico	1.0	1.0	1.1	1.1	1.15	1.7
Monte Bondone	1.8	1.6	1.9	1.8	1.09	2.1
Nomi	2.1	2.2	2.2	2.3	1.16	1.1
Passo Vezzena	1.4	1.4	1.4	1.5	1.30	1.3
Pinzolo Prà Rodont	1.5	1.3	1.4	1.3	0.93	1.1
Predazzo	1.1	1.3	1.2	1.4	1.29	1.3
Segonzano	1.5	1.9	1.6	1.9	1.40	1.1
Storo	2.4	1.8	2.5	1.7	1.58	0.9
Trento Roncafort	2.0	1.7	1.9	1.8	0.93	1.1
Vioz	3.5	3.7	3.7	3.6	1.50	1.0

Tabella 5.5: Velocità del vento e parametri di Weibull per l'estate, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Aldeno	2.1	2.0	2.3	2.1	1.3	1.2
Baselga di Pinè	1.6	0.9	1.7	0.9	1.7	0.9
Cavalese	1.2	1.6	1.3	1.8	1.4	1.4
Levico	0.9	1.0	1.0	1.1	1.3	1.9
Monte Bondone	2.0	1.5	2.2	1.7	1.4	2.4
Nomi	2.2	1.8	2.4	1.9	1.4	1.2
Passo Vezzena	1.4	1.4	1.5	1.6	1.5	1.5
Pinzolo Prà Rodont	1.6	1.3	1.5	1.4	1.0	1.3
Predazzo	1.2	1.6	1.3	1.8	1.6	1.6
Segonzano	1.6	1.7	1.7	1.8	1.7	1.0
Storo	2.5	1.7	2.7	1.7	1.9	1.1
Trento Roncafort	2.1	1.6	2.1	1.6	1.1	1.0
Vioz	3.7	3.1	4.0	2.9	1.8	0.9

Tabella 5.6: Velocità del vento e parametri di Weibull per l'autunno, misurati e calcolati a 10 m dal suolo.

Stazione	Velocità media [m/s]		Fattore di scala $c$ [m/s]		Fattore di forma $k$	
	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>	<i>simulazioni</i>	<i>misure</i>
Aldeno	1.3	1.4	1.3	1.3	1.0	0.9
Baselga di Pinè	1.0	0.7	1.0	0.5	1.3	0.6
Cavalese	0.7	1.0	0.8	1.1	1.2	1.2
Levico	0.7	0.7	0.6	0.8	1.0	1.6
Monte Bondone	1.2	1.4	1.3	1.6	1.1	2.2
Nomi	1.3	1.6	1.4	1.5	1.1	0.9
Passo Vezzena	0.9	1.2	0.9	1.2	1.2	1.2
Pinzolo Prà Rodont	0.9	1.1	0.8	1.1	1.0	1.1
Predazzo	0.8	1.1	0.8	1.2	1.3	1.3
Segonzano	1.0	1.1	1.0	1.2	1.3	1.2
Storo	1.7	1.2	1.8	1.1	1.7	0.8
Trento Roncafort	1.3	1.2	1.1	1.2	0.8	1.1
Vioz	2.5	3.3	2.7	3.1	1.5	0.8

### 5.3 Distribuzioni di probabilità

Nelle Figure 5.2 – 5.14 viene mostrato il confronto tra le distribuzioni di probabilità della velocità del vento misurate e simulate dalla catena modellistica. Anche in questo caso si può notare generalmente un buon accordo tra misure e simulazioni. Viene confermato che i risultati peggiori sono stati ottenuti a Baselga di Pinè e Storo, dove le distribuzioni di probabilità simulate sono molto diverse da quelle ottenute dalle misure, con una sovrastima dei valori di velocità del vento. Si può notare come ad Aldeno, Nomi, Passo Vezena e Pinzolo Prà Rodont il modello tende a sovrastimare la probabilità di accadimento di velocità del vento basse (intorno a  $1 \text{ m s}^{-1}$ ). Inoltre confrontando le funzioni di densità di probabilità (PDF) ottenute dalle simulazioni ad Aldeno e Nomi, in val d'Adige, si può notare come esse siano molto simili a quelle misurate a Trento Sud e Rovereto rispettivamente (vedi schede in Allegato), due stazioni assimilate all'interno della catena modellistica. Pur essendo distanti solo pochi chilometri, le PDF sperimentali di Aldeno e Nomi differiscono quindi da quelle di Trento Sud e Rovereto, i cui dati hanno guidato e indirizzato i risultati modellistici. Questo fatto sottolinea come sia difficile simulare la velocità del vento in un territorio complesso come quello della Provincia di Trento, dove questa grandezza ha una grande variabilità spaziale e dipende fortemente dalle condizioni microclimatiche locali. Inoltre, come detto in precedenza, in terreno complesso l'ubicazione stessa della stazione meteorologica risulta fondamentale e può non essere completamente rappresentativa della velocità del vento nel territorio circostante. Infine è significativo che i risultati siano molto soddisfacenti al Vioz (2975 m s.l.m.), nonostante le grandi difficoltà nel simulare e misurare la velocità del vento a questa quota.

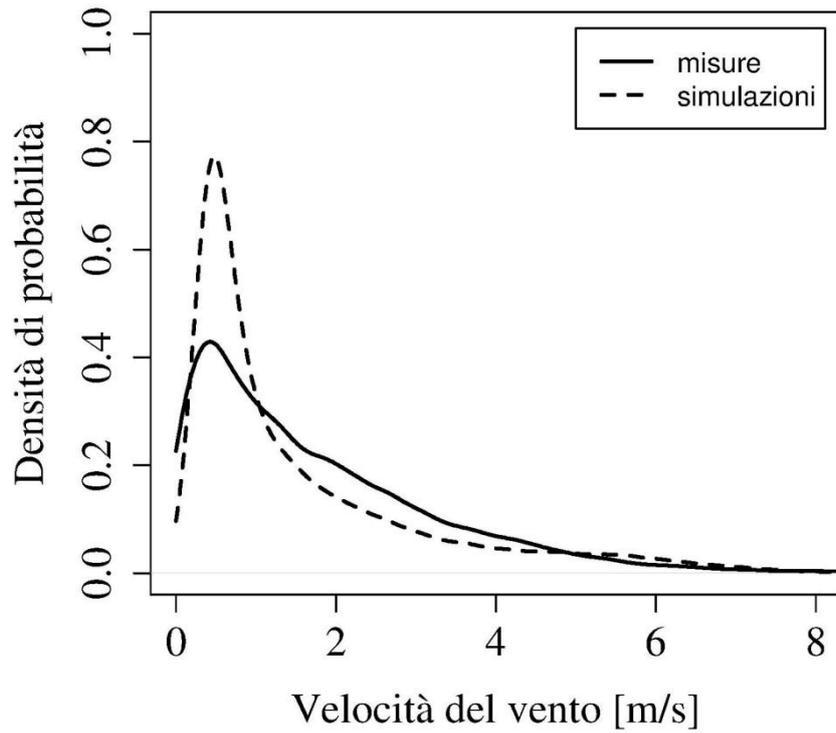


Figura 5.2: Densità di probabilità annuale della velocità del vento ad Aldeno misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

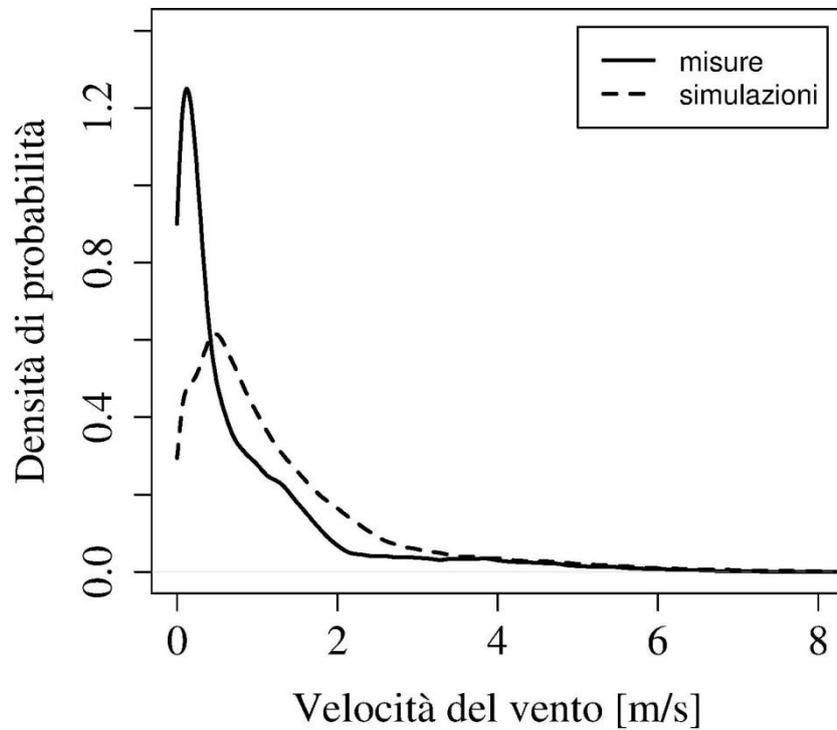


Figura 5.3: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Baselga di Pinè misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

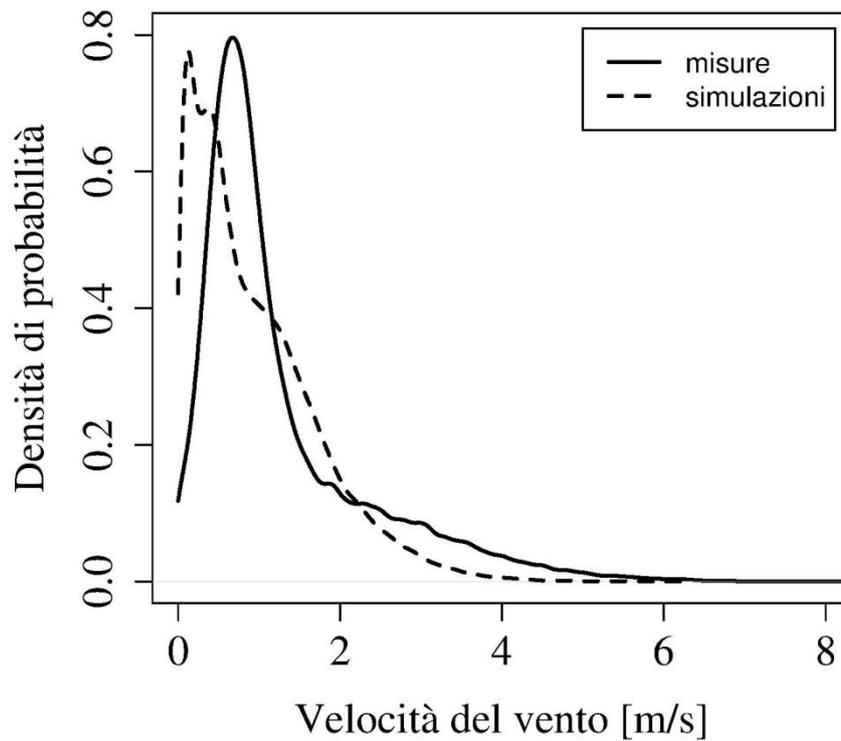


Figura 5.4: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Cavalese misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

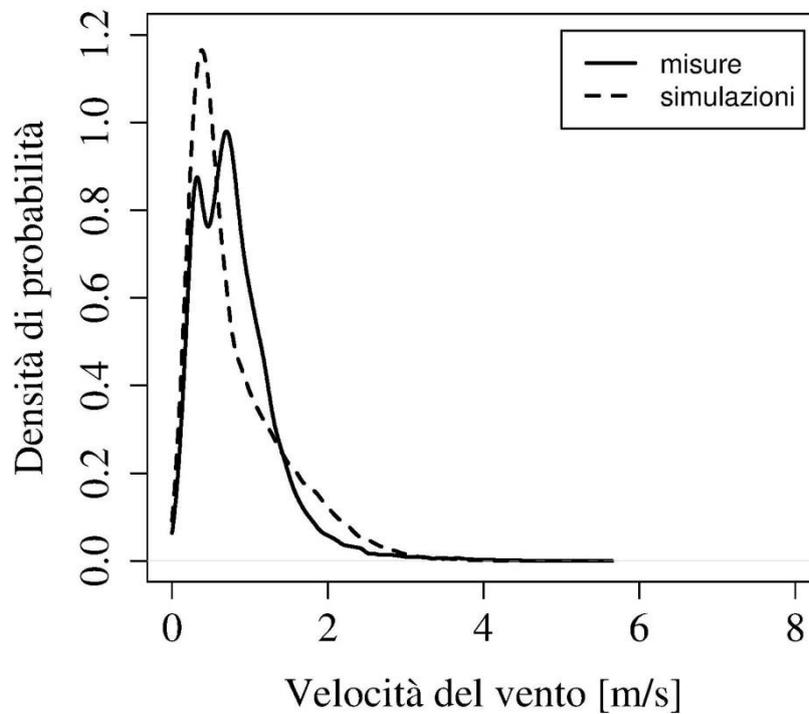


Figura 5.5: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Levico misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

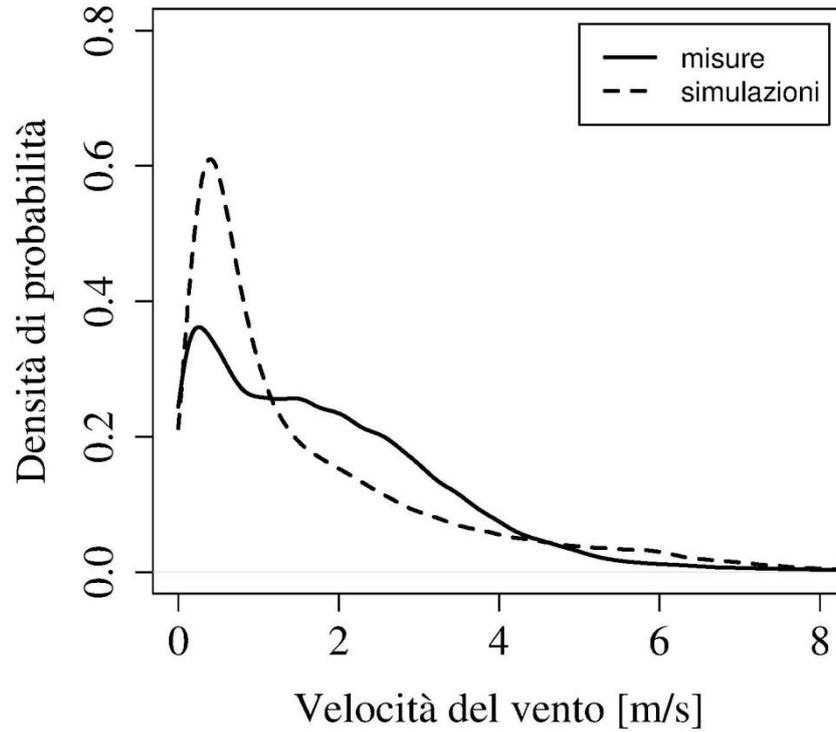


Figura 5.6: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Nomi misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

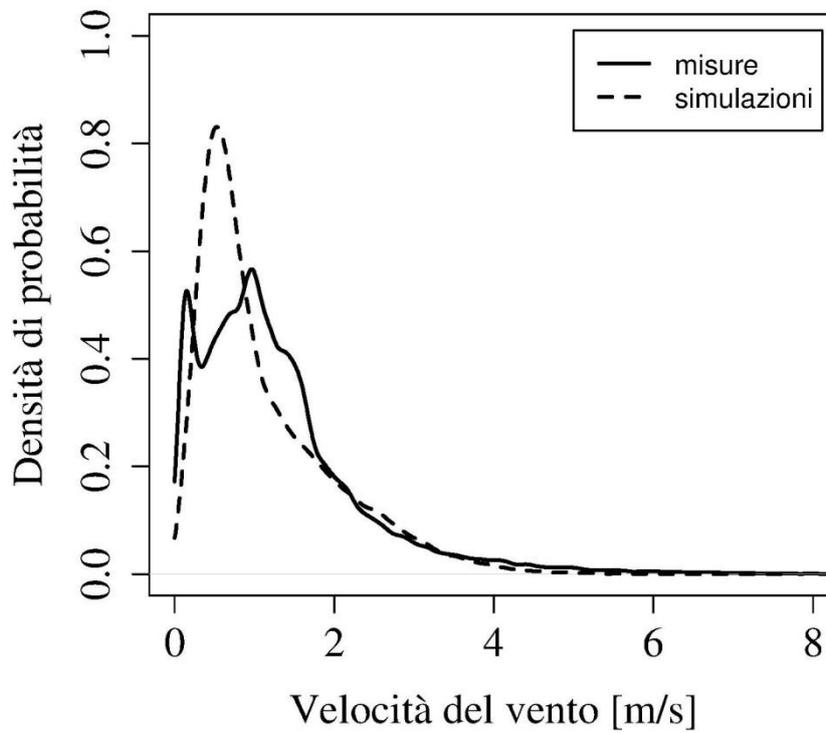


Figura 5.7: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Passo Vezzena misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

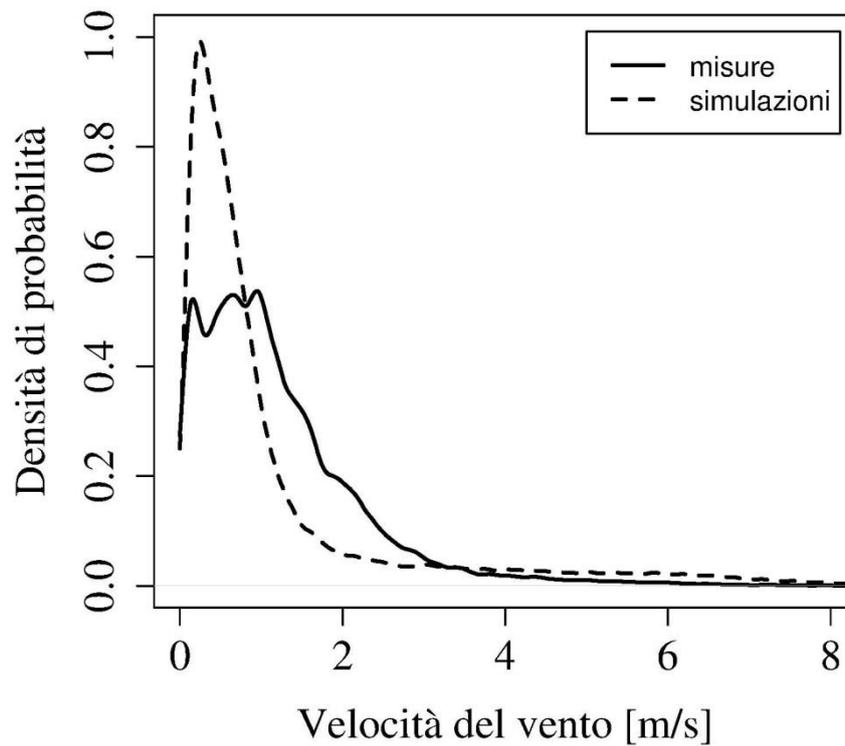


Figura 5.8: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Pinzolo Prà Rodont misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

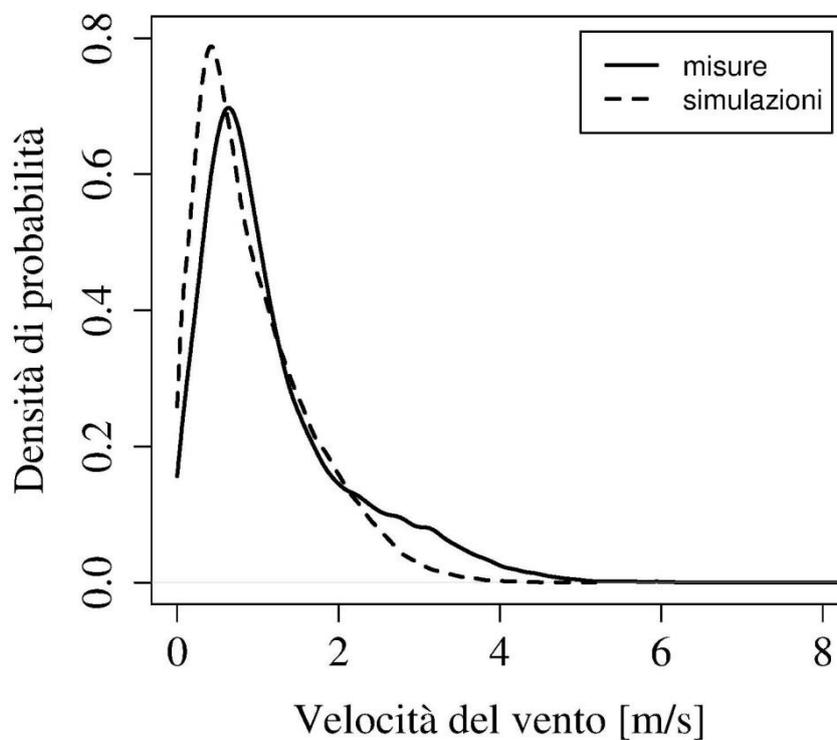


Figura 5.9: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Predazzo misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

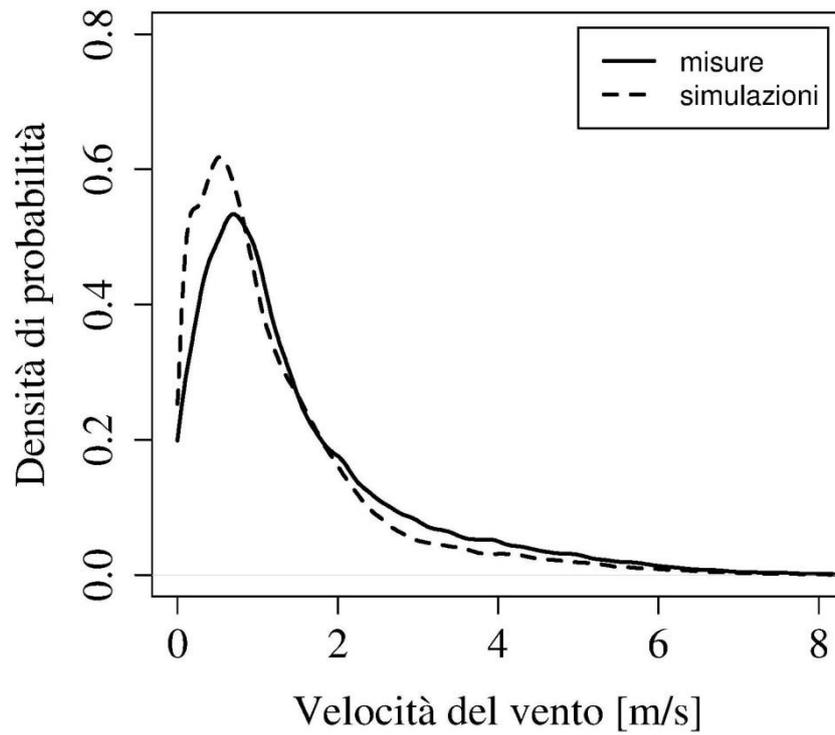


Figura 5.10: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Segonzano misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

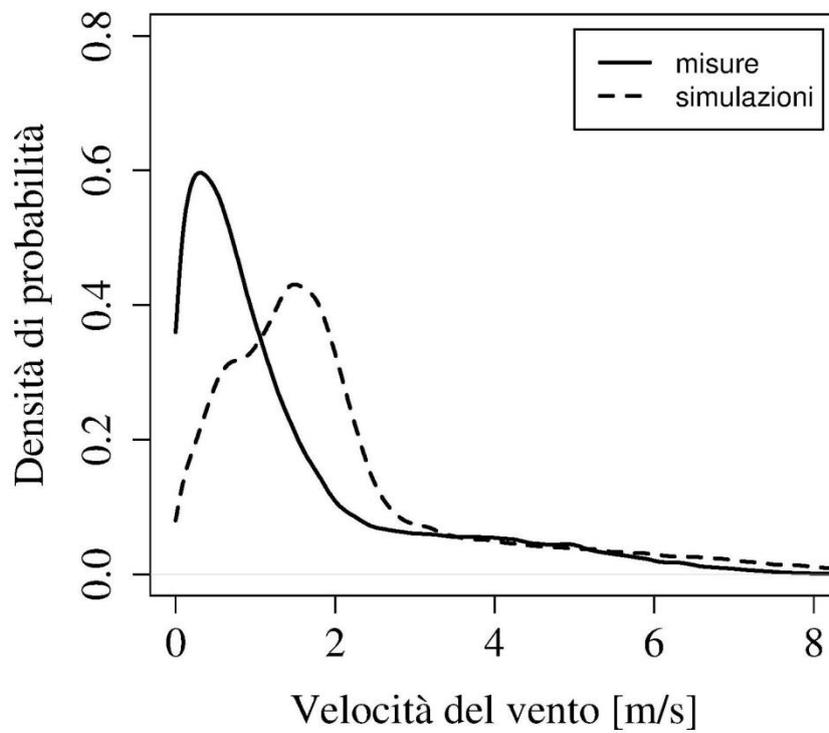


Figura 5.11: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Storo misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

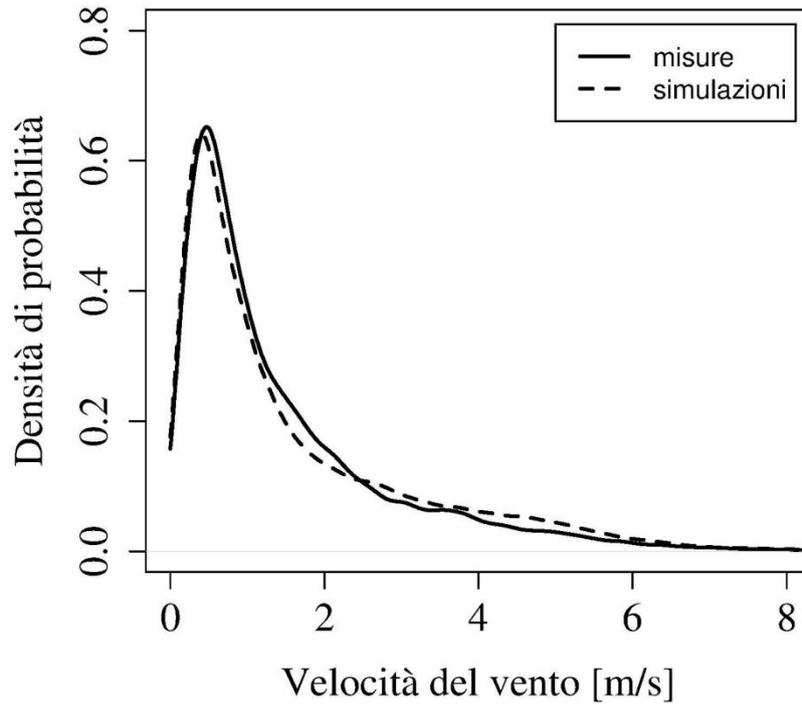


Figura 5.12: Densità di probabilità annuale della velocità del vento a Trento Roncafort misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

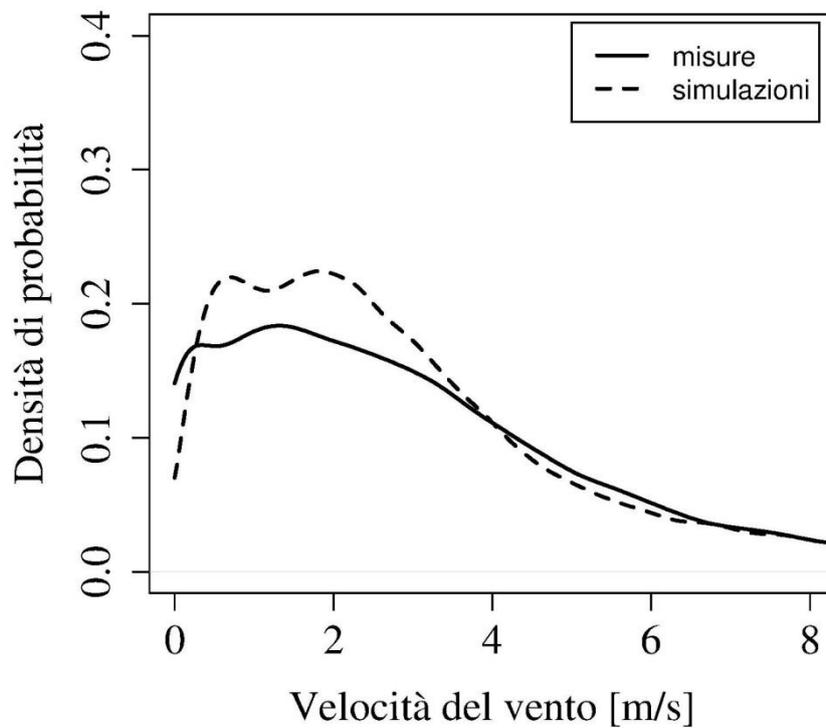


Figura 5.13: Densità di probabilità annuale della velocità del vento al Vioz misurata (linea continua) e simulata (linea tratteggiata).

## 6. Conclusioni

In questa relazione è stata riassunta l'attività svolta nell'ambito del progetto commissionato dalla Provincia Autonoma di Trento, Dipartimento Protezione Civile all'Università degli studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica per la realizzazione atlante eolico per la Provincia di Trento.

Sono state effettuate simulazioni su un periodo di 10 anni con una catena modellistica composta dal modello meteorologico prognostico WRF e dal modello diagnostico CALMET, con una risoluzione del dominio di calcolo più interno di 0.5 km, al fine di ottenere una mappatura completa della velocità del vento e delle sue proprietà statistiche più significative sulla Provincia di Trento. La scelta della configurazione della catena modellistica è stata effettuata sulla base di numerosi test con set-up differenti e sull'esperienza maturata durante il progetto "Attività propedeutiche alla realizzazione di un atlante eolico per la Provincia di Trento". La configurazione scelta, che ha dovuto soddisfare l'esigenza di ottenere risultati sufficientemente accurati utilizzando un tempo macchina ragionevole, è stata implementata su tutto il periodo di simulazione in maniera omogenea, al fine di ottenere risultati statisticamente significativi. Inoltre sono stati assimilati all'interno della catena modellistica dati di velocità e direzione del vento da radiosondaggi e da 23 stazioni meteorologiche al suolo poste sul territorio provinciale, con lo scopo di "guidare" e migliorare gli output modellistici.

I risultati ottenuti hanno mostrato come le zone con velocità medie del vento più elevate siano generalmente quelle poste a quote più elevate, soprattutto nella parte occidentale e meridionale della Provincia. Per quanto riguarda i fondovalle, le zone più ventose sono risultate le aree vicino al lago di Garda, la zona a Nord di Trento, dove giunge l'Ora del Garda dalla valle dei Laghi e la parte più meridionale della val d'Adige. Frequenti calme di vento e velocità medie molto basse sono state invece riscontrate in Valsugana, in val di Non e in val di Fiemme. Notevoli differenze sono state trovate tra la stagione invernale e quella estiva, soprattutto nei fondovalle. In inverno le velocità del vento sono risultate molto deboli quasi ovunque, con l'eccezione delle zone poste più in quota. In questa stagione infatti, a parte brevi episodi con vento sinottico intenso, soprattutto dai quadranti settentrionali, alle quote più basse prevalgono le calme di vento. In primavera e in estate invece si sviluppano con regolarità nei fondovalle le circolazioni forzate termicamente, come ad esempio i venti di valle o l'Ora del Garda, che influenzano notevolmente la climatologia e contribuiscono ad avere velocità medie del vento più elevate.

Infine la performance del modello è stata valutata confrontando i risultati delle simulazioni con osservazioni di velocità e direzione del vento provenienti da alcune stazioni meteorologiche provinciali, diverse da quelle utilizzate per l'assimilazione, al fine di avere un confronto con un dataset indipendente. La validazione ha evidenziato come i risultati della catena modellistica siano generalmente in grado di catturare con buona accuratezza le statistiche principali e la distribuzione osservata della velocità del vento, sia per quanto riguarda le stazioni poste in fondovalle, sia per quelle in quota. Tuttavia è stata riscontrata qualche eccezione, come ad esempio nelle stazioni di Baselga di Pinè e Storo, dove i risultati della catena modellistica sovrastimano i valori misurati.

Comunque la validazione è risultata nel complesso più che soddisfacente, con errori nella maggior parte dei casi inferiori a  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ , non molto maggiori dell'incertezza sperimentale che contraddistingue la misura stessa della velocità del vento. Inoltre tale risultato è particolarmente significativo perché ottenuto in un territorio ad orografia altamente complessa, dove la simulazione meteorologica è molto impegnativa e la velocità del vento ha una variabilità spaziale intrinseca particolarmente elevata.

## 7. Bibliografia

- Bannister, R.N., 2008: A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. II: Modelling the forecast error covariance statistics, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**: 1971–1996.
- Boilley, A., T. Ranchin, E. Wey, A. Ghennioui, B. Ikken, 2013: Validation of a dynamical downscaling process in the context of wind resources mapping, *2<sup>nd</sup> International Conference on Energy & Meteorology*, Toulouse, Francia, 25-28 giugno 2013.
- Busillo, C., F. Calastrini, B. Gozzini, G. Gualtieri, R. Mari, 2008: WIND-GIS: Progetto per la realizzazione di un servizio web per la valutazione del potenziale eolico della regione Toscana, [http://159.213.57.78/sites/all/files/doc/consorzio/pubblicazioni/aria/WIND-GIS\\_2008.pdf](http://159.213.57.78/sites/all/files/doc/consorzio/pubblicazioni/aria/WIND-GIS_2008.pdf).
- CESI, 2002: Atlante eolico dell'Italia, 57 pp., <http://www.wutel.net/eolico/FILES/Atlanteolico.pdf>.
- Chávez-Arroyo R., O. Probst, 2013: Quality assurance of near-surface wind velocity measurements in Mexico. *Meteorological Applications*, **22**, 165-177. DOI: 10.1002/met.1432.
- Chen, F., J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, **129**, 569-585.
- Cox, R.M., J. Sontowski, R. N. Fry Jr., C. M. Dougherty, T. J. Smith, 1998. Wind and diffusion modeling for complex terrain, *Journal of Applied Meteorology*, **37**, 996-1009.
- Cox, R.M., J. Sontowski, C. M. Dougherty, 2005: An evaluation of three diagnostic wind models (CALMET, MCSCIPUF, and SWIFT) with wind data from the Dipole Pride 26 field experiments”, *Meteorol. Appl.*, **12**, 329–341.
- Desiato, F, S. Finardi, G. Brusasca, M. G. Morselli, 1998: Transalp 1989 experimental campaign – I. simulation of 3d flow with diagnostic wind field models, *Atmospheric Environment*, **32 (7)**, 1141-1156.
- Dudhia, J, 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **46**, 3077-3107.
- Finardi, S., G. Tinarelli, P. Faggian, G. Brusasca, 1998: Evaluation of different wind field modeling techniques for wind energy applications over complex topography, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **74-76**, 283-294.
- Giovannini, L., G. Antonacci, D. Zardi, L. Laiti, L. Panziera, 2014: Sensitivity of simulated wind speed to spatial resolution over complex terrain. *Energy Procedia*. **59C**, 323-329.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, **132**, 103-120.
- Hong, S-Y., Y. Noh, J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.

- Kain, J.S., J.M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: the Kain–Fritsch scheme, *The representation of cumulus convection in numerical models*, Emanuel KA, Raymond DJ, Eds, American Meteorological Society.
- Jiménez, P.A., J. Dudhia, 2012: Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **51**, 300-316.
- Jiménez, P.A., J. Dudhia, 2013: On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 1610-1617.
- Jiménez, P.A., J.F. Ganzáles-Rouco, E. García-Bustamante, Jorge Navarro, J.P. Montávez, J. Vilà-Guerau de Arellano, J. Dudhia, A. Muñoz-Roldan, 2010: Surface wind regionalization over complex terrain: evaluation and analysis of WRF high-resolution simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **49**, 268-287.
- Landberg, L., L. Myllerup, O. Rathmann, E. Lundtang Petersen, B. Hoffmann Jørgensen, J. Badger, N. Gylling Mortensen, 2003: Wind resource estimation—An Overview, *Wind Energy* **6**: 261–271.
- Ludwig, F.L., D. K. Miller, S. G. Gallaher, 2006: Evaluating a hybrid prognostic–diagnostic model that improves wind forecast resolution in complex coastal topography, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **45**, 155-177.
- Lorenc, A.C., 2003: Modelling of error covariances by 4D-Var data assimilation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **129**, 3167–3182.
- Lorenc, A.C, F. Rawlins, 2005: Why does 4D-Var beat 3D-Var?, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 3247–3257.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, S.A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, **102(D14)**, 16663–16682.
- Nawri, N., G.N. Petersen, H. Björnsson, K. Jónasson, 2013: The wind energy potential of Iceland, Icelandic Meteorological Service, Report VÍ 2013-01, 72 pp.
- Schwitalla, T., H.-S. Bauer, V. Wulfmeyer, F. Aoshima, 2011: High-resolution simulation over central Europe: assimilation experiments during COPS IOP 9c, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**: 156–175.
- Scire, J.S., F.R. Robe, M.E. Fernau, R.J. Yamartino, 2000: A user guide for the CALMET. meteorological model (version 5), Earth Tech, Inc ([www.src.com/calpuff/download/download.htm](http://www.src.com/calpuff/download/download.htm)).
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barke, M.G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, J.G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note TN-475+STR, 125.

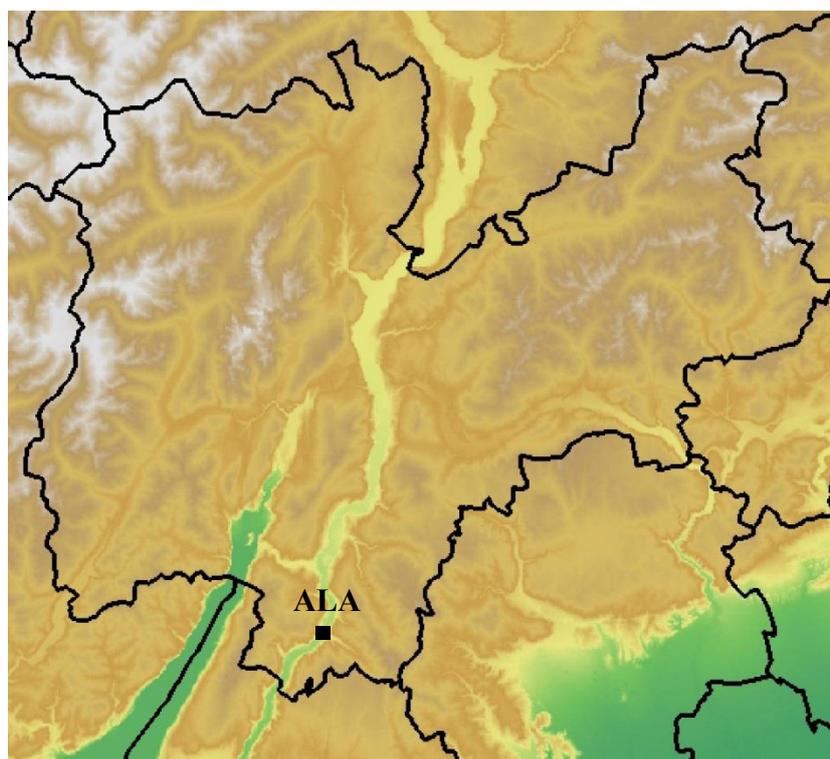
- Storm, B., J. Dudhia, S. Basu, A. Swift, I. Giammanco, 2009: Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on forecasting low-level jets: implications for wind energy”, *Wind Energy*, **12**, 81–90.
- Varvayanni, M., J. G. Bartzis, N. Catsaros, G. Graziani, P. Deligiannis, 1998: Numerical simulation of daytime mesoscale flow over highly complex terrain: Alps case, *Atmospheric Environment*, **32** (7), 1301-1316.
- Wang, X., D. M. Barker, C. Snyder, T. M. Hamill, 2008: A Hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. part I: observing system simulation experiment”, *Monthly Weather Review*, **136**, 5116-5131.
- Wang, W., W. J. Shaw, T. E. Seiple, J. P. Rishel, Y. Xie, 2008: An evaluation of a diagnostic wind model (CALMET), *J. Appl. Meteor.*, **47**, 1739-1756.
- Wang, W., W. J. Shaw, 2009: Evaluating wind fields from a diagnostic model over complex terrain in the Phoenix region and implications to dispersion calculations for regional emergency response, *Meteorol. Appl.*, **16**, 557–567.
- Yim, S.H.L., J. C. H. Fung, A. K. H. Lau, S. C. Kot, 2007: Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system, *Journal of Geophysical Research*, **112**, **D05106**.

## Allegato - Schede stazioni

Nel presente allegato vengono presentate le schede delle 23 stazioni assimilate nella catena modellistica, contenenti le principali informazioni geografiche e un'analisi dei dati di velocità e direzione del vento. In particolare per ogni stazione vengono presentate le velocità medie e le frequenze di calme di vento (velocità del vento  $\leq 0.5 \text{ m s}^{-1}$ ) mensili e annuali, gli istogrammi stagionali e annuali della frequenza della velocità del vento, le rose del vento stagionali e annuali, i parametri caratteristici della distribuzione di Weibull stagionali e annuali e la funzione di distribuzione di probabilità della velocità del vento stagionale e annuale.

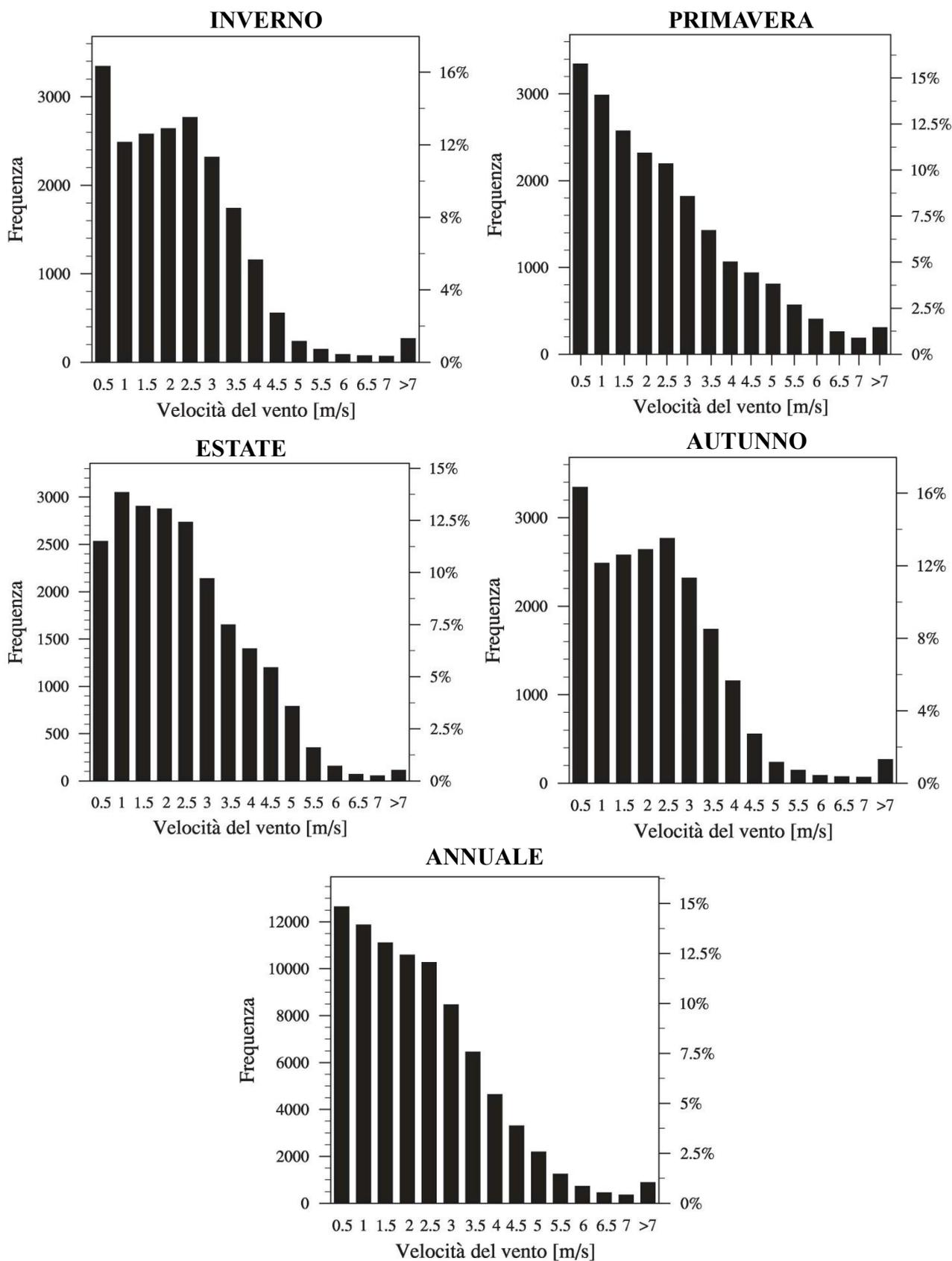
# Ala

- Coordinate: 45.670 N, 11.000 E
- Quota: 172 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

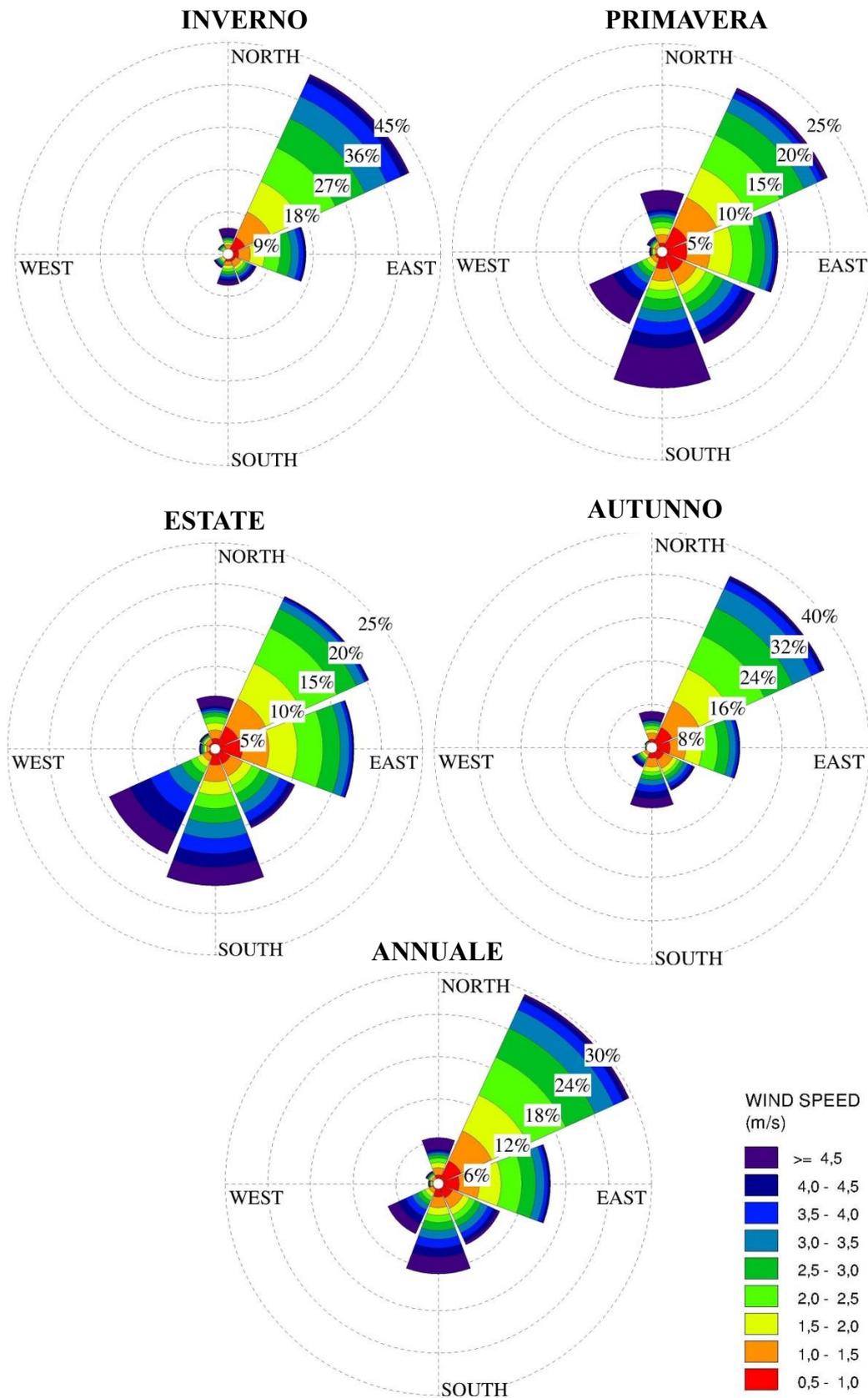


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Ala.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.90	2.00	2.26	2.15	2.15	2.17	2.14	2.00	1.92	1.70	1.92	1.96	2.02
<b>Calme [%]</b>	17.2	18.2	17.1	15.4	14.8	12.0	9.9	12.6	14.0	20.3	13.2	13.5	14.8



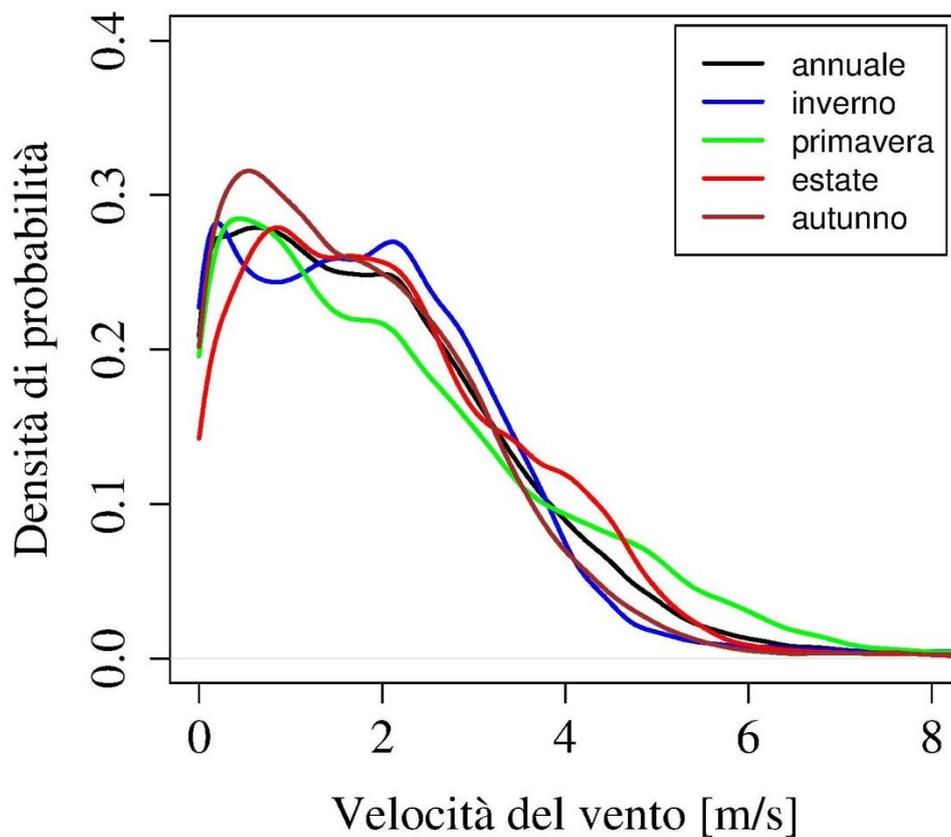
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Ala.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Ala.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Ala.

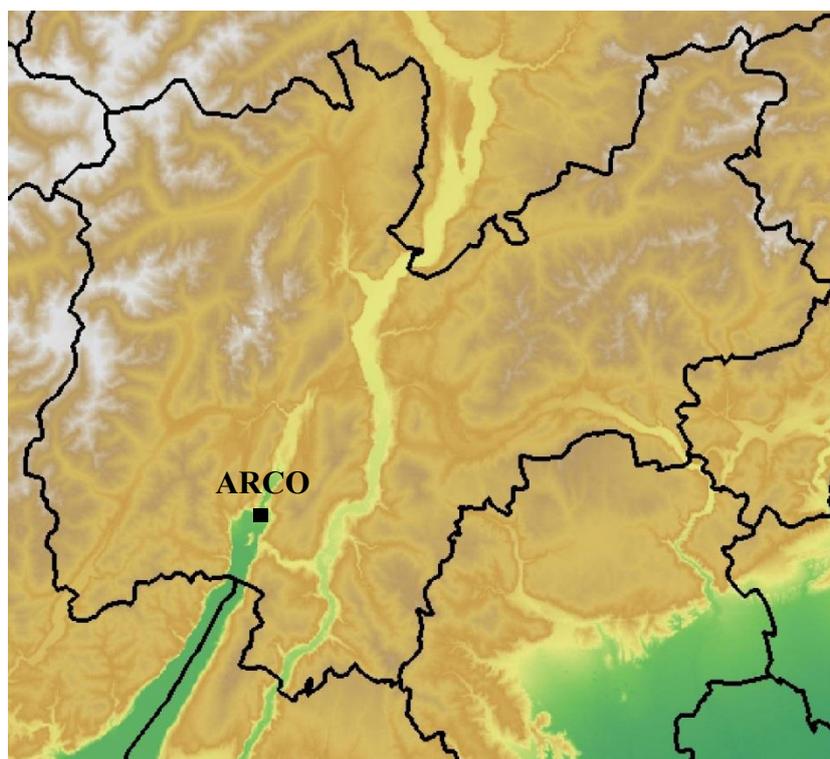
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.97	2.2	2.23	1.89	2.07
<b>Parametro di forma k</b>	1.04	1.01	1.26	1.09	1.09



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Ala.

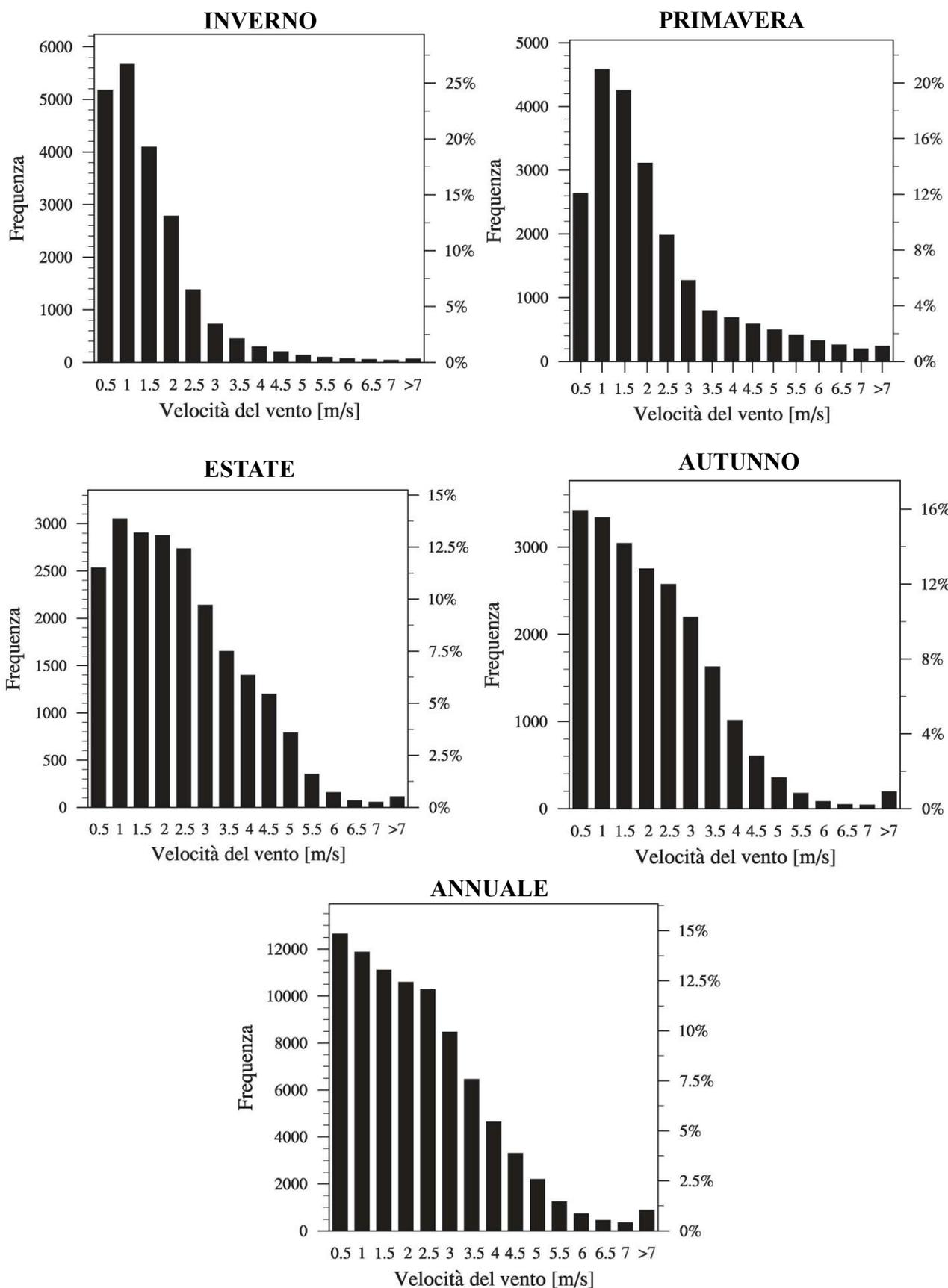
## Arco

- Coordinate: 45.910 N, 10.887 E
- Quota: 84 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

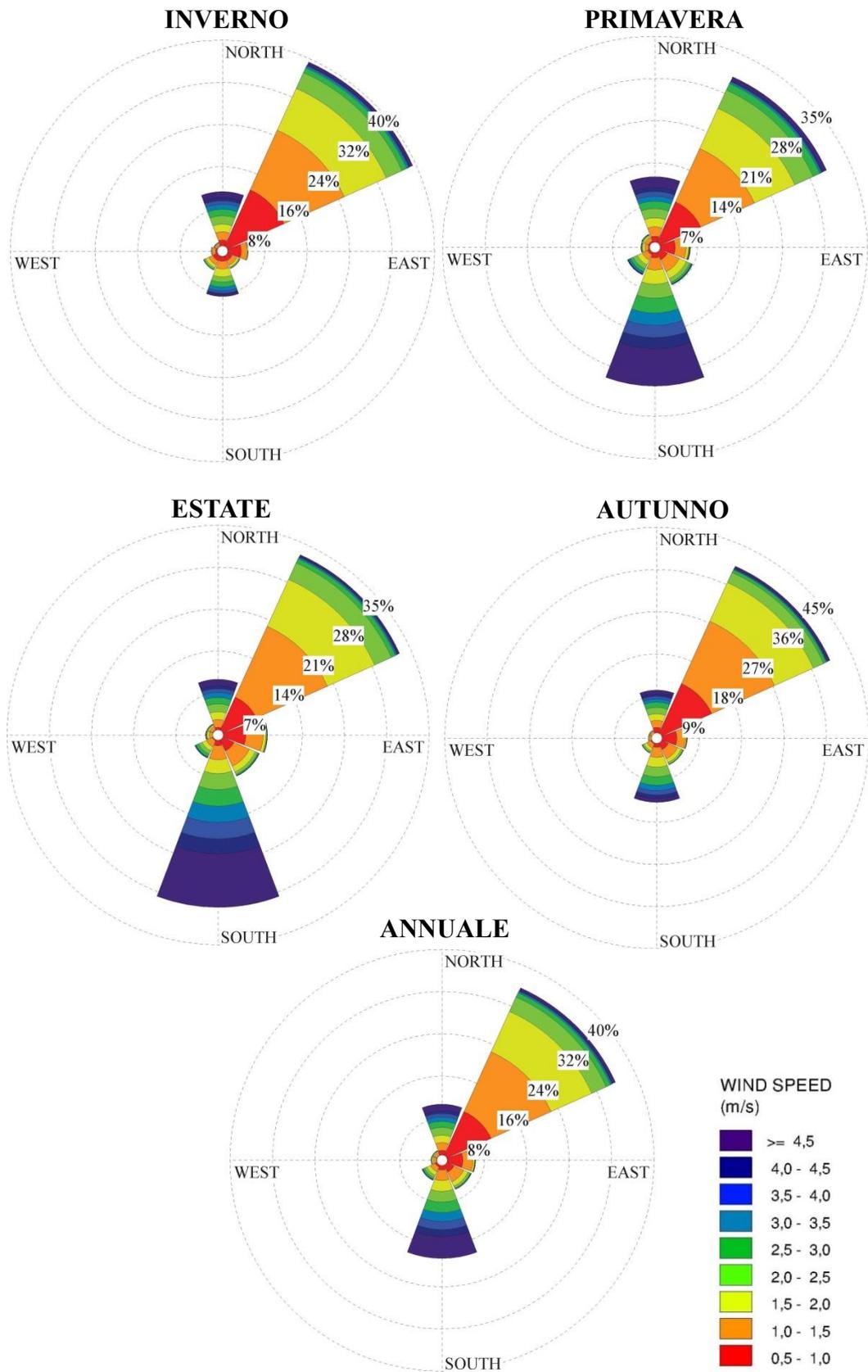


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Arco.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.14	1.51	1.79	1.79	2.00	2.08	2.06	1.89	1.57	1.22	1.18	0.97	1.60
<b>Calme [%]</b>	25.5	17.3	16.2	12.6	7.4	6.6	3.8	4.7	6.7	17.4	23.4	29.9	14.2



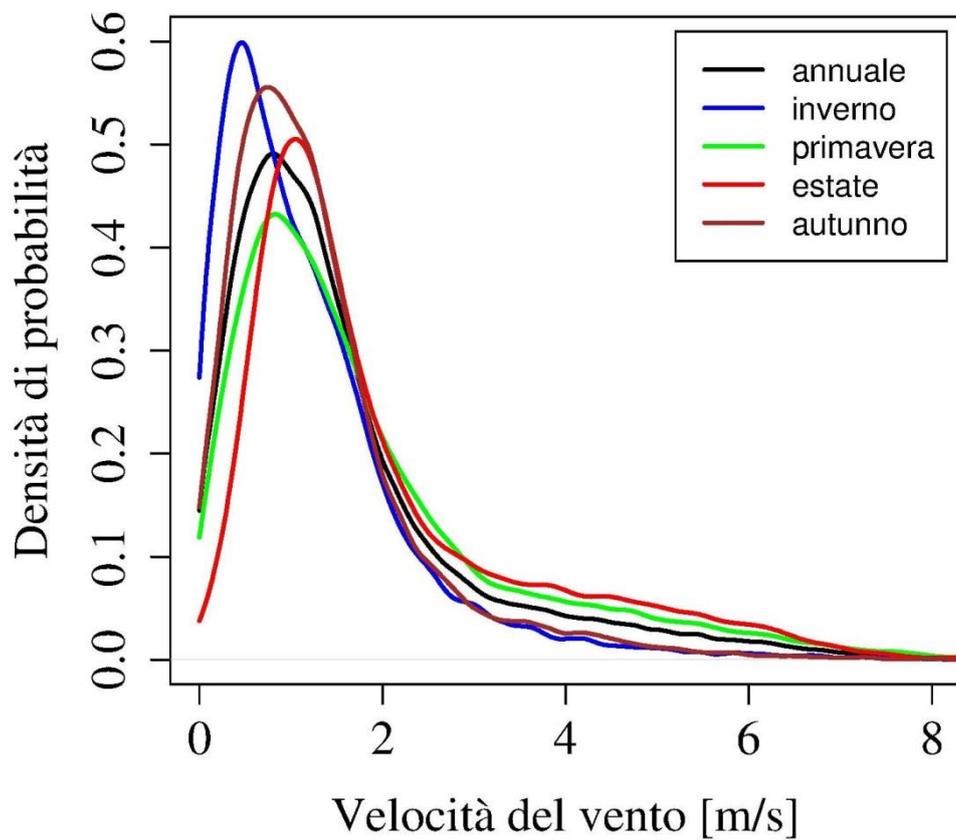
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Arco.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Arco.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Arco.

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.23	1.97	2.21	1.42	1.69
<b>Parametro di forma k</b>	1.05	1.18	1.38	1.25	1.17



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Arco.

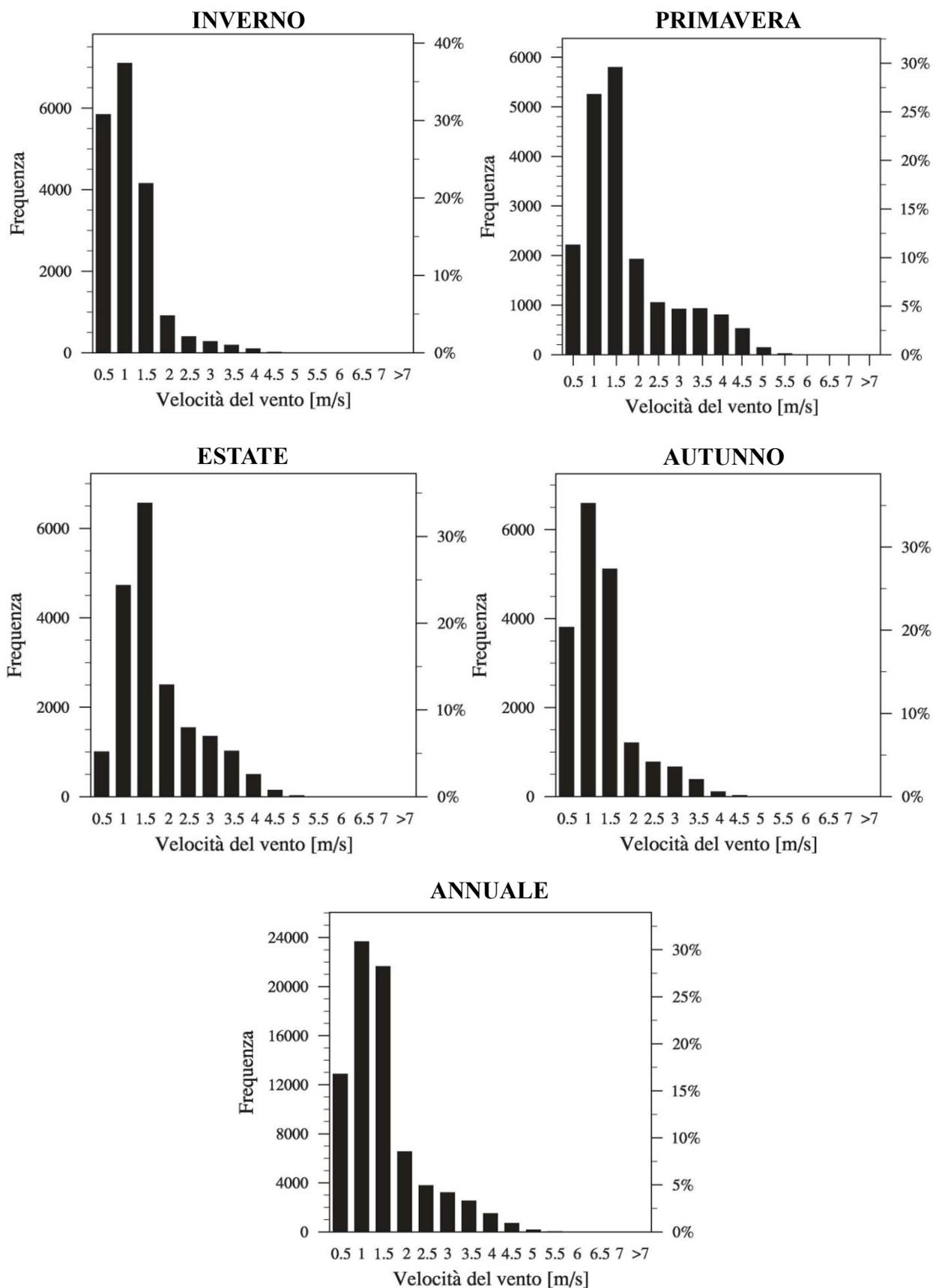
## Bezzecca

- Coordinate: 45.896 N, 10.729 E
- Quota: 705 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m



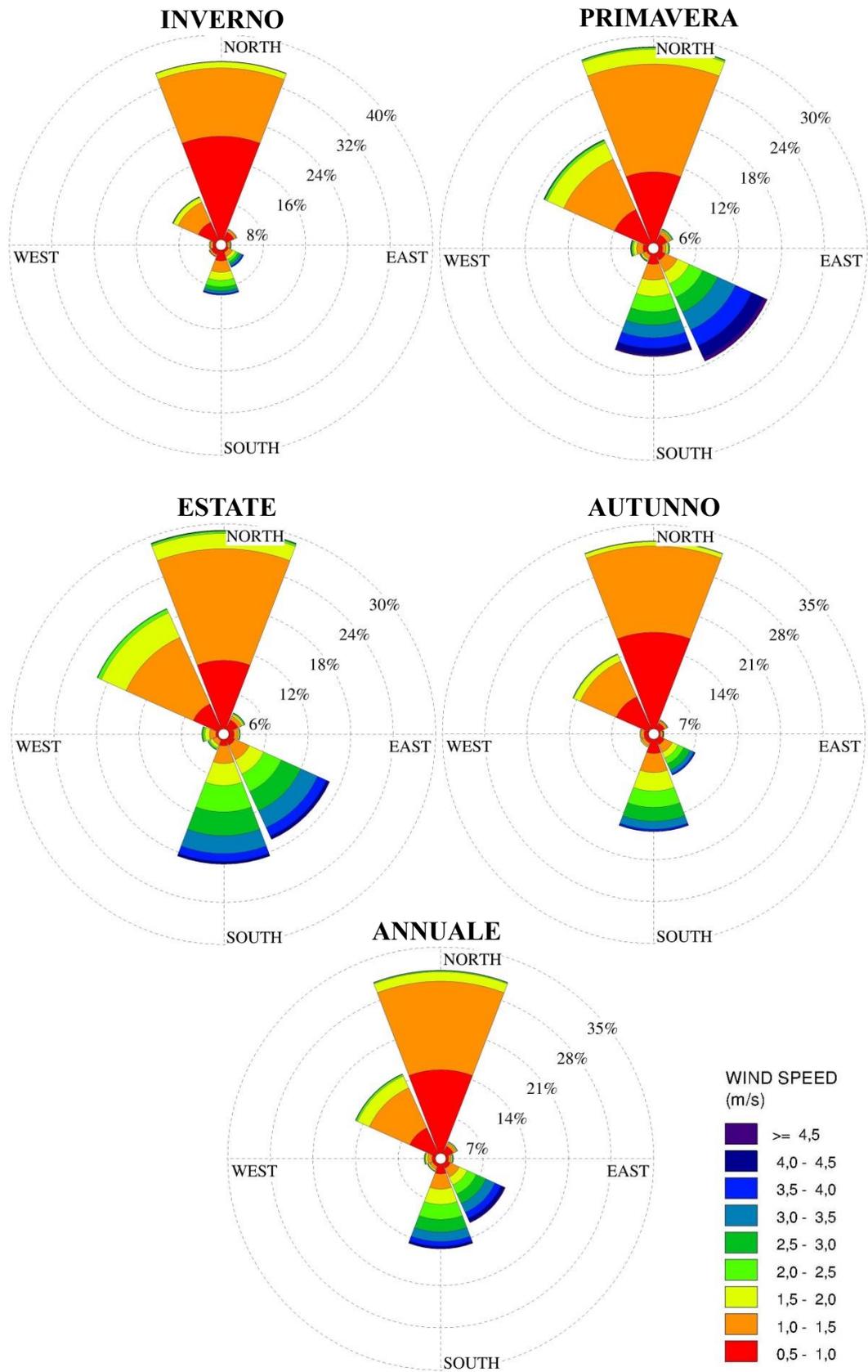
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Bezzecca.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.73	0.98	1.32	1.47	1.52	1.44	1.52	1.46	1.23	0.98	0.84	0.71	1.18
<b>Calme [%]</b>	34.6	27.6	18.0	9.3	6.4	6.4	4.2	4.9	10.9	23.4	25.8	29.9	16.8



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Bezzeca.

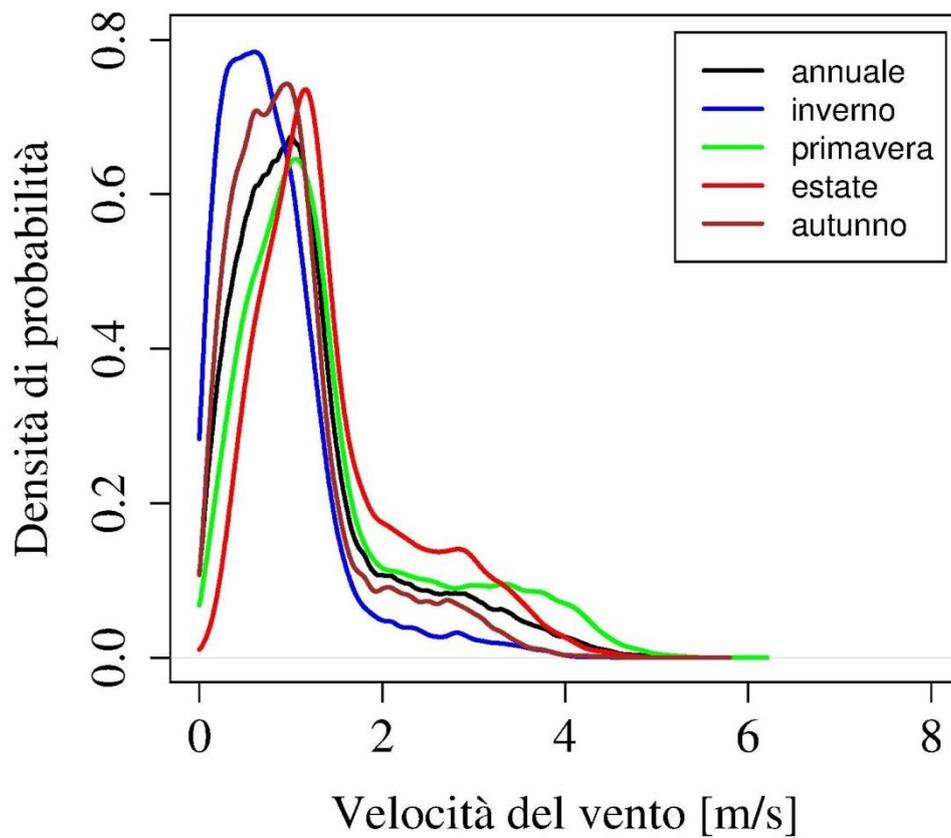
# ATLANTE EOLICO DEL TRENINO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Bezzecca.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Bezzecca.

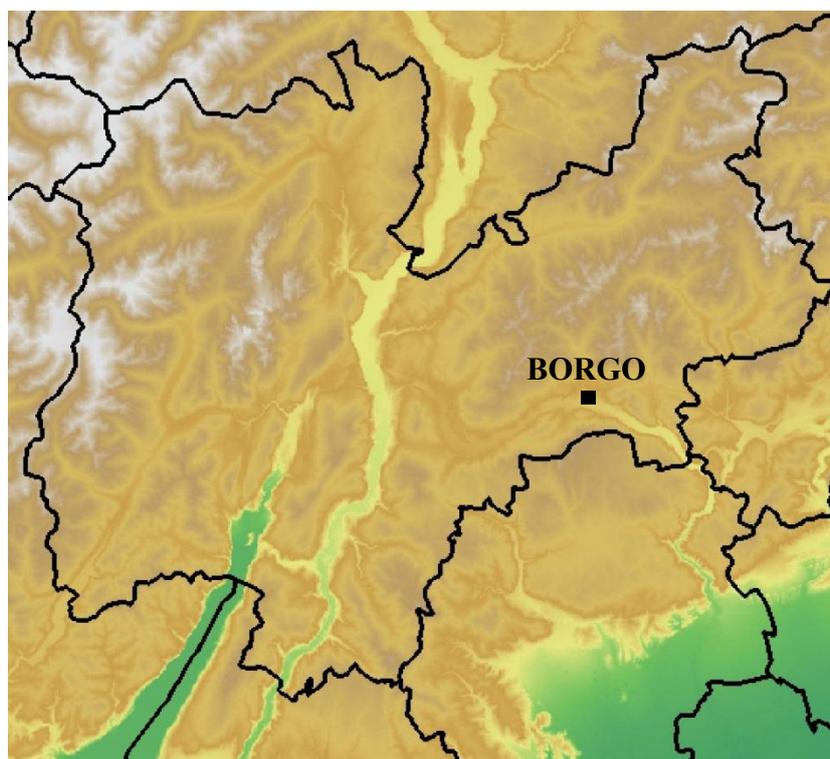
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.86	1.59	1.67	1.11	1.30
<b>Parametro di forma k</b>	1.25	1.44	1.82	1.46	1.38



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Bezzecca.

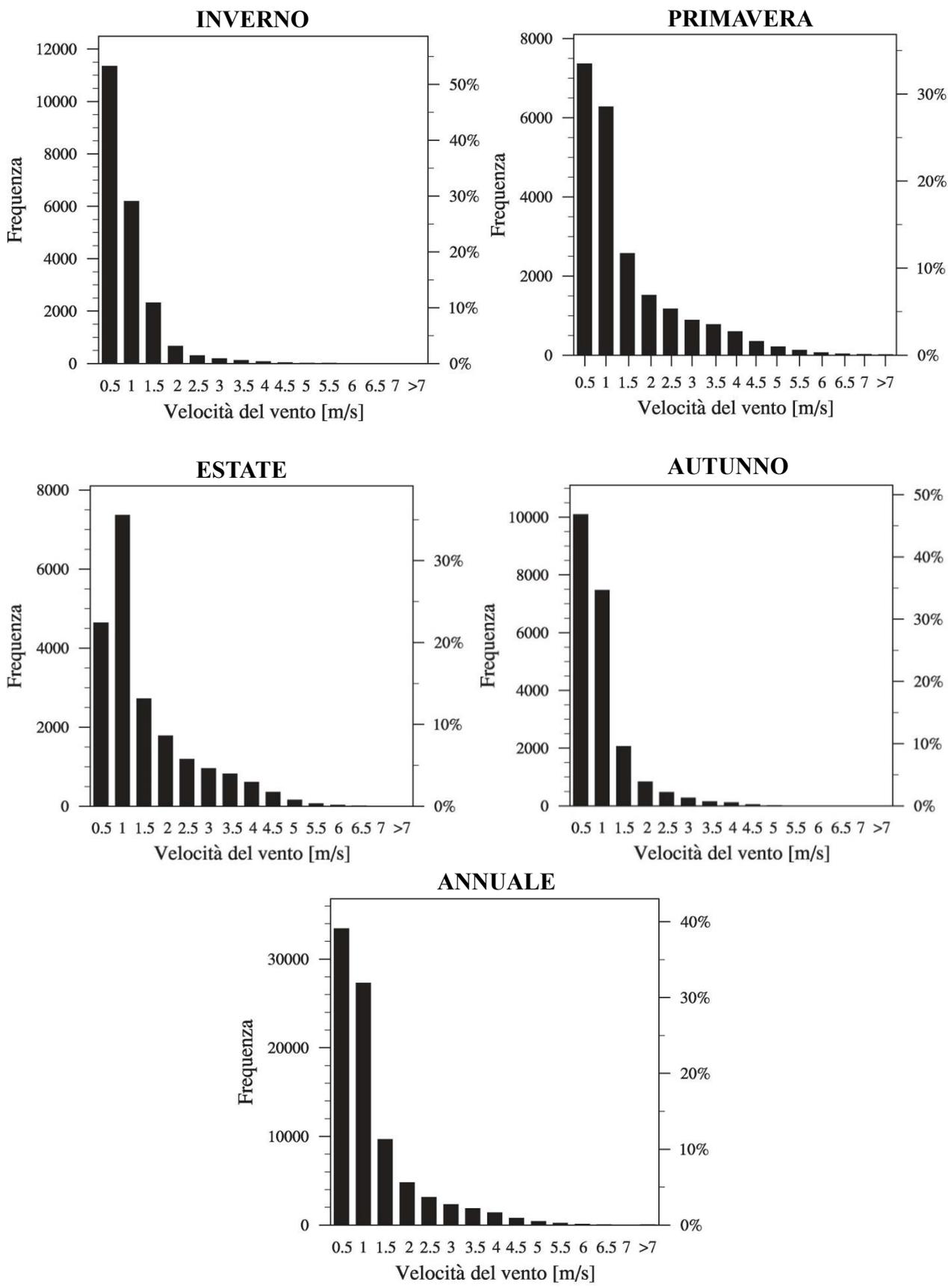
## Borgo

- Coordinate: 46.055 N, 11.475 E
- Quota: 420 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

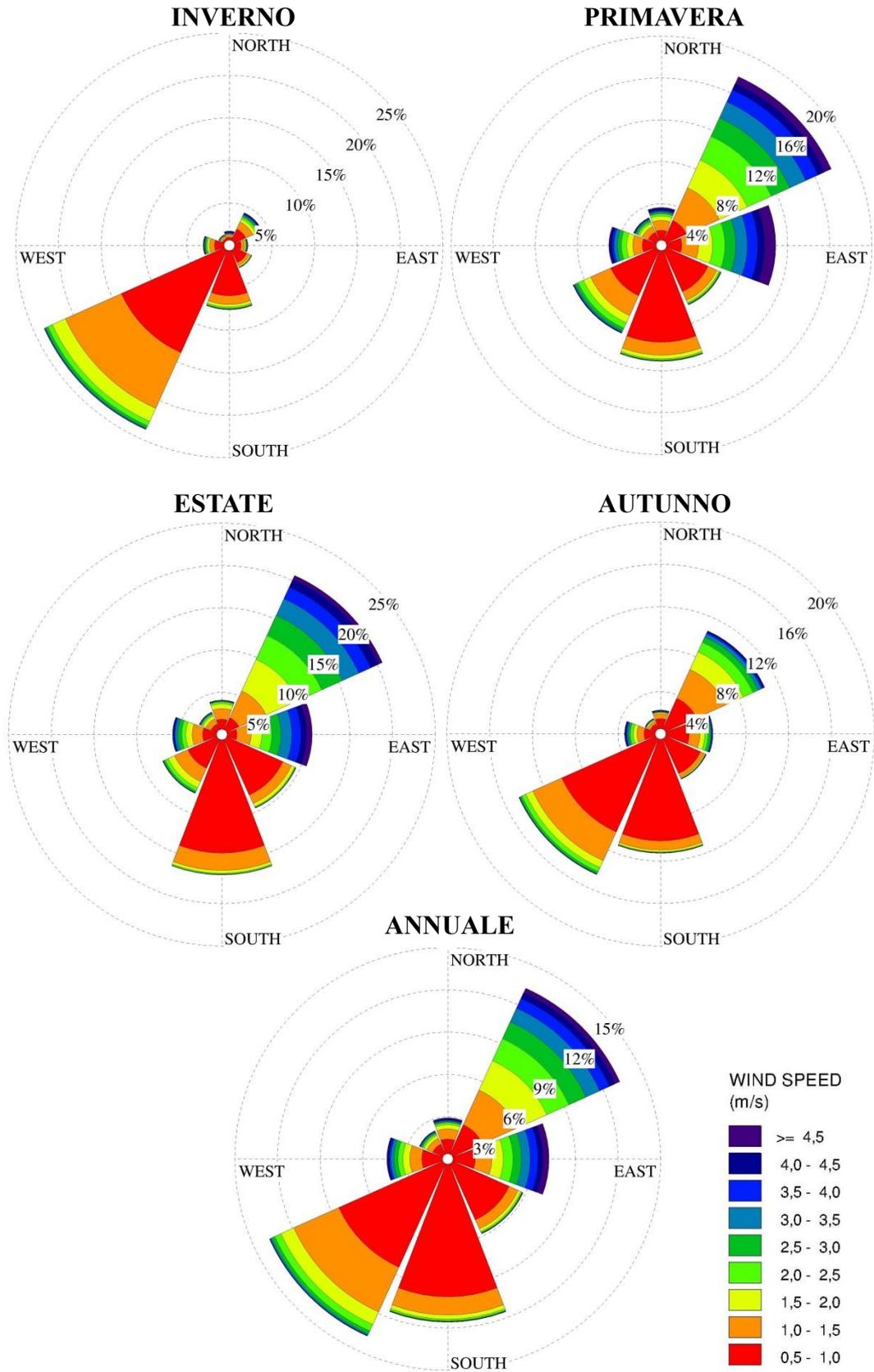


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Borgo.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.55	0.64	0.97	1.22	1.26	1.28	1.29	1.11	0.80	0.56	0.62	0.59	0.91
<b>Calme [%]</b>	56.3	52.2	42.0	32.0	26.5	24.8	18.3	24.4	38.9	53.2	48.5	51.3	39.1



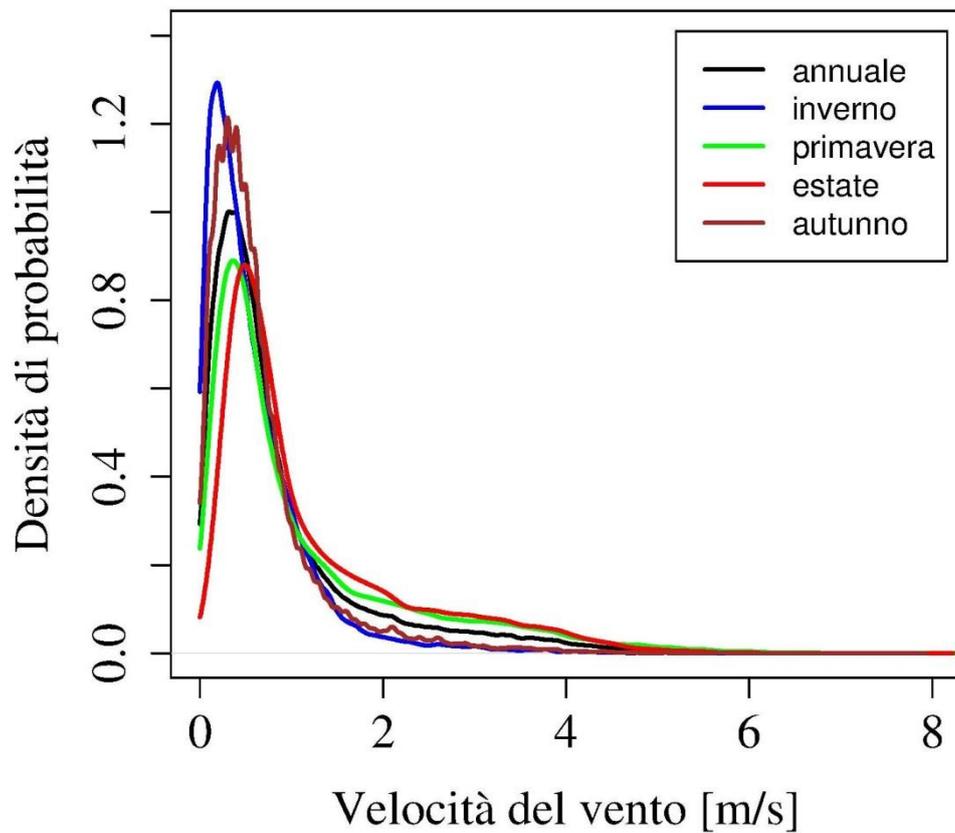
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Borgo.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Borgo.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Borgo.

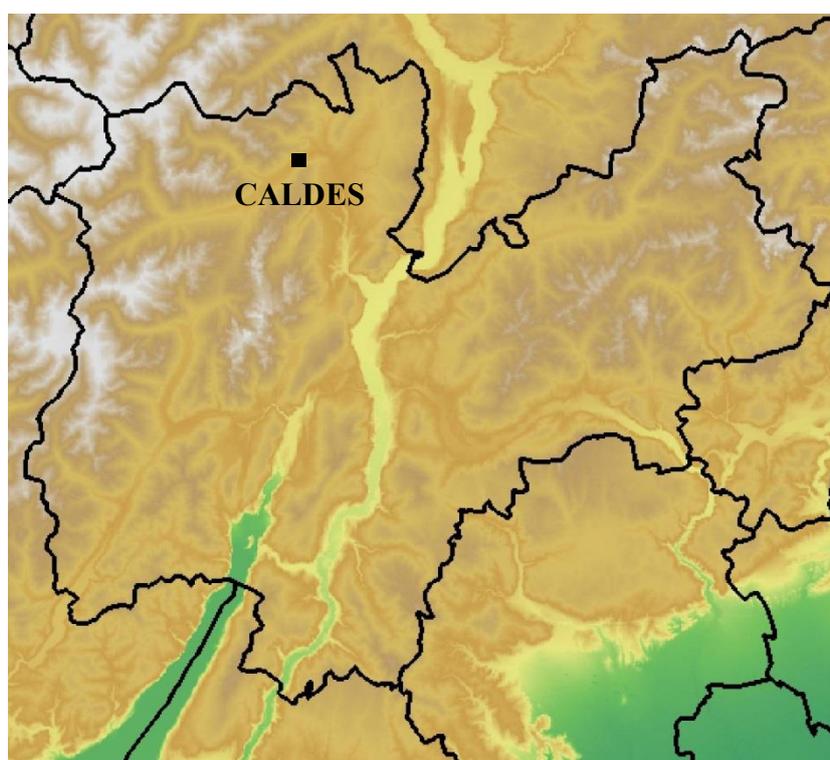
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.58	1.15	1.32	0.68	0.90
<b>Parametro di forma k</b>	0.95	1.01	1.23	1.08	1.00



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Borgo.

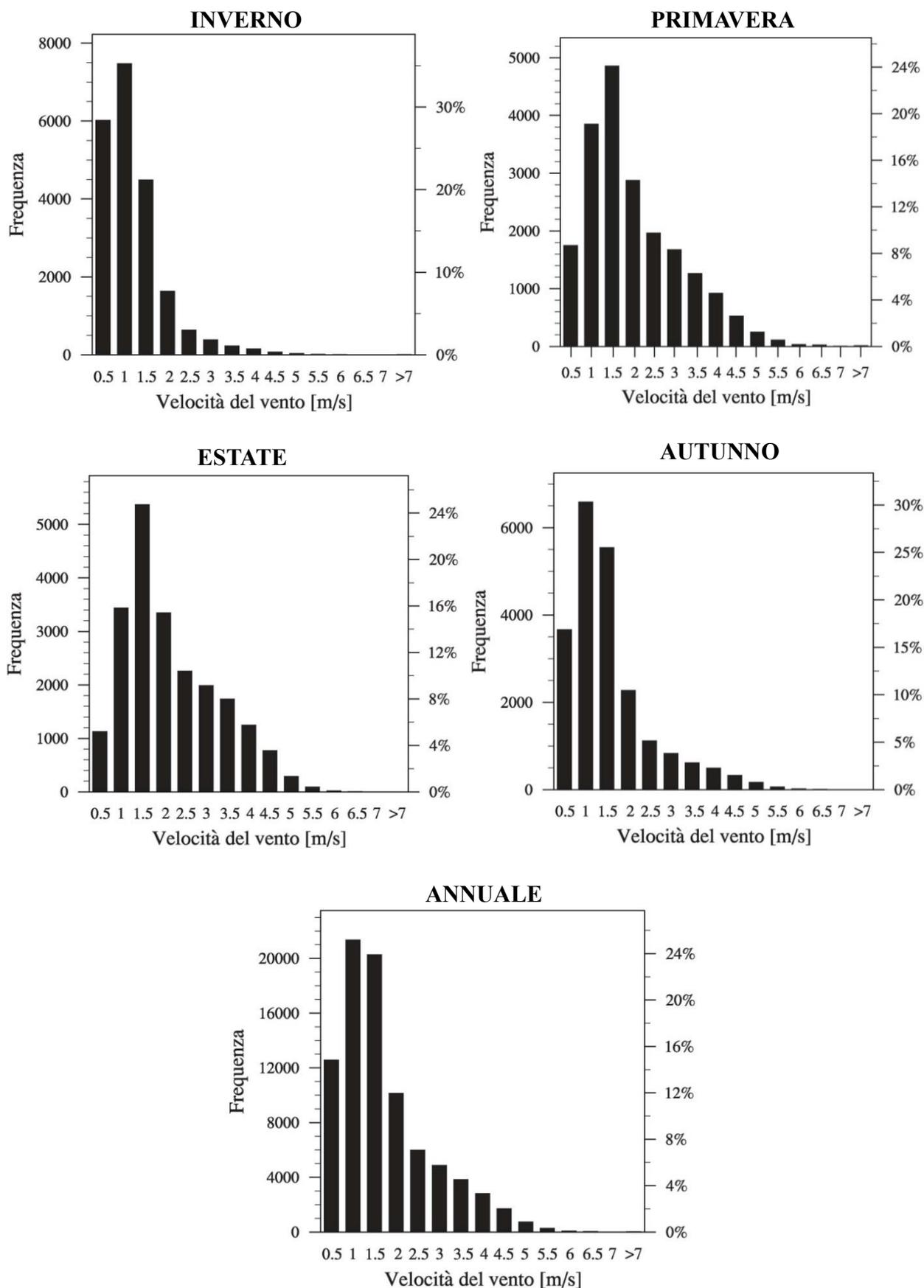
## Caldes

- Coordinate: 46.379 N, 10.961 E
- Quota: 773 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

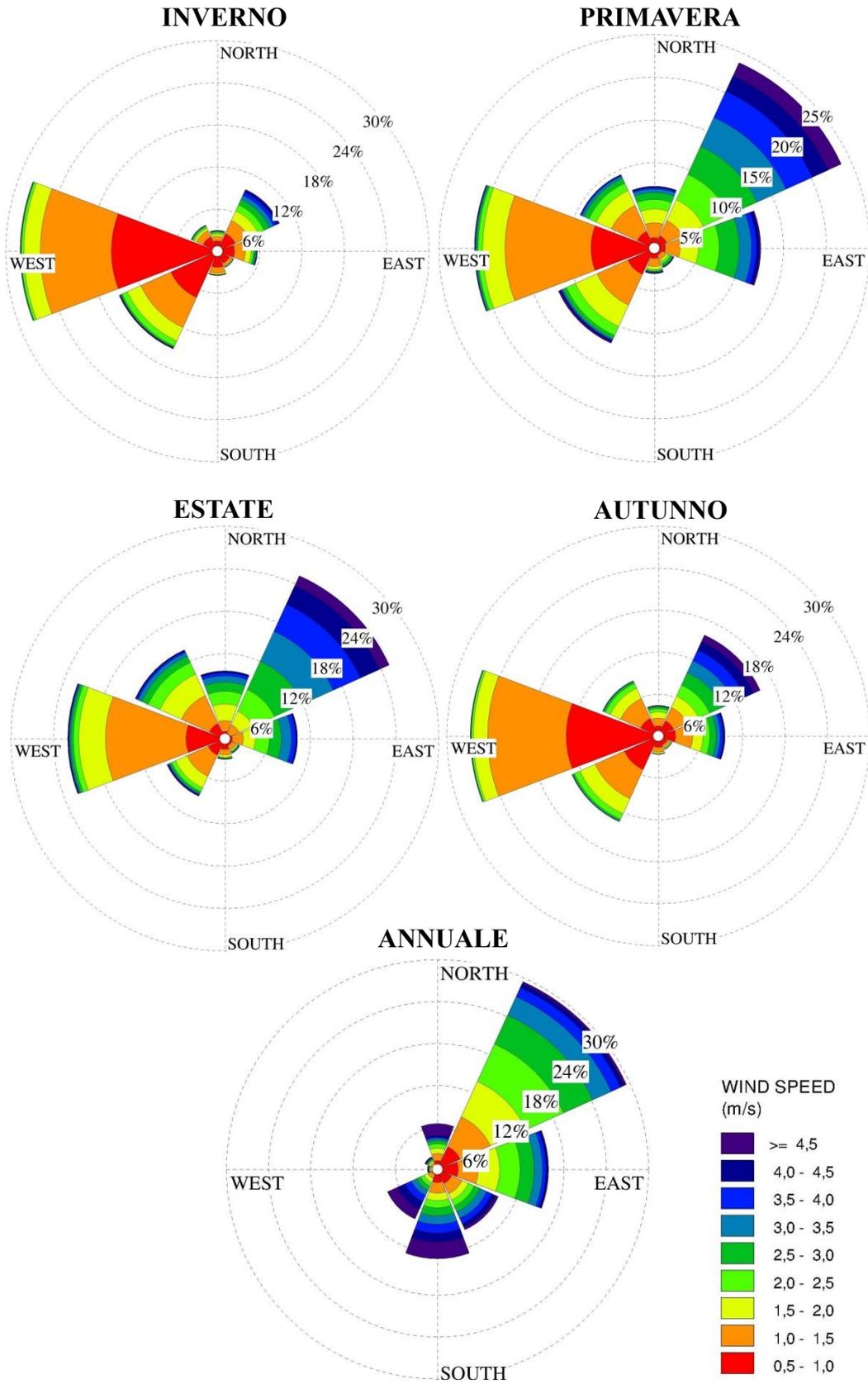


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Caldes.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.83	1.11	1.59	1.74	1.84	1.89	1.92	1.79	1.59	1.22	0.91	0.77	1.43
<b>Calme [%]</b>	30.1	21.5	12.4	6.5	6.8	5.9	3.9	5.8	9.4	17.1	24.2	33.1	14.8



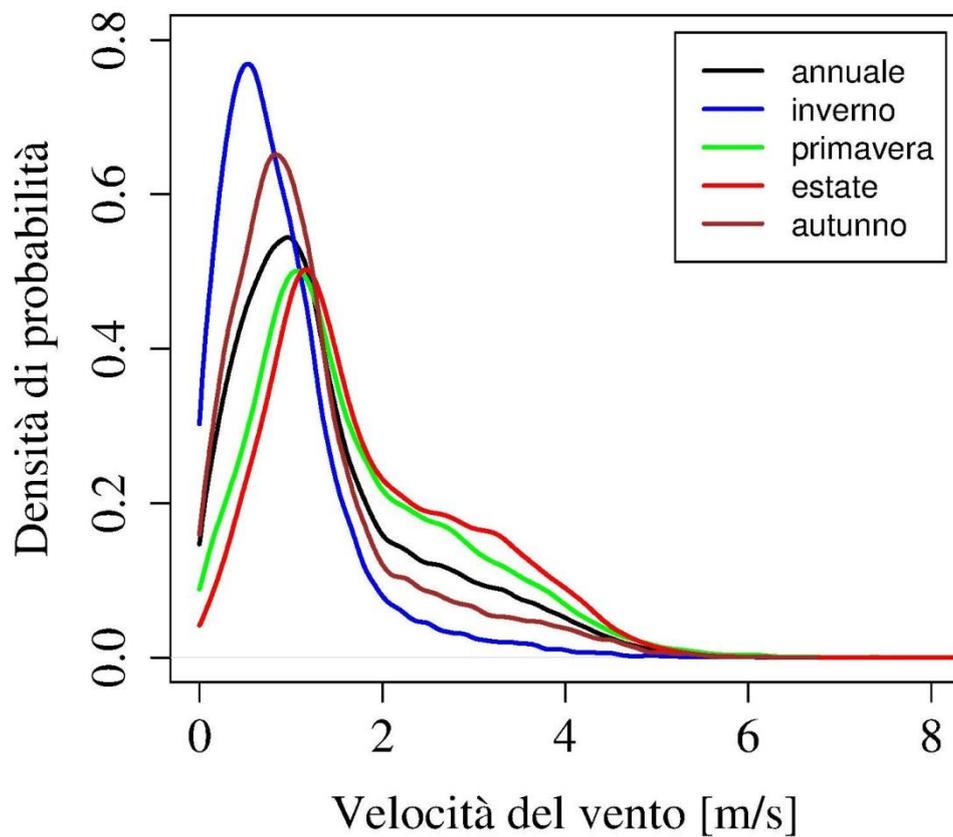
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Caldes.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Caldes.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Caldes.

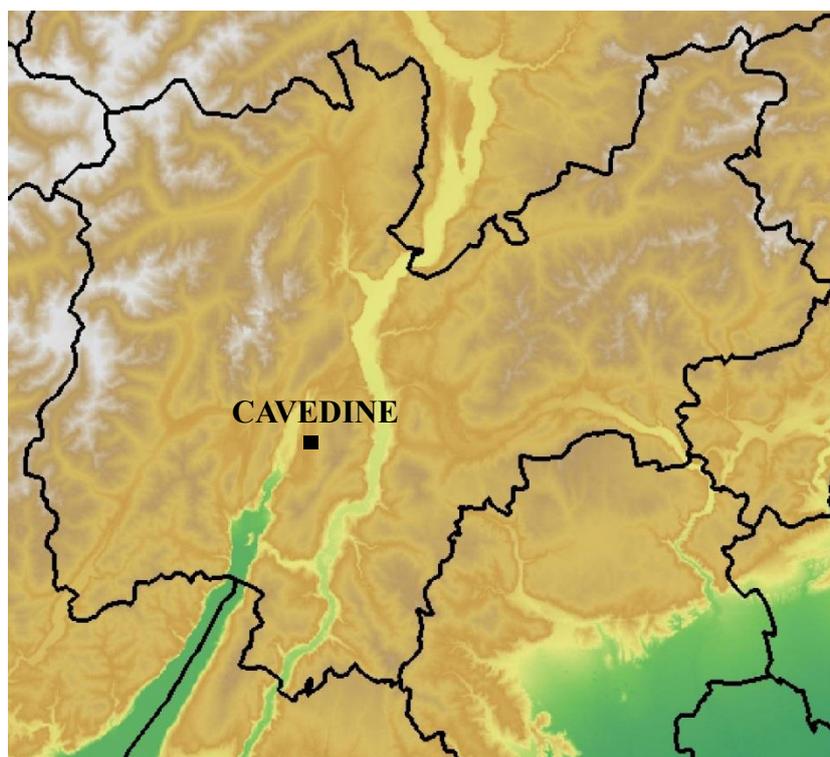
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.94	1.89	2.09	1.33	1.54
<b>Parametro di forma k</b>	1.16	1.48	1.71	1.27	1.29



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Caldes.

## Cavedine

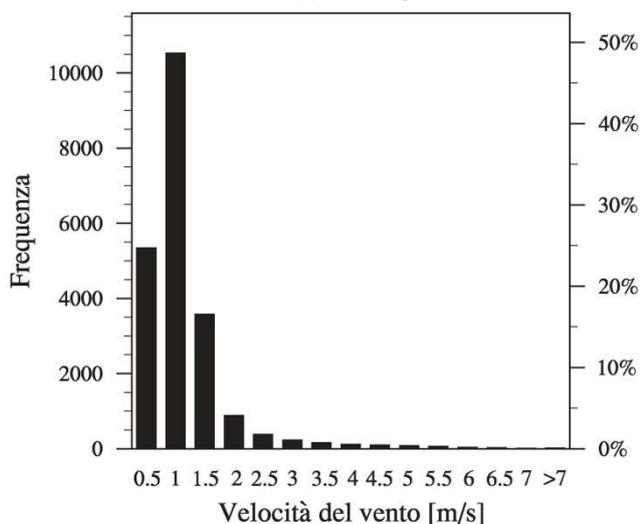
- Coordinate: 45.985 N, 10.981 E
- Quota: 552 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m



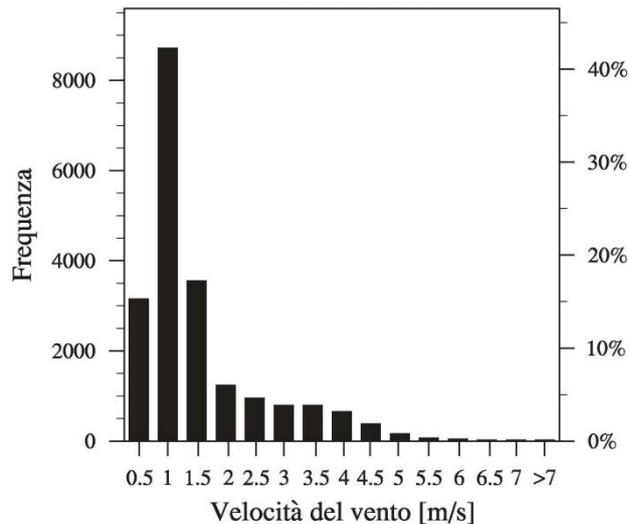
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Cavedine.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.84	0.95	1.21	1.22	1.34	1.38	1.36	1.27	1.09	0.87	0.86	0.81	1.10
<b>Calme [%]</b>	30.1	21.5	12.4	6.5	6.8	5.9	3.9	5.8	9.4	17.1	24.2	33.1	16.0

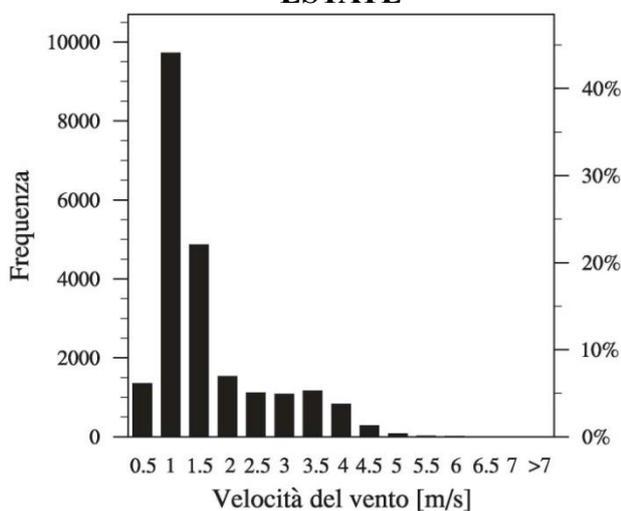
### INVERNO



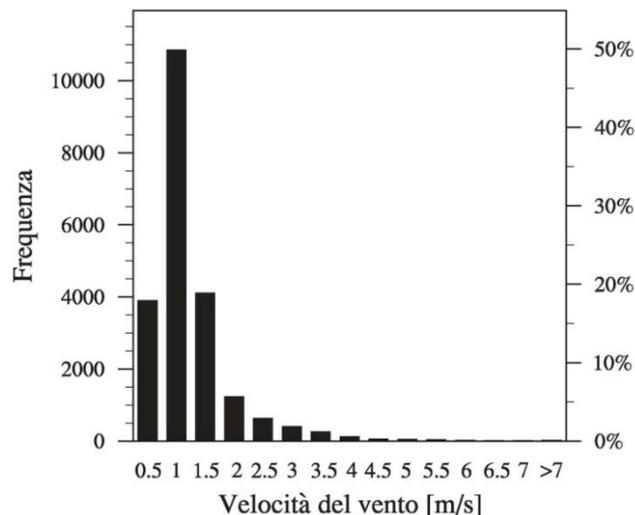
### PRIMAVERA



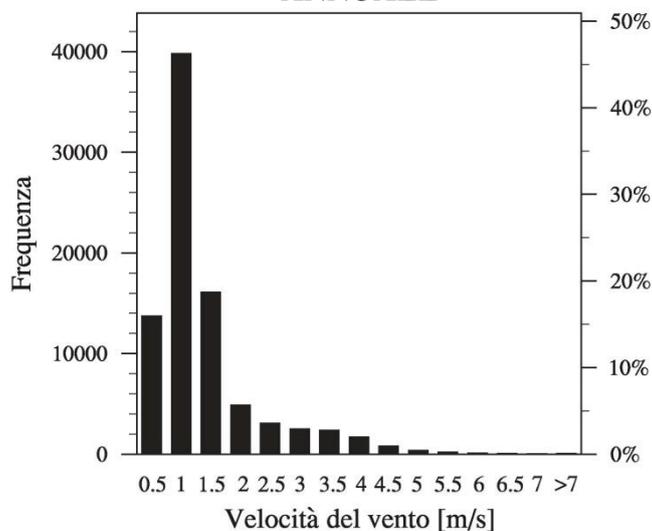
### ESTATE



### AUTUNNO

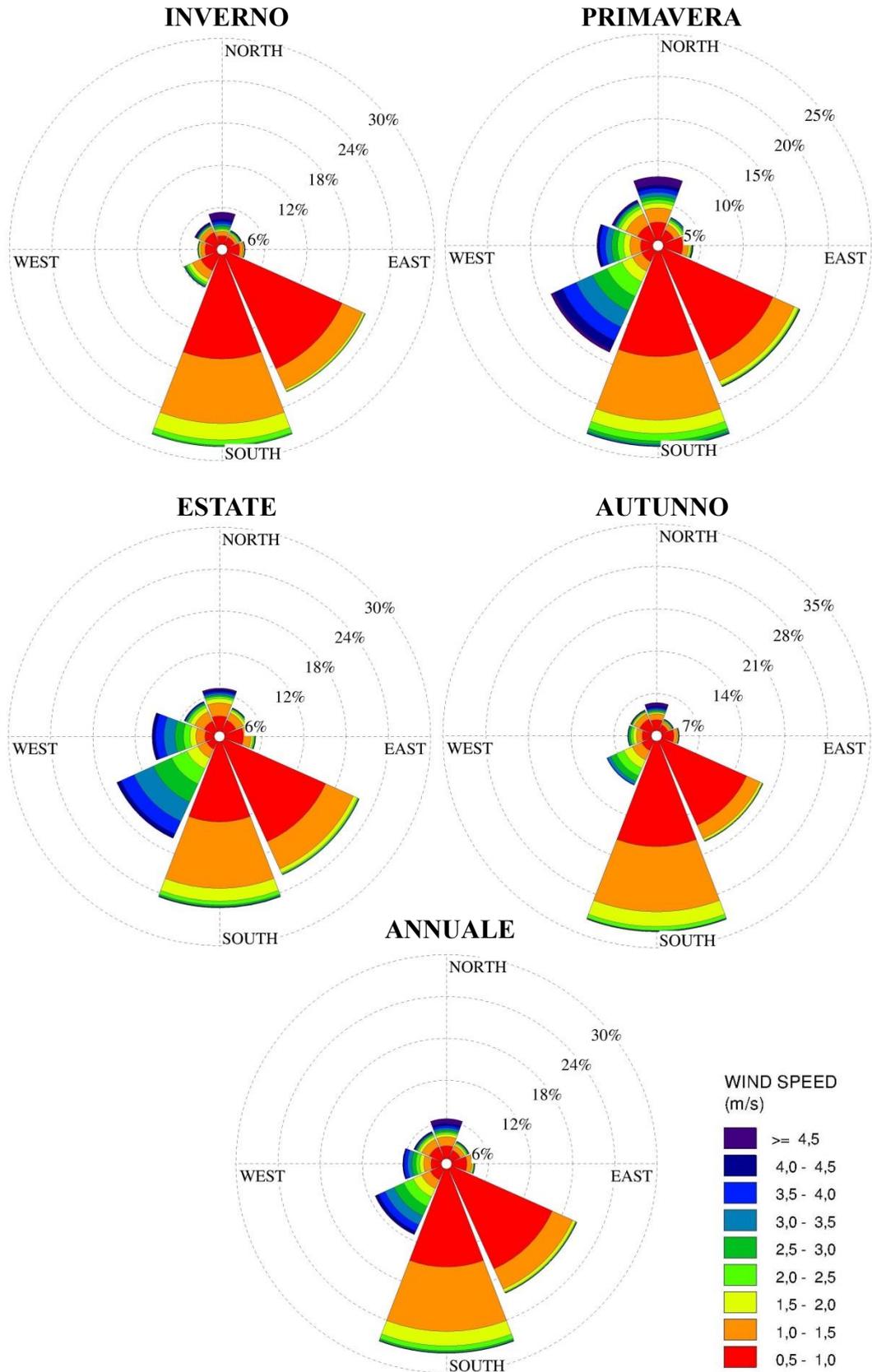


### ANNUALE



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Cavedine.

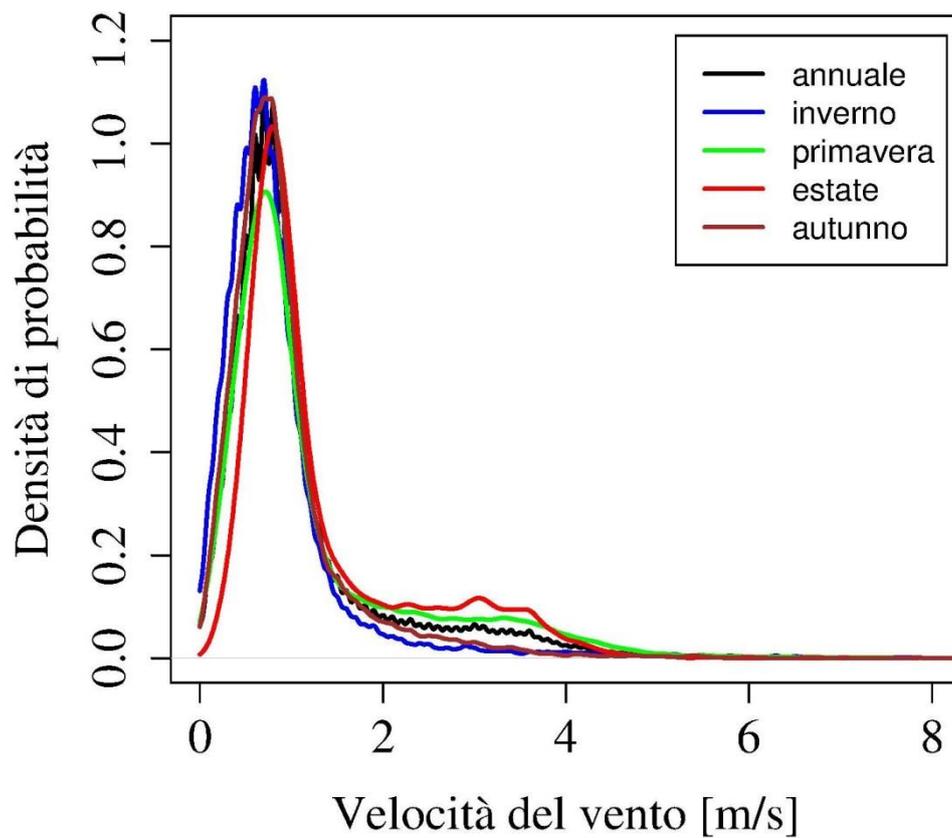
# ATLANTE EOLICO DEL TRENINO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Cavédine.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Cavedine.

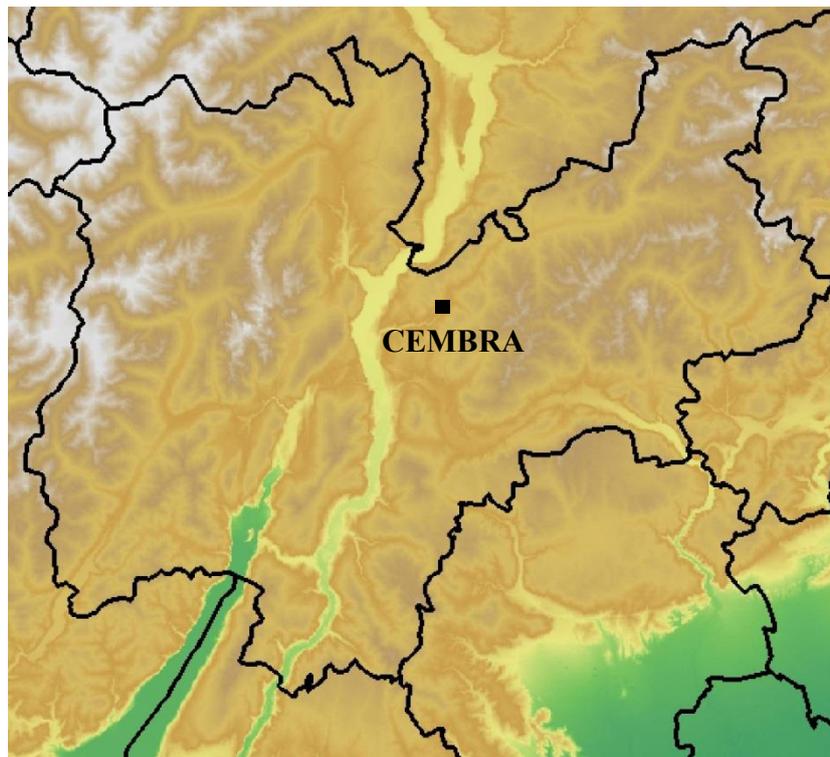
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.93	1.36	1.50	1.04	1.20
<b>Parametro di forma k</b>	1.26	1.25	1.51	1.42	1.31



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e totale per la stazione di Cavedine.

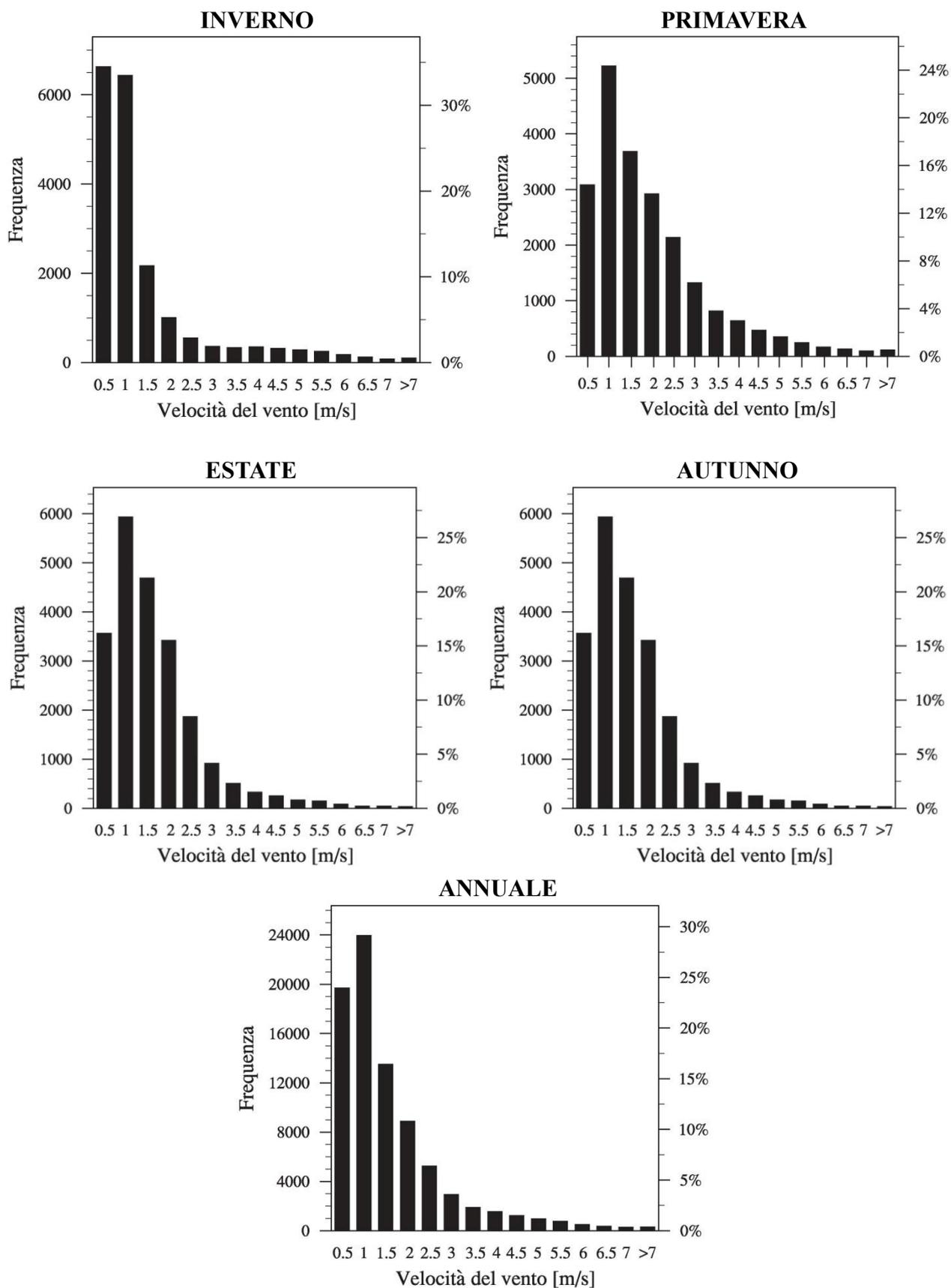
## Cembra

- Coordinate: 46.171 N, 11.220 E
- Quota: 640 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

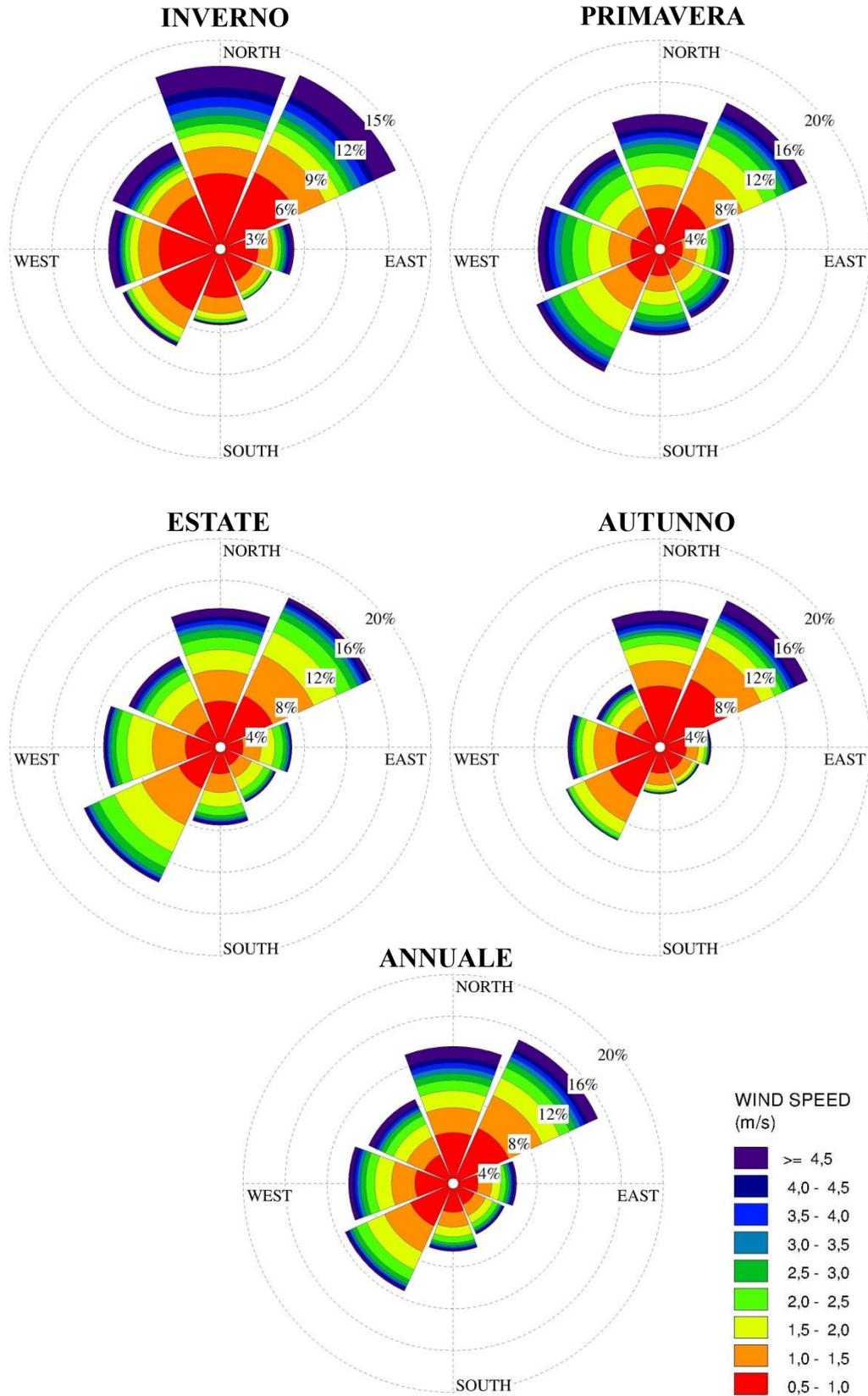


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Cembra.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.07	1.34	1.68	1.62	1.62	1.41	1.37	1.28	1.15	0.94	0.92	0.99	1.30
<b>Calme [%]</b>	34.9	28.0	18.7	12.3	12.4	16.4	15.0	17.1	22.9	37.4	39.7	41.0	24.0



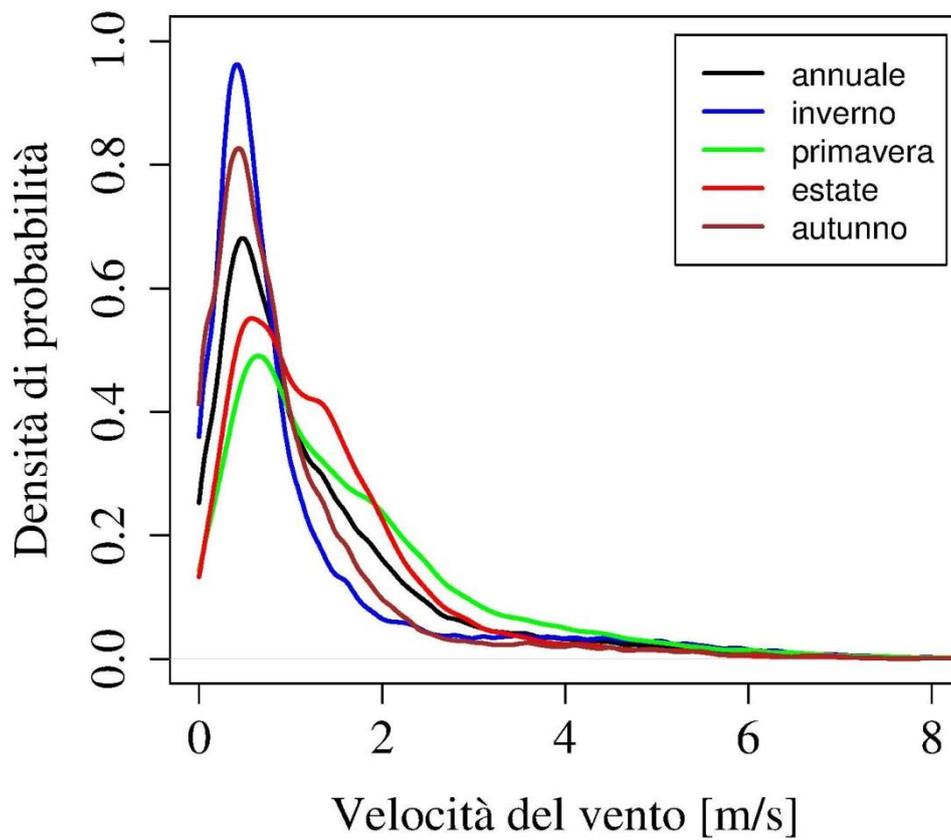
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Cembra.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Cembra.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Cembra.

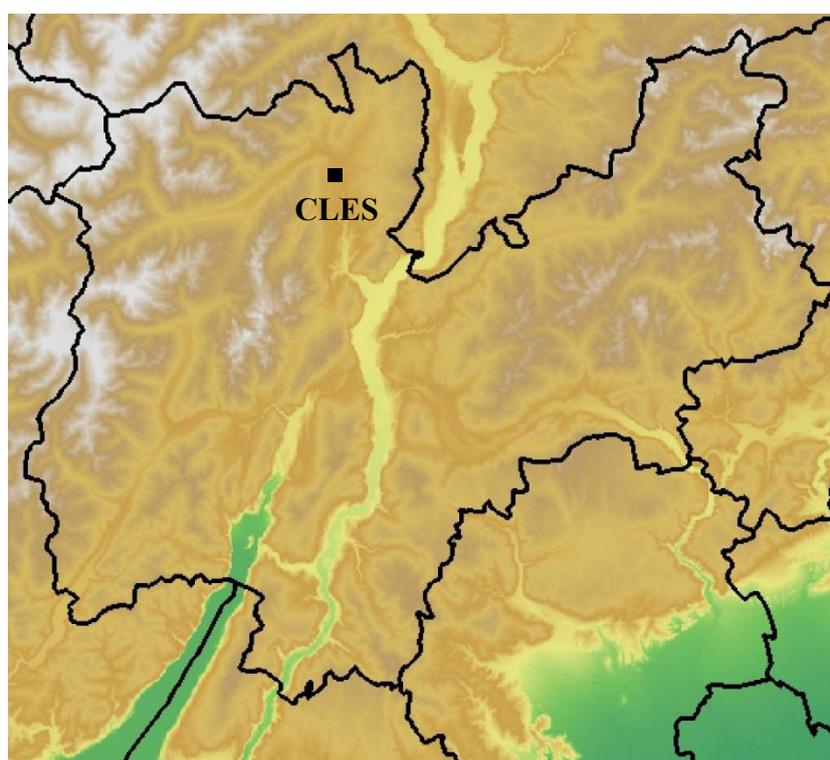
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.05	1.73	1.46	0.97	1.30
<b>Parametro di forma k</b>	0.86	1.17	1.27	0.92	1.01



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e totale per la stazione di Cembra.

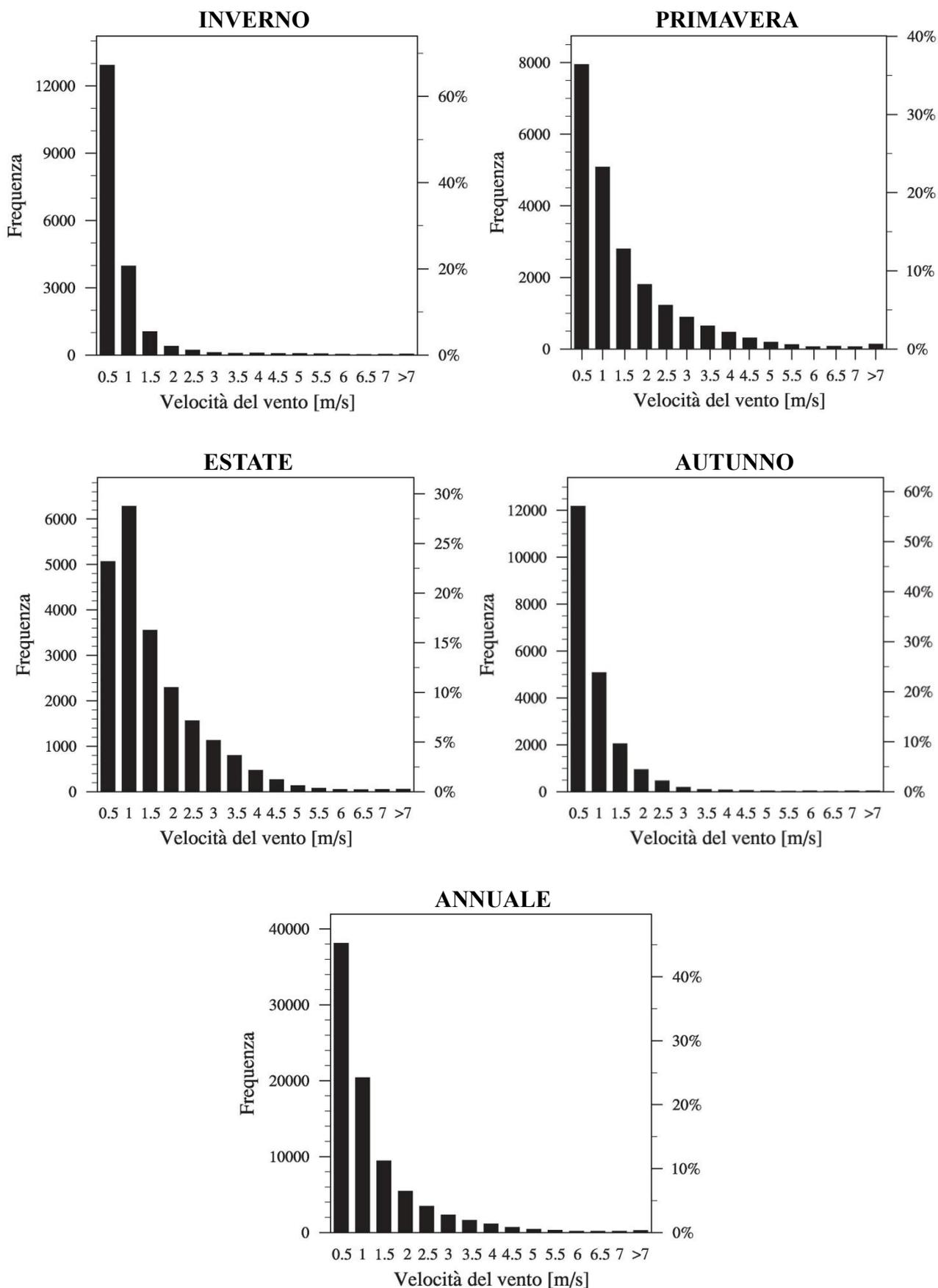
## Cles

- Coordinate: 46.389N, 11.040 E
- Quota: 656 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m



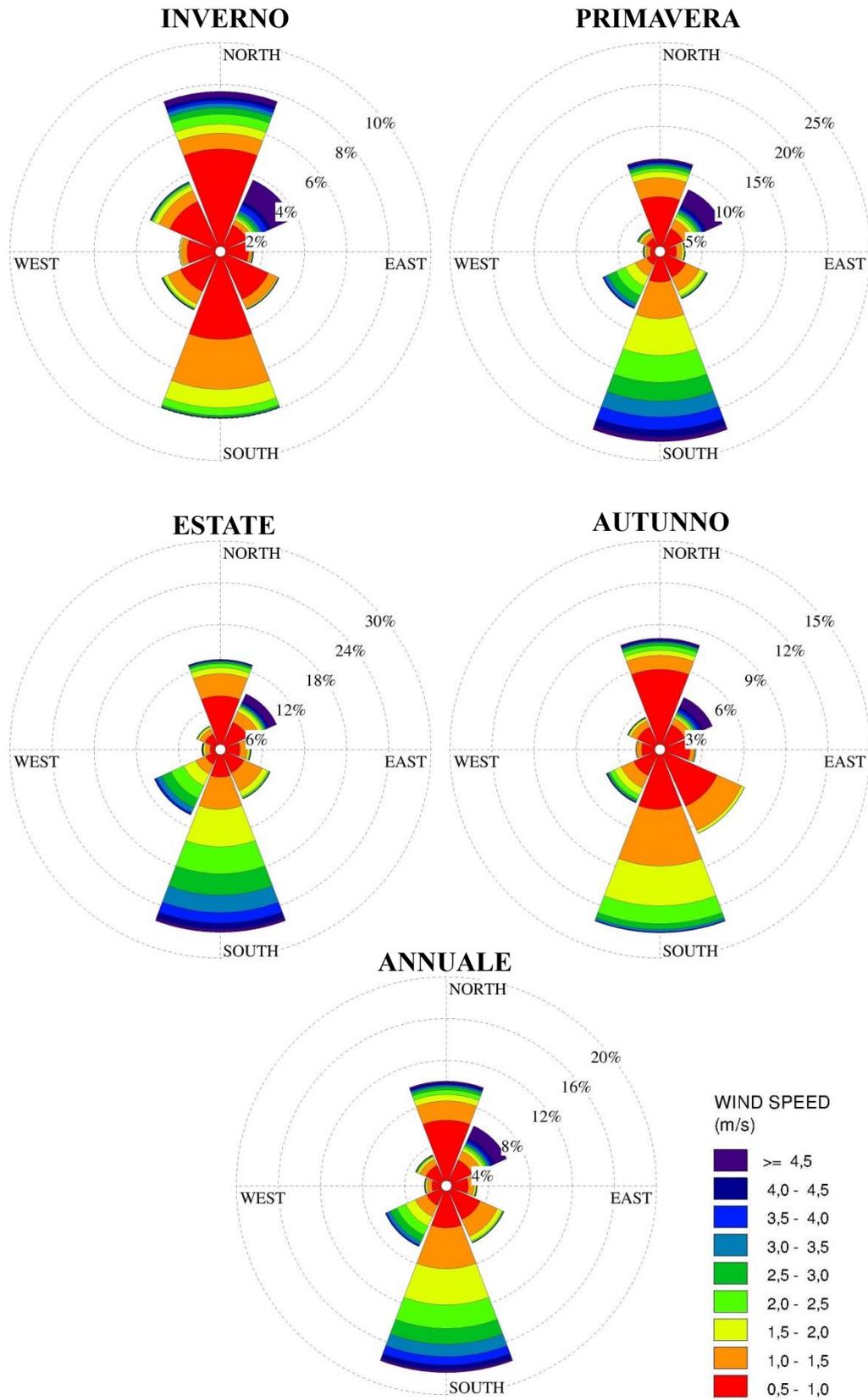
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Cles.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.51	0.67	1.02	1.16	1.32	1.40	1.32	1.11	0.83	0.54	0.48	0.39	0.91
<b>Calme [%]</b>	68.1	59.2	44.5	36.5	28.4	21.9	20.2	27.3	41.1	61.3	69.5	74.5	45.3



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Cles.

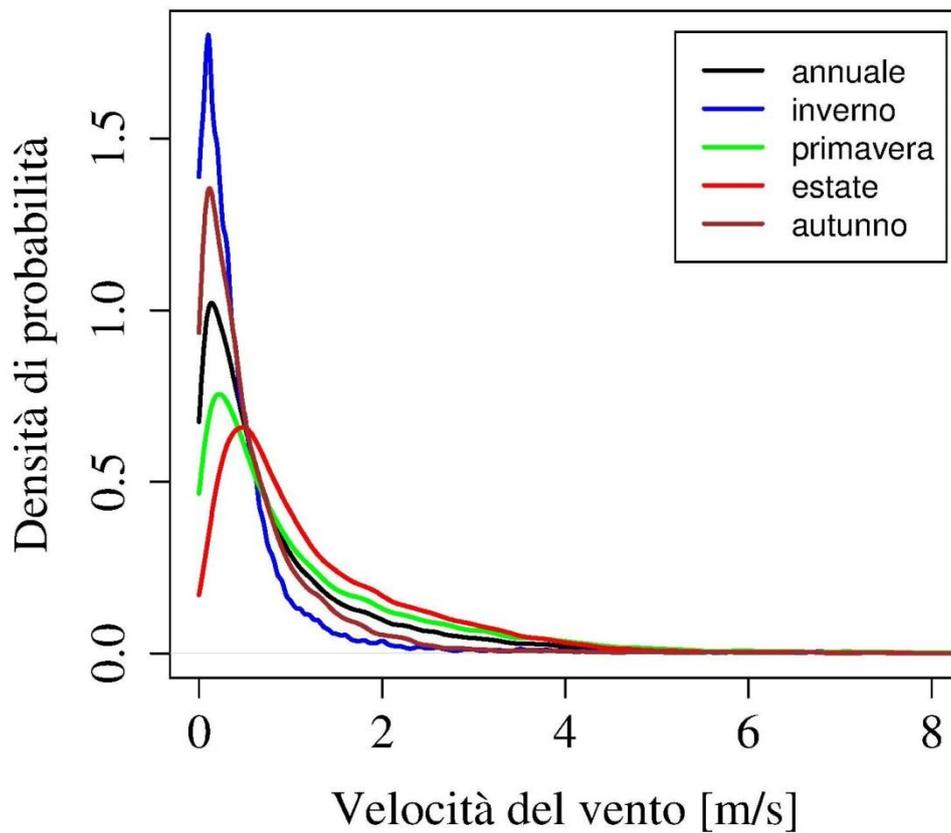
# ATLANTE EOLICO DEL TRENINO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Cles.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Cles.

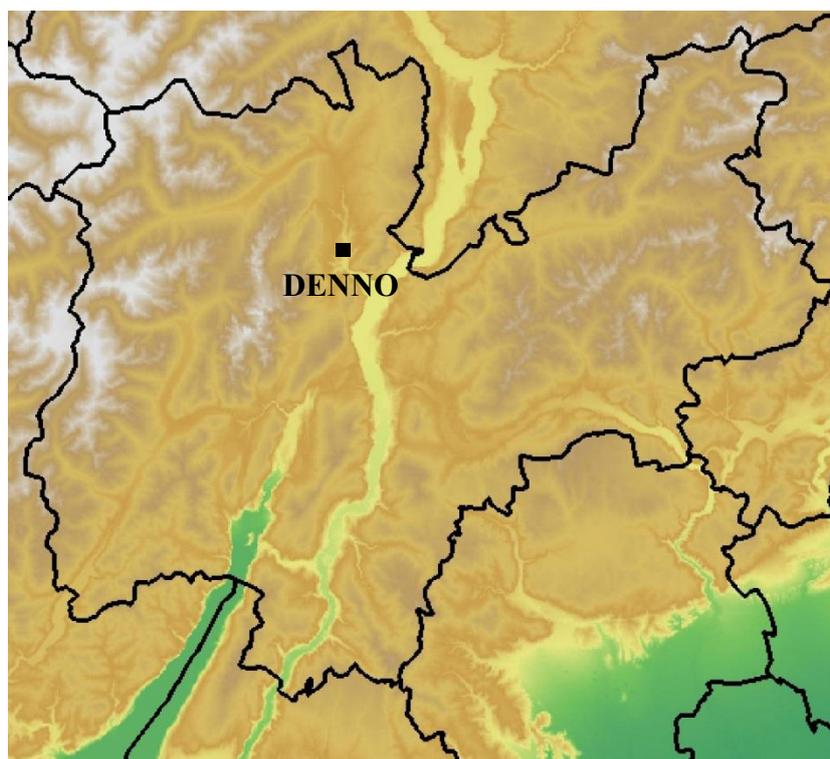
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.39	1.07	1.35	0.53	0.79
<b>Parametro di forma k</b>	0.65	0.83	1.16	0.75	0.77



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e totale per la stazione di Cles.

## Denno

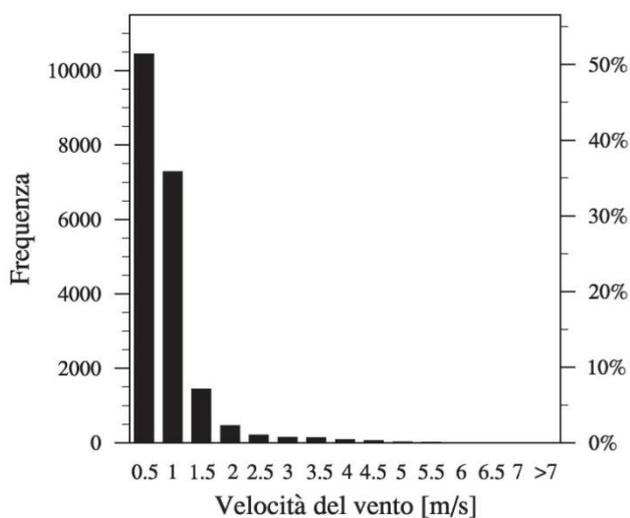
- Coordinate: 46.267 N, 11.056 E
- Quota: 324 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m



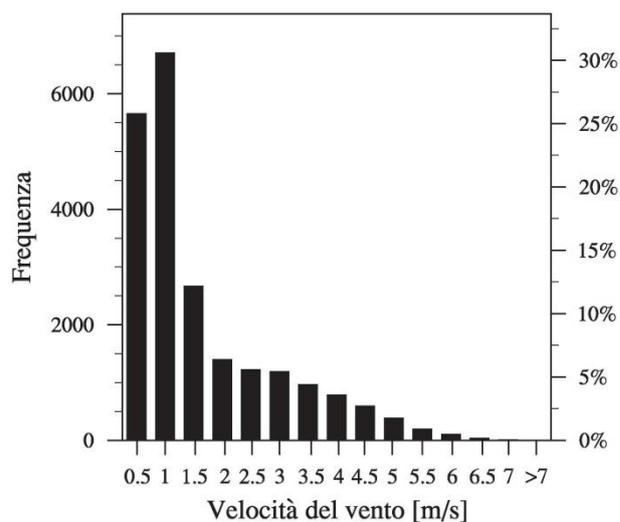
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Denno.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.53	0.69	1.14	1.39	1.51	1.56	1.47	1.30	1.01	0.75	0.58	0.52	1.05
<b>Calme [%]</b>	53.9	46.3	32.4	25.7	19.3	16.3	14.4	16.9	27.4	39.0	50.7	53.5	32.6

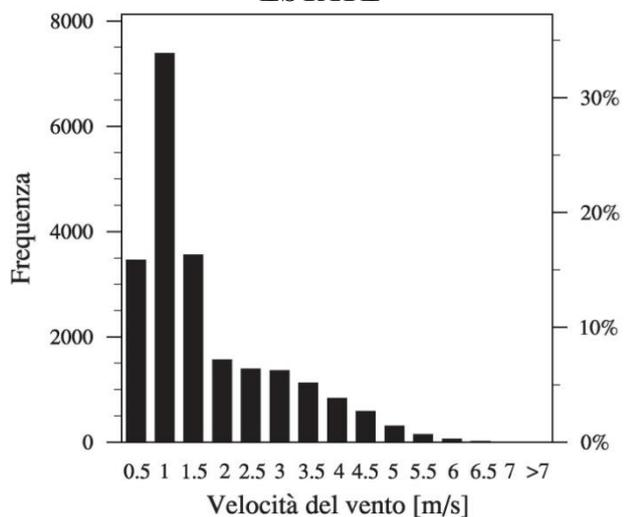
## INVERNO



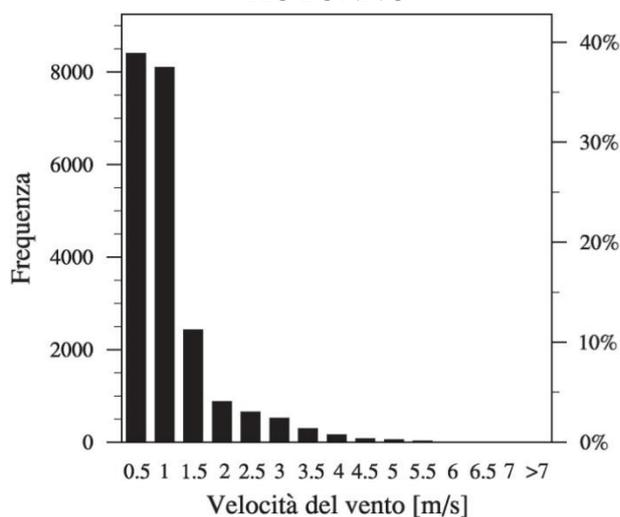
## PRIMAVERA



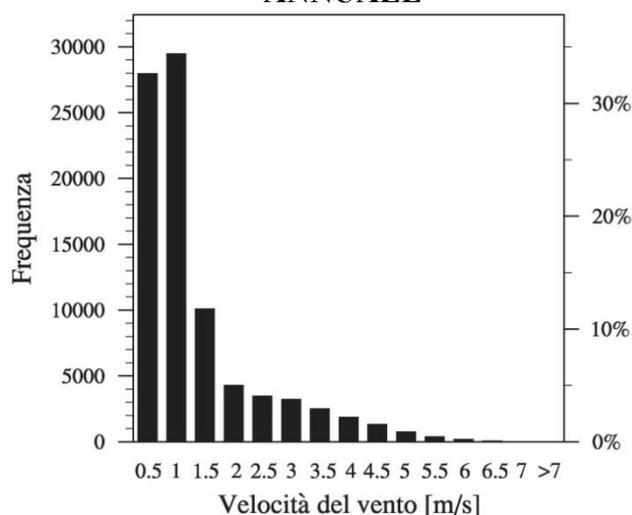
## ESTATE



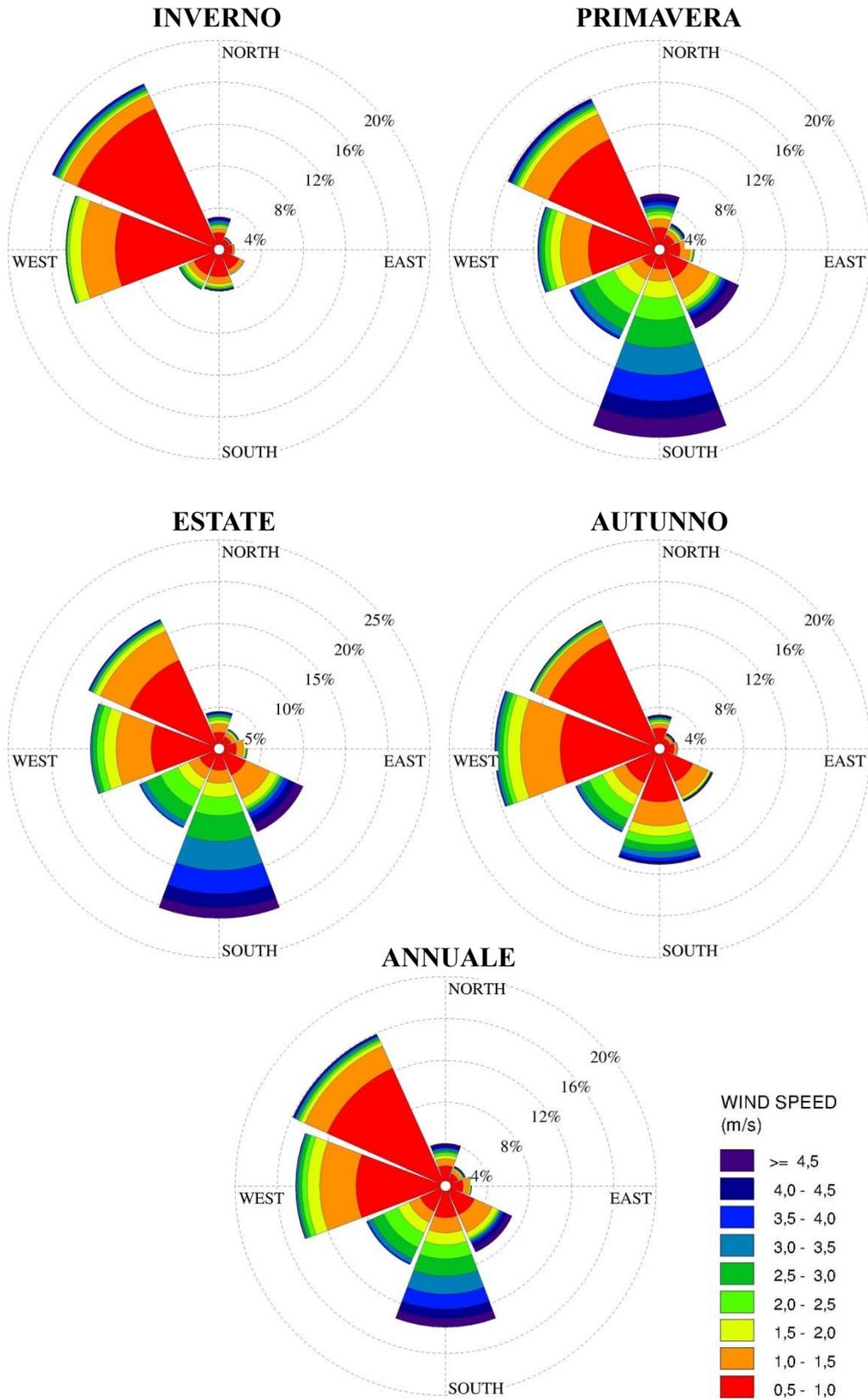
## AUTUNNO



## ANNUALE



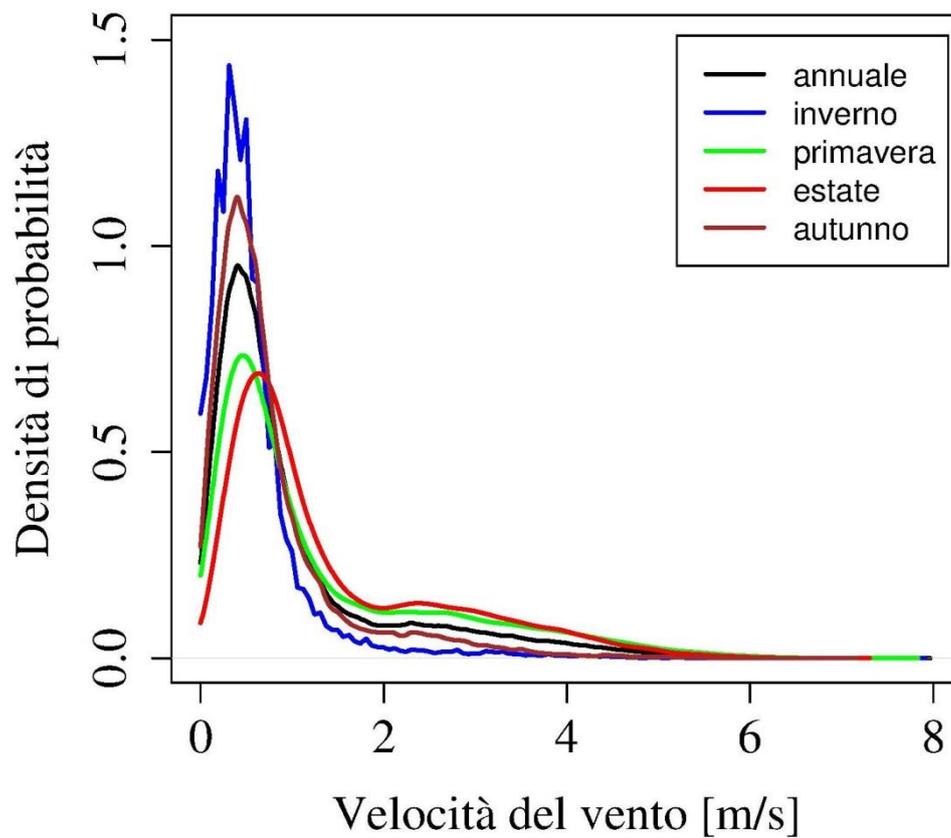
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Denno.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Denno.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Denno.

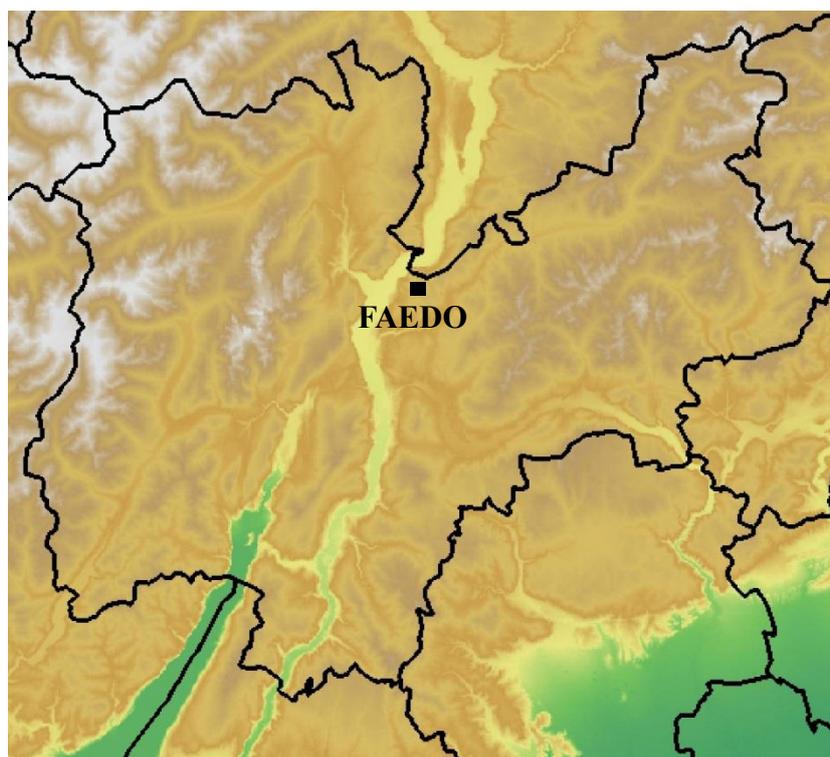
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.58	1.38	1.56	0.81	1.05
<b>Parametro di forma k</b>	1.02	1.06	1.27	1.10	1.02



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Denno.

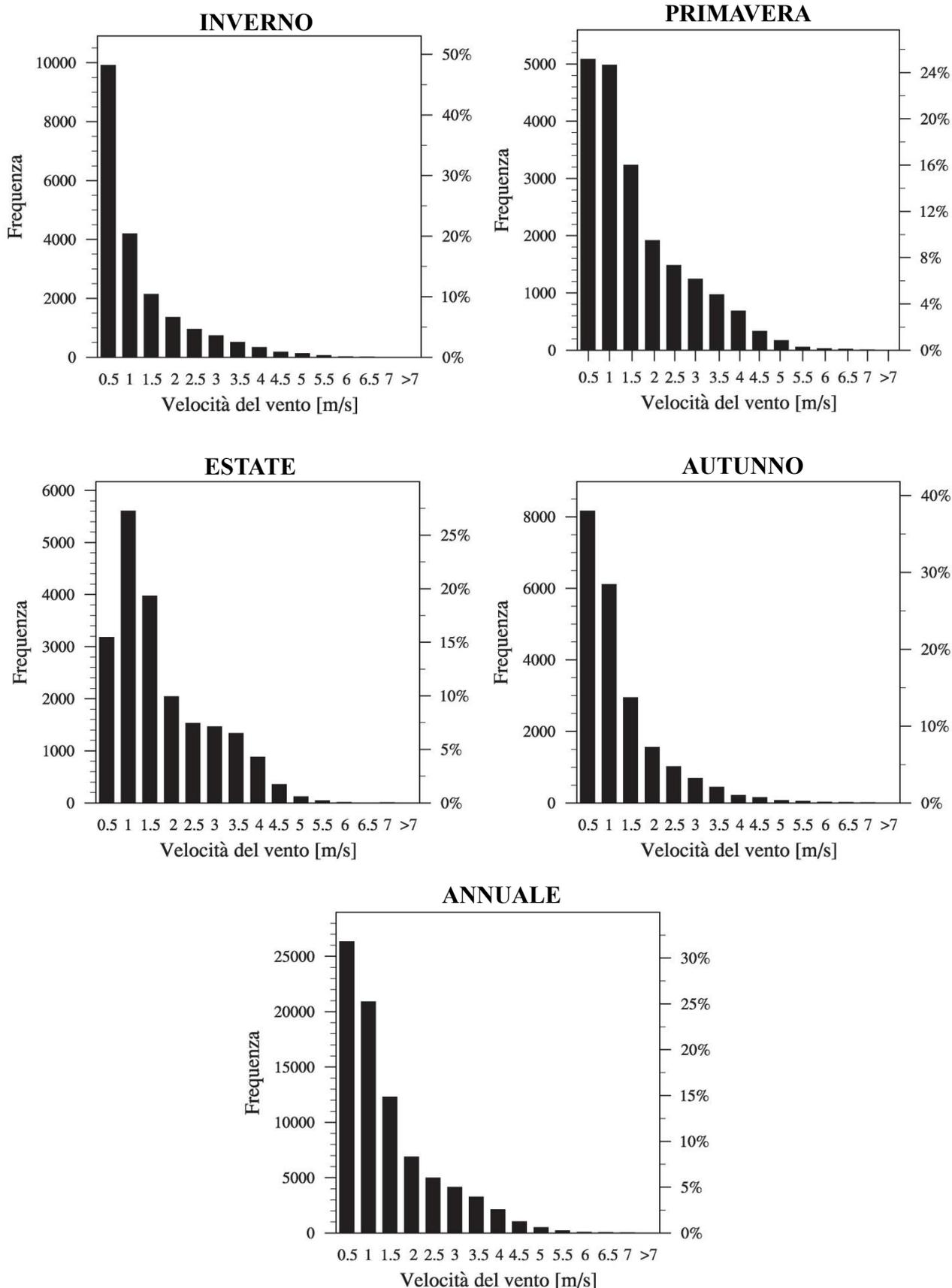
## Faedo

- Coordinate: 46.195 N, 11.170 E
- Quota: 696 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

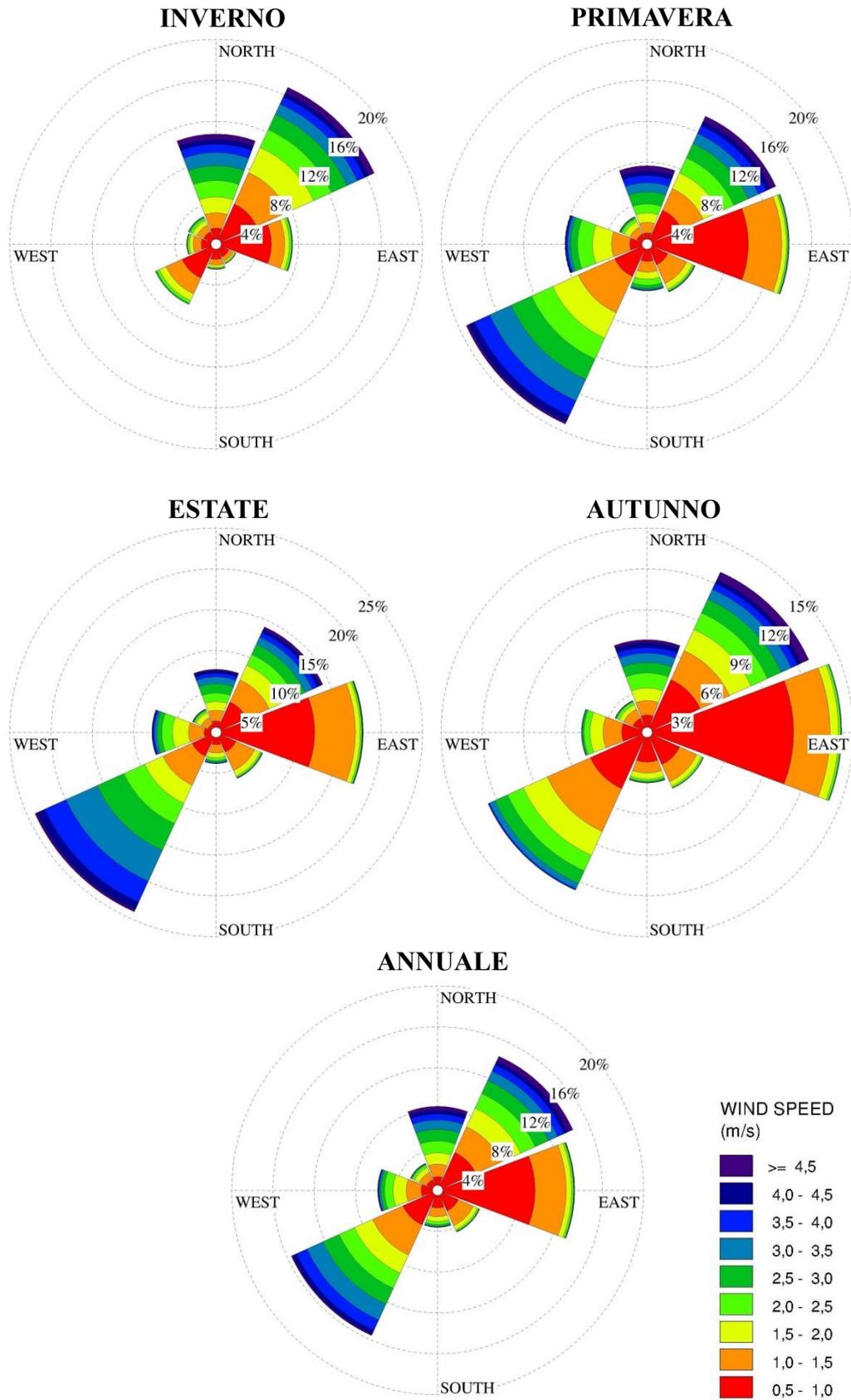


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Faedo.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.85	0.97	1.23	1.27	1.46	1.52	1.47	1.41	1.10	0.86	0.82	0.86	1.15
<b>Calme [%]</b>	51.6	42.5	31.7	25.1	18.0	15.9	15.1	15.4	24.6	37.6	51.9	49.9	31.8



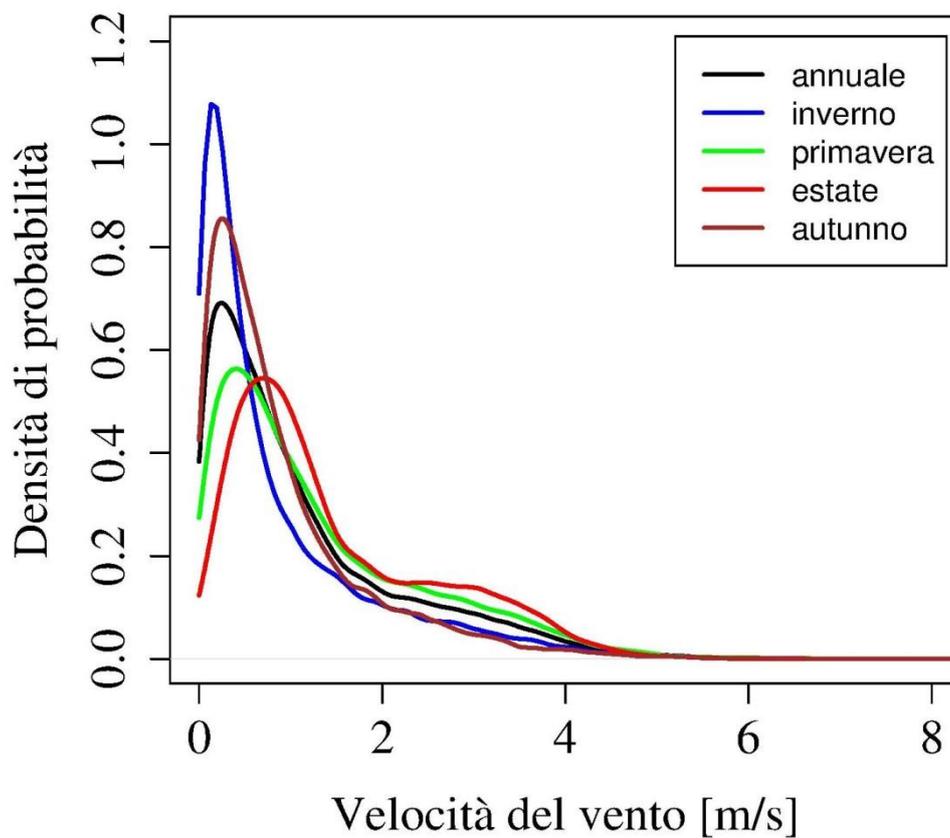
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Faedo.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Faedo.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Faedo.

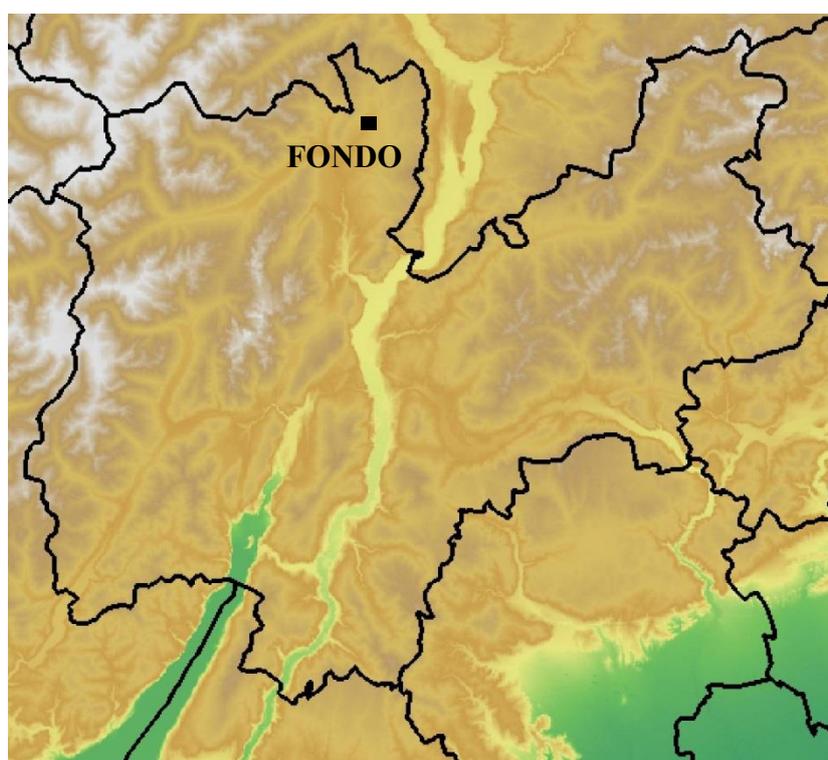
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.77	1.34	1.58	0.91	1.12
<b>Parametro di forma k</b>	0.75	1.05	1.30	0.95	0.95



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Faedo.

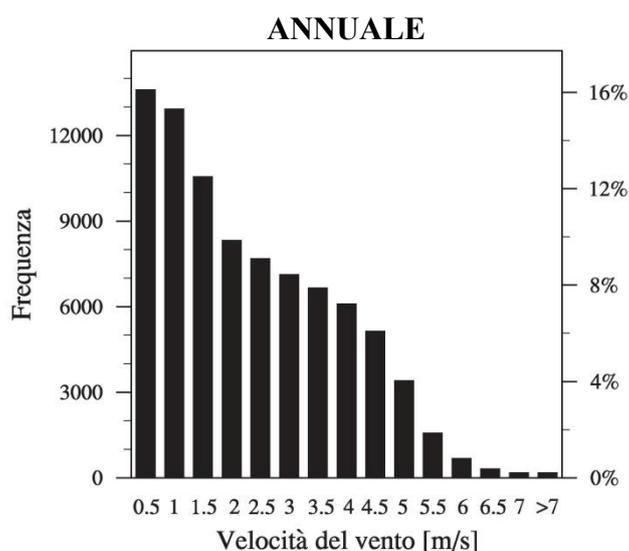
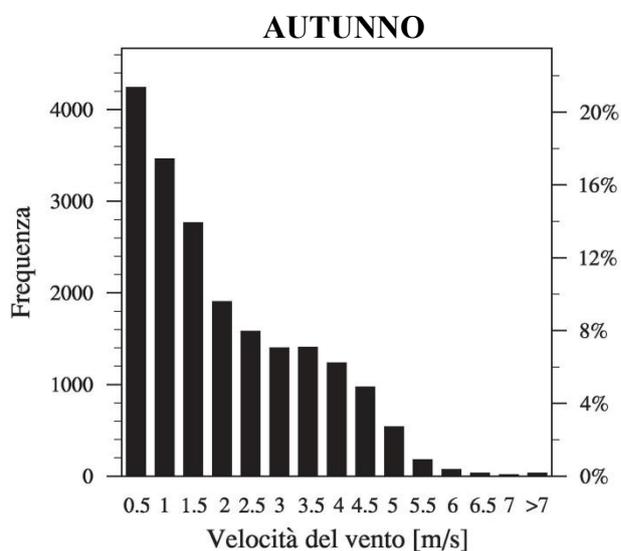
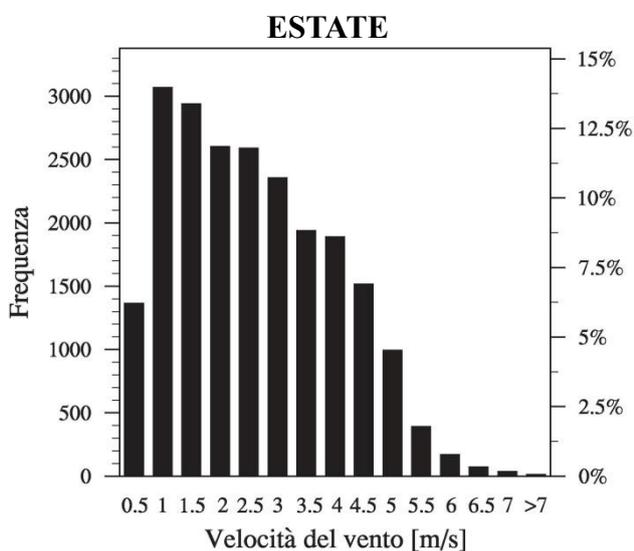
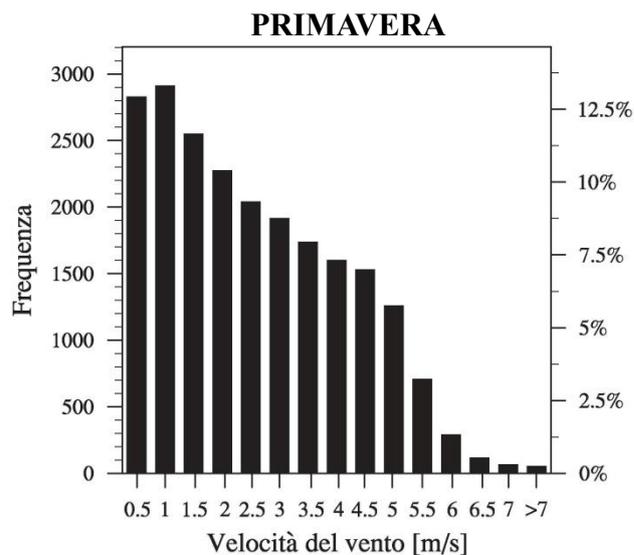
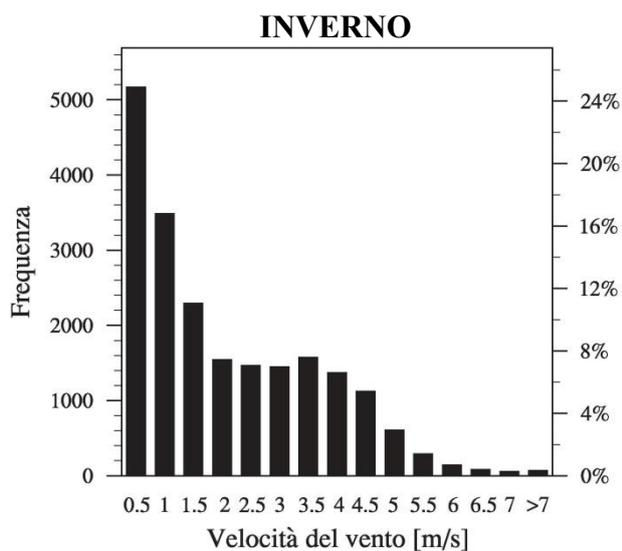
## Fondo

- Coordinate: 46.438 N, 11.130 E
- Quota: 918 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

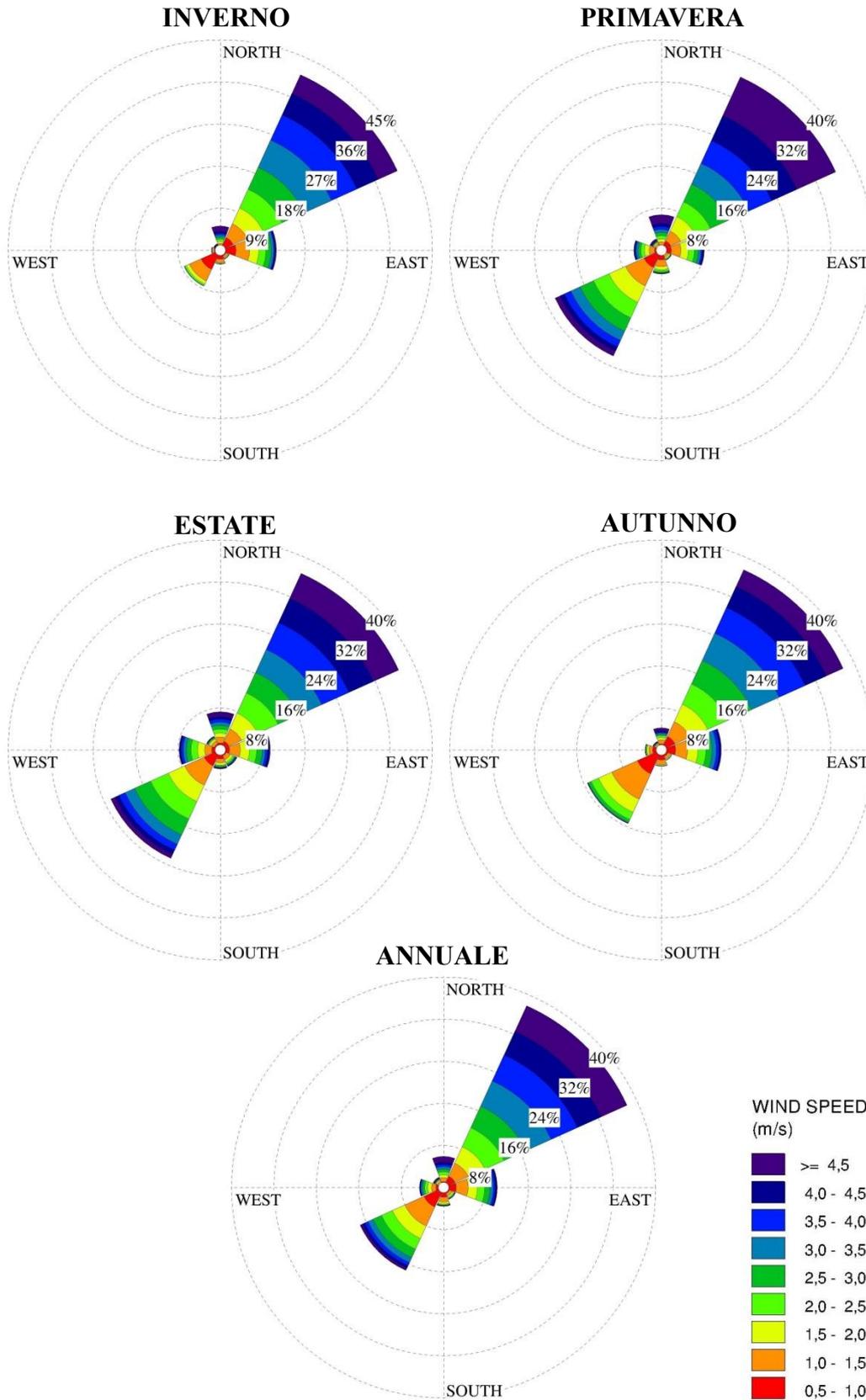


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Fondo.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.83	1.91	2.23	2.29	2.32	2.28	2.39	2.23	1.98	1.59	1.67	1.67	2.04
<b>Calme [%]</b>	24.8	22.5	16.1	13.1	9.7	7.8	4.3	6.5	12.8	24.4	26.5	27.2	16.1



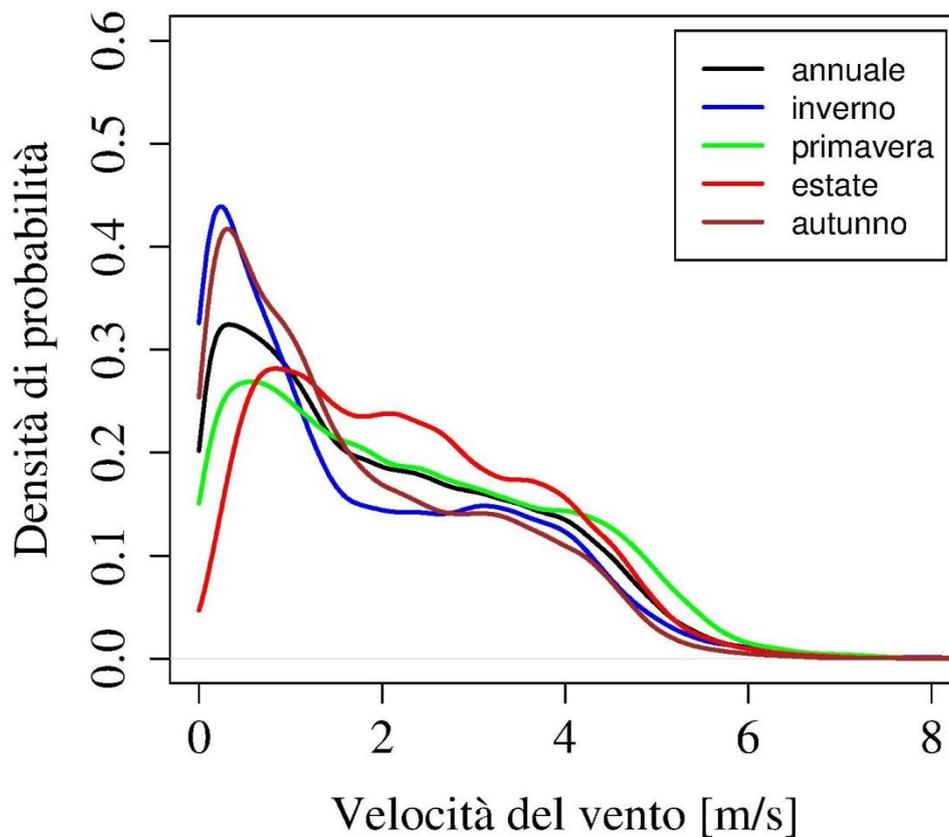
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Fondo.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Fondo.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Fondo.

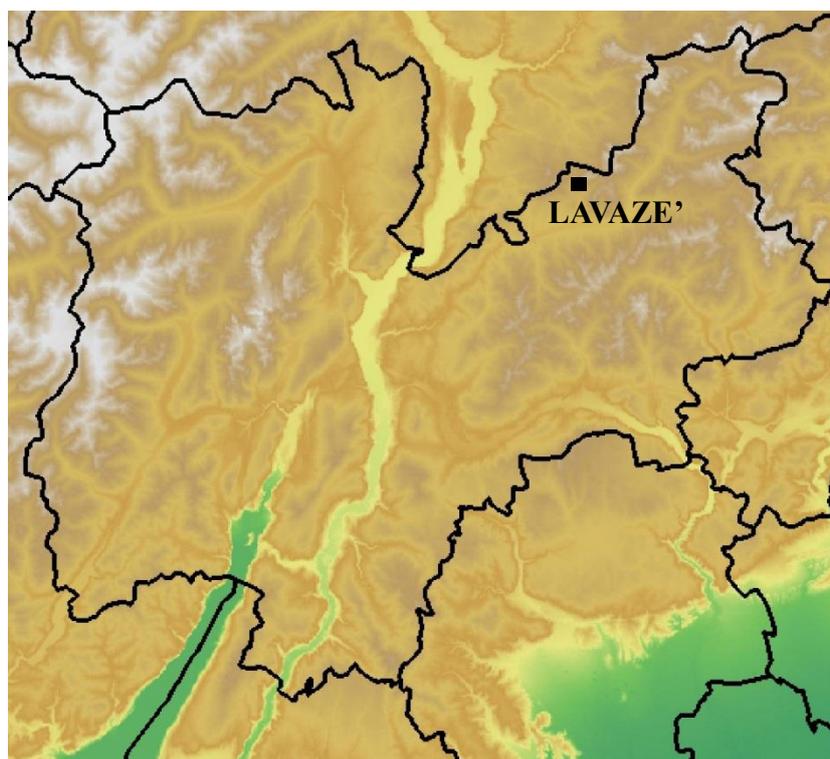
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.70	2.41	2.56	1.76	2.11
<b>Parametro di forma k</b>	0.86	1.23	1.66	1.03	1.12



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Fondo.

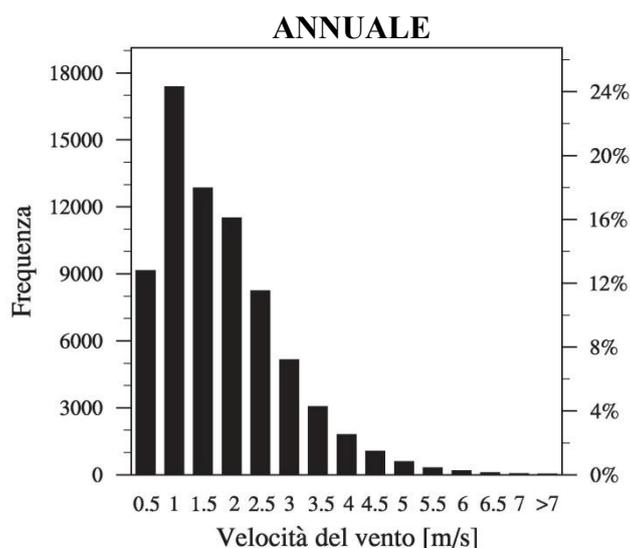
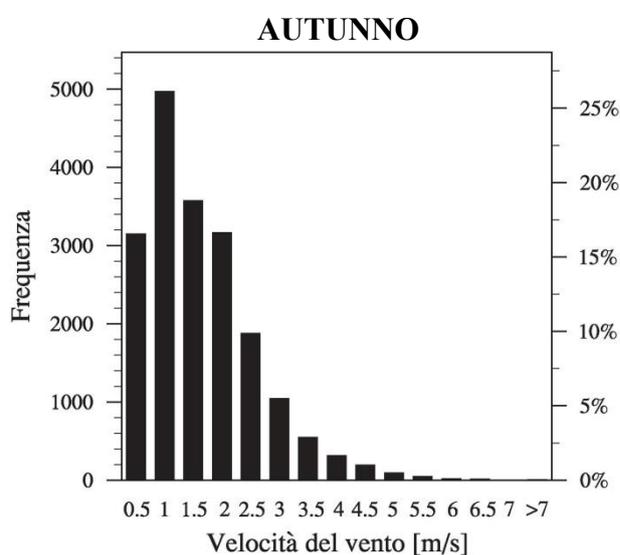
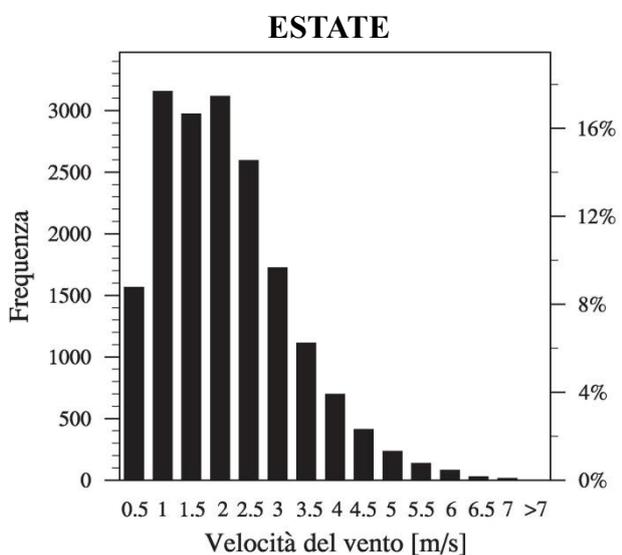
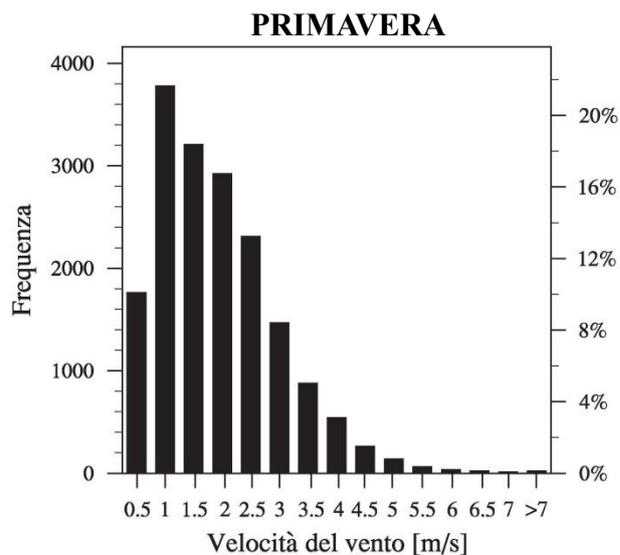
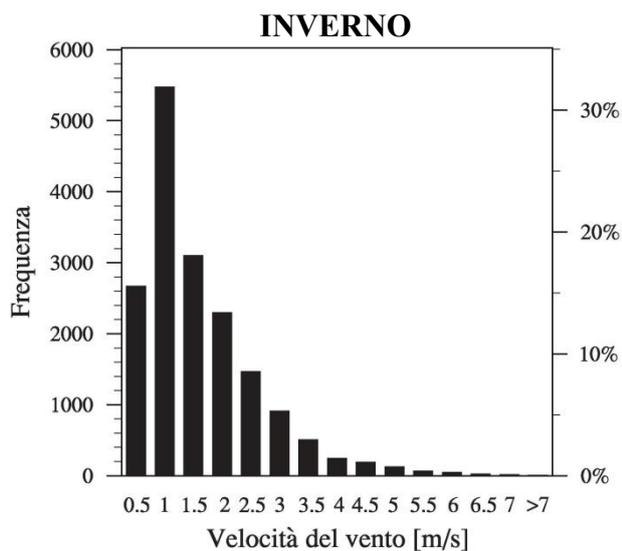
## Lavazè

- Coordinate: 46.358 N, 11.494 E
- Quota: 1807 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 5 m

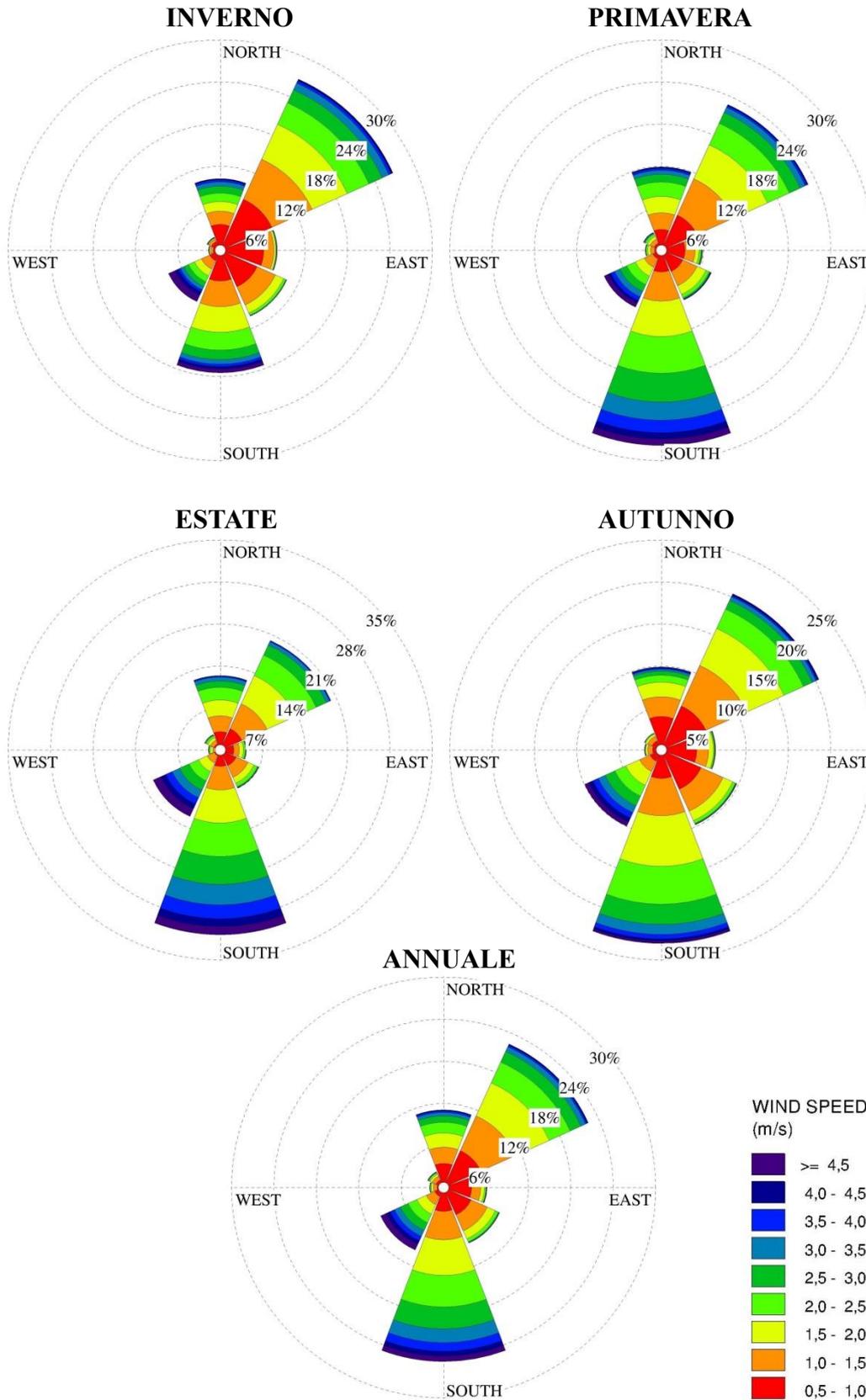


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Lavazè.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.26	1.34	1.58	1.50	1.82	1.90	1.82	1.72	1.37	1.34	1.30	1.34	1.52
<b>Calme [%]</b>	16.5	14.5	9.2	13.1	8.1	8.4	8.5	9.3	14.9	16.7	18.1	15.6	12.8



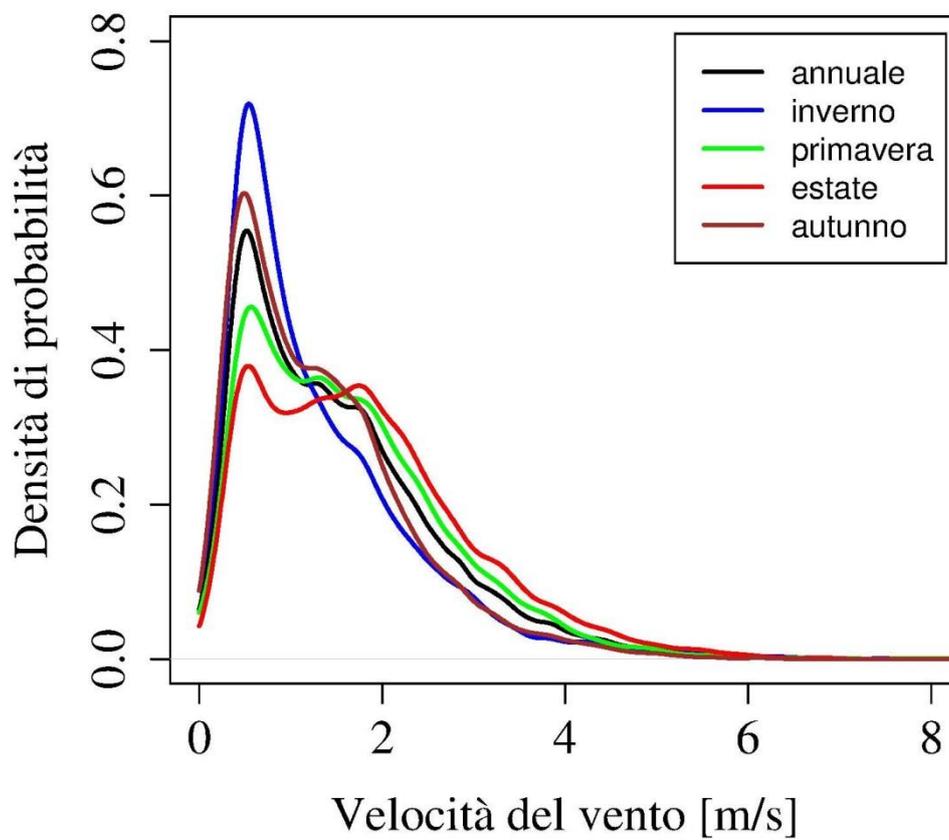
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Lavazè.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Lavazè.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Lavazè.

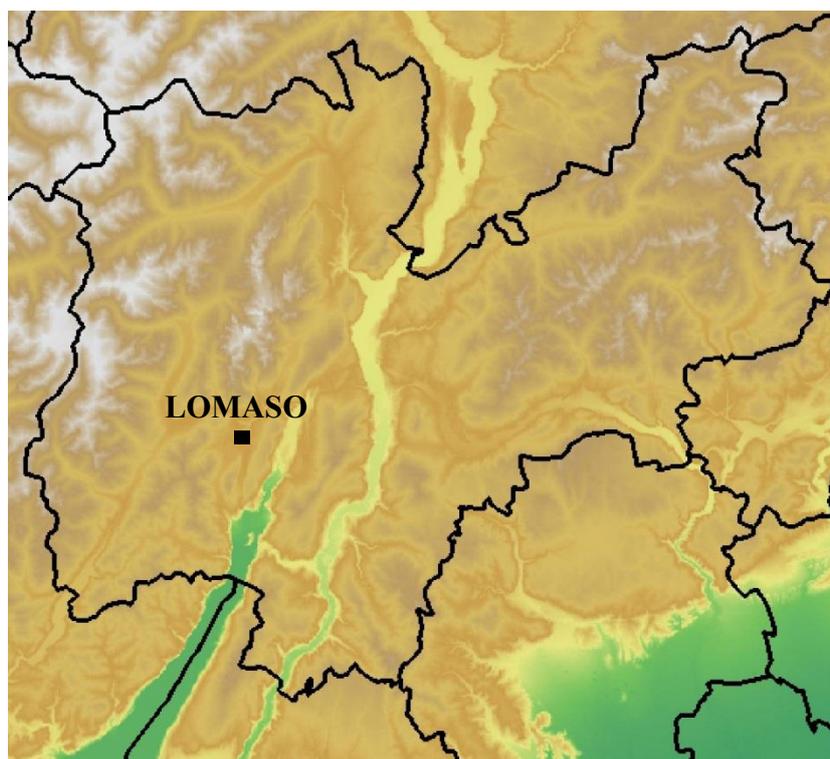
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.43	1.80	2.02	1.47	1.67
<b>Parametro di forma k</b>	1.33	1.50	1.62	1.41	1.43



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Lavazè.

## Lomaso

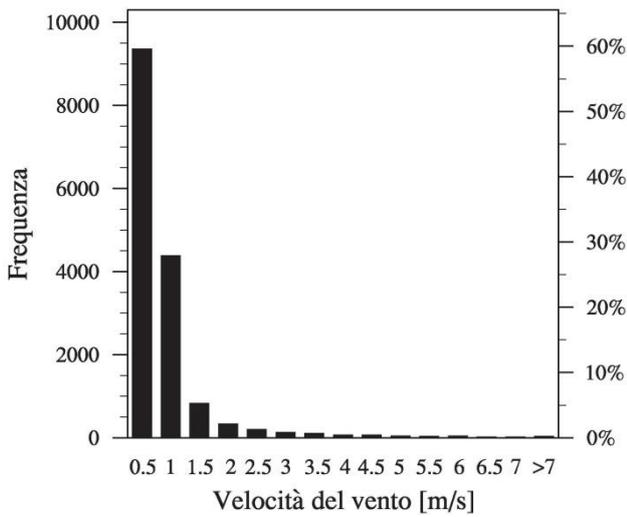
- Coordinate: 46.014 N, 10.867 E
- Quota: 492 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m



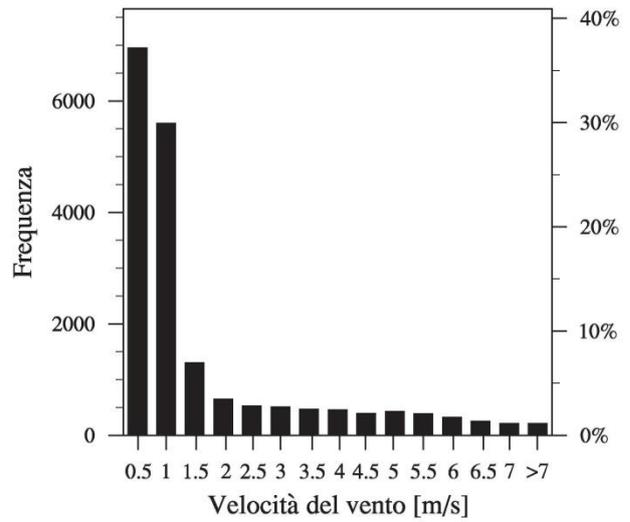
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Lomaso.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.55	0.80	1.17	1.35	1.60	1.64	1.43	1.31	0.96	0.71	0.55	0.42	1.07
<b>Calme [%]</b>	59.8	51.3	40.1	39.0	32.6	31.2	32.3	31.9	43.4	53.8	63.9	67.9	44.6

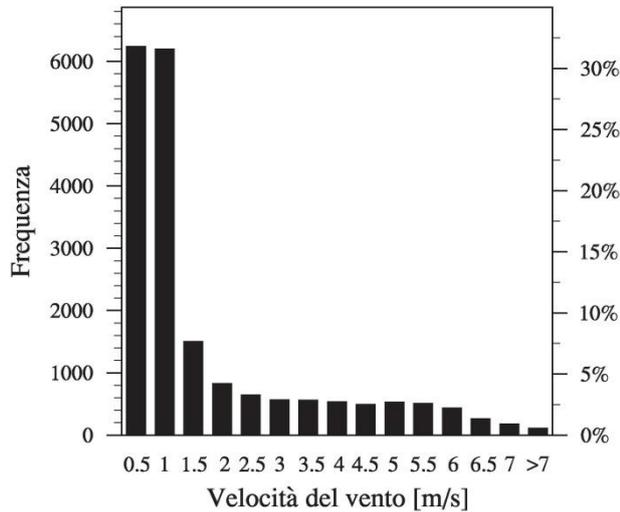
### INVERNO



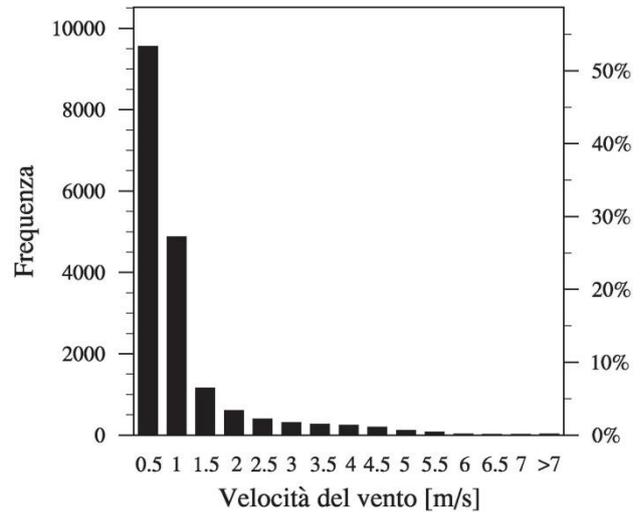
### PRIMAVERA



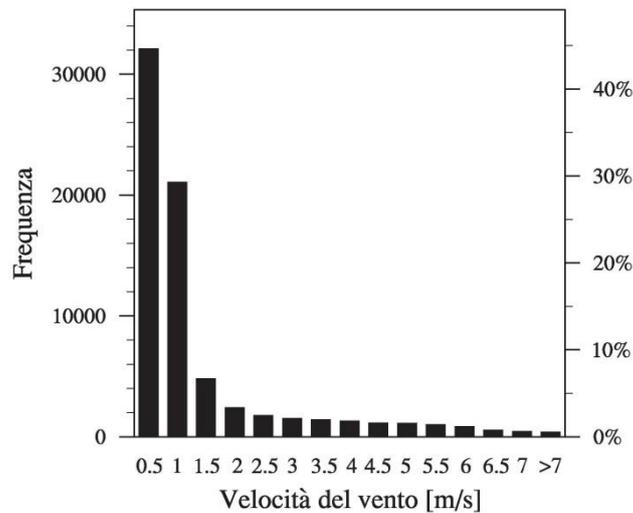
### ESTATE



### AUTUNNO

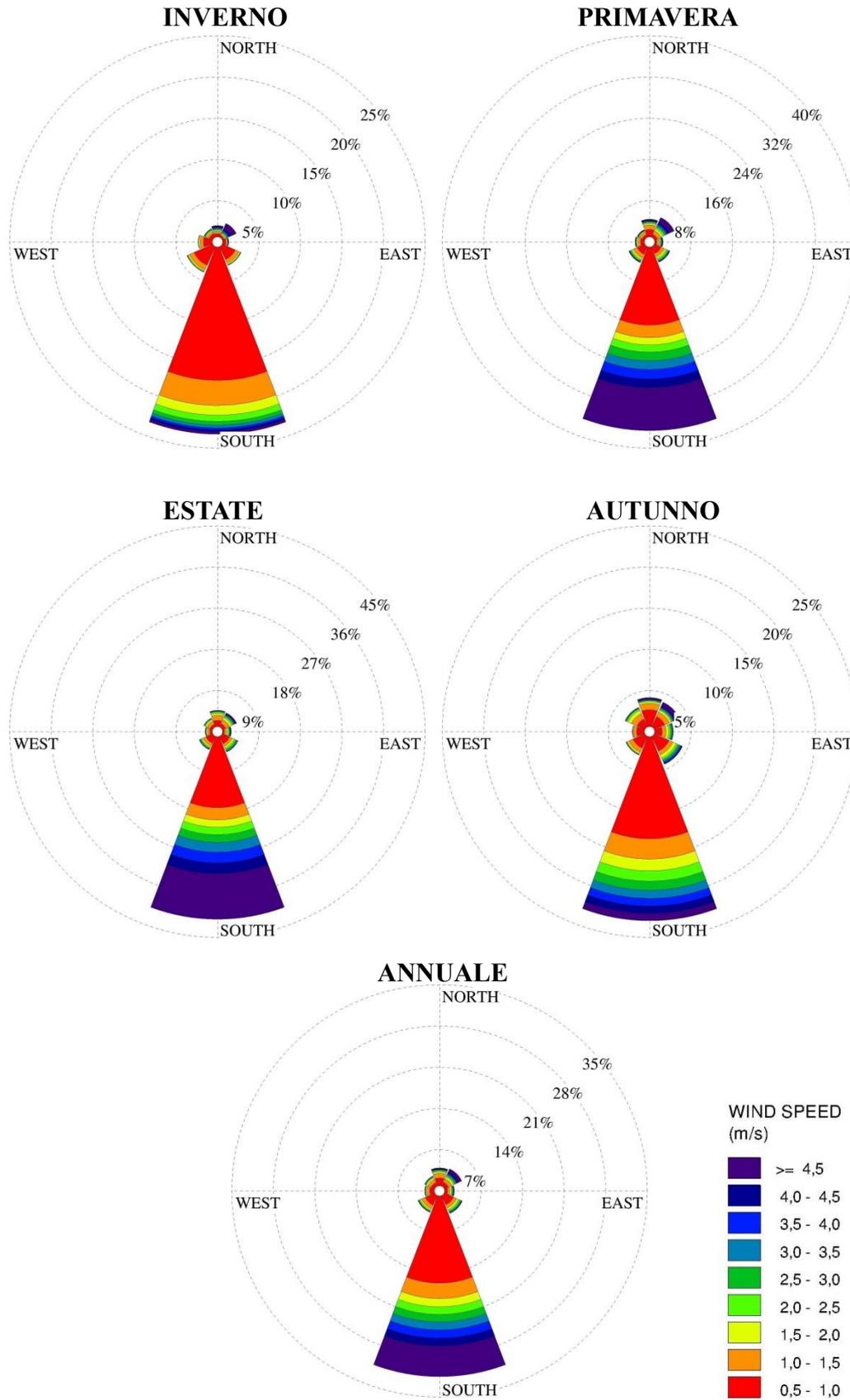


### ANNUALE



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Lomaso.

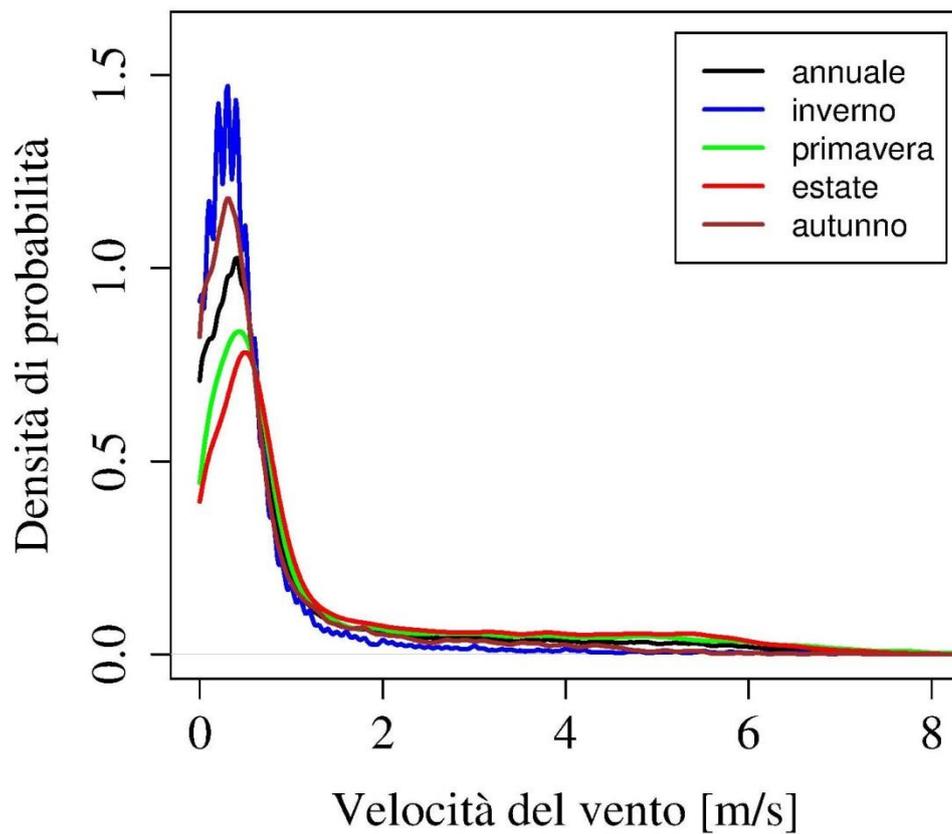
# ATLANTE EOLICO DEL TRENINO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Lomaso.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Lomaso.

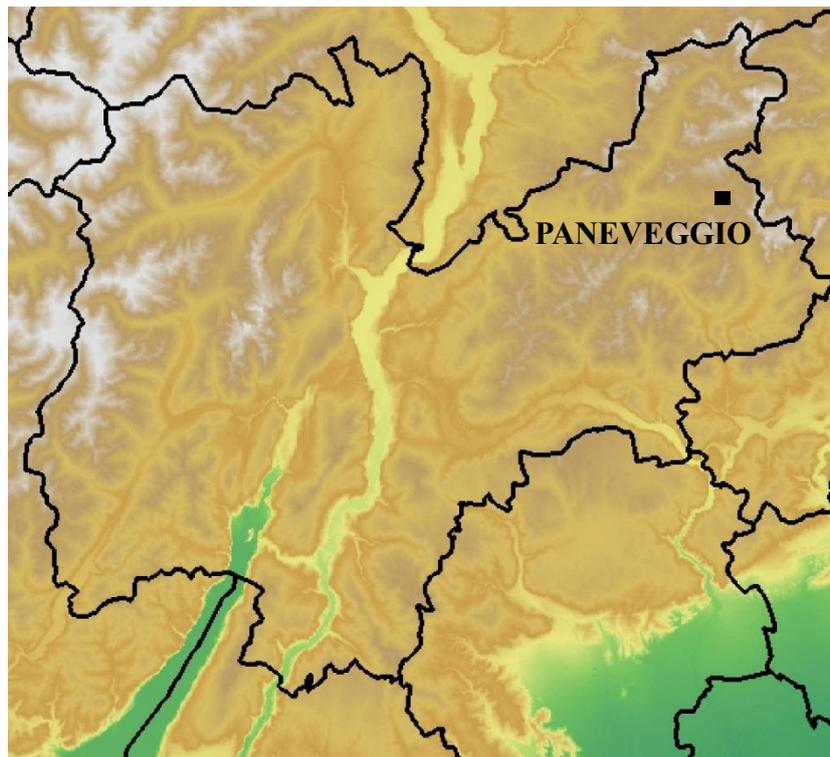
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.52	1.14	1.24	0.63	0.87
<b>Parametro di forma k</b>	0.80	0.72	0.74	0.74	0.71



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Lomaso.

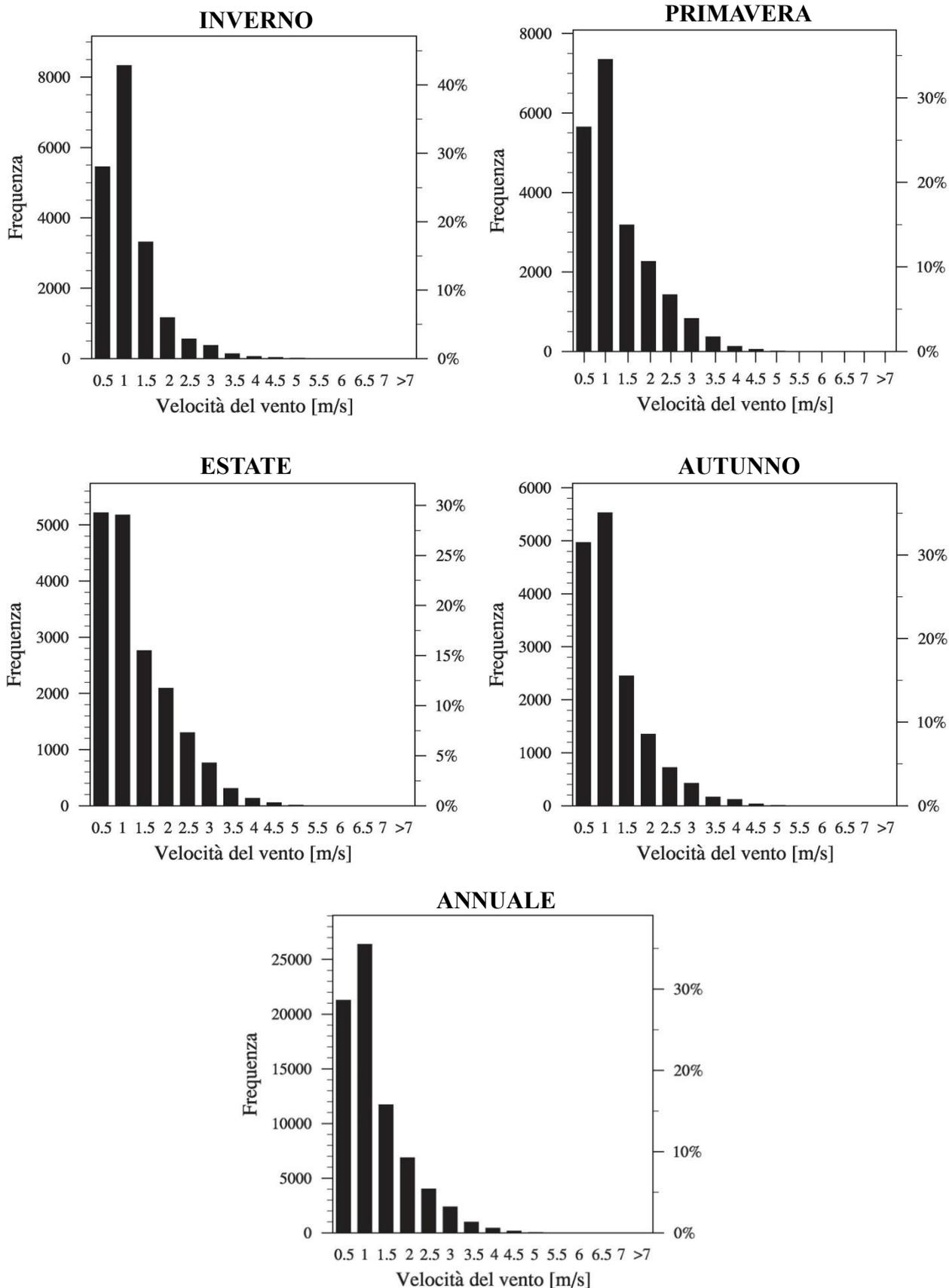
## Paneveggio

- Coordinate: 46.310 N, 11.748 E
- Quota: 1543 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 5 m

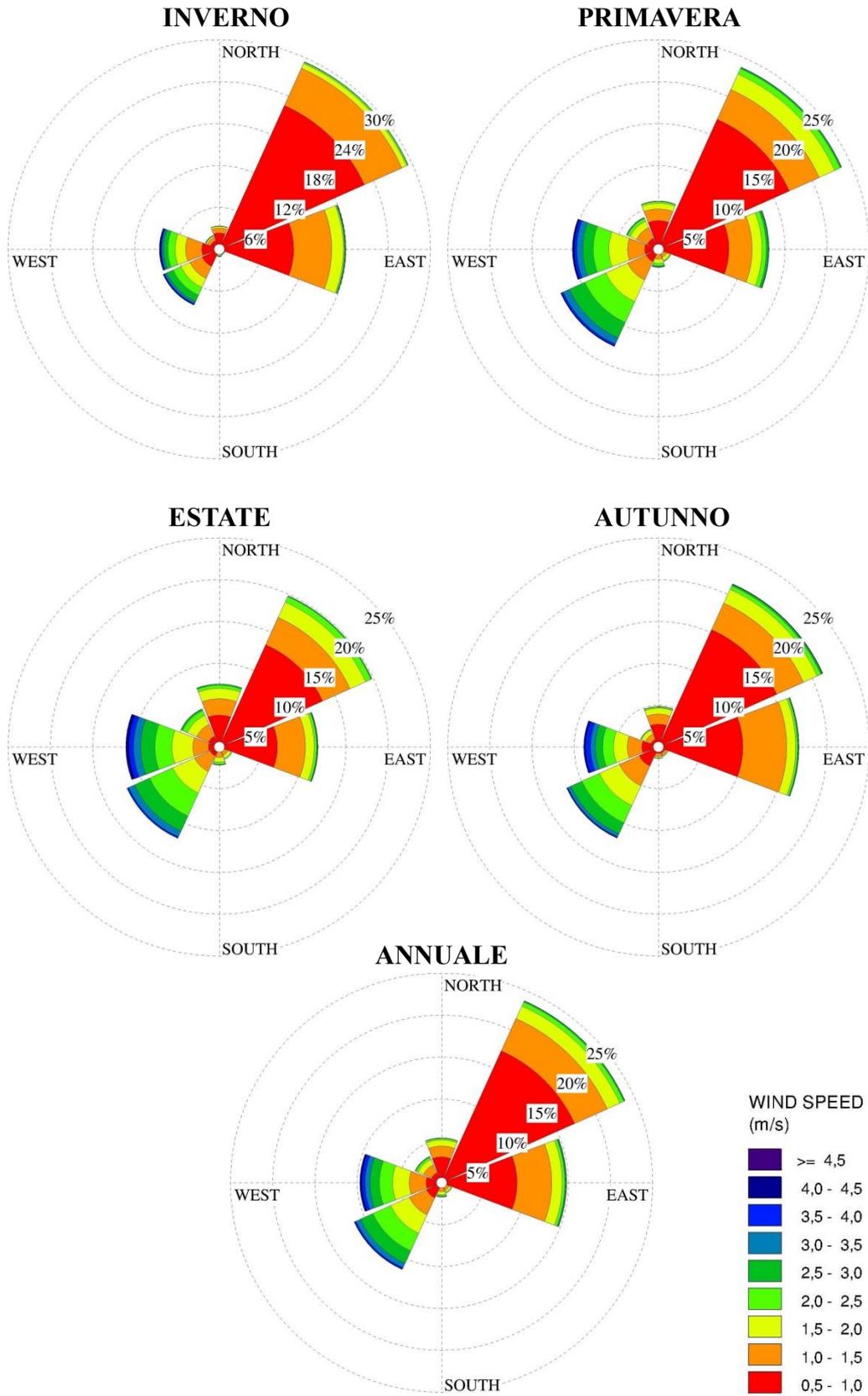


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Paneveggio.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.77	0.95	1.01	0.96	1.03	1.01	1.08	0.99	0.99	0.90	0.80	0.76	0.94
<b>Calme [%]</b>	29.6	25.3	28.2	26.7	24.8	30.3	27.2	30.3	29.9	32.2	32.2	29.2	28.6



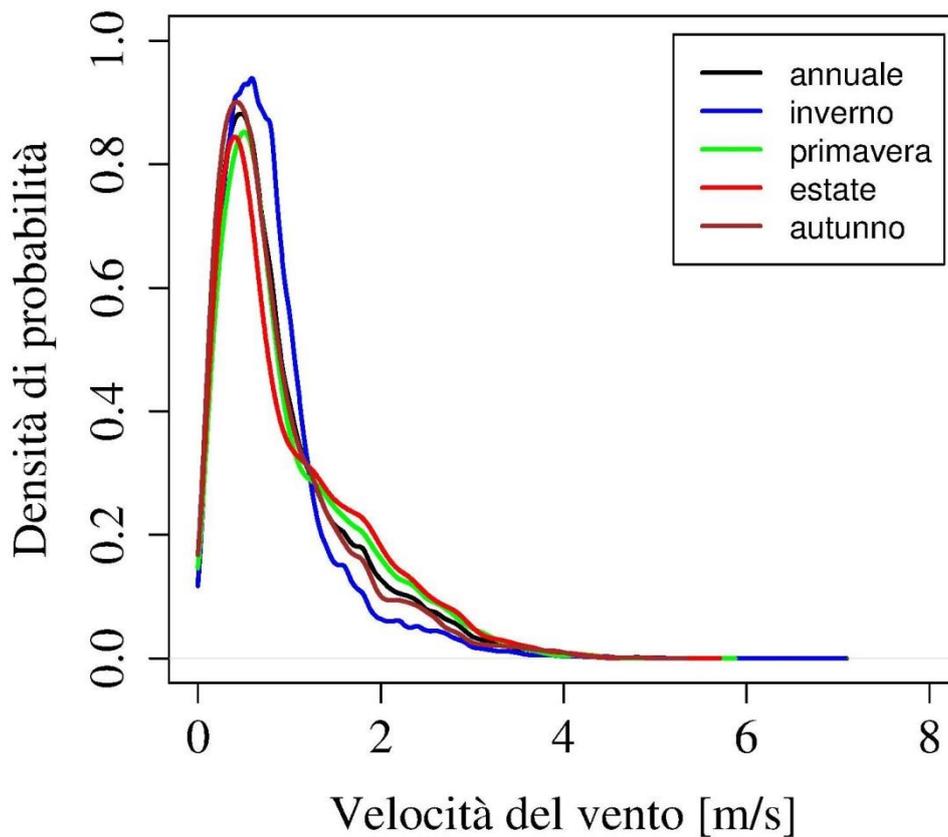
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Paneveggio.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Paneveggio.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Paneveggio.

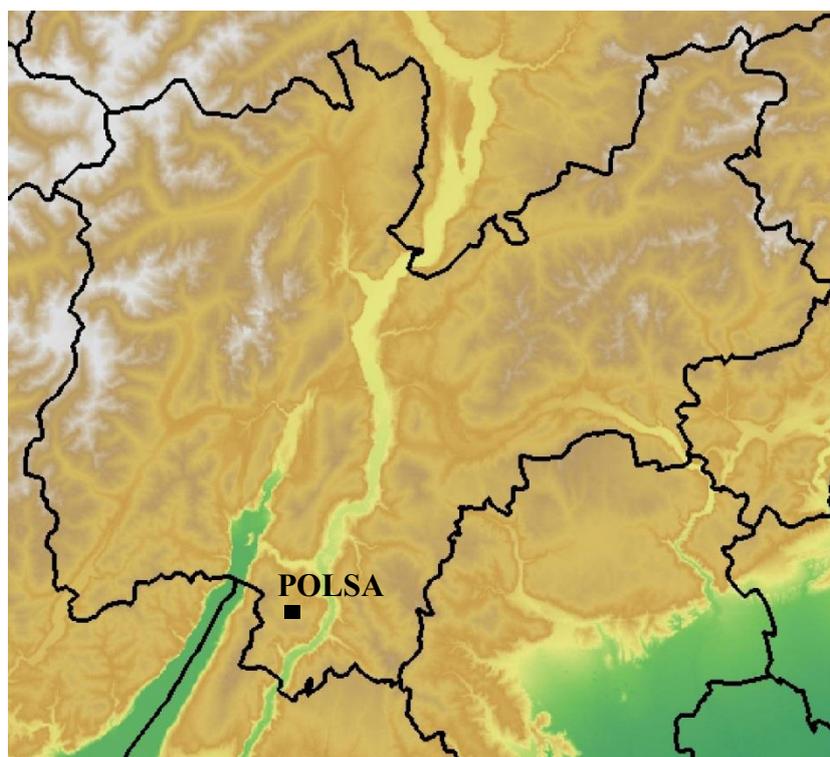
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.91	1.09	1.11	0.96	1.02
<b>Parametro di forma k</b>	1.40	1.32	1.28	1.27	1.31



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Paneveggio.

## Polsa

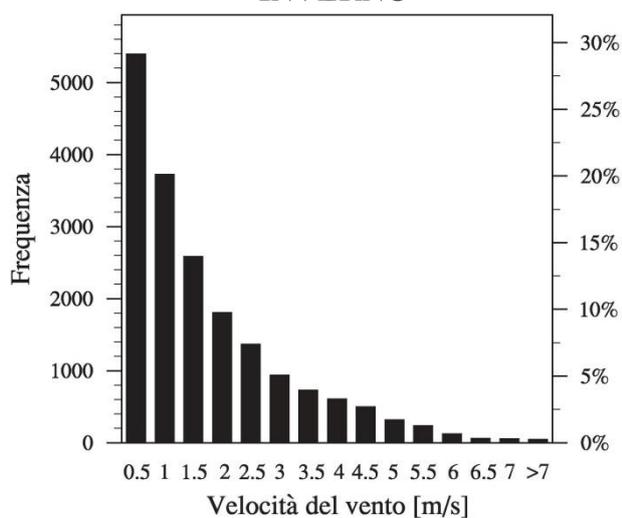
- Coordinate: 45.782 N, 10.947 E
- Quota: 1310 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 5 m



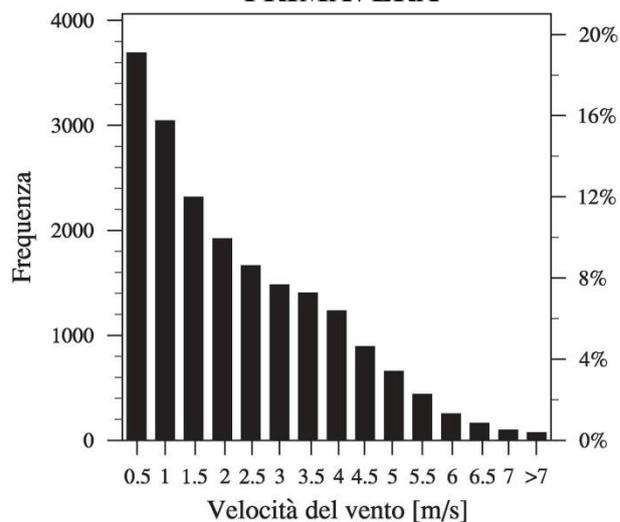
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Polsa.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.30	1.56	1.95	1.94	2.05	2.12	1.95	2.00	1.59	1.37	1.37	1.48	1.73
<b>Calme [%]</b>	31.7	27.8	21.5	19.6	16.5	17.0	18.1	18.0	25.8	33.7	32.7	27.7	24.1

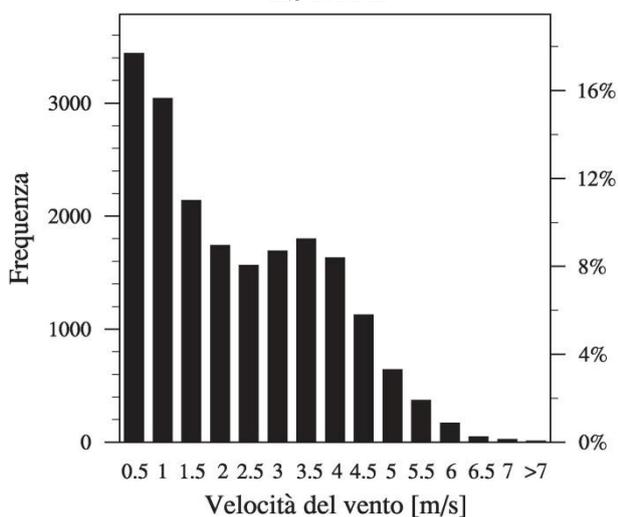
## INVERNO



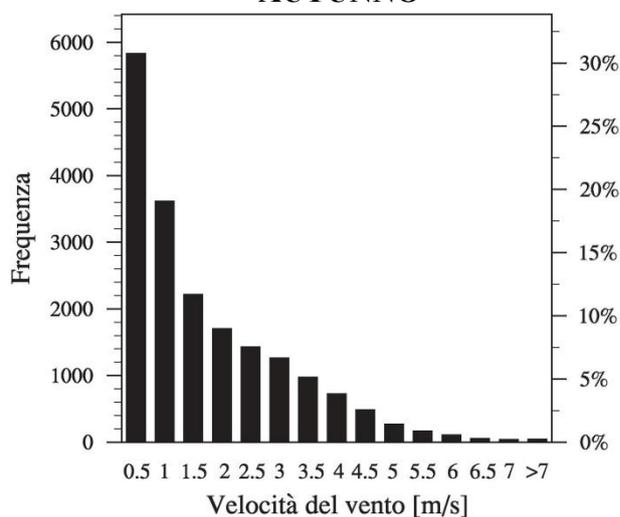
## PRIMAVERA



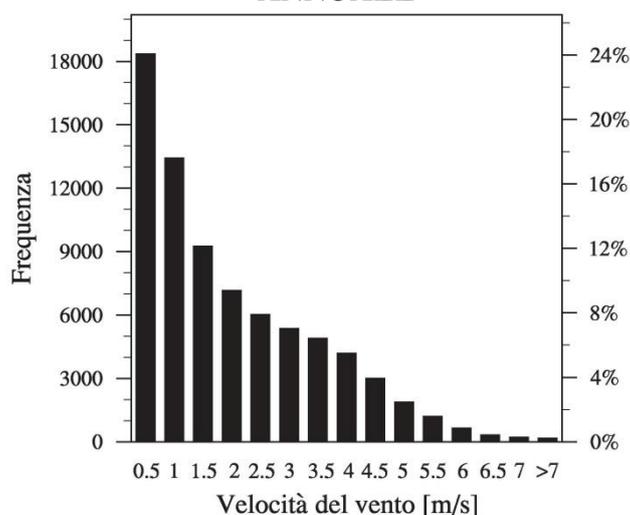
## ESTATE



## AUTUNNO

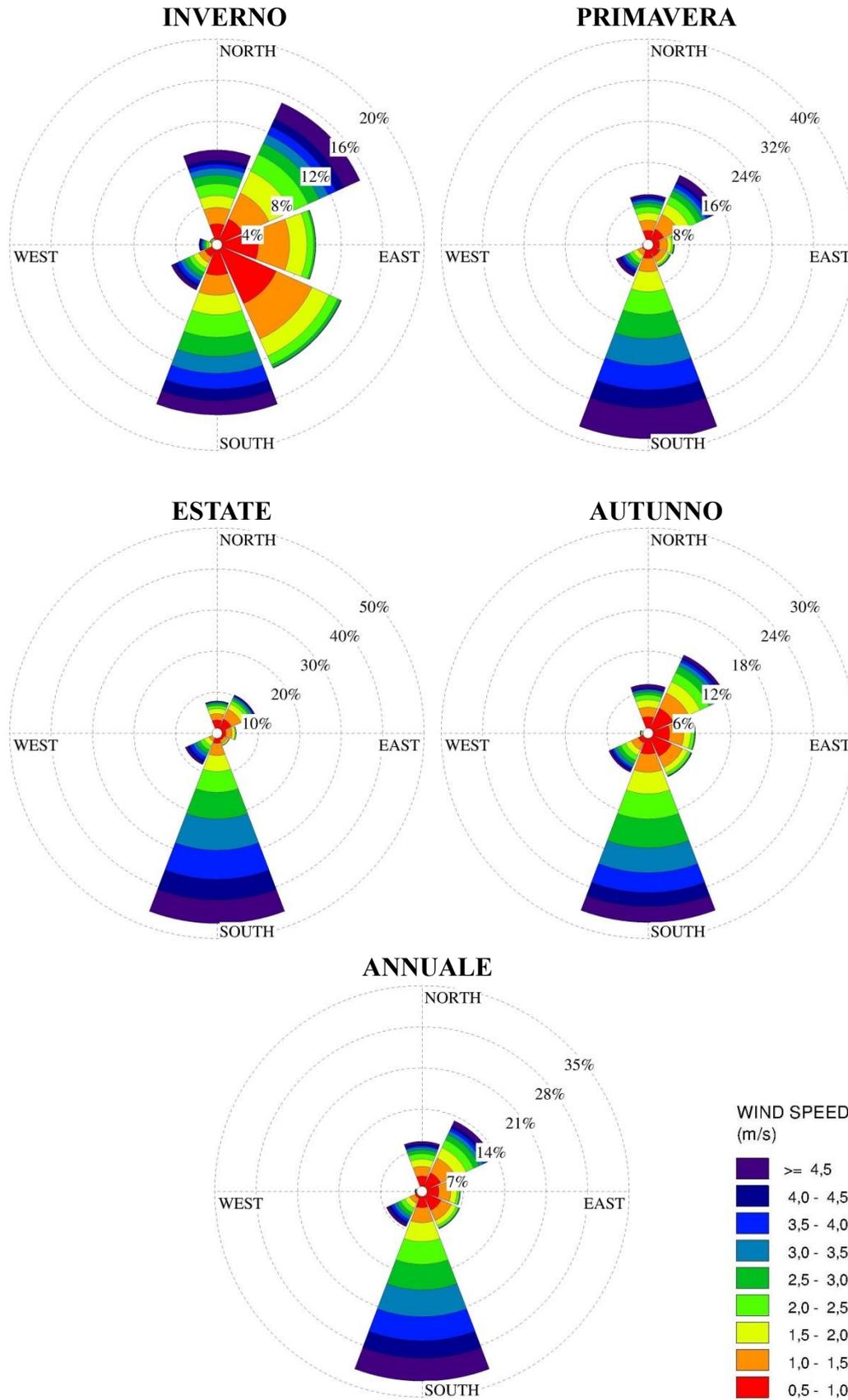


## ANNUALE



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Polsa.

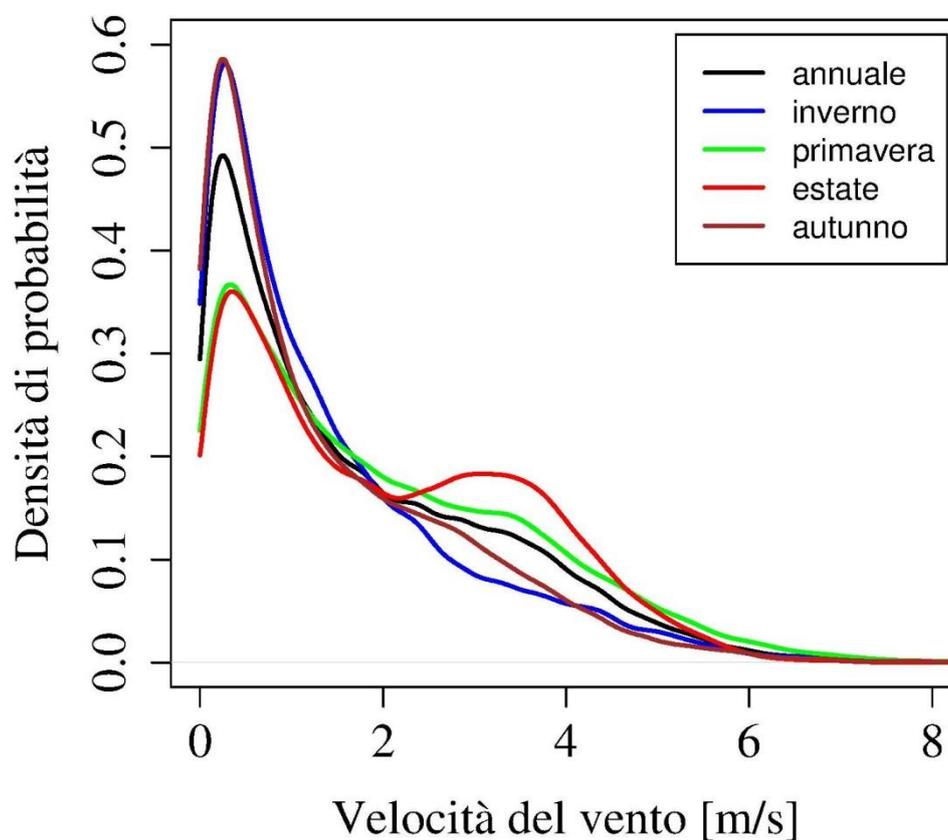
# ATLANTE EOLICO DEL TRENINO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Polsa.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Polsa.

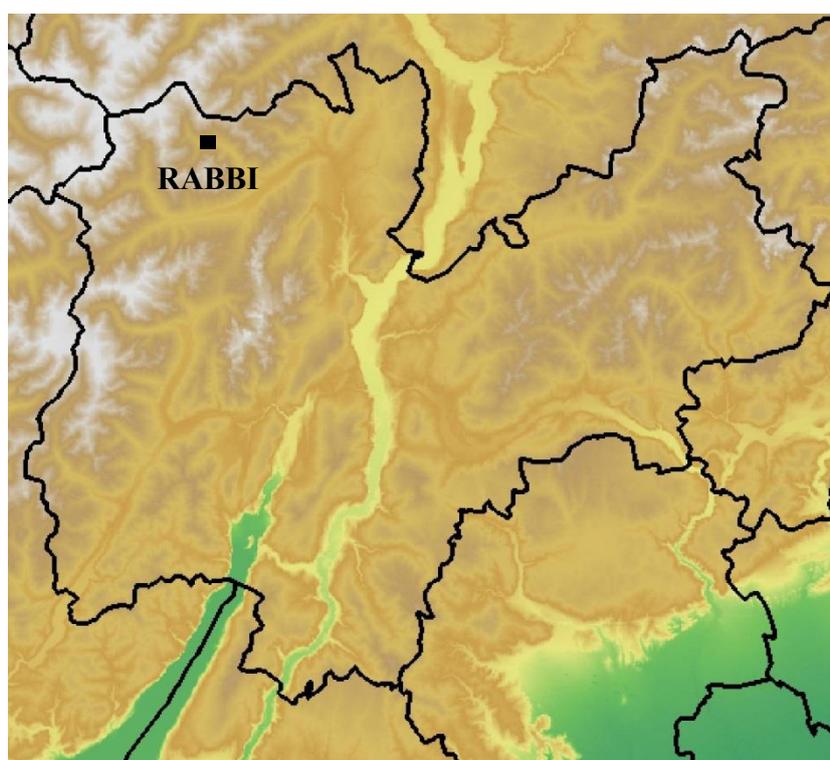
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.38	2.02	2.11	1.36	1.71
<b>Parametro di forma k</b>	0.91	1.05	1.15	0.88	0.97



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Polsa.

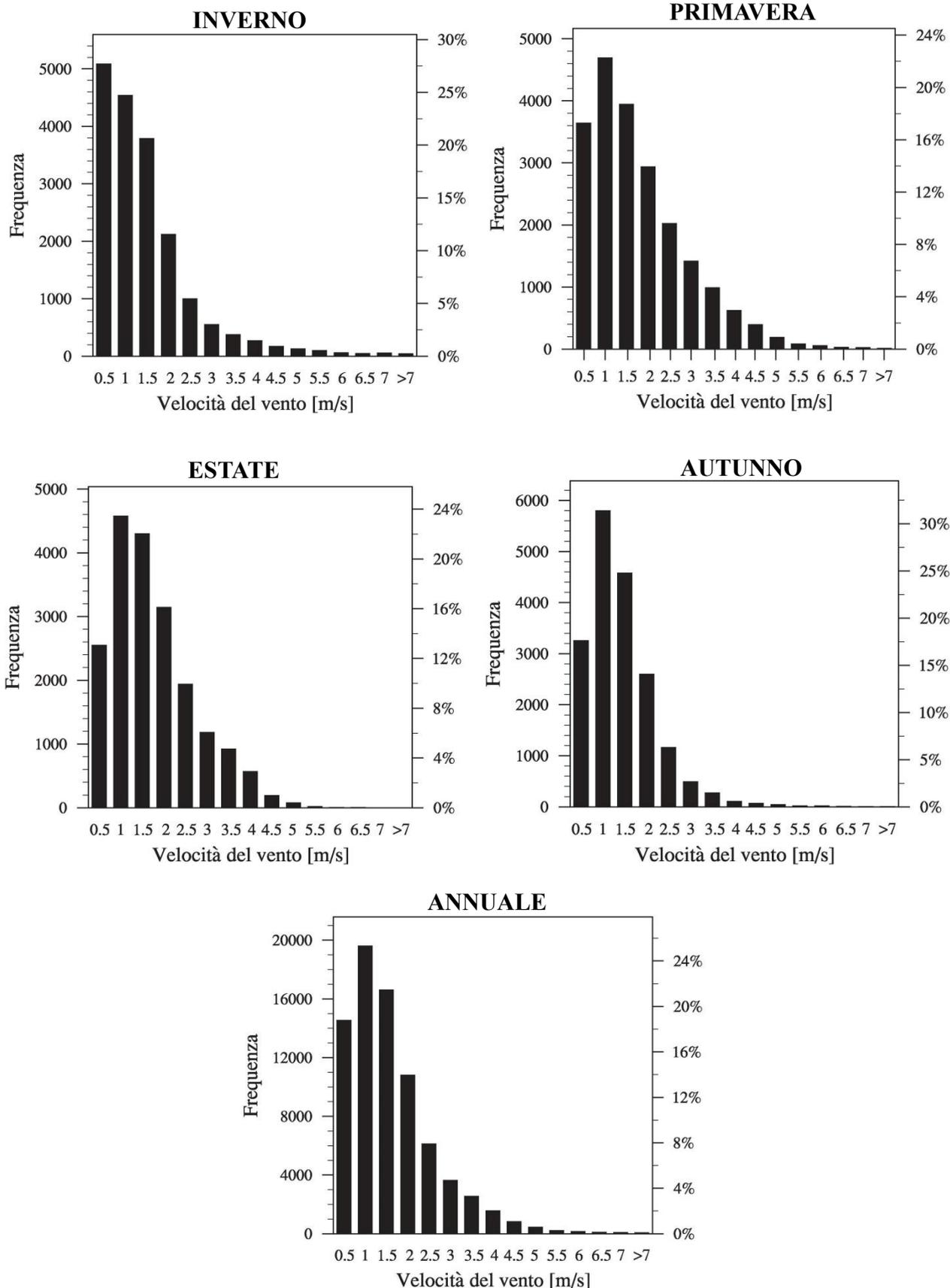
## Rabbi

- Coordinate: 46.412 N, 10.809 E
- Quota: 1444 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 3 m



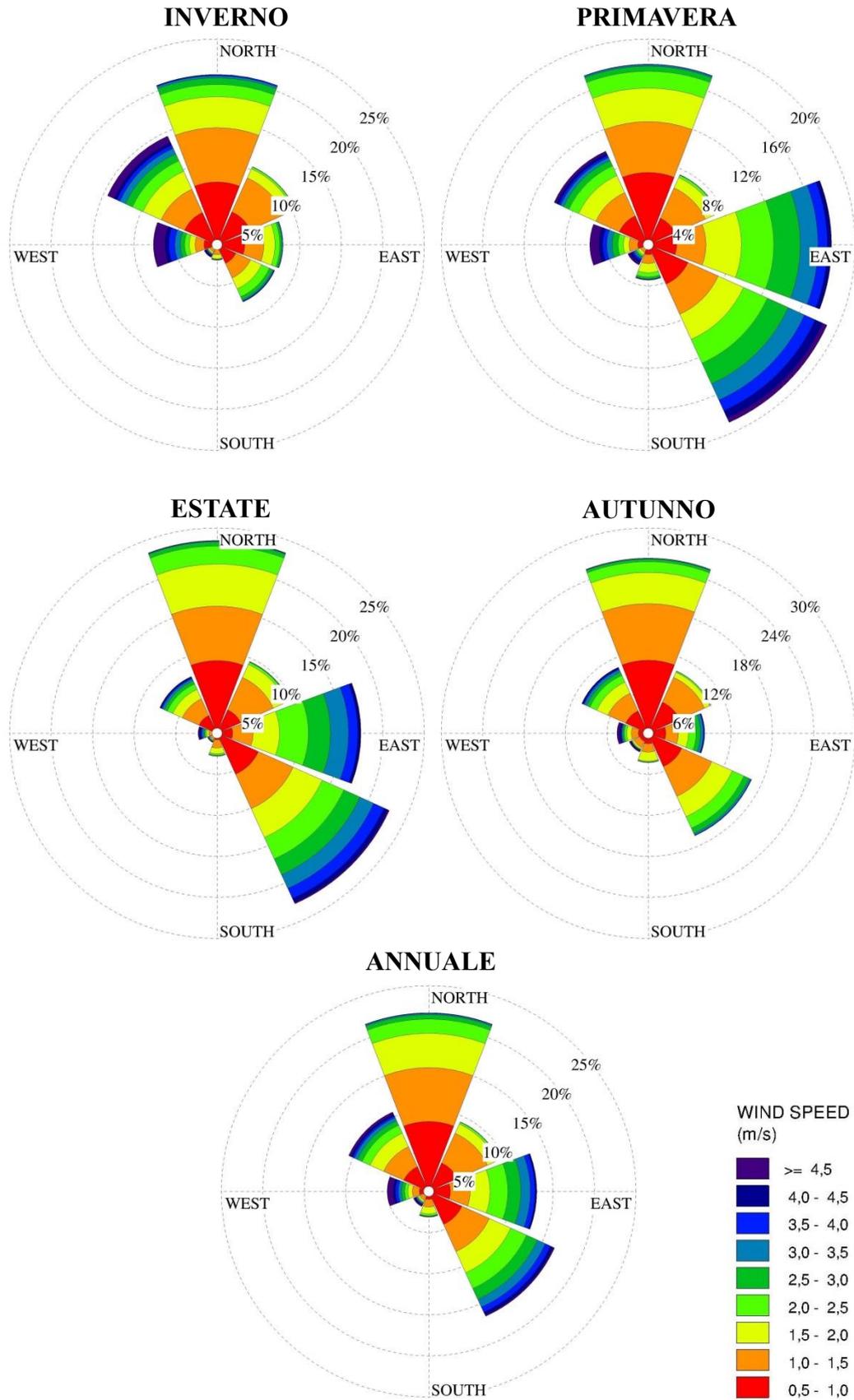
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Rabbi.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.13	1.24	1.38	1.48	1.59	1.46	1.47	1.39	1.22	1.08	1.09	1.15	1.31
<b>Calme [%]</b>	30.4	25.9	21.9	17.3	13.0	13.7	12.0	13.8	14.6	19.8	18.0	26.6	18.8



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Rabbi.

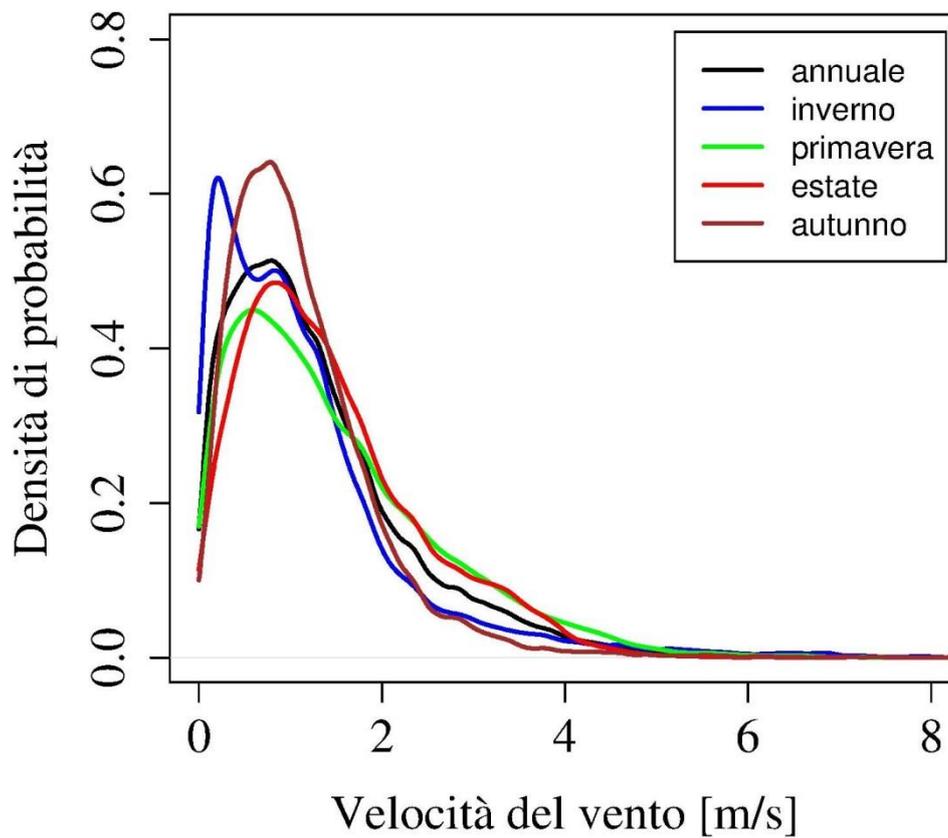
# ATLANTE EOLICO DEL TRENINO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Rabbi.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Rabbi.

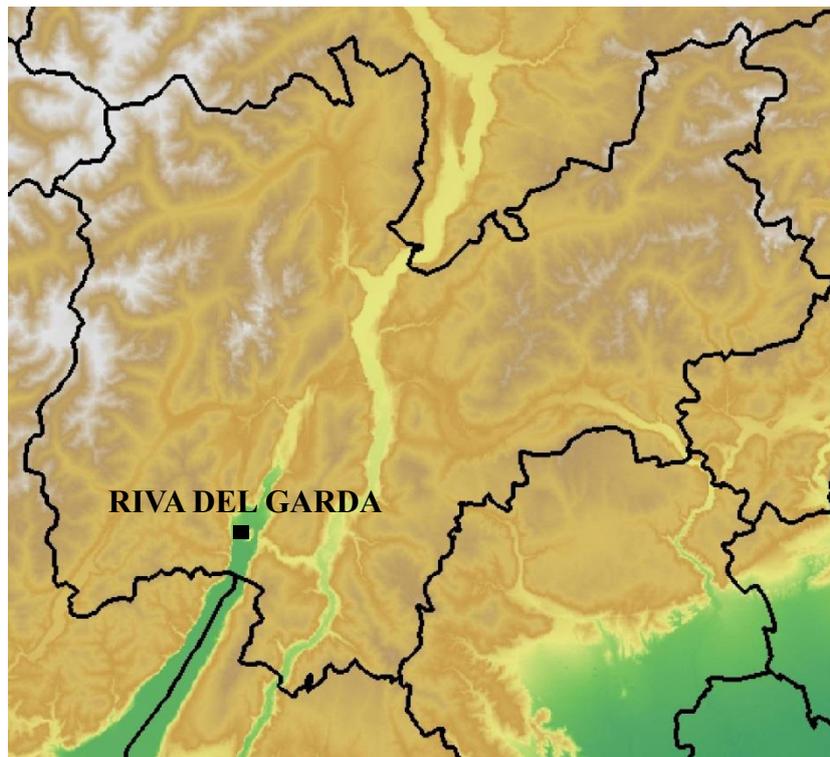
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.19	1.59	1.59	1.24	1.41
<b>Parametro di forma k</b>	1.04	1.26	1.47	1.45	1.26



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Rabbi.

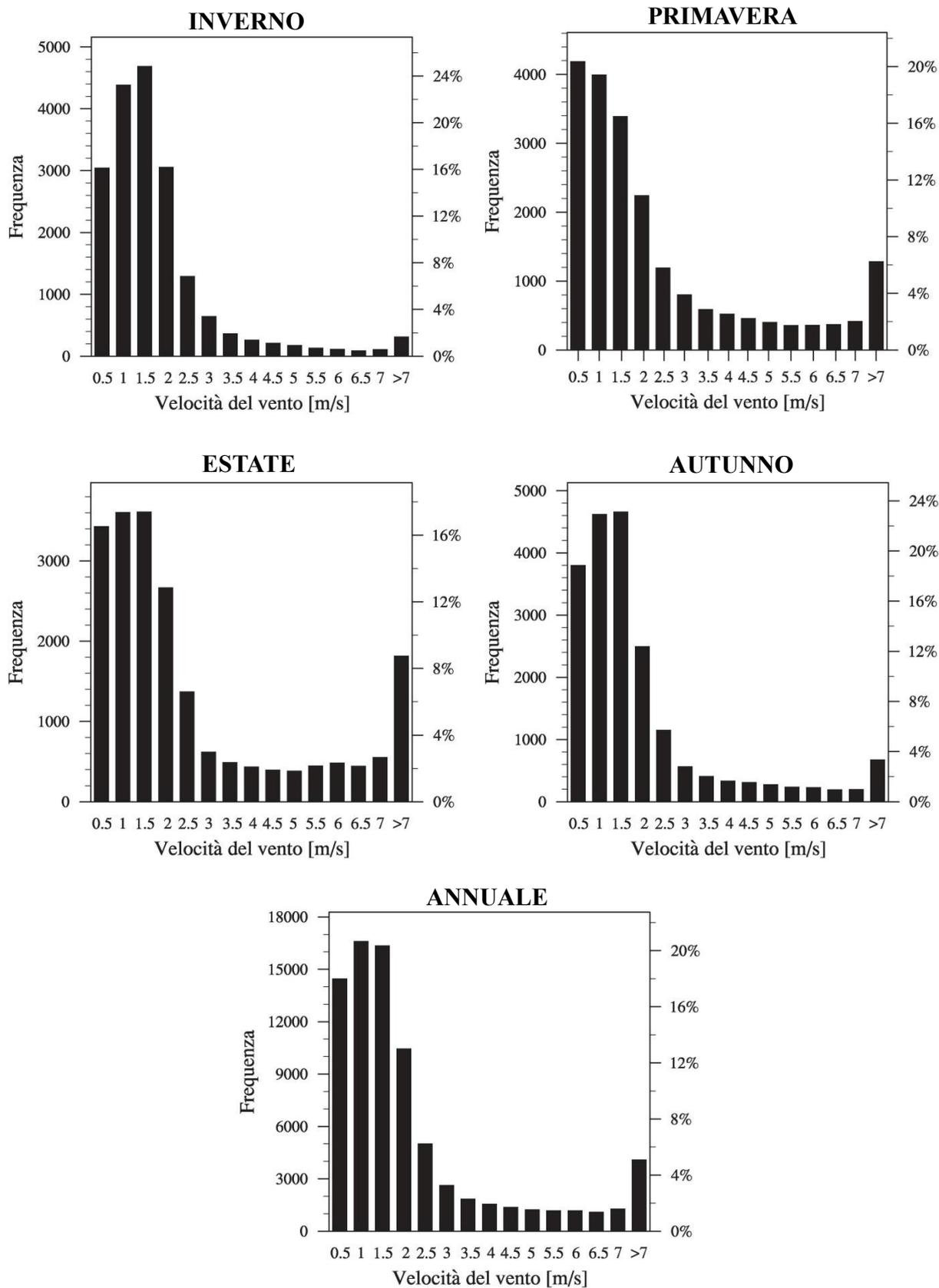
## Riva del Garda

- Coordinate: 45.878 N, 10.856 E
- Quota: 66 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 5 m

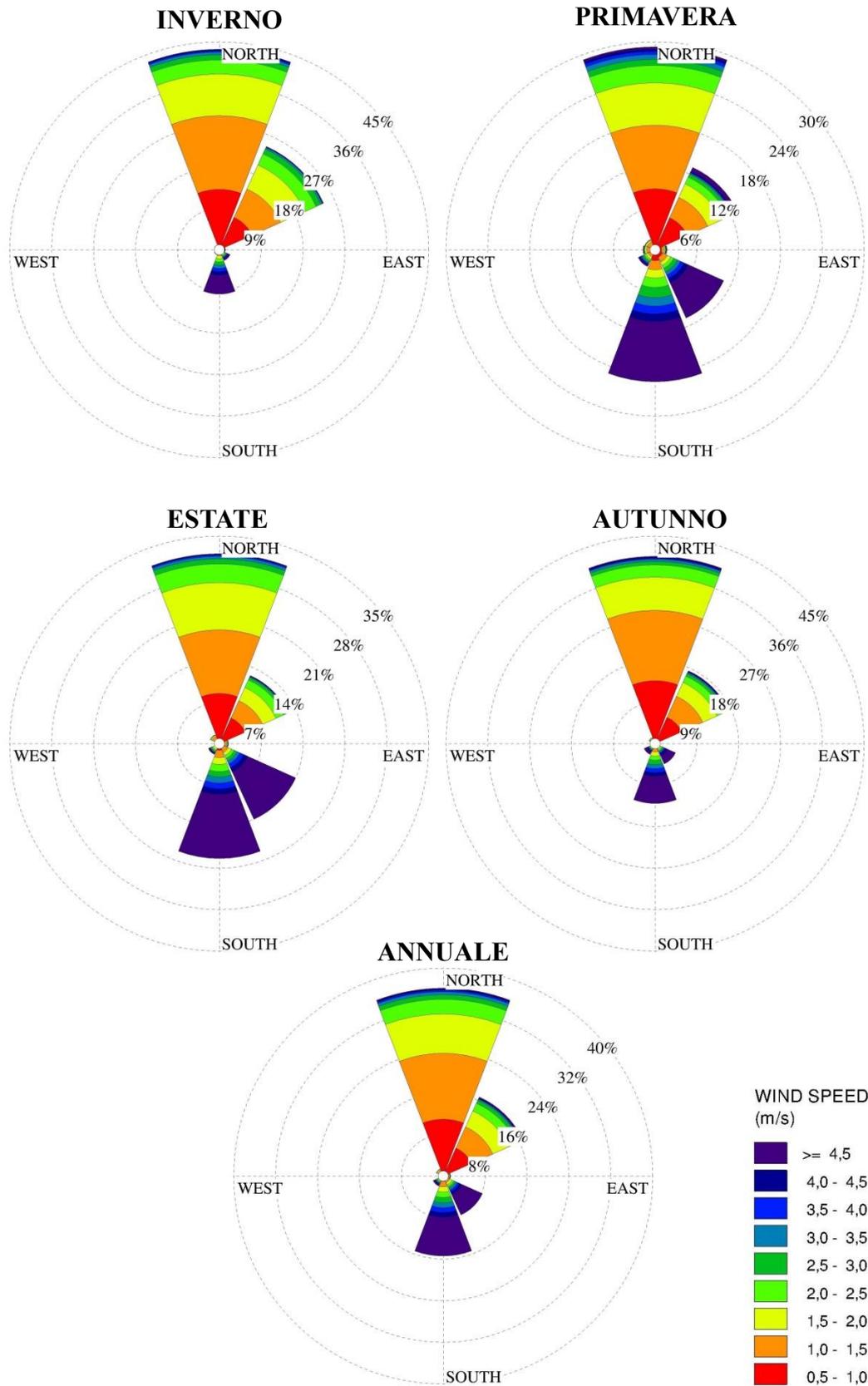


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Riva del Garda.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.41	1.79	2.02	2.08	2.32	2.45	2.49	2.33	1.89	1.73	1.40	1.29	1.94
<b>Calme [%]</b>	16.7	17.4	20.2	20.5	20.4	18.0	14.6	17.1	19.8	21.3	15.3	14.3	18.0



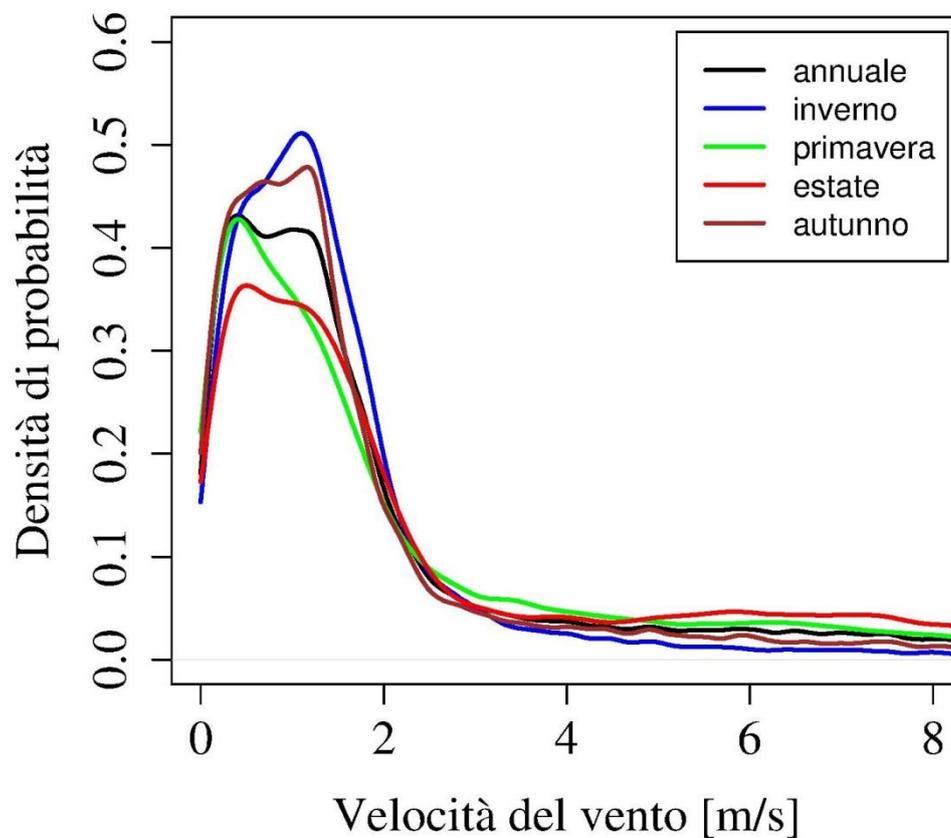
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Riva del Garda.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Riva del Garda.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Riva del Garda.

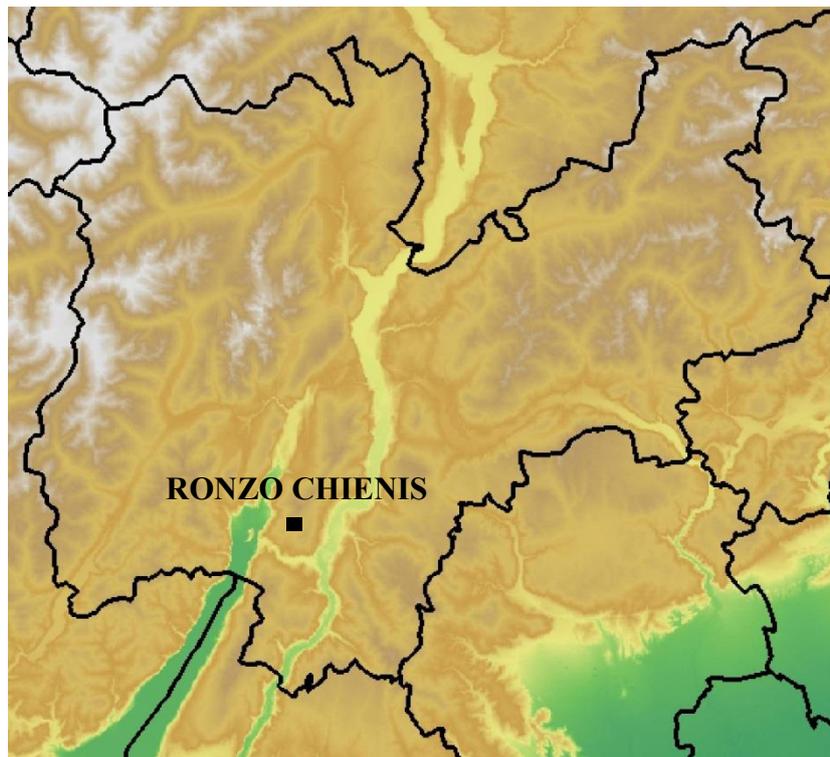
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.56	2.02	2.37	1.65	1.90
<b>Parametro di forma k</b>	1.13	0.89	0.95	0.97	0.95



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Riva del Garda.

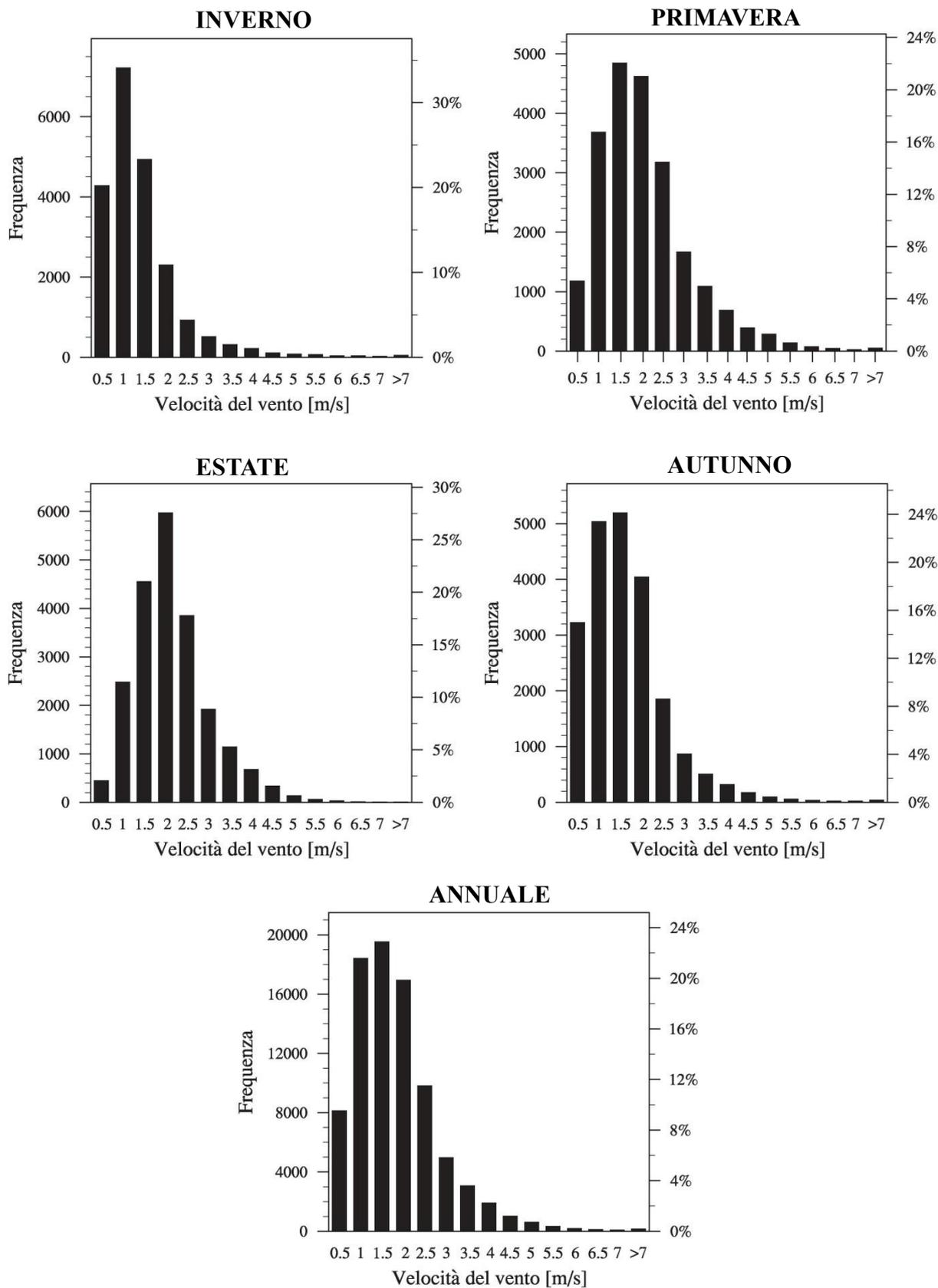
## Ronzo Chienis

- Coordinate: 45.886 N, 10.944 E
- Quota: 957 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

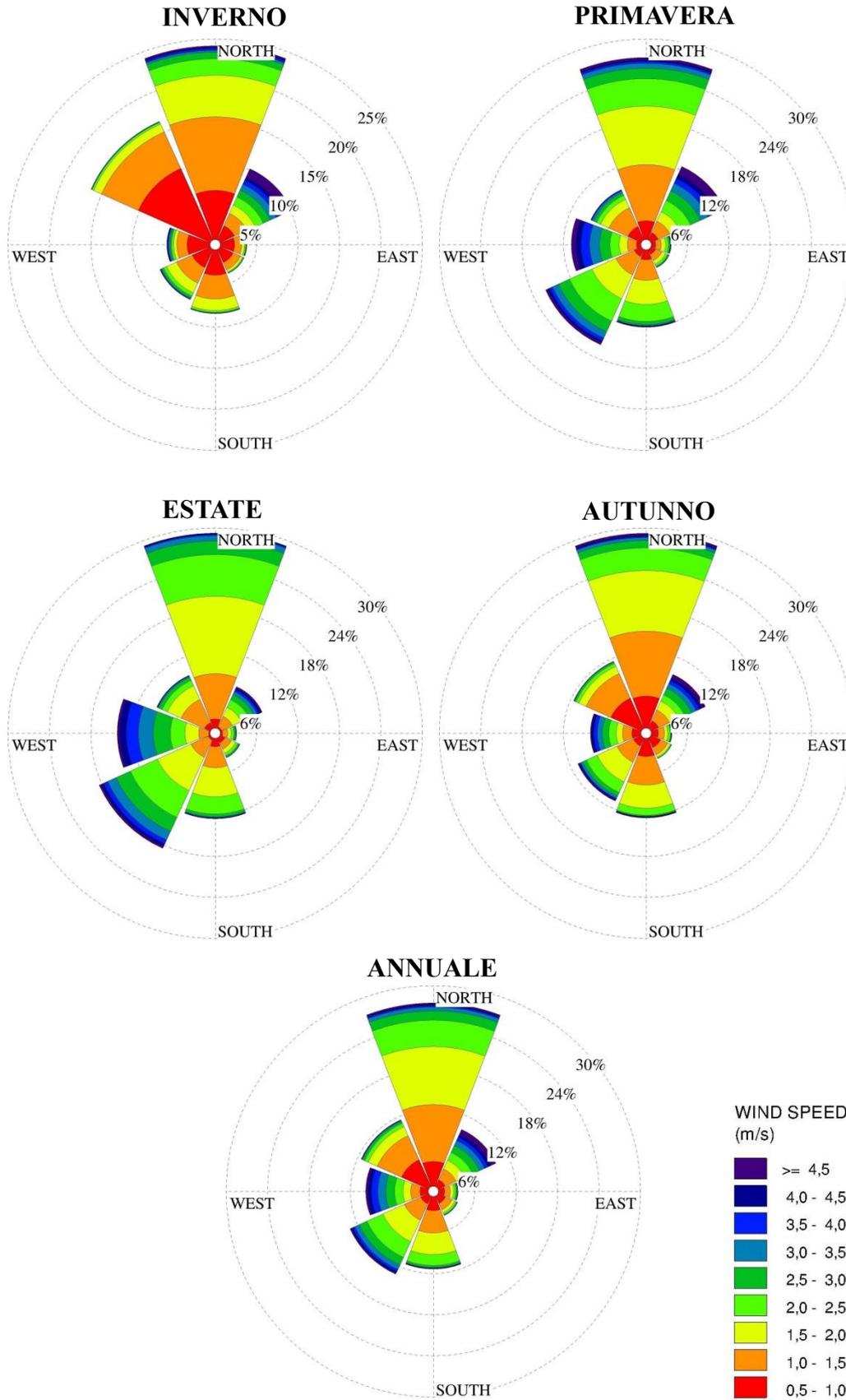


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Ronzo Chienis.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.03	1.27	1.64	1.80	1.89	1.91	1.88	1.76	1.66	1.33	1.20	1.02	1.54
<b>Calme [%]</b>	24.1	15.2	8.2	5.1	2.8	2.4	1.0	2.8	4.2	11.1	17.8	20.9	9.5



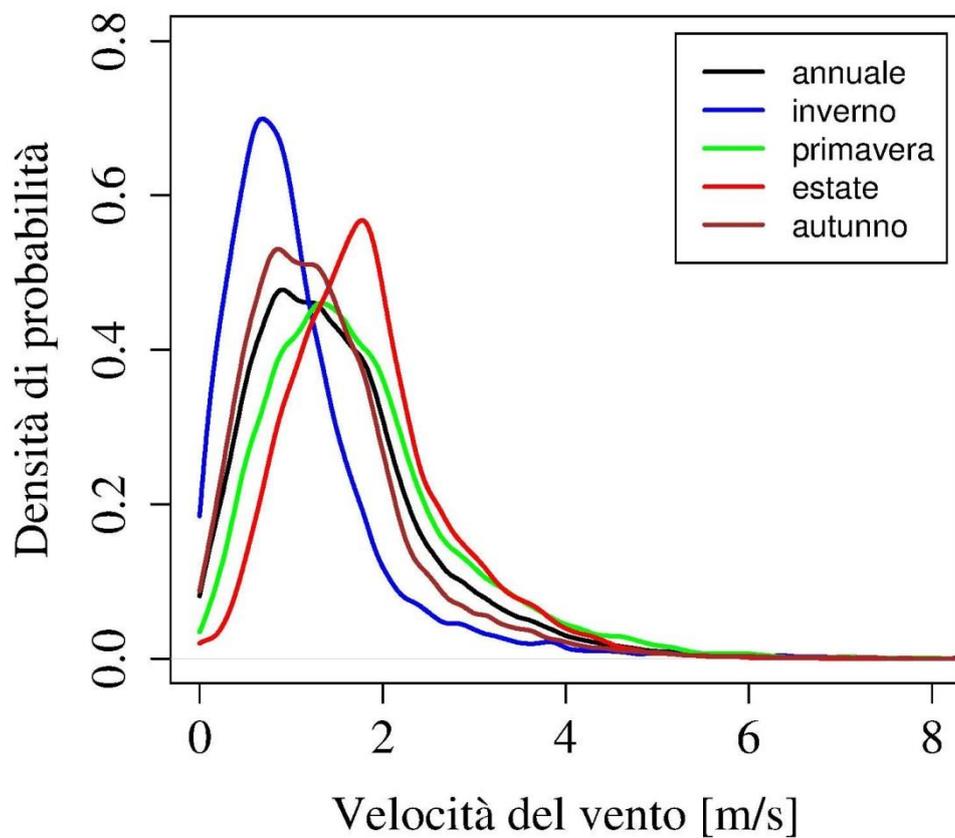
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Ronzo Chienis.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Ronzo Chienis.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Ronzo Chienis.

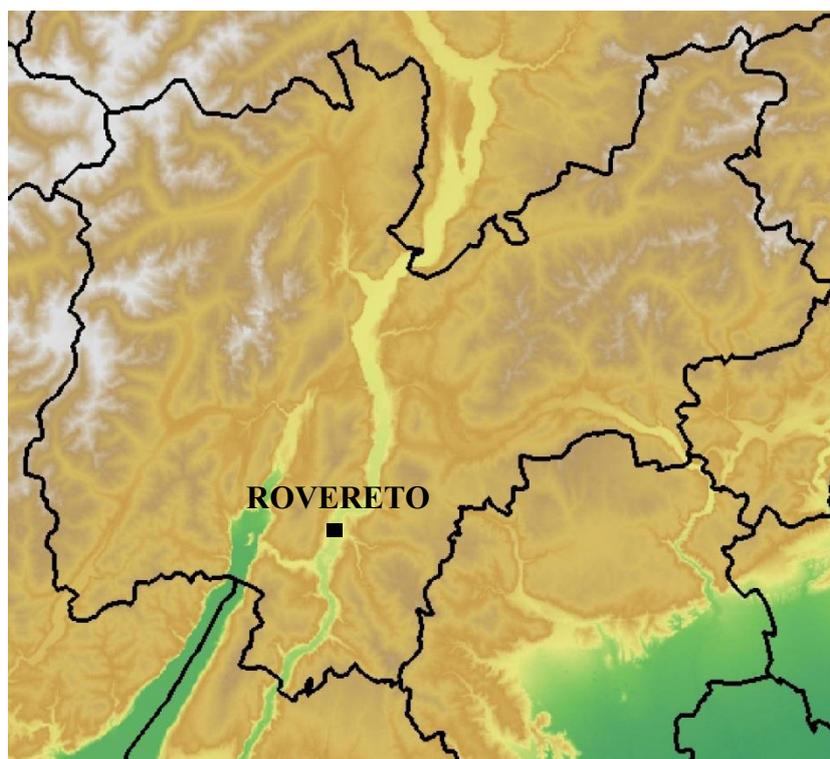
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.18	1.99	2.08	1.55	1.70
<b>Parametro di forma k</b>	1.21	1.69	2.13	1.48	1.51



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Ronzo Chienis.

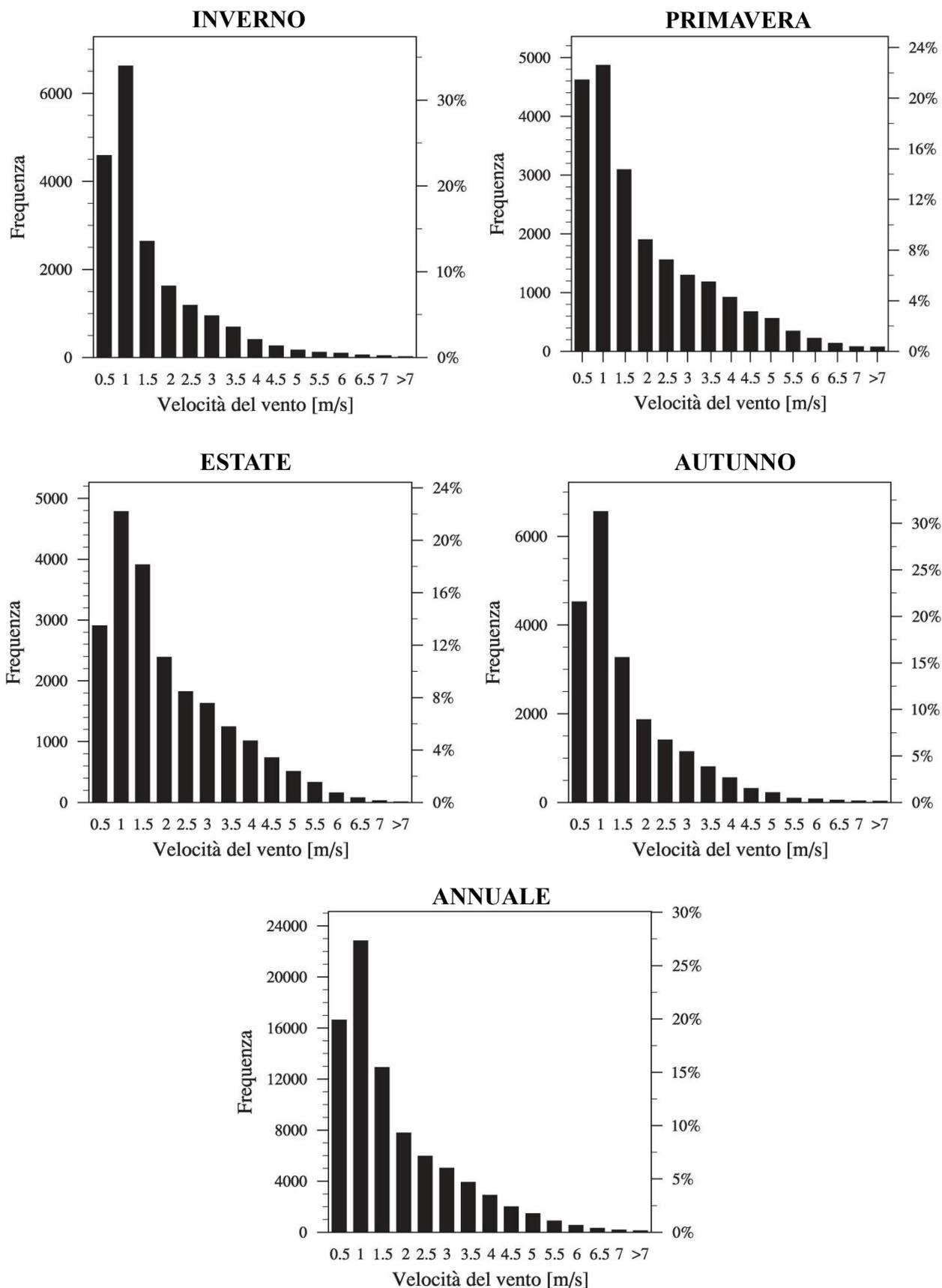
## Rovereto

- Coordinate: 45.878 N, 11.020 E
- Quota: 170 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

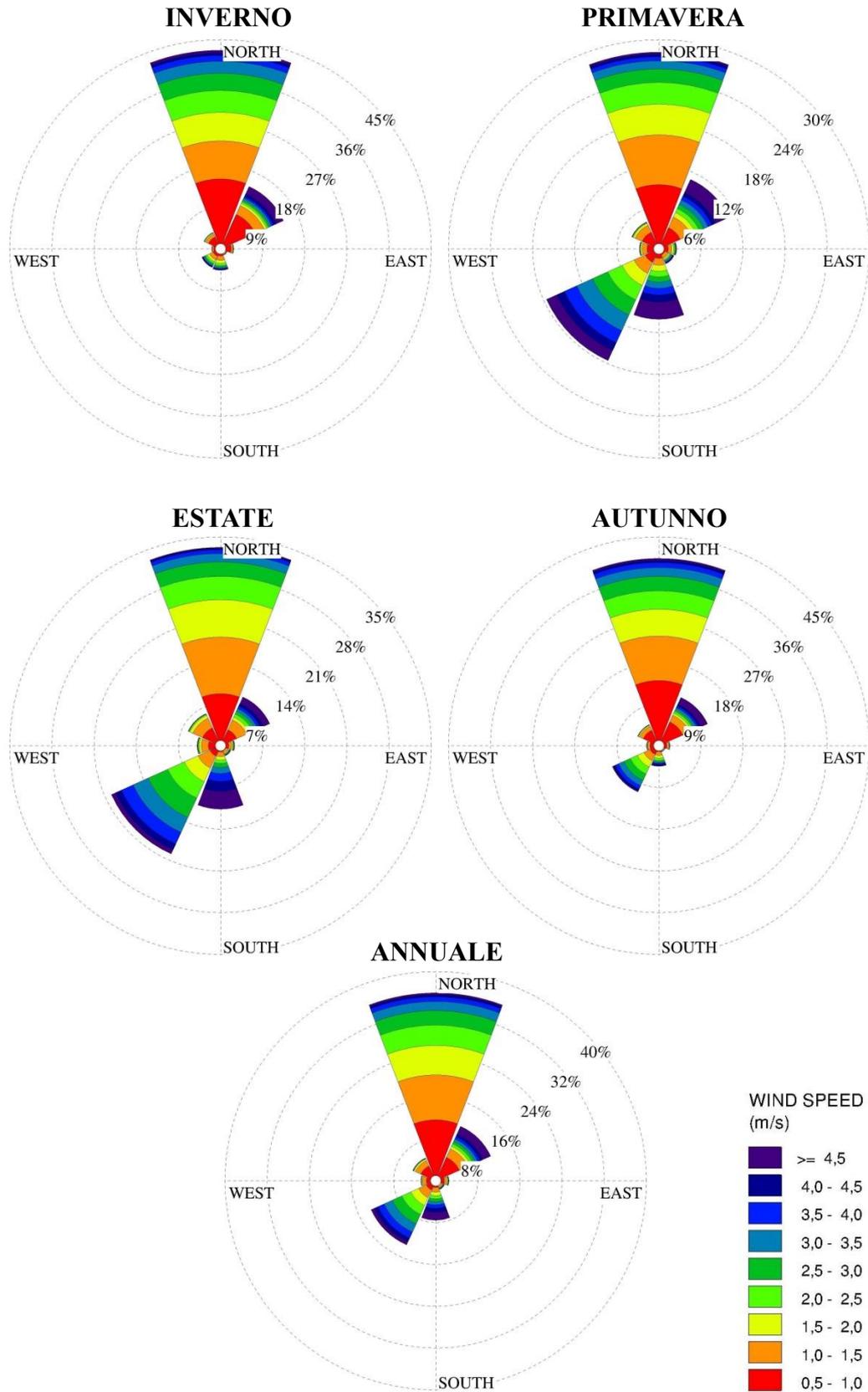


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Rovereto.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.18	1.35	1.65	1.62	1.71	1.80	1.80	1.65	1.41	1.20	1.34	1.20	1.50
<b>Calme [%]</b>	24.3	24.9	22.5	22.6	19.4	15.1	10.7	14.6	19.9	24.3	20.3	21.7	19.9



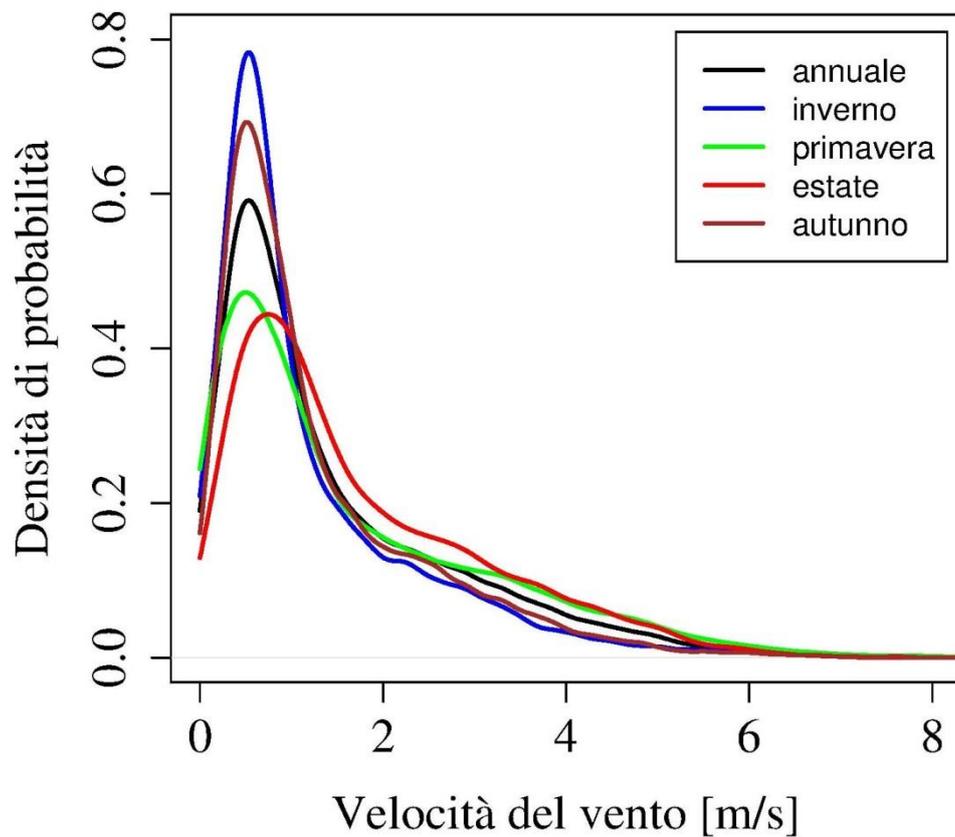
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Rovereto.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Rovereto.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Rovereto.

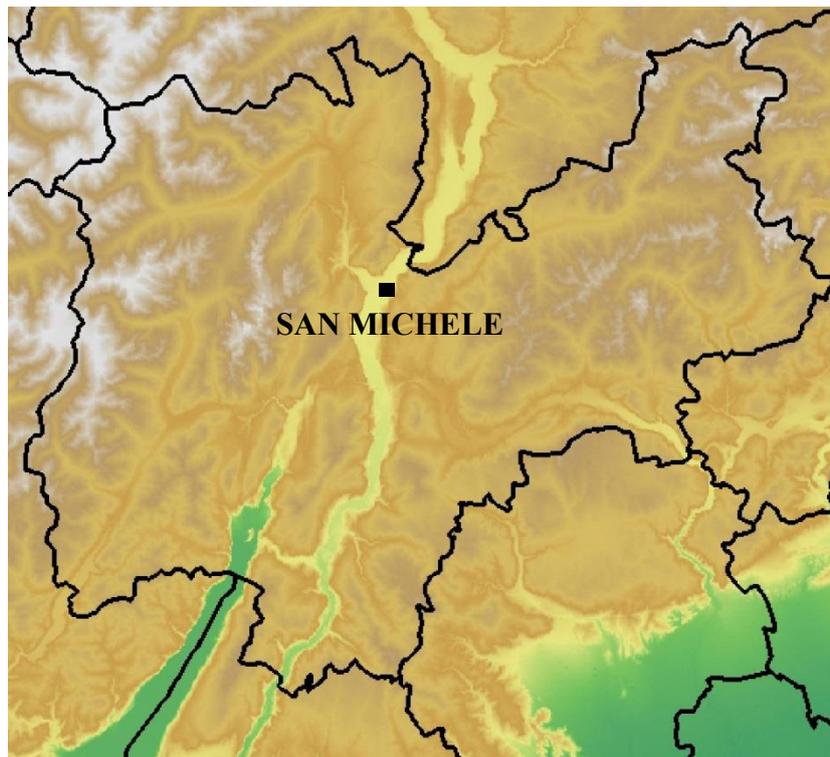
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.26	1.63	1.86	1.37	1.53
<b>Parametro di forma k</b>	1.04	0.95	1.22	1.13	1.06



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Rovereto.

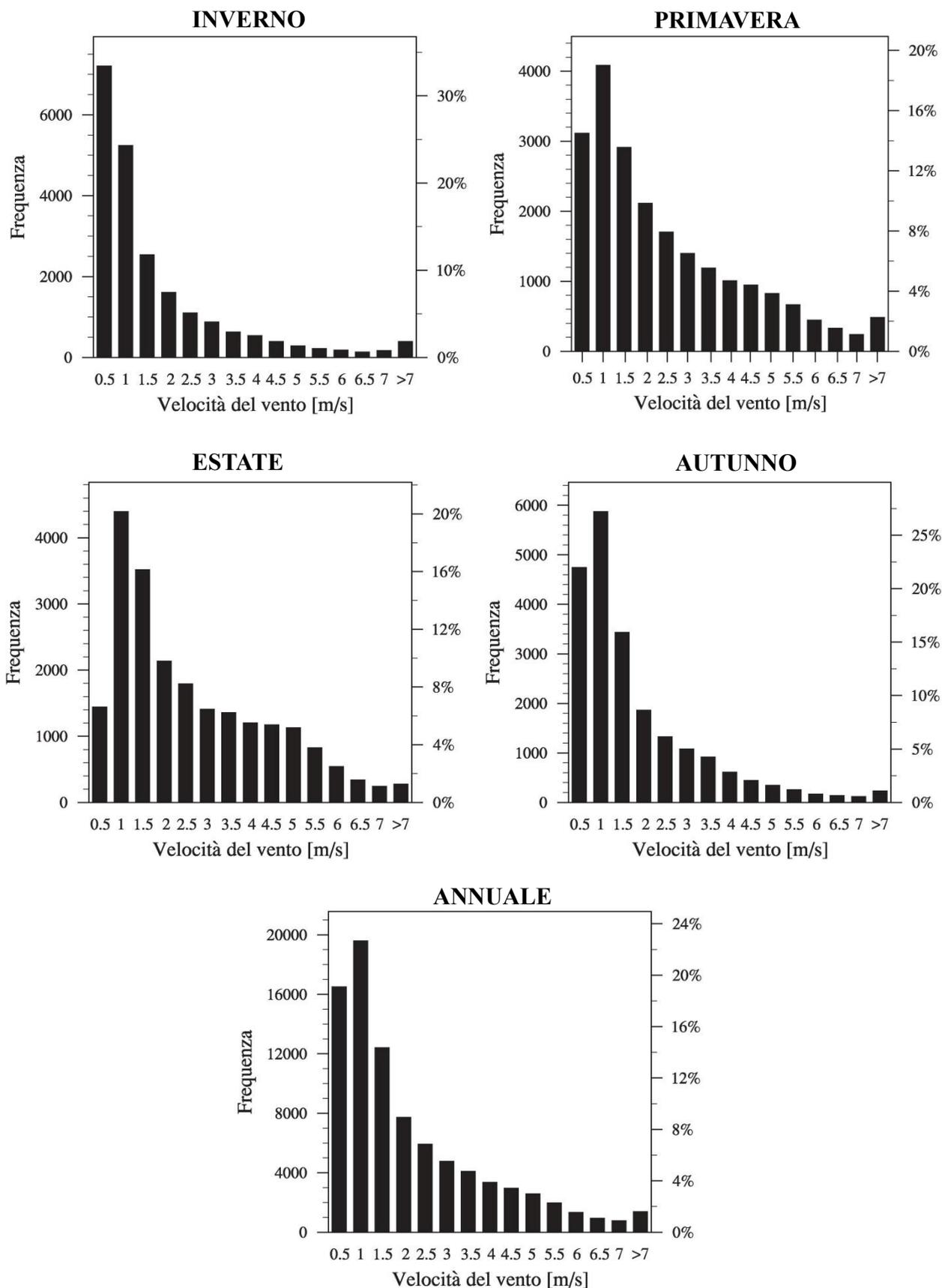
## San Michele

- Coordinate: 46.190 N, 11.135 E
- Quota: 203 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

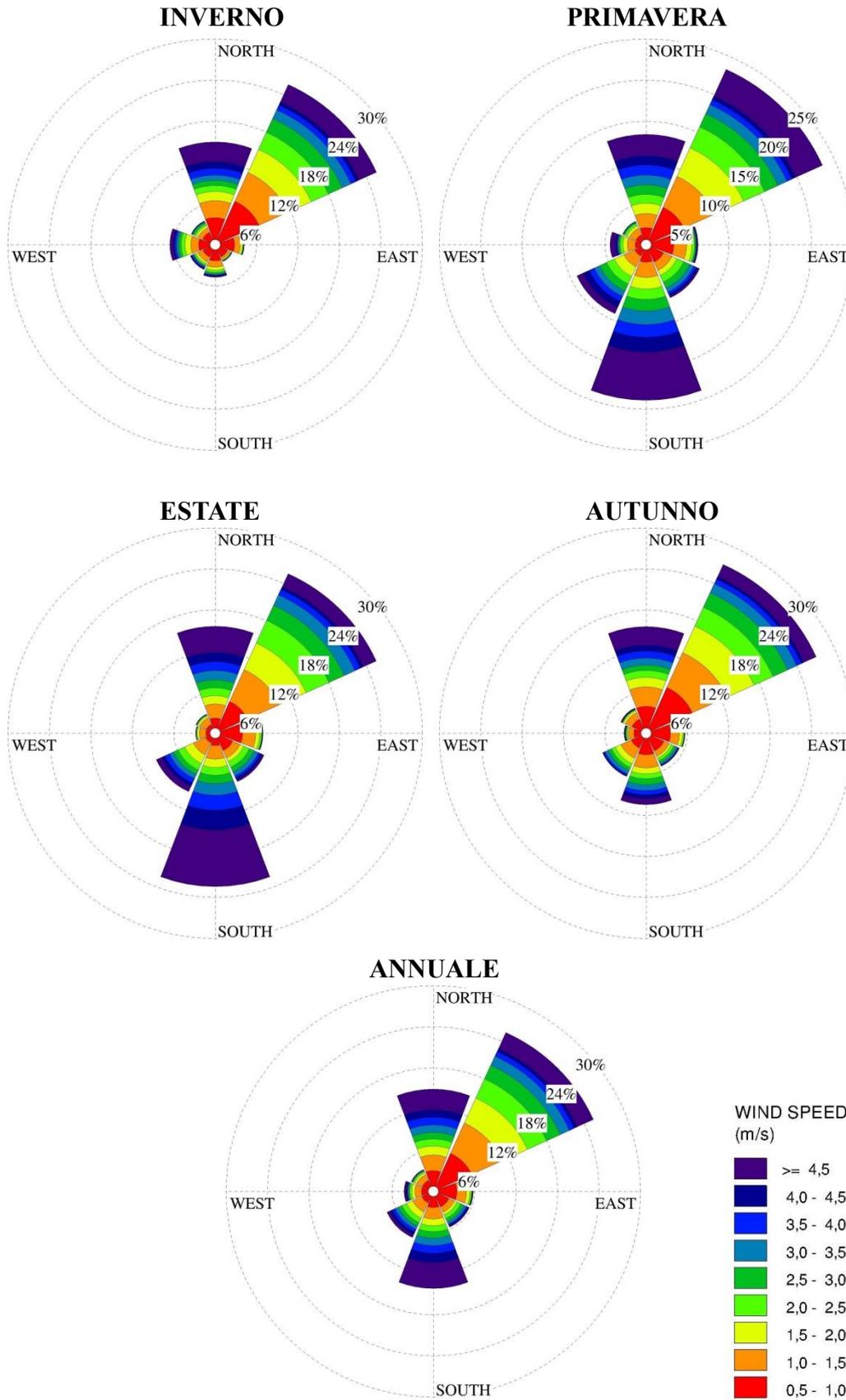


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di San Michele.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	1.28	1.64	2.14	2.08	2.40	2.45	2.37	2.27	1.79	1.39	1.39	1.30	1.87
<b>Calme [%]</b>	36.9	30.1	18.2	15.3	9.7	7.5	6.0	6.4	12.6	22.9	30.6	33.0	19.1



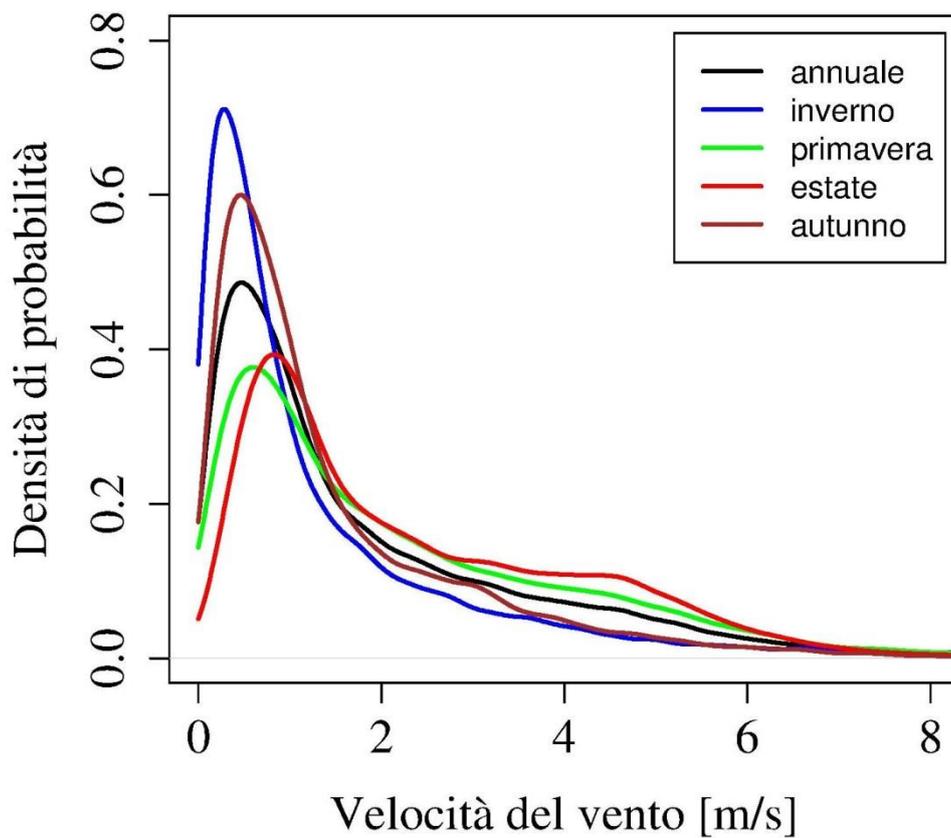
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di San Michele.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di San Michele.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di San Michele.

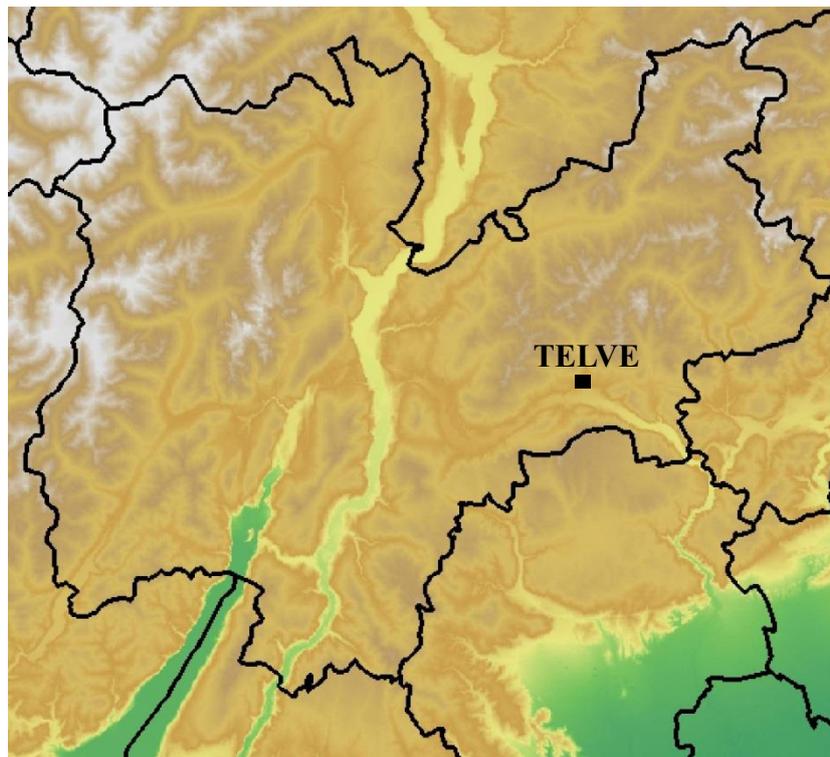
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	1.27	2.30	2.59	1.56	1.90
<b>Parametro di forma k</b>	0.83	1.13	1.36	1.05	1.03



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di San Michele.

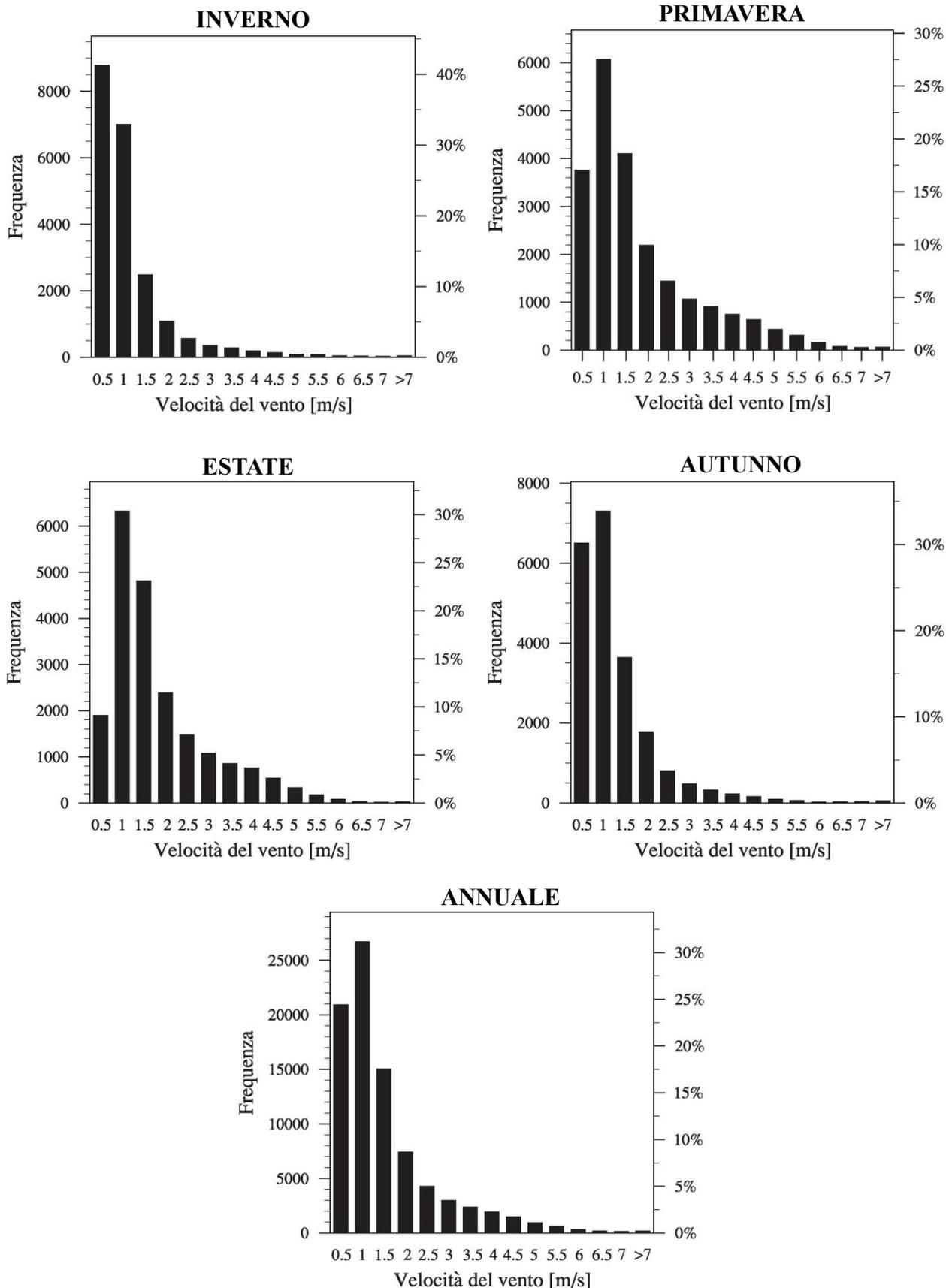
# Telve

- Coordinate: 46.058 N, 11.477 E
- Quota: 412 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

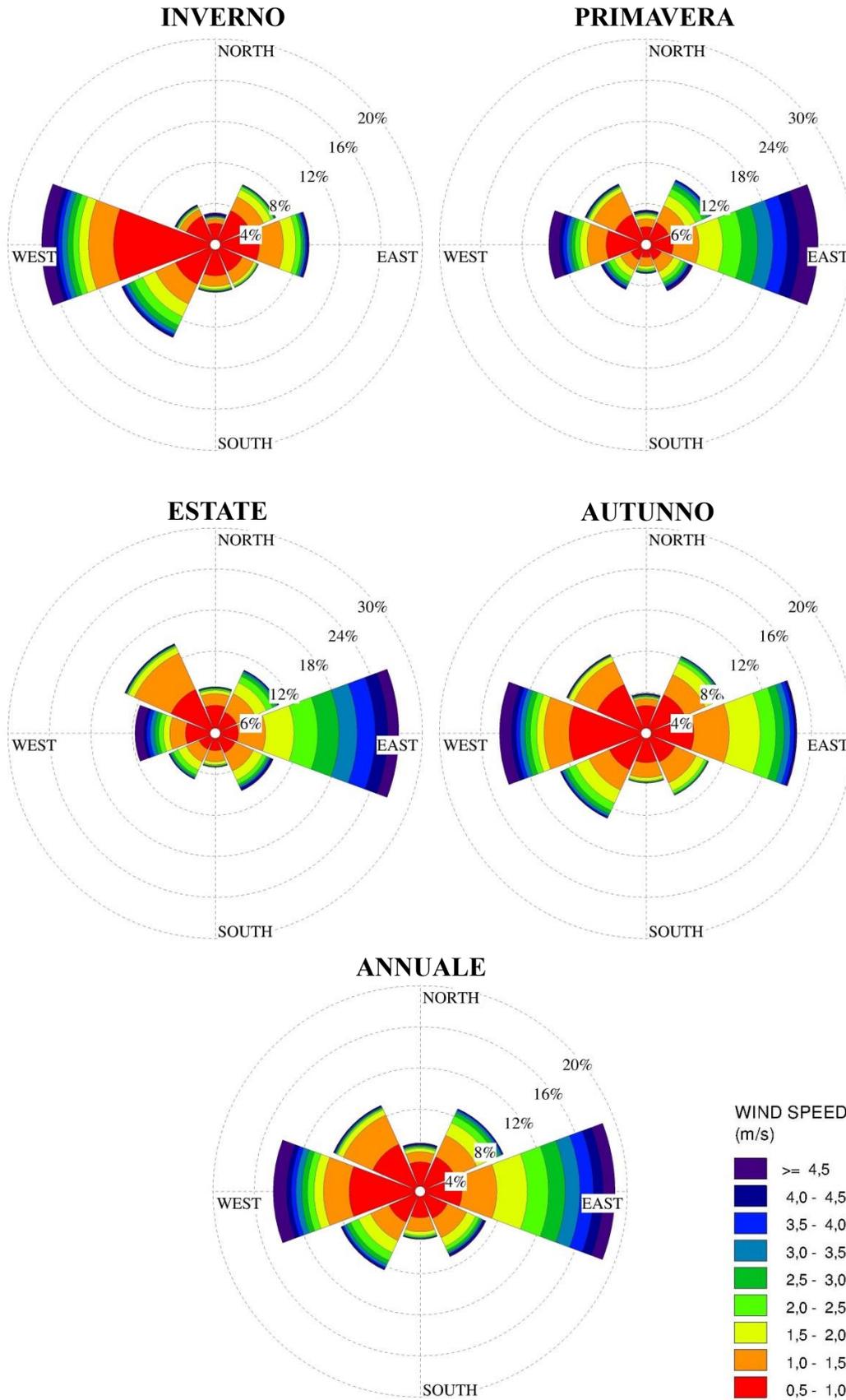


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Telve.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.78	1.01	1.41	1.58	1.65	1.60	1.61	1.43	1.17	0.91	0.91	0.77	1.23
<b>Calme [%]</b>	46.6	31.5	23.2	16.6	11.3	9.9	6.9	10.6	20.4	32.7	37.1	45.0	24.4



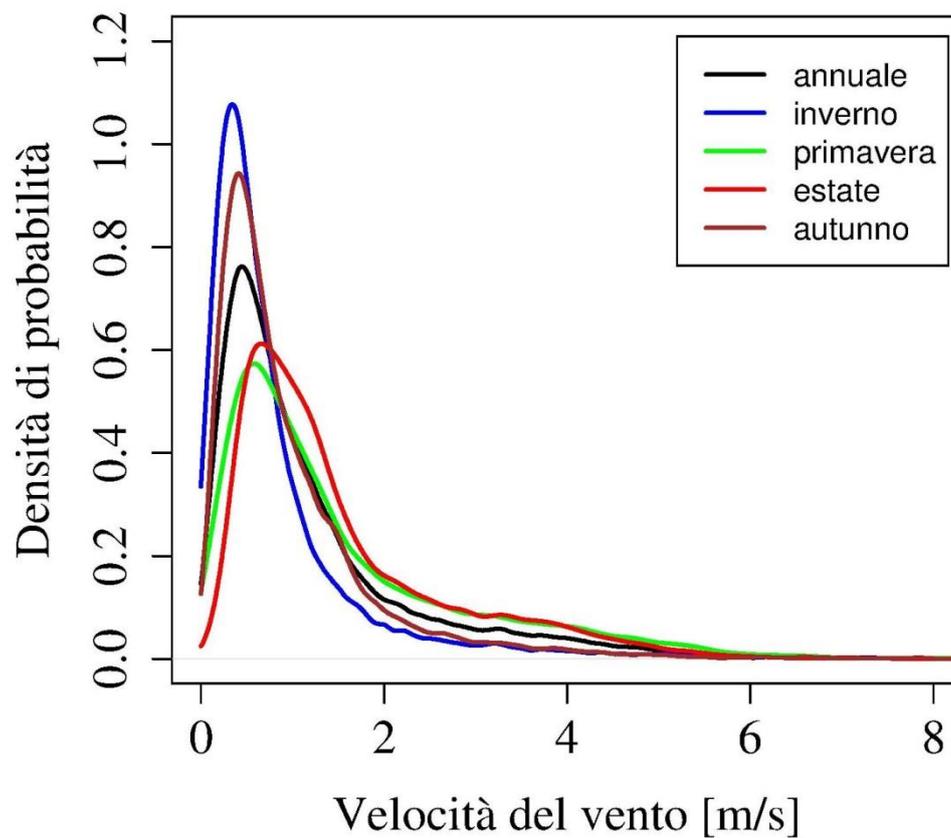
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Telve.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Telve.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Telve.

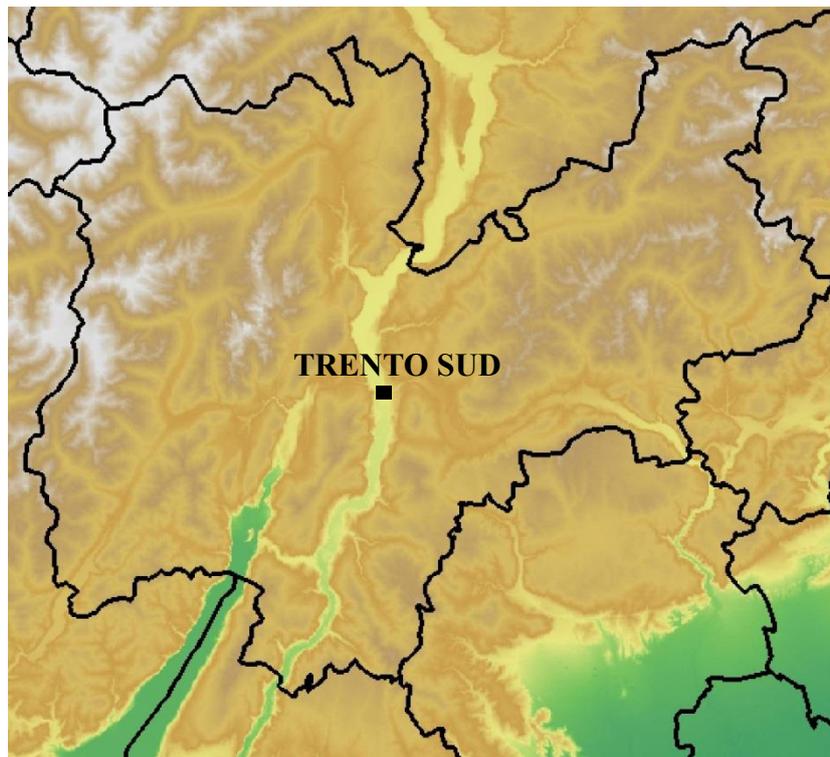
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.83	1.63	1.71	1.05	1.28
<b>Parametro di forma k</b>	0.97	1.16	1.41	1.16	1.11



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Telve.

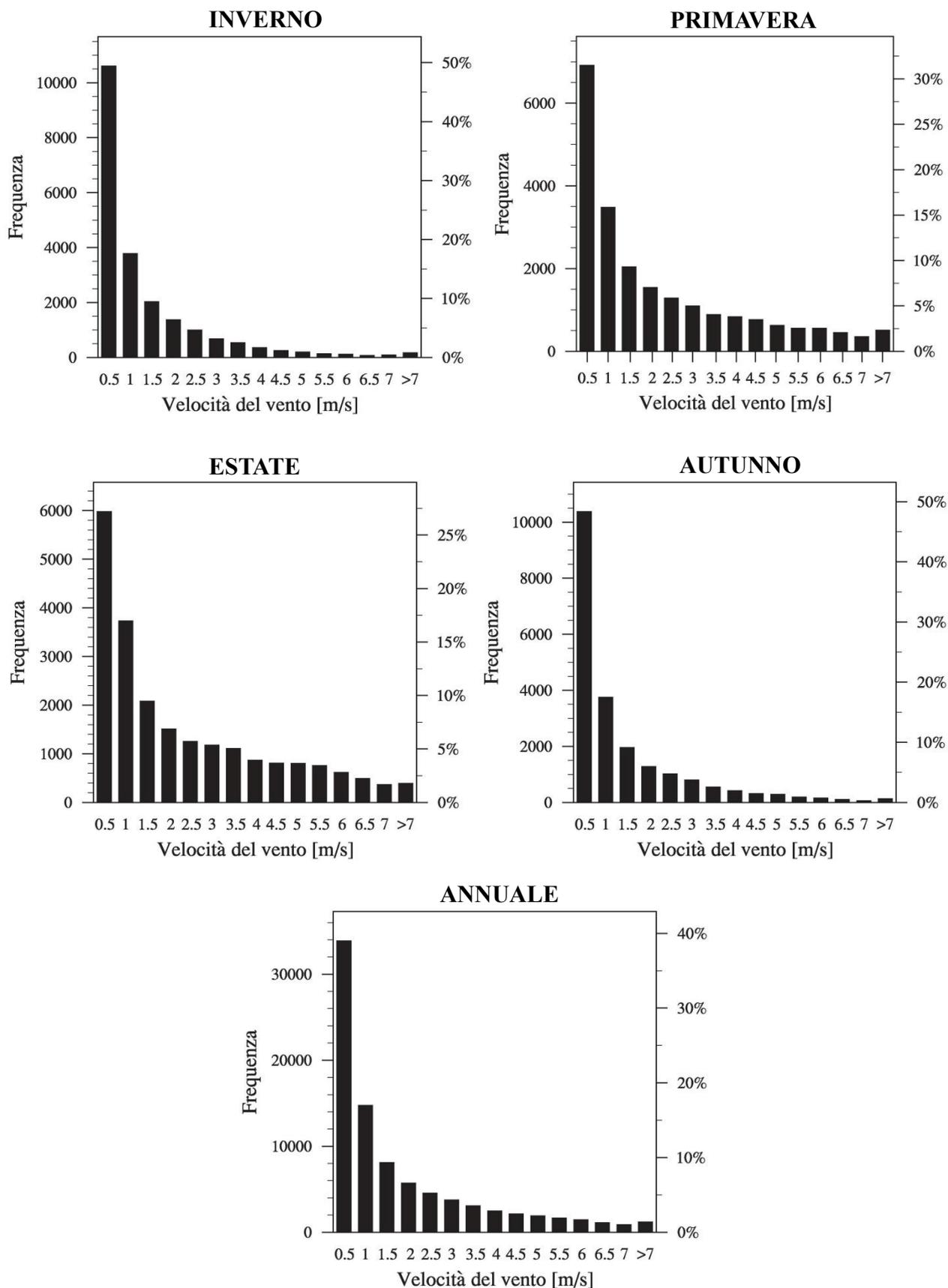
## Trento Sud

- Coordinate: 46.023 N, 11.127 E
- Quota: 185 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m



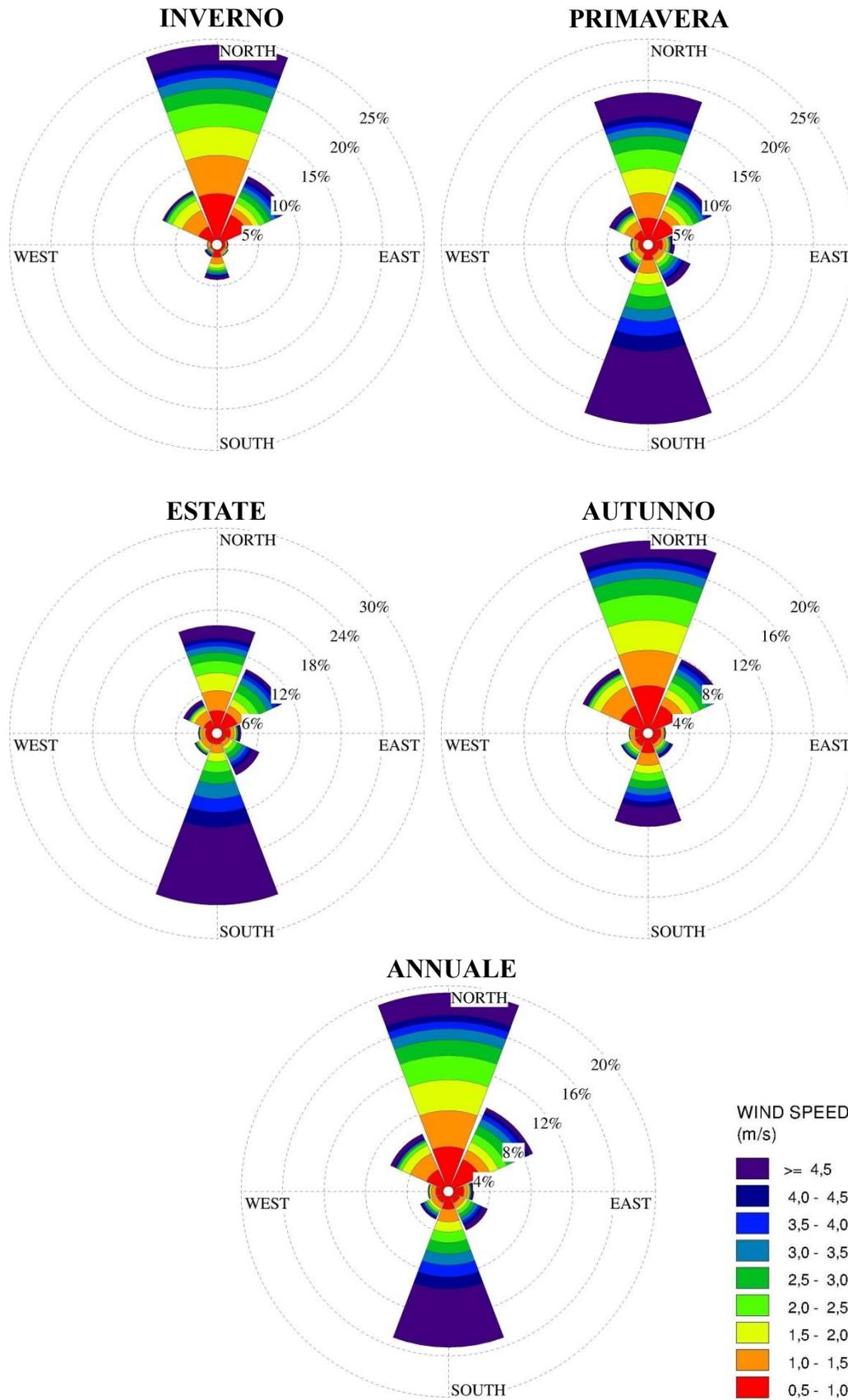
Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Trento Sud.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.98	1.25	1.80	1.87	2.07	2.24	2.08	1.81	1.33	0.92	1.00	0.86	1.52
<b>Calme [%]</b>	49.5	45.4	34.1	31.1	29.3	26.7	25.2	29.7	40.9	52.8	51.4	53.1	39.0



Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Trento Sud.

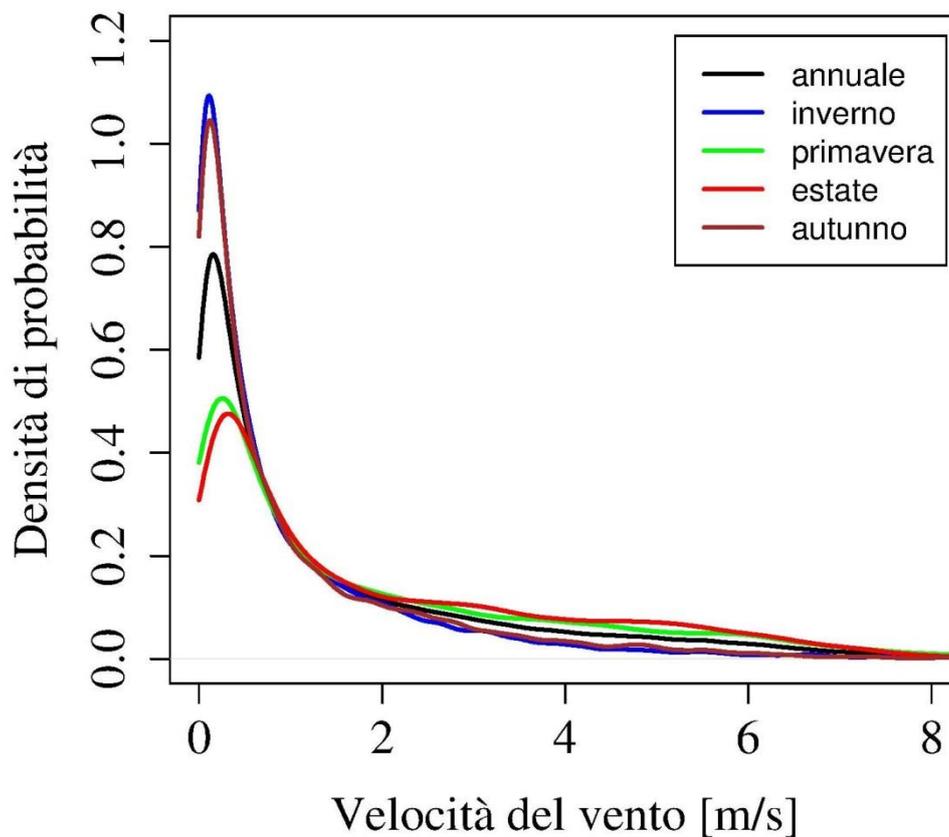
# ATLANTE EOLICO DEL TRENTO



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Trento Sud.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Trento Sud.

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.74	1.63	1.92	0.79	1.21
<b>Parametro di forma k</b>	0.61	0.74	0.87	0.62	0.67



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Trento Sud.

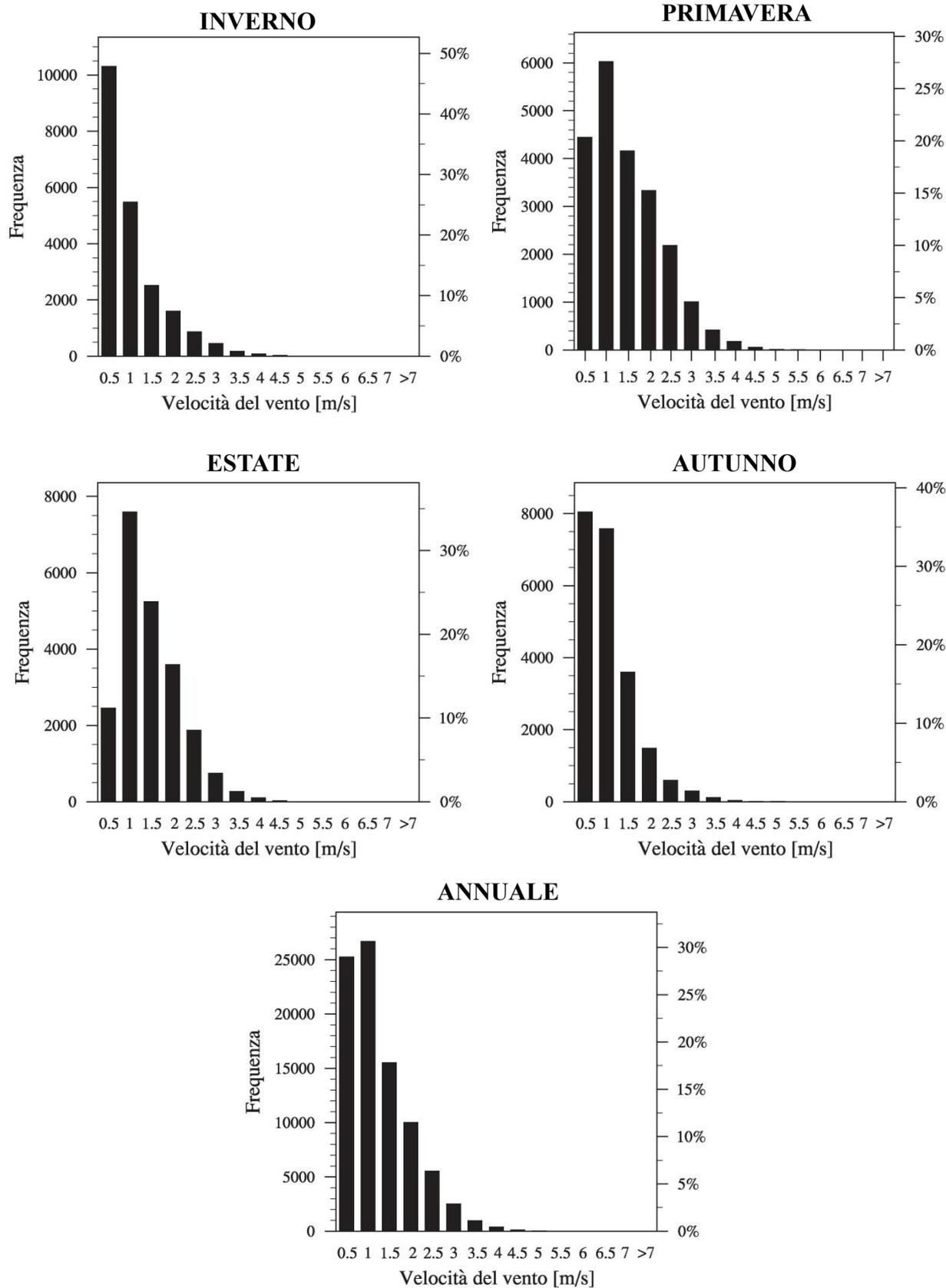
## Vigolo Vattaro

- Coordinate: 45.998 N, 11.195 E
- Quota: 706 m s.l.m.
- Altezza anemometro: 10 m

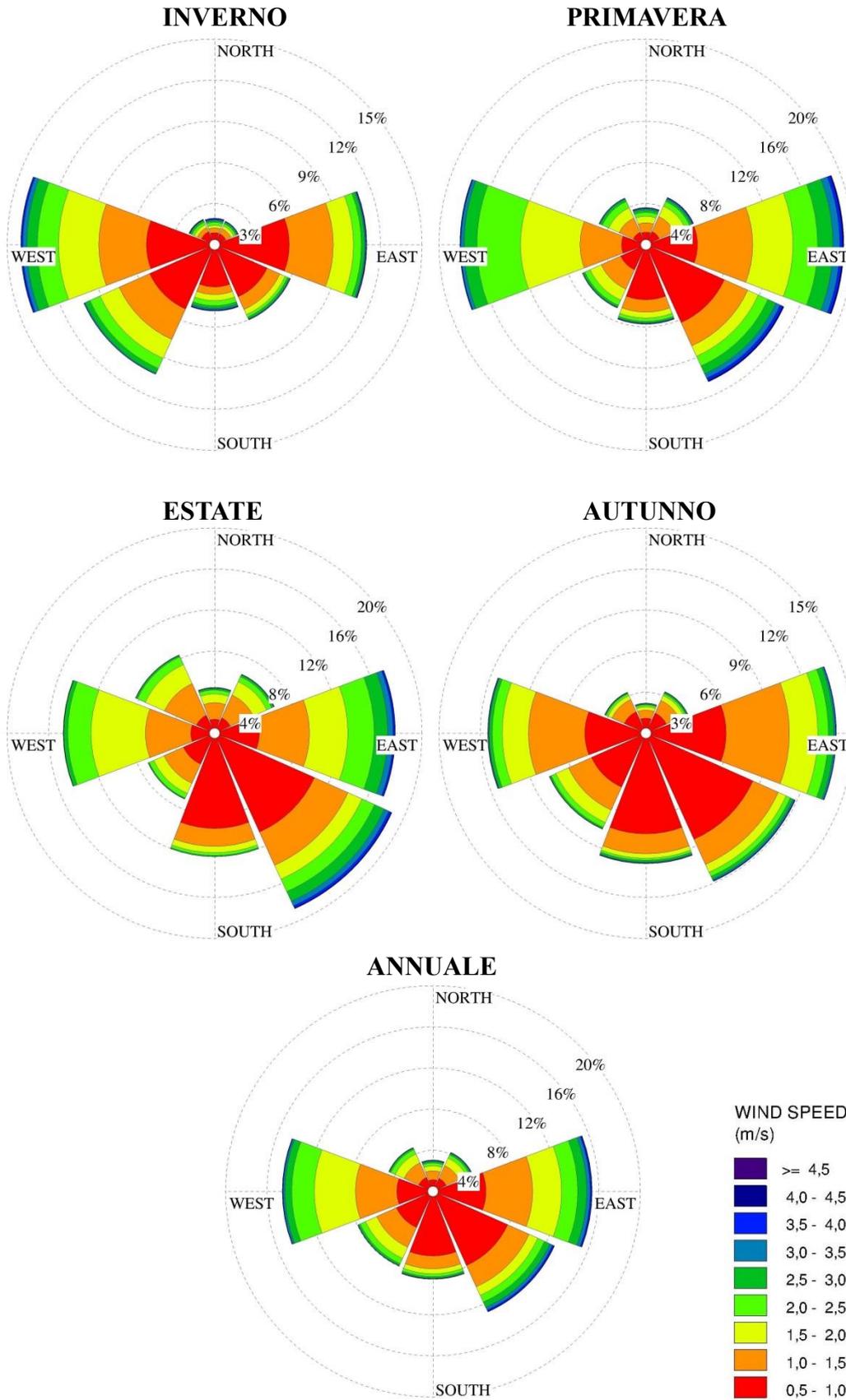


Velocità media e calme di vento (velocità del vento < 0.5 m/s) mensili e annuale per la stazione di Vigolo Vattaro.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	TOT
<b>Velocità media [m/s]</b>	0.71	0.86	1.11	1.20	1.22	1.26	1.19	1.08	0.90	0.71	0.69	0.65	0.96
<b>Calme [%]</b>	50.3	40.3	27.4	19.2	14.5	11.3	10.2	12.1	22.5	39.9	48.4	52.4	29.0



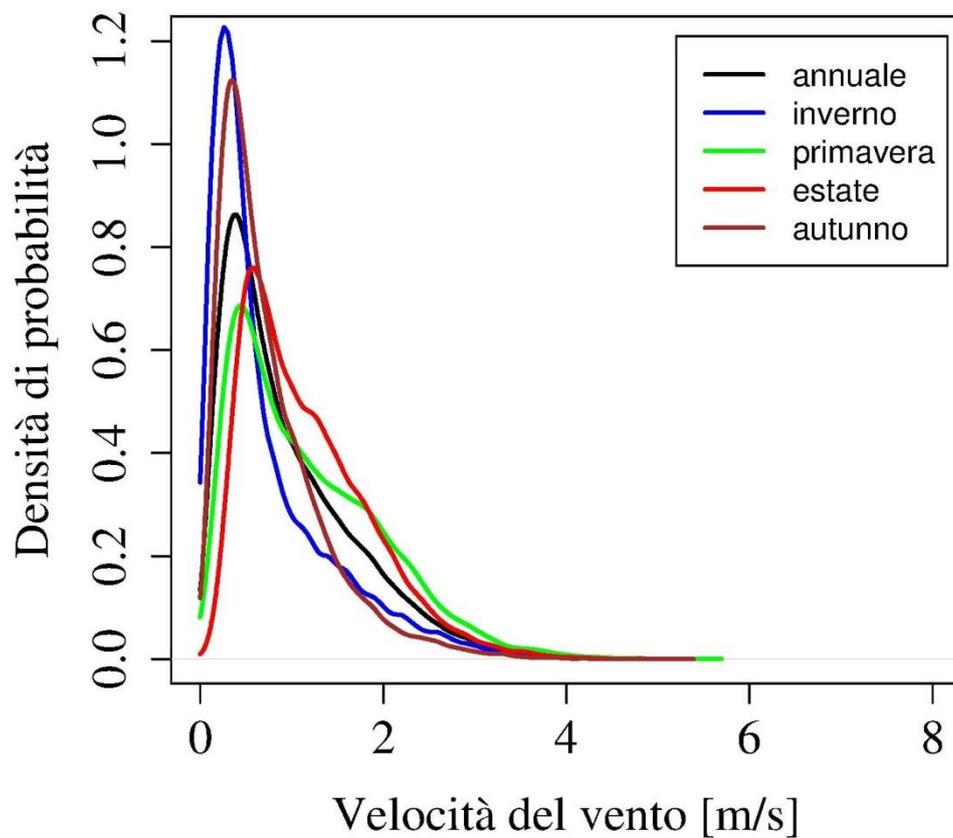
Istogrammi stagionali e annuale della frequenza della velocità del vento per la stazione di Vigolo Vattaro.



Rose del vento stagionali e annuale per la stazione di Vigolo Vattaro.

Parametri caratteristici della distribuzione di Weibull su base stagionale e annuale per la stazione di Vigolo Vattaro.

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
<b>Parametro di scala c (m/s)</b>	0.75	1.30	1.33	0.84	1.05
<b>Parametro di forma k</b>	1.06	1.49	1.81	1.37	1.33



Densità di probabilità della velocità del vento stagionali e annuale per la stazione di Vigolo Vattaro.