



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Stima dell'evapotraspirazione potenziale da dati osservati e da modello climatico ad alta risoluzione: correzione del bias ed applicazione alla pianura veneta

Relatrice

Dott.ssa Eleonora Dallan

Correlatore

Prof. Marco Borga

Laureando

Lorenzo Furlan

Matricola n. 2057614

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

RIASSUNTO.....	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI.....	5
2. AREA DI STUDIO	11
2.1. Inquadramento generale.....	11
2.2. Caratteristiche geomorfologiche.....	13
2.3. Uso del suolo.....	14
2.4. Inquadramento idrografico.....	16
2.5. Caratteristiche climatiche.....	18
3. MATERIALI E DATI	23
3.1. Modelli climatici.....	23
3.1.1. <i>Modelli climatici globali GCM</i>	25
3.1.2. <i>Modelli climatici regionali RCM</i>	25
3.1.3. <i>Modelli climatici a convezione permessa (CPM)</i>	26
3.2. Gli scenari di emissione.....	29
3.3. Dati.....	31
3.3.1. <i>Temperature osservate</i>	31
3.3.2. <i>Dati da modello climatico</i>	34
4. METODOLOGIA	37
4.1. Estrazione delle serie di temperatura.....	37
4.2. Analisi qualitative delle temperature osservate.....	38
4.3. Definizione delle serie di temperatura media, massima e minima.....	40
4.4. Definizione dello schema di calibrazione e validazione.....	42
4.5. Identificazione e valutazione delle distorsioni del modello.....	43
4.6. Correzione del discostamento del modello.....	45
4.7. Validazione della correzione.....	47
4.8. Determinazione dell'evapotraspirazione potenziale.....	49

5. RISULTATI E DISCUSSIONI	53
5.1. Analisi esplorative	53
5.1.1. <i>Verifica della qualità dei dati</i>	53
5.1.2. <i>Analisi delle temperature</i>	56
5.2. Identificazione dei discostamenti (bias).....	61
5.2.1. <i>Periodo di calibrazione e validazione</i>	61
5.2.2. <i>Discostamenti (bias) mensili e stagionali</i>	63
5.3. Correzione delle temperature	74
5.3.1. <i>Correzione con il solo bias medio</i>	74
5.3.2. <i>Correzione con l'applicazione dei tre bias</i>	76
5.3.3. <i>Confronto tra approcci correttivi</i>	78
5.4. Stima dell'evapotraspirazione potenziale	81
5.4.1. <i>Verifica dell'evapotraspirazione potenziale giornaliera media</i>	81
5.4.2. <i>Distribuzione spazio-temporale dell'evapotraspirazione potenziale</i>	86
6. CONCLUSIONI	89
Appendice.....	93
Bibliografia	101
Sitografia	106
Software utilizzati.....	106
Ringraziamenti	107

RIASSUNTO

Il lavoro di tesi ha come obiettivo generale la valutazione della stima dell'evapotraspirazione potenziale mediante l'impiego di modelli climatici, rispetto a quella ottenuta da dati osservati all'interno di un ambito di bassa pianura veneta per il quale, data la sua vocazione agricola, tale parametro climatico risulta importante al fine di definirne i fabbisogni irrigui e poter studiare l'impatto del cambiamento climatico.

Questa variabile, che costituisce un elemento chiave del ciclo idrologico, viene calcolata secondo diversi metodi indiretti caratterizzati da una variabilità di parametri richiesti.

In questo lavoro è stato adottato il metodo di Hargreaves-Samani (1985), che necessita quale unico dato in entrata di valori di temperatura. Ne deriva quindi la necessità di disporre di serie termometriche simulate che siano il più fedeli possibile alla realtà, costituita dall'osservato.

Le simulazioni di variabili climatiche, tra cui la temperatura, vengono fornite da modelli climatici aventi caratteristiche, scale spaziali e temporali differenti. Tra questi si ritrovano i *Convection Permitting Model (CPM)*, modelli che producono proiezioni climatiche ad alta risoluzione, garantendo simulazioni dettagliate, che ben si adattano alla dimensione dell'area di studio. Il loro punto di forza sta in una più precisa rappresentazione dell'orografia, che aumenta la variabilità spaziale della temperatura e nella capacità di risolvere la convezione, con una più accurata riproduzione delle nuvole e del bilancio radiativo, migliorando il ciclo e l'intervallo diurno delle temperature. Tuttavia, questi modelli è noto siano caratterizzati da distorsioni sistematiche delle simulazioni rispetto alle variabili reali.

Con questo lavoro si vuole quindi applicare e validare un metodo che permetta di correggere gli errori di ricostruzione delle serie di temperatura simulate in un periodo passato. Questo ha previsto il confronto di serie storiche di dati di temperatura media, minima e massima ricavate dalla rete di misura ARPAV, che costituiscono la linea di base, con le medesime derivanti da modello climatico ad alta risoluzione CPM (*Convection Permitting Model*) per il periodo 1995- 2010, al fine di determinare il discostamento da cui sono affette quest'ultime.

La ricerca dei discostamenti (*bias*) che caratterizzano le simulazioni, ha reso possibile correggere le performance del modello al fine di renderlo somigliante alla climatologia

osservata, utilizzando il metodo correttivo monovariato *Linear scaling* (LS) che prevede per le temperature minime, medie e massime, una tecnica basata su bias additivi. È stato infatti adottato un primo approccio semplificato basato sull'utilizzo, per ogni stazione, del solo bias sulla temperatura media per correggere separatamente tutte e tre le serie di temperatura, a cui è seguito un secondo approccio fondato sull'utilizzo dei rispettivi bias, che ha permesso di migliorare la riduzione dell'errore di ogni serie.

La valutazione della bontà del metodo correttivo è stata eseguita attraverso indicatori statistici, utilizzando l'RMSE e il bias residuo; il primo rappresenta la differenza media tra valori previsti dal modello climatico e i valori effettivi, dati dalla serie osservata, mentre il secondo indica la distorsione ancora presente dopo la correzione tra le singole temperature.

Infine, è stata stimata l'evapotraspirazione potenziale, allo scopo di confrontarne i risultati ottenuti, utilizzando le temperature osservate, quelle simulate e le serie ottenute del processo di correzione, permettendo di disporre così di un metodo di riduzione degli errori, su cui poter basare studi sull'impatto del cambiamento climatico anche per il futuro, valido per l'area di studio indagata.

ABSTRACT

The general objective of the thesis work is the evaluation of potential evapotranspiration estimation using climate models compared to that obtained from observed data in a low-lying area in the Veneto region. Given its agricultural vocation, this climatic parameter is crucial for defining irrigation needs and studying the impact of climate change.

This variable, a key element of the hydrological cycle, is calculated using various indirect methods characterized by parameter variability.

The Hargreaves-Samani method (1985) was adopted in this work, requiring only temperature values as input. Consequently, there is a need for simulated temperature series that are as faithful as possible to the observed reality. Climate model simulations, including temperature, are provided by Convection Permitting Models (CPM), which produce high-resolution climate projections, ensuring detailed simulations well-suited to the study area's size.

The strength of CPMs lies in a more precise representation of orography, increasing spatial temperature variability and the ability to resolve convection, leading to a more accurate reproduction of clouds and the radiative balance, enhancing the diurnal temperature cycle. However, these models are known to have systematic distortions compared to real variables.

This study aims to apply and validate a method to correct errors in reconstructing simulated temperature series for a past period. This involved comparing historical series of average, minimum, and maximum temperature data from the ARPAV measurement network (baseline) with those derived from the high-resolution CPM climate model for the period 1995-2010 to determine the discrepancies.

Identifying biases in the simulations allowed correcting model performance to make it more similar to observed climatology using the Linear Scaling (LS) monovariate corrective method, which employs additive bias for minimum, average, and maximum temperatures. A simplified approach based on using only the bias on average temperature for each station was followed by a second approach using respective biases, improving error reduction for each temperature series.

The evaluation of the corrective method's effectiveness was carried out using statistical indicators, employing RMSE (Root Mean Square Error) and residual bias. RMSE represents the average difference between values predicted by the climate model and

actual values from the observed series, while residual bias indicates the remaining distortion after correction for individual temperatures.

Finally, potential evapotranspiration was estimated to compare results using observed temperatures, simulated temperatures, and corrected series. This provides a method for error reduction, forming the basis for future studies on the impact of climate change in the investigated area.

1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI

Le tematiche riguardanti il cambiamento climatico stanno avendo negli anni un crescente interesse, non solo da parte del mondo scientifico, ma anche nella società civile, rappresentando oggi e nel futuro, una delle sfide più rilevanti a livello globale e locale.

In particolare l'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, nei suoi ultimi rapporti AR5 e AR6, colloca l'Italia nell' "hot spot mediterraneo", un'area identificata come particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici.

Infatti il territorio nazionale è soggetto ai rischi naturali, tra i quali fenomeni di dissesto, alluvioni, carenza idrica, ed è altrettanto evidente come l'aumento delle temperature e l'intensificarsi di eventi estremi connessi ai cambiamenti climatici (siccità, ondate di caldo, venti, piogge intense, ecc.), amplifichino tali rischi i cui impatti economici, sociali e ambientali sono destinati ad aumentare nei prossimi decenni (PNACC, 2023).

La risorsa idrica in particolare, oltre ad essere vitale per l'umanità, ha da sempre rappresentato un elemento fondamentale per lo sviluppo economico di diversi Paesi.

L'agricoltura, nello specifico, risulta essere dipendente dalla disponibilità di acqua e questo legame sarà sempre maggiore, basti pensare come gli ordinamenti colturali irrigui rappresentino sempre più un punto di forza in termini di reddito e occupazione (Pontrandolfi & Zucaro, 2007).

Infatti il settore primario rappresenta il 70% del totale dei prelievi di acqua dolce e si prevede che entro il 2050 la domanda alimentare aumenterà del 60%, portando ad un conseguente aumento del fabbisogno irriguo di oltre il 50% (Ghiat et al., 2021).

Si dovrà quindi porre sempre maggiore attenzione al tema della risorsa idrica, visto il suo ruolo predominante per la sopravvivenza e la qualità delle produzioni agricole, ma allo stesso tempo, perchè coinvolta nei processi connessi ai cambiamenti climatici che sempre più si concretizzano in eventi estremi. Infatti questi mutamenti influiscono sul bilancio idrologico e quindi sulla disponibilità spaziale e temporale di acqua, a fronte di una domanda da parte delle attività umane in crescita.

Alla luce di quanto premesso, è di estrema attualità disporre di strumenti che permettano di valutare i futuri cambiamenti delle risorse idriche, al fine di migliorarne la loro gestione, partendo dall'osservazione del passato e l'utilizzo di modelli climatici.

In questo contesto, l'evapotraspirazione (ET) è una componente chiave, in quanto oltre alle precipitazioni, costituisce un indicatore importante del ciclo idrologico. Inoltre è ampiamente utilizzata in quanto rappresenta l'unico collegamento tra bilancio energetico e bilancio idrico.

Tra i diversi termini che descrivono l'evapotraspirazione, l'evapotraspirazione potenziale (ETP) è un parametro efficace per studiare il cambiamento nel ciclo idrologico causato dal cambiamento climatico, oltre che importante per la pianificazione dell'irrigazione e la gestione delle risorse idriche (Dong et al., 2020).

È infatti necessario disporre di proiezioni affidabili di ETP per la modellazione di scenari di cambiamento climatico; tuttavia questa variabile viene stimata prevalentemente per via indiretta, considerando cioè altri elementi meteorologici direttamente misurabili da cui essa dipende, tra i quali vi è la temperatura.

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), definisce l'evapotraspirazione (ET) come la quantità di acqua, espressa in millimetri, che si trasferisce in atmosfera per i fenomeni di evaporazione diretta dagli specchi d'acqua e dal terreno e di traspirazione della vegetazione.

L'evapotraspirazione potenziale (ETP), pure espressa come altezza in millimetri, indica invece la massima quantità di acqua che può essere trasformata in vapore, dal complesso di fattori atmosferici e della vegetazione e dove il contenuto di risorsa idrica del suolo non costituisce fattore limitante. Può quindi considerarsi un parametro tipicamente legato al clima, in quanto esprime la tendenza a traspirare di una determinata superficie e per questo motivo è determinata in funzione di soli parametri climatici.

In particolare l'evapotraspirazione si caratterizza per due processi fondamentali (Carobin, 2007) :

- a) passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore, in cui la fonte energetica per tale passaggio di stato è data dalla radiazione solare (componente radiativa);
- b) diffusione del vapore acqueo dalla superficie vegetale all'atmosfera circostante. I fattori determinanti tale processo sono la temperatura, l'umidità relativa dell'aria e la velocità del vento (componente aerodinamica).

È importante notare anche come ETP spesso sia usata come l'equivalente dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 , che rappresenta il tasso evapotraspirativo di

una coltura bassa e uniforme, completamente ombreggiata e con adeguata disponibilità idrica nel suolo. Nasce però un'ambiguità con ETP, in quanto molti tipi di colture possono rientrare nella descrizione di coltura erbacea bassa. Il concetto di ET_0 è invece più adatto ai fini agronomici, in quanto si riferisce a condizioni di contorno standard, corrispondenti ad una superficie vegetata standardizzata di altezza pari a 12 cm, resistenza superficiale di 0,70 s/m e albedo di 0,23, ben irrigata che ombreggia completamente il suolo.

Ai fini del presente lavoro di tesi verrà utilizzato il termine di evapotraspirazione potenziale (ETP) per identificare il parametro di interesse per l'idrologia.

L'evapotraspirazione è quindi uno dei parametri importanti da conoscere, che entrano in gioco nelle applicazioni legate sia alla razionale utilizzazione delle risorse idriche, in particolare nell'ambito della produzione agraria per la programmazione delle irrigazioni, sia in studi di tipo agroclimatologico e nei processi di valutazione ambientale.

La gestione dell'acqua e le rese colturali possono quindi essere migliorate utilizzando metodi affidabili di stima dell'evapotraspirazione potenziale (Hargreaves et al., 2003).

La determinazione di questo parametro può essere eseguita secondo differenti metodi, che richiedono una o più variabili climatiche, non sempre disponibili omogeneamente per i territori.

L'equazione di Penman-Monteith adottata dalla FAO è considerata il modello standard per la stima dell'evapotraspirazione potenziale o di riferimento, ma proprio la caratteristica di richiedere molte variabili misurate, tra cui oltre alla temperatura, vi sono umidità relativa, radiazione solare e velocità del vento, la rende spesso non applicabile.

Esistono quindi un ventaglio di altre formule empiriche, che si contraddistinguono per una minor richiesta di variabili. Infatti, considerando la temperatura un dato di base nelle misurazioni delle stazioni e di facile accessibilità, in questo studio è stato adottato quale metodo di stima di ETP, il modello di Hargreaves-Samani formalizzato nel 1985.

La disponibilità di dati di temperatura è quindi un elemento fondamentale per poter studiare i processi evapotraspirativi.

Dal punto di vista climatico, a livello globale, le temperature hanno una tendenza all'incremento, infatti Arnell et al., (2019), già per il periodo 1981-2010, affermano che i valori medi erano di 0,61°C superiori ai livelli preindustriali.

Concentrandosi poi sul Nord Italia, si prevede che le variazioni dei valori medi saranno di circa + 2,5 °C nel periodo 2021–2050 rispetto al 1961–1990 e diverranno più pronunciati verso la fine del secolo (Ben Hamouda et al., 2021; Tomozeiu et al., 2014).

Più nello specifico anche per il Veneto l'*Agenzia Regionale per la protezione ambientale (ARPAV)* riscontra un trend positivo e statisticamente significativo delle temperature, superiore al riscaldamento osservabile a livello globale e causato principalmente dall'aumento in atmosfera dei gas climalteranti, in linea con quello delle regioni confinanti, appartenenti all'*hot spot* dell'area mediterranea.

Tuttavia l'osservazione delle variabili può essere rivolta solo a periodi passati e presenti, dove si ha una robusta base dati proveniente dalla rete di misura, prima appartenuta al Servizio Idrografico e Mareografico nazionale e dal 1998 trasferita alle Regioni territorialmente competenti, con la creazione delle Agenzie per la protezione ambientale regionali, che per il Veneto prende il nome di ARPAV.

La conoscenza dell'andamento climatico futuro prescinde invece, dalla disponibilità di proiezioni, generate dai modelli climatici, i quali producono simulazioni a diverse durate e scale spaziali. Si trovano infatti modelli globali (GCM) che coprono tutto il mondo e sono caratterizzati da risoluzioni grossolane e i modelli regionali (RCM), in cui le simulazioni sono rivolte a porzioni limitate del globo. L'aumento della potenza dei computer di calcolo, sempre più performanti, hanno negli anni portato alla nascita dei Convection Permitting Model (CPM), modelli ad alta risoluzione, che coprono aree terrestri limitate, la cui differenziazione rispetto ai modelli globali e regionali, oltre ad una migliore rappresentazione dell'orografia, risiede nella capacità di risolvere processi a scala locale, tra cui la convezione profonda, fin prima rappresentati da una parametrizzazione.

Più nello specifico questi modelli consentono di avere dati climatici, tra cui la temperatura, su una griglia tridimensionale, sia per periodi passati e presenti che per quelli futuri. Ne deriva la possibilità di poter disporre di serie temporali osservate e simulate in parallelo per intervalli storici, così da studiare la diversità dei valori prodotti.

Infatti, sebbene i modelli climatici ad alta risoluzione, forniscano informazioni climatiche più dettagliate, queste sono caratterizzate da un errore sistematico, denominato bias, che include una sovrastima o una sottostima delle componenti idrometeorologiche, tra cui le

temperature, tali da renderne sconsigliabile l'uso diretto per processi decisionali o studi sul cambiamento climatico (Kim et al., 2022).

Pertanto, la correzione dei bias statistici dei risultati simulati è stata progressivamente adottata come procedura standard per migliorarne le prestazioni, in particolare quando vengono inseriti in varie valutazioni di impatto dei cambiamenti climatici (Qiu et al., 2023).

L'obiettivo generale di questo lavoro è quindi la correzione delle distorsioni che un modello climatico a convezione permessa presenta rispetto alle osservazioni in una specifica area, e che influiscono di conseguenza sulla stima dell'evapotraspirazione potenziale.

L'ambito territoriale di riferimento per lo studio comprende un'area coltivata e irrigata di bassa pianura veneta, posta nel settore centro-meridionale, dove gli unici esempi di rilievi sono costituiti dai Colli Euganei e dalle propaggini sud-orientali dei Monti Berici.

Gli obiettivi specifici dello studio prevedono, in prima battuta, la stima della distorsione (*bias*) del modello climatico, attraverso il confronto tra la serie di temperature istantanee osservate e le simulazioni, riferite al periodo storico 1995-2010. Questo permette di individuare e valutare l'andamento degli errori nella ricostruzione della serie termometrica storica e la successiva applicazione del fattore correttivo al modello climatico, con un approccio di addizione del bias.

Si accompagnerà poi la valutazione dell'evapotraspirazione potenziale, determinata secondo il metodo di Hargreaves-Samani (1985), sia in termini di progressione temporale e spaziale, che di discostamento tra il valore derivato dal clima osservato e le simulazioni. Disporre di questa variabile che ben ricostruisca il dato reale, ottenuta da parametri climatici simulati corretti, è la base fondante per poter comparare i valori di evapotraspirazione spazialmente e nel tempo e studiarne i trend futuri.

A questo proposito, viene considerato che i metodi di correzione del bias siano stazionari, ovvero che la parametrizzazione per le condizioni climatiche attuali sia valida anche per le condizioni future. Questo lavoro, infatti, costituisce la base per un successivo studio dei cambiamenti futuri dell'evapotraspirazione potenziale, attraverso la correzione di una proiezione da modello, trattato da Fregona (2023).

2. AREA DI STUDIO

2.1. Inquadramento generale

L'area analizzata in questo studio è situata nell'Italia Nord orientale, all'interno della regione Veneto e in una vasta porzione della Pianura padano-veneta. L'ambito è posto a Sud dell'asse Verona-Venezia, comprendendo oltre a queste, anche parte delle provincie di Vicenza e Padova. Il comparto in esame costituisce una delle maggiori aree in cui si esercita la pratica agricola, ed è per questo interessato dal comprensorio del Consorzio di bonifica di secondo grado Lessinio-Euganeo-Berico (L.E.B), il quale comprende un ambito di bassa pianura che si estende dalla zona pedemontana a sud dei Monti Lessini e delle Prealpi vicentine, fino all'area lagunare. L'opera principale attorno a cui ruotano le attività di questo ente, è costituita dal Canale LEB, che interessa direttamente ed indirettamente 102 comuni ed un territorio di 349.826 ettari, di cui 172.413 rappresentano la superficie agraria utile (SAU), 137.412 la superficie irrigabile e 82.675 ettari sono attualmente irrigati.

L'ambito di studio, in *figura 1*, è stato identificato a partire dal comprensorio dell'ente di bonifica, occupandone un'area di 1833 Km², compresa tra i fiumi Brenta ed Adige, delimitata altresì dalla Laguna veneta ad Est e dai Monti Berici a Nord – Nord Ovest.

Per il territorio analizzato sono state identificate un numero rappresentativo di stazioni di misura della temperatura, di cui verrà data più ampia trattazione nei capitoli successivi.

I Monti Berici assieme ai Colli Euganei, compresi solo parzialmente nell'area oggetto del lavoro ad esclusione della parte sommitale, sono gli unici gruppi orografici della zona.

I primi di origine vulcanica, sono un complesso di colline che sorge pressochè isolato a sud-ovest della città di Padova, in posizione centrale nella pianura; i Monti Berici invece hanno una genesi marina e si collocano a Sud della città di Vicenza con maggiore ampiezza in direzione Nord-Est/Sud-Ovest.

Il territorio a morfologia prevalentemente pianeggiante, con un andamento altimetrico decrescente da Ovest verso Est, e da Nord a Sud, presenta quote comprese tra 518 m.s.l.m., rilevati nei pressi delle propaggini dei Colli Euganei, nel comune di Teolo (PD) e -3 m.s.l.m. dell'area lagunare, nelle vicinanze di Cavarzere (VE), dove per la messa a coltura dei terreni, nel passato sono stati effettuati intensi lavori di bonifica.

L'area di studio ricade inoltre, all'interno di n°8 Siti Natura 2000, di seguito elencati:

- IT3250046 - Laguna di Venezia (ZPS);
- IT3250030 - Laguna medio-inferiore di Venezia (SIC);
- IT3260017 – Colli Euganei – Monte Lozzo – Monte Riccio (SIC e ZPS);
- IT3260018 – Grave e Zone umide del Brenta (SIC e ZPS);
- IT3260020 – Le vallette (ZPS);
- IT3260021 – Bacino Val Grande – Lavacci (ZPS);
- IT3260020 – Garzaia della tenuta “Civrana” (ZPS);
- IT3260021 – Colli Berici (SIC).

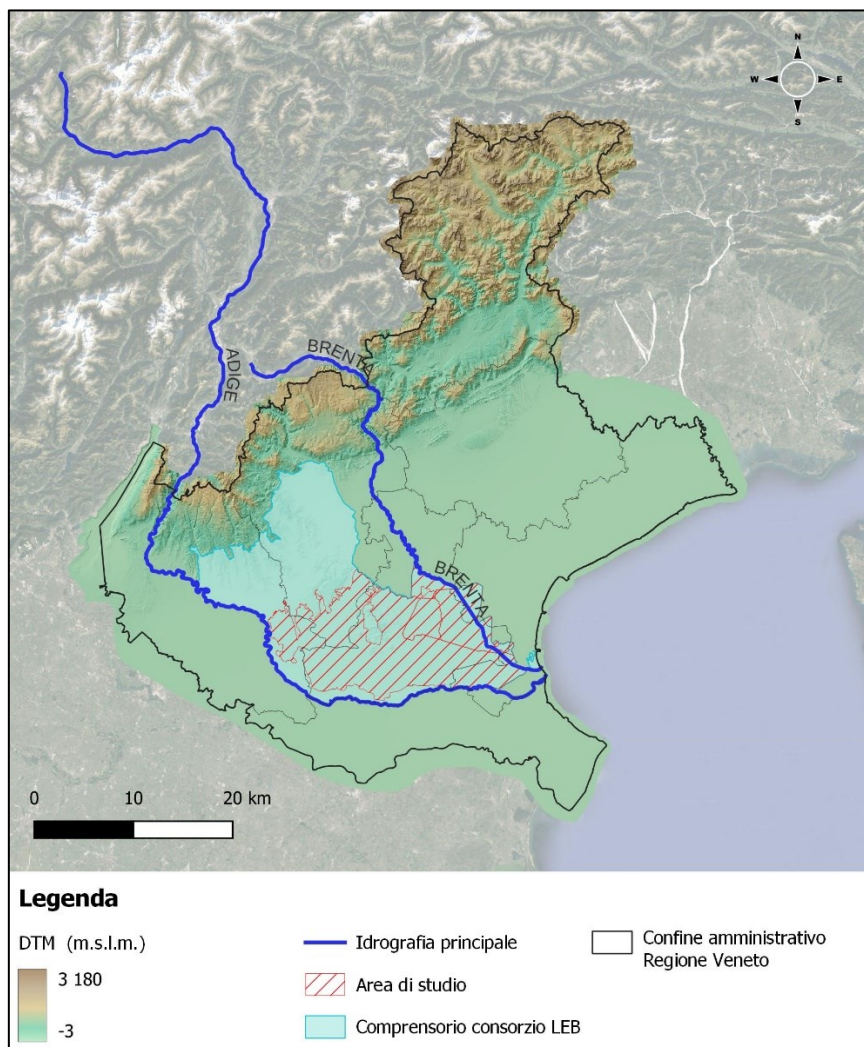


Figura 1: inquadramento dell'area di studio rispetto al territorio della Regione Veneto e al comprensorio del Consorzio di bonifica di secondo grado Lessinio Euganeo Berico (LEB). Viene rappresentata anche l'idrografia principale che racchiude l'area di studio.

2.2. Caratteristiche geomorfologiche

L'azione dei ghiacciai alpini che hanno trasportato a valle grandi quantità di detriti, unitamente all'azione modellatrice dei corsi d'acqua, ha portato alla formazione di quella che oggi è conosciuta come Pianura Padana.

L'area di studio, in particolare, si trova all'interno della Pianura veneta o veneto-friulana, che in senso più ampio appartiene alla Pianura Padana, costituendone la porzione Nord orientale. Mostra infatti una specificità che la differenzia da quest'ultima, a causa del reticolo idrografico che la attraversa, il quale non è tributario del fiume Po, come invece avviene nella pianura lombarda, ma le sue acque confluiscono direttamente nel mar Adriatico. Infatti la pianura veneta è di chiara genesi alluvionale, che è riconducibile all'azione di trasporto dei sedimenti da parte dei sei fiumi principali che la attraversano: Adige, Bacchiglione, Brenta, Sile, Piave e Tagliamento.

La presenza di una linea delle risorgive, caratterizzata dalla venuta a giorno della tavola d'acqua, permette di suddividere la pianura veneta in 2 principali unità fisiografiche: alta pianura e bassa pianura, che presentano differenti caratteristiche dei sedimenti.

La prima si caratterizza per depositi di natura ghiaiosa con matrice sabbiosa, indifferenziati e molto permeabili e manca quasi totalmente di una rete di drenaggio superficiale naturale. Questa porzione di territorio, chiamata anche fascia delle ghiaie, costituisce l'area di ricarica dell'intero sistema idrogeologico.

L'ambito di bassa pianura, su cui ricade l'area di indagine, è costituito da alternanza di orizzonti limoso argillosi e sabbiosi, con livelli ghiaiosi profondi e presenza di una rete idrografica fitta (Mengato, 2015).

In particolare la presenza di sedimenti a matrice fine nel sottosuolo di bassa pianura, vede la sua causa nella diminuzione della capacità di trasporto dei due fiumi principali Brenta e Adige e del sistema Astico-Tesina-Bacchiglione che la attraversano e presentano alvei fluviali con configurazione a canale singolo, sinuosità variabile da poco accentuata fino a meandriforme.

La presenza di alvei pensili, cioè sopraelevati rispetto alle aree circostanti, nel tempo, ha portato alla genesi di dossi fluviali, maggiormente osservabili nel basso corso dell'Adige. Gli orizzonti poco permeabili di argille e limi, permettono l'affioramento di parte della falda freatica, mentre la restante porzione fluisce nel sottosuolo formando acquiferi

sovraimposti, normalmente presenti entro i primi due metri di profondità dal piano campagna (Cocchi, 2016).

Si segnalano piccole porzioni di territorio in prossimità delle propaggini dei Berici, le cui caratteristiche litologiche riconducono ad un substrato roccioso di origine sedimentaria, formato da calcari e marne, mentre nella zona pedicollinare degli Euganei sono presenti rocce di genesi vulcanica, riconducibili a basalti e tufi.

2.3. Uso del suolo

La maggior parte del territorio veneto, si stima il 55%, è occupata dalla pianura, costituita da una consociazione di tessuto residenziale, produttivo e rurale, che ha altresì impedito, da una parte, la formazione di grandi agglomerati urbani e dall'altra lo spopolamento delle campagne.

L'ambito di studio, nello specifico, è caratterizzato da estese porzioni di territorio ad uso agricolo, in cui gioca un ruolo di rilievo la pratica irrigua, a cui si interpongono aree urbane e produttive sparse, le cui maggiori superfici si ritrovano in coincidenza dei centri maggiori, tra cui le città capoluogo (*figura 2*).

Nelle aree agricole sono prevalenti aziende di medie e grandi dimensioni, anche se permangono aziende di più piccola entità, che presentano un orientamento produttivo cerealicolo e zootecnico.

Le colture erbacee prevalenti risultano essere il Mais da granella (*Zea Mays*) e la Soia (*Glycine max*), spesso avvicendate con cereali autunno-vernini, quali il Grano Tenero (*Triticum aestivum*) e l'Orzo (*Hordeum vulgare*) o da colture biennali come la Barbabietola da zucchero (*Beta vulgaris*).

Parte della superficie agricola, principalmente nella zona pedecollinare e collinare dei Monti Berici e dei Colli Euganei è coltivata a vigneto, con diverse Denominazioni di origine, le quali, tuttavia, comprendono tutto il territorio di studio. I frutteti, soprattutto pescheti, insistono maggiormente a Sud/Sud-est dell'ambito, comprendente la bassa padovana e il veronese, anche se la loro superficie è in progressiva diminuzione.

La presenza di prati stabili è limitata a pochi appezzamenti situati nel quadrante nord occidentale, mentre si rilevano aree boscate alle pendici dei Colli Euganei, riconducibili principalmente a querceti e castagneti dei suoli magmatici.

Nelle aree localizzate in vicinanza dei centri urbani, vi è la presenza di zone agricole eterogenee, in cui trova posto un mosaico di piccoli appezzamenti con diverse colture annuali e permanenti. Inoltre ricadono nella stessa tipologia di zone anche aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di formazioni vegetali naturali. Le campagne sono oramai prive di alberi e siepi campestri a causa delle pratiche agricole intensive, mentre si trova una vegetazione ripariale costituita essenzialmente da saliceti, lungo i corsi d'acqua principali.

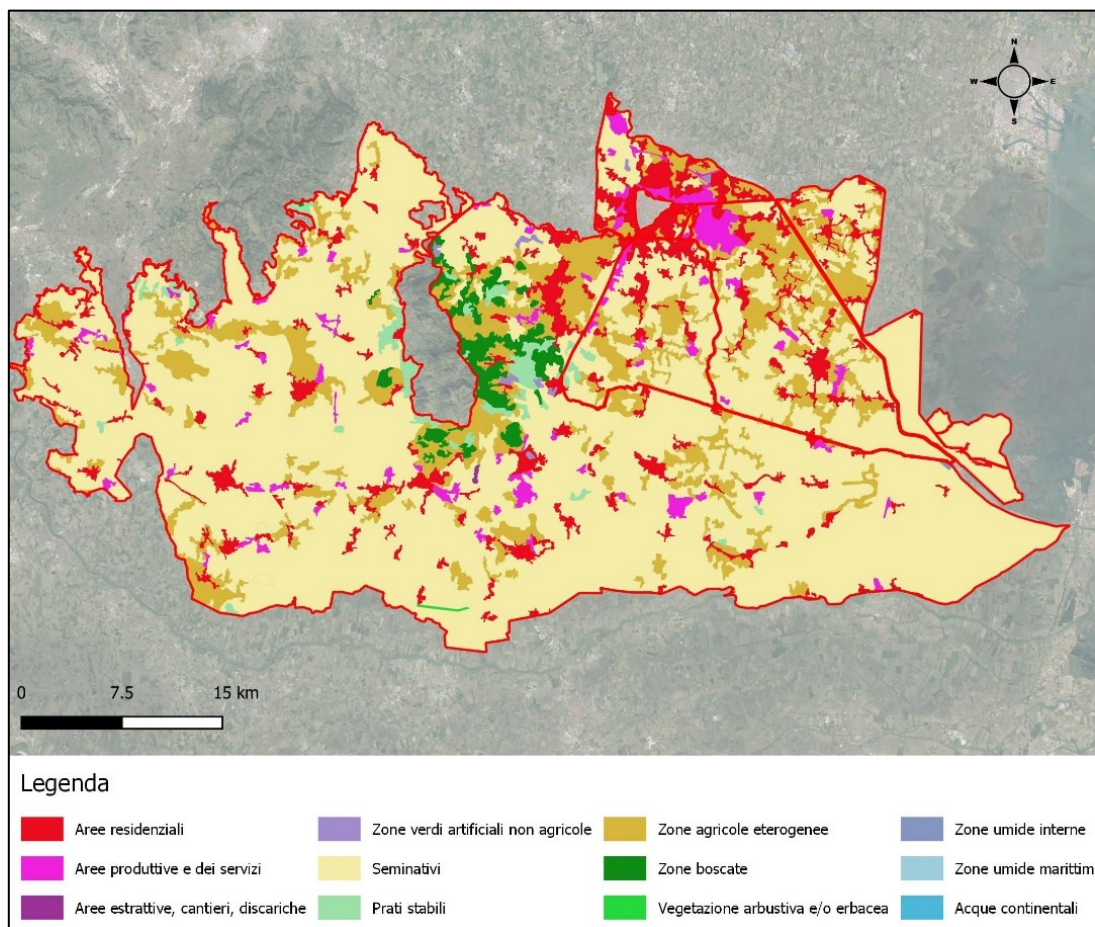


Figura 2: Carta della copertura del suolo per l'area di studio, rielaborata a partire da Corine Land Cover 2018

2.4. Inquadramento idrografico

La rete idrografica presente nell'area di studio vede tre corsi d'acqua principali: il Brenta, l'Adige e il Bacchiglione, a cui si affianca un'estesa rete secondaria (*figura 3*).

L'Adige, che interessa l'area di studio, lambendone il confine meridionale, nasce in alta Val Venosta, presso Passo Resia e dopo 410 Km sfocia nel Mar Adriatico, tra i comuni di Chioggia (VE) e Rosolina (RO), rendendosi il secondo fiume italiano per lunghezza. Il suo corso interessa le provincie Autonome di Bolzano e Trento, le provincie di Verona, passando per il capoluogo, Padova, Rovigo e Venezia, lungo il quale raccoglie le acque di numerosi tributari tra cui l'Isarco, il Noce, l'Avisio e l'Alpone, drenando un territorio di 12.000 Km². Il fiume scorre dapprima in un tratto vallivo in Trentino, giungendo fino al confine con la Provincia di Verona, dove, dopo aver raccolto le acque del sottobacino della Lessinia, si chiude il bacino tributario e inizia il tratto pensile (Peripoli, 2008).

Il Brenta, che scorre più a Nord con un tracciato di 174 Km, rappresenta, assieme all'Adige e al Piave l'ossatura idraulica del Nord-Est italiano e nasce come emissario del Lago di Caldonazzo, in Trentino. Attraversa la fascia prealpina, quindi la Valsugana, per giungere in pianura a Bassano del Grappa (VI), dopo aver ricevuto le acque del principale tributario: il torrente Cismon e di alcune sorgenti carsiche poste sul fondovalle, tra cui si ricordano quelle di Oliero.

Nella fascia pedemontana e di alta pianura alimenta inoltre numerosi canali di irrigazione sia in destra che in sinistra idrografica. Abbandonata Padova, il fiume scorre in un alveo artificiale per sfociare poi nel Mar Adriatico nei pressi di Brondolo di Chioggia (VE), poco dopo aver ricevuto le acque del fiume Bacchiglione.

Quest'ultimo corso d'acqua scorre interamente in Veneto per una lunghezza di 119 Km, toccando le provincie di Vicenza, Padova e Venezia e drenando un'area di 1400 Km².

Il Bacchiglione, che attraversa in direzione Nord-Ovest/Sud-Est l'area di studio, costituisce il collettore di un sistema di corsi d'acqua prevalentemente a carattere torrentizio della zona montana e pedemontana vicentina. Infatti nasce dall'unione di due sistemi idrografici: il sottobacino Leogra-Timonchio e alcune risorgive.

I due sistemi confluiscono nei pressi di Dueville (VI) dando origine al fiume Bacchiglione propriamente detto (Rossi et al., 2004).

Dopo aver ricevuto le portate di diversi affluenti, il fiume prosegue con andamento rettilineo verso la confluenza con il Brenta.

L'area di studio si trova in una zona vocata dal punto di vista delle produzioni agricole, che abbisognano di acqua irrigua, distribuita da numerosi corsi d'acqua secondari, tra cui i fiumi Fratta-Gorzone, Guà-Frassine e una rete di canali e scoli gestita dai Consorzi di bonifica di primo grado, che tuttavia non è in grado da sola di soddisfare le esigenze irrigue. L'ambito è interessato infatti dal canale Lessinio-Euganeo-Berico (L.E.B.), principale infrastruttura del sistema irriguo, gestito dall'omonimo Consorzio di bonifica di secondo grado, il cui comprensorio comprende l'area di studio, che ha la funzione di prelevare le acque del fiume Adige a Zevio (VR), adducendole fino a Cologna Veneta per mezzo di un canale artificiale a cielo aperto, che prende il nome di Canale Adige Guà. Il canale L.E.B arriva al Bacchiglione per mezzo di una condotta, che in questo secondo tratto è denominato "canale Pedemontano Beriuganeo Guà-Bacchiglione". Il sistema distribuisce l'acqua irrigua in tutta la sinistra Adige e attraverso corpi idrici esistenti, alimenta i territori della bassa padovana e le aree di bonifica della pianura tra Adige e Bacchiglione, rifornendo altresì il nodo idraulico di Padova e le aree agricole del Veneziano fino a Chioggia (VE).

L'opera, oltre alle funzioni irrigua e di vivificazione, contribuisce anche alla sicurezza idraulica dei territori.

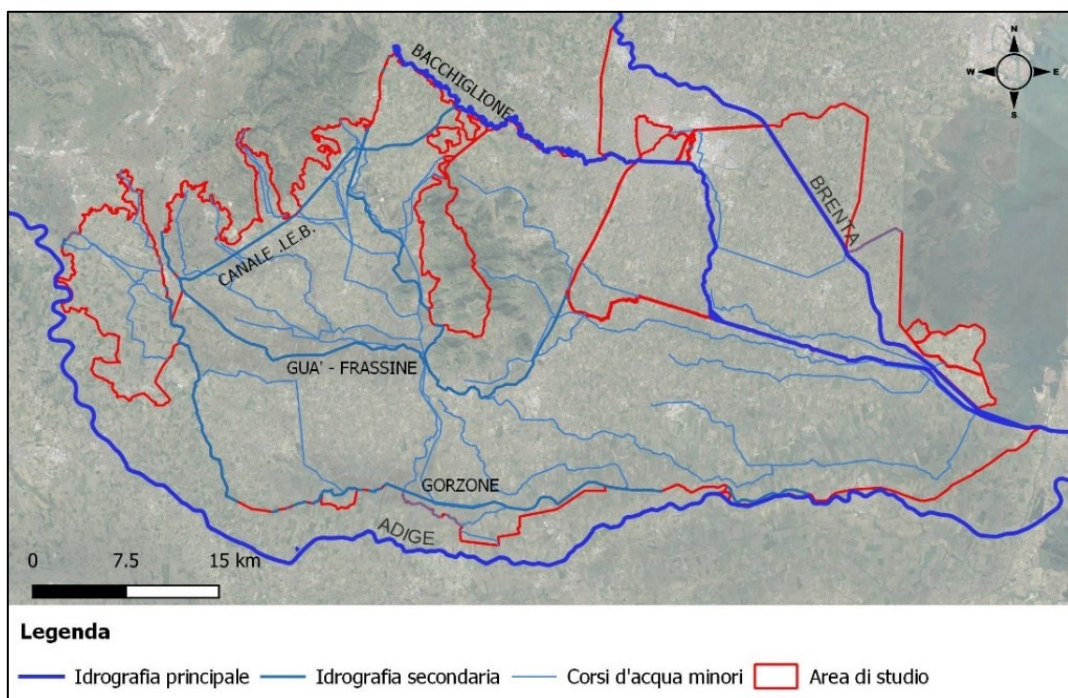


Figura 3: Mappa dell'idrografia principale e secondaria, che interessa l'area di studio.

2.5. Caratteristiche climatiche

Il Veneto presenta caratteristiche climatiche peculiari, che risultano dall'azione combinata di differenti fattori. La regione si colloca alle medie latitudini, in una posizione geografica di transizione tra il bacino mediterraneo, dove domina l'influsso di anticicloni subtropicali e del mar Mediterraneo e l'area continentale centro europea, in cui si ha influenza di grandi correnti occidentali e dell'Oceano Atlantico, da cui derivano caratteristici effetti stagionali.

A mesoscala l'areale appartiene al bacino padano-veneto, confinato a nord dalla catena alpina e a sud dagli Appennini, con un'apertura predominante verso est e la presenza di una estesa fascia adriatica nel settore orientale. Proprio le Alpi hanno un ruolo sulla regolazione della circolazione atmosferica, alterandola; infatti intercettano l'umidità di circolazione, portando a fenomeni di intensificazioni orografiche sui versanti sopravvento ed una attenuazione delle precipitazioni sottovento.

Le aree montane del Veneto risultano mediamente le più piovose, soprattutto nel periodo autunnale, in occasione di forti flussi perturbati di provenienza meridionale.

In inverno, invece, la catena alpina costituisce una barriera all'entrata di perturbazioni provenienti da Nord, per i versanti sud e la pianura limitrofa, che risultando sottovento, registrano assenza di precipitazioni per lunghi periodi e tempo stabile. Ad ovest invece si ha la presenza del Lago di Garda che assieme al Mar Adriatico costituisce una grande massa di acque, che contribuisce a mitigare le temperature smorzando gli estremi, con aree litoranee che presentano temperature medie più elevate in inverno e più basse in estate. Inoltre è responsabile della genesi di brezze e della cessione di umidità, utile alla formazione di fenomeni temporaleschi.

L'effetto mitigativo delle acque marine è comunque limitato, in quanto si è in presenza di un mare interno, stretto e con profondità modesta e per l'incursione di bora fredda e asciutta da Nord-Est (Barbi et al., 2018).

Gioca un ruolo significativo sugli effetti del clima anche la variabilità spaziale della copertura e dell'uso del suolo, che porta alla genesi di diversi microclimi, da cui dipendono la qualità e la quantità delle produzioni agricole.

Tali fattori determinanti per il clima del Veneto permettono di distinguere tre mesoclimi: alpino interno, prealpino e di pianura.

In particolare il mesoclima di pianura, che contraddistingue tutta l'area pianeggiante del Veneto fino alla zona pedemontana, compresi i Colli Euganei, i Monti Berici, l'area litoranea e quindi l'area di studio, si caratterizza per un clima temperato sub-continentale, con inverni relativamente rigidi ed estati calde. Le temperature medie annue registrano valori di 13°C nelle zone interne e 14°C nel litorale (*figura 4*) e un'escursione termica tra estate ed inverno che arriva a 20°C nell'areale di pianura.

In presenza di anticiclone la massa d'aria che sovrasta la pianura veneta porta a condizioni di elevata stabilità o di inversione termica al suolo che si traducono in fenomeni a spiccata stagionalità quali foschie, nebbie, gelate, afa e accumulo di inquinanti in vicinanza del suolo.

Le temperature medie più elevate, registrate nel periodo 1993-2021 da *ARPAV*, si localizzano nell'area pedemontana orientale e nei pressi del Lago di Garda (+13,5/14°C), nella laguna e nell'area costiera meridionale (+13,8/14,2°C) e nella pianura interna centro meridionale (+13,5/13,7°C).

A scala stagionale, il periodo invernale vede i valori mediamente più bassi nella pianura occidentale (+3,5°C), sulle zone di entroterra della pianura orientale (+3,6°C) e sulle aree interne della pianura centro-meridionale, mentre valori meno rigidi si osservano lungo la fascia costiera (+4,2/4,8 °C), nell'area dei Colli (+4,0/4,2 °C) e su pedemontana orientale e Lago di Garda (+ 4,0/4,8 °C). Considerando le temperature minime nel medesimo periodo, si registra una stessa distribuzione con l'area costiera, la pedemontana orientale, il Lago di Garda ed i Colli che restano le aree con valori mediamente più elevati, attorno o superiori ad 1 °C; il resto della pianura interna si presenta invece più fredda con temperature oscillanti su valori da positivi a negativi prossimi agli 0 °C.

Il periodo estivo vede una differente distribuzione rispetto all'inverno, con le temperature maggiori nell'intera pianura sud-occidentale (+23,6/24°C), seguita dall'area costiera (+23,4/23,7°C), dalla pianura centrale (+23/23,4°C), mentre è più fresco l'ambito orientale. Allo stesso modo, prendendo in esame le temperature massime, si registrano valori di oltre 30 °C sulla pianura sudoccidentale, tra 29 e 30 °C sulla pianura centro-orientale e tra 28 e 29 °C sulla costa, mitigata dalla presenza del mare.

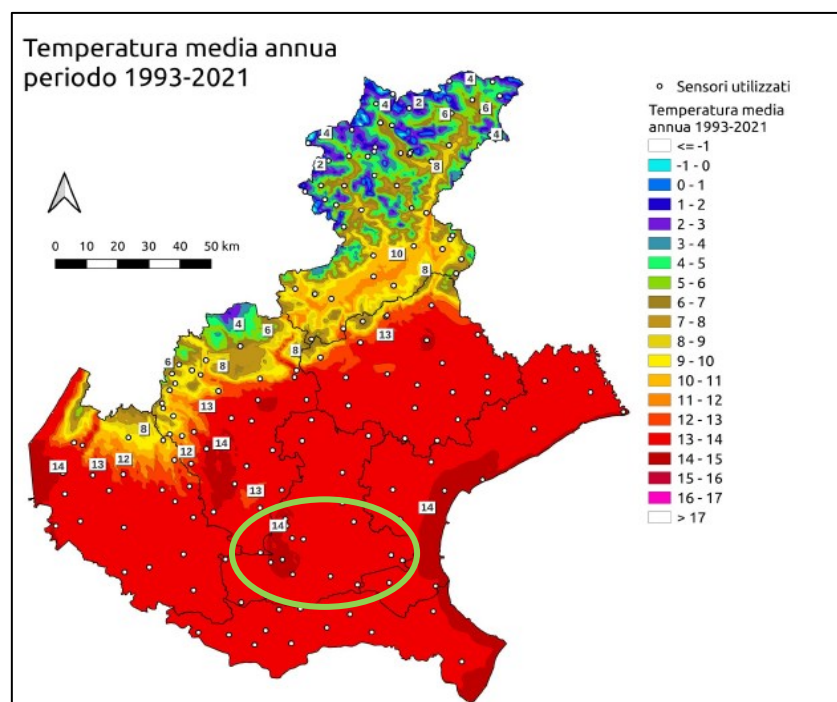


Figura 4: Temperatura media annua sul Veneto valutata sul periodo 1993-2021, ottenuta da stazioni automatiche della rete ARPAV. (Fonte ARPAV, 2022). In verde viene evidenziata la zona in cui ricade l'area di studio.

Le precipitazioni medie annue cumulate della pianura veneta riferite al periodo 1993-2021, presentano un andamento crescente da Sud verso Nord, passando dai 650 mm del basso polesine, fino ai 1100 mm della zona pedemontana (*figura 5*). Presentano un regime equinoziale, che vede un massimo assoluto in autunno e uno relativo in primavera.

A livello stagionale l'inverno vede il minor apporto pluviometrico medio, che oscilla in pianura tra i 120 e 130 mm della provincia di Rovigo e punte di oltre 400 mm nella fascia prealpina.

Il trimestre primaverile, caratterizzato dal ritorno delle perturbazioni atlantiche, registra un aumento generalizzato delle precipitazioni, ma focalizzandosi sull'ambito di pianura, i maggiori quantitativi si verificano nella fascia pedemontana orientale con 570 mm, che decrescono fino ai 160 mm nella parte più meridionale della regione.

Nel periodo estivo le precipitazioni sono originate perlopiù da temporali di origine termoconvettiva, che talvolta sono associati a fenomeni di alta intensità, accompagnati da grandine e trombe d'aria. In particolare la vicinanza dell'alta pianura orientale ai rilievi dove si originano questi fenomeni, permette di registrare quantitativi del tutto simili alla

primavera. Diminuiscono, seppur leggermente, gli apporti pluviometrici nella bassa pianura con minimi di 150 mm.

L'autunno, caratterizzato dai valori massimi cumulati a livello annuale, registra precipitazioni oscillanti tra un minimo di 210 mm del Polesine, ad un massimo di 370 mm della zona pedemontana orientale

Un altro fattore importante che caratterizza il clima è il bilancio idroclimatico, che è definito come la differenza tra le precipitazioni e l'evapotraspirazione potenziale, entrambe espresse in millimetri. L'evapotraspirazione potenziale (ETP), focus di questa tesi, misura invece la quantità di acqua dispersa in atmosfera, per processi evaporativi dal suolo e traspirativi di una coltura di riferimento.

Secondo uno studio dell'*Agenzia per la Protezione ambientale del Veneto*, l'andamento del bilancio idroclimatico primaverile – estivo, analizzato nel periodo 1961-2004 (ARPAV, 2015) registra un lieve calo, soprattutto in pianura, con conseguente aumento maggiore dell'evapotraspirazione potenziale, rispetto all'incremento delle precipitazioni, determinando la crescita del deficit idrico.

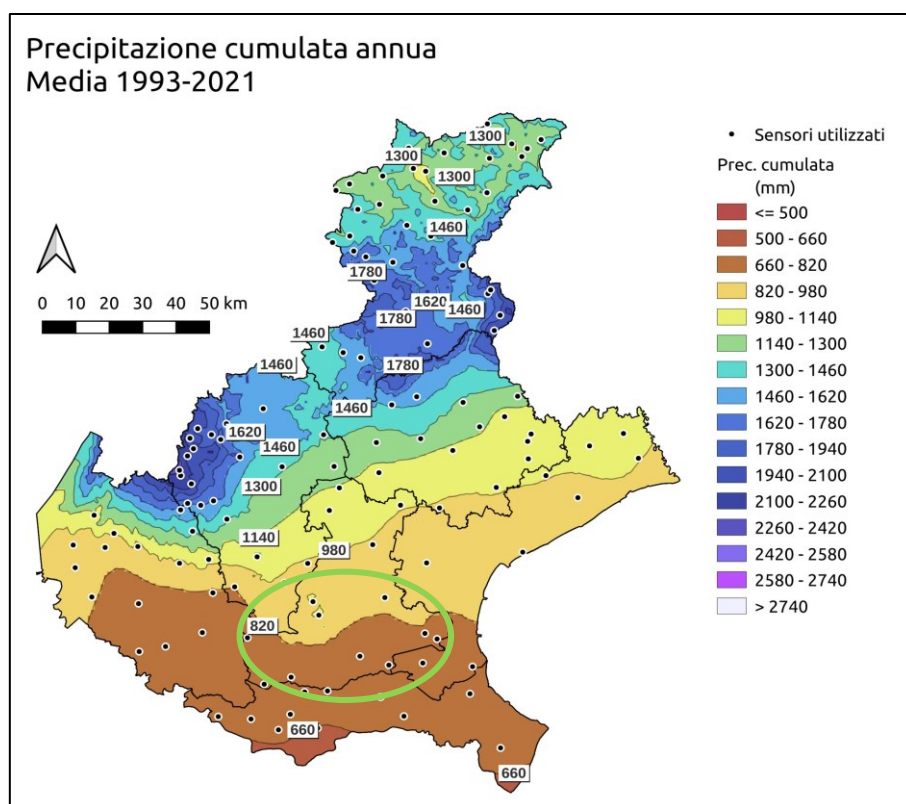


Figura 5: precipitazione cumulata media annua sul veneto valutata sul periodo 1993-2021. (Fonte ARPAV 2022). In verde è evidenziata la zona in cui ricade l'area di studio.

3. MATERIALI E DATI

3.1. Modelli climatici

I modelli climatici sono lo strumento principale per lo studio della risposta del sistema climatico alle forzanti naturali e antropiche, che permette di fare proiezioni del clima futuro nel prossimo secolo e oltre. A tal proposito il *World Meteorological Organization (WMO)* definisce le proiezioni climatiche come la probabilità con cui determinate variazioni del clima possono verificarsi nei prossimi decenni, in relazione a possibili evoluzioni dello sviluppo socio-economico globale.

Il clima, in particolare, può essere considerato come un sistema di componenti che interagiscono reciprocamente e che sono coinvolte in un'ampia gamma di processi fisici a scale temporali e spaziali differenti, che vengono descritti da leggi chimiche e fisiche. Questo sistema coinvolge quindi l'atmosfera, l'idrosfera, la criosfera, la litosfera e la biosfera.

I modelli del clima sono quindi basati su algoritmi fisico-matematici, che descrivono le interazioni tra le diverse componenti del sistema climatico, permettendo di simulare l'evoluzione futura, partendo dal clima passato e dividendo la superficie e l'atmosfera della Terra in una griglia tridimensionale che definisce box tra loro interagenti, su cui si basano le simulazioni (*figura 6*).

Non si limitano, inoltre, alla sola descrizione dello strato inferiore dell'atmosfera, dove avvengono i processi meteorologici, ma simulano anche le correnti oceaniche e in parte le interazioni con il manto nevoso, i ghiacci e la vegetazione.

Una caratteristica fondamentale di questi modelli è quindi la risoluzione spaziale, che indica l'ampiezza della griglia, a cui si affianca una risoluzione temporale chiamata time step, che può essere espressa in minuti, ore o a scala giornaliera e annuale.

Lo sviluppo dei modelli climatici coinvolge diverse fasi, che possono essere così riassunte: le leggi del sistema climatico vengono scalate in una simulazione numerica, le caratteristiche ed i processi che si verificano in ciascun box vengono catalogati e per ognuno di essi vengono definite le equazioni matematiche che rappresentano i processi fisici. Le equazioni sono convertite in codice numerico la cui risoluzione è affidata a computer di calcolo, che simulano le variabili incognite, utilizzando specifiche condizioni al contorno.

I modelli climatici possono quindi essere definiti come rappresentazioni basate sulla teoria, che caratterizzano o simulano caratteristiche e meccanismi essenziali, allo scopo di esplorare come funziona il clima della Terra (Edwards, 2010).

Essendo rappresentazioni della realtà, questi modelli sono caratterizzati da un grado di approssimazione, da tenere in considerazione nella proiezione degli scenari futuri (Rizzardi, 2022).

Data la molteplicità di componenti, la complessità dei processi, le diverse scale temporali e spaziali e l'aumento della capacità di calcolo, sono nati diversi approcci modellistici, che possono essere divisi essenzialmente in:

- Modelli climatici globali (GCM) che agiscono su larga scala;
- Modelli climatici regionali (RCM), caratterizzati da risoluzioni maggiori e domini di area limitati;
- Modelli climatici a convezione permessa (CPM), che agiscono su scale chilometriche.



Figura 6: Rappresentazione della griglia tridimensionale del globo terrestre su cui si basa la modellazione climatica

3.1.1. Modelli climatici globali GCM

I GCM sono lo strumento principale per la comprensione di come il clima potrebbe evolversi in futuro e forniscono previsioni affidabili a risoluzioni tra i 100 e i 600 Km, comprendendo vaste aree, anche con caratteristiche morfologiche e orografiche differenti. Questa tipologia di modelli a scala globale deriva da esperimenti di previsione meteorologica numerica computerizzata e sono costituiti da un “nucleo dinamico”, che simula il movimento dei fluidi su larga scala, utilizzando le equazioni primitive e un “modello fisico”, che simula altri processi fisici significativi come il trasferimento radiativo, la formazione di nuvole e la convezione (Edwards, 2010).

Un esempio di tali modelli è rappresentato dal CMCC-CM, modello globale utilizzato come condizioni al contorno per fornire le proiezioni utilizzate in questo lavoro di tesi. Data la differente scala, molto più piccola rispetto alle griglie del modello, a cui avvengono, alcuni processi vengono rappresentati indirettamente attraverso parametrizzazioni o funzioni e costanti matematiche, che catturano gli effetti su larga scala, senza modellarli direttamente. Sebbene i GCM siano uno strumento avanzato e sofisticato per simulare il sistema climatico globale, presentano problematiche derivanti dalla loro risoluzione spaziale grossolana.

3.1.2. Modelli climatici regionali RCM

Per aggiungere ulteriori dettagli alle simulazioni del clima globale o studiare processi climatici con maggior accuratezza, vengono introdotti i *Regional Climate Model (RCM)*, che coprono un'area limitata da subcontinentale a subnazionale, sviluppati attraverso tecniche di downscaling statistico o dinamico.

Il primo si basa su solide relazioni statistiche tra variabili climatiche su larga scala e quelle utilizzate per descrivere le caratteristiche climatiche a scala locale.

Il downscaling dinamico o nidificazione, molto più utilizzato, consiste in una tecnica per cui la modellizzazione climatica, avviene in un'area limitata su un dominio di interesse, guidata da condizioni al contorno iniziali, laterali e superficiali fornite da modelli climatici su larga scala (Lucas-Picher et al., 2021) .

L'insieme base delle condizioni al contorno comprende la temperatura, l'umidità e la circolazione (venti), nonché la temperatura della superficie del mare e il ghiaccio

marino. Un trattamento accurato di queste condizioni è una questione centrale nella modellizzazione regionale ed è anche una delle cause di errori delle proiezioni.

Lo scopo di quest'ultimi modelli è quindi quello di simulare processi meteorologici su scala fine e di descrivere in maniera migliorata le forzanti superficiali scarsamente rappresentate nei modelli globali GCM a risoluzione grossolana.

Un punto di riferimento per i RCM è rappresentato dal progetto CORDEX (*COordinated Regional Downscaling Experiment*) istituito nel 2009 e promosso dal *World Climate Research Programme* (WRCP), che ha la finalità di produrre in maniera coordinata, proiezioni climatiche a scala regionale per tutte le regioni terrestri del mondo, basate su molteplici modelli climatici a partire dal Couple Model Intercomparison Project (CMIP 5), una serie di esperimenti coordinati multi-modello, per studiare i meccanismi responsabili della variabilità e del cambiamento climatico.

A tal proposito il globo terrestre viene suddiviso in 14 domini, regioni in cui viene realizzato un ridimensionamento regionale; l'area di studio risulta compresa all'interno Regione 4 - Europe, che di fatto prende il nome di EURO-CORDEX, ramo europeo dell'iniziativa CORDEX.

Sulla delimitazione delle regioni effettuata da questo progetto globale, si basano molti altri modelli a scala regionale, quale ad esempio il COSMO-CLM, un modello climatico regionale RCM sviluppato congiuntamente dal Consortium for Small-scale Modeling (COSMO) e dalla Climate Limited-area Modeling Community (CLM), progettato per simulazioni climatiche con risoluzioni da 20-200 Km a 2-20 Km.

Per l'Italia questo costituisce il downscaling intermedio per le proiezioni ad altissima risoluzione, utilizzate in questo lavoro di tesi.

3.1.3. Modelli climatici a convezione permessa (CPM)

I modelli climatici con spaziature maggiori di 10 Km vengono classificati come *Large-Scale Models (LSM)* e nonostante la loro elevata risoluzione spaziale, non permettono di rappresentare tutta una serie di processi che avvengono in atmosfera su piccola scala a livello locale, tra i quali vi è la convezione. Questa è responsabile della ridistribuzione di quantità significative di umidità, calore e massa su piccole scale temporali e spaziali; inoltre, può provocare gravi eventi precipitativi. La convezione, in particolare a

quelle risoluzioni degli LSM viene parametrizzata, divenendo una fonte di incertezza nei modelli a scala grossolana, in quanto costituisce una semplificazione del mondo reale (Kendon et al., 2021).

In questo ambito si inseriscono i modelli a convezione permessa (CPM), considerati un'estensione dei RCM, a scale in cui la convezione profonda può essere simulata esplicitamente e presentano una spaziatura sulla griglia orizzontale minore di 4 Km, che segna la separazione con i LSM, caratterizzati da minore accuratezza.

Infatti, analizzando le simulazioni a varie risoluzioni, Weisman et al. (1997) hanno dimostrato che una simulazione di 4 km riproduceva sufficientemente la struttura alla mesoscala e l'evoluzione dei sistemi convettivi. Infatti viene generalmente accettata come il limite per il quale la convezione profonda può essere risolta esplicitamente e per la quale la parametrizzazione della convezione profonda non è più richiesta.

I CPM stanno guadagnando negli anni ampia attenzione, rivelandosi strumenti promettenti per rappresentare le caratteristiche del clima a scala oraria e la loro sensibilità ai cambiamenti climatici. Inoltre il miglioramento della risoluzione spaziale, oltre a portare ad una rappresentazione più realistica, rispetto ai modelli regionali, dell'orografia e della superficie terrestre, consente la simulazione di feedback terra-atmosfera, necessari per amplificare altri eventi come la siccità e le ondate di caldo e incide sui flussi di energia, come il calore latente e sensibile e l'umidità del suolo (Raffa et al., 2023).

Sebbene le proiezioni climatiche da modelli a convezione permessa non abbiano come unico e principale scopo la valutazione della temperatura a 2 m, molti studi hanno riscontrato miglioramenti nella simulazione di questa variabile, divenendo quindi di interesse anche per gli obiettivi di lavoro. Questo valore aggiunto può essere messo in relazione all'orografia meglio risolta, che aumenta la variabilità spaziale della temperatura; in secondo luogo, con una più accurata rappresentazione delle nuvole e del bilancio radiativo, proprio grazie alla simulazione esplicita della convezione, il ciclo e l'intervallo diurno delle temperature migliorano, soprattutto nel periodo estivo (Lucas-Picher et al., 2021; Prein et al., 2015).

Infatti, diversi autori hanno evidenziato come la migliore performance dei modelli CPM, rispetto agli RCM, legata alla rappresentazione esplicita delle nubi convettive, porti a condizioni di cielo sereno, inducendo un aumento della radiazione solare superficiale simulata, che influisce sul dato di temperatura.

La simulazione climatica CPM presenta diversi approcci, tra cui quello più utilizzato sintetizzato in *figura 7*, risulta essere basato su una modellazione che si basa su domini di area limitata a spaziature sulla griglia orizzontale progressivamente decrescenti, con condizioni al contorno fornite da modello globale o da rianalisi, fino al raggiungimento di scale che consentono di risolvere la convezione (Prein et al., 2015).

In altre parole questi domini hanno lo scopo, attraverso tecniche di multi-nidificazione, di ingrandire una regione, fino a spaziature della griglia di circa 2 Km.

Un ulteriore aumento del dominio è stato visto diminuirebbe i discostamenti di temperatura, di particolare interesse per questo lavoro, ma nonostante questo, i modelli a convezione permessa risultano essere strumenti soddisfacenti per lo studio del cambiamento climatico.

Le caratteristiche di questi modelli rispondono quindi alle esigenze del presente lavoro, che si focalizza su un'area limitata, sia in termini di estensione spaziale che temporale, costituendo la fonte da cui acquisire le simulazioni e rendendone coerente l'uso.

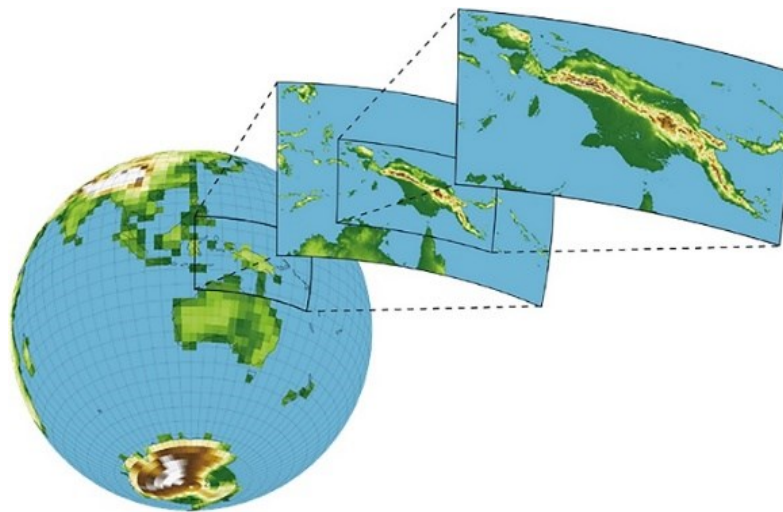


Figura 7: modellazione climatica ad area limitata per simulazioni che consentono la convezione (Tratto da Lucas-Picher et al., 2021)

3.2. Gli scenari di emissione

I modelli climatici hanno lo scopo di fornire delle proiezioni in relazione a diverse possibili condizioni: gli scenari di emissione. Questi sono rappresentazioni plausibili dell'andamento futuro di emissione in atmosfera di gas climalteranti (c.d. gas serra) e aerosol, che influenzano il bilancio delle radiazioni della Terra.

I fattori che guidano le emissioni sono strettamente dipendenti dallo sviluppo socio-economico, tecnologico e dalle decisioni prese sul piano politico a livello internazionale. In letteratura si sono susseguite diverse famiglie di scenari emissivi, tra cui una delle più recenti è costituita dai Representative Concentration Pathways (RCP), i quali sono rappresentativi di varie politiche climatiche, caratterizzate ognuna da un obiettivo climatico raggiungibile al 2100, collegato ad un andamento delle emissioni umane. Ciascun RCP fornisce quindi, solo uno dei molti scenari possibili che porterebbero alle specifiche caratteristiche di forzatura radiativa.

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), nel suo Quinto rapporto di valutazione (AR5), individua quattro diversi scenari RCP, ognuno dei quali caratterizzato da un forzante radiativo che indica, in Watt per metro quadro, l'energia aggiuntiva assorbita dal sistema Terra alla fine del XXI secolo, a causa dell'aumento dell'effetto serra, rispetto al periodo preindustriale (1750).

Più nello specifico il forzante radiativo viene definito dal *National Centre of Climate Services svizzero (NCCS)* come un "cambiamento causato da un fattore nel flusso di energia ed è misurato in corrispondenza della tropopausa o nel limite superiore dell'atmosfera".

I quattro RCP, in *tabella 1 e figura 8*, includono uno scenario che prevede l'attuazione di forti politiche di mitigazione (RCP2.6) e presenta un picco di emissioni all'inizio del secolo, per poi diminuire rapidamente, portando ad un livello di forzante basso, a cui si affiancano due scenari di stabilizzazione: RCP4.5 e RCP6, accomunati da misure di riduzione via via meno stringenti. Il primo dei due scenari prevede un picco di emissioni di gas serra entro il 2040 e la successiva decrescita, scendendo entro il 2070 al di sotto degli attuali livelli; la concentrazione atmosferica invece si stabilizza entro fine secolo, a circa il doppio dei livelli preindustriali. L'RCP6, raggiunge un picco emissivo nel 2080, diminuendo marcatamente fino al 2100. Infine RCP8.5, definito anche business as usual, rappresenta lo scenario di maggior criticità, in quanto presenta un livello di emissione

costantemente in aumento fino a fine secolo, in conseguenza della mancata attuazione di misure di mitigazione atte a ridurre la produzione di gas serra.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi è stato usato solo lo scenario RCP4.5, allo scopo di completare le serie di temperatura simulate con il periodo 2006-2010, non presente nella proiezione "historical" del modello. Infatti, l'andamento delle emissioni di CO₂ (figura 8), mostra come nei primi anni di sua applicazione nella proiezione climatica, gli effetti siano blandi, potendo quindi assimilare i valori simulati al trend della serie storica, non interessata da politiche di riduzione delle emissioni.

Nome	Scenario	Forzante radiativa (W/m ²)	Concentrazione (ppm CO ₂ eq)
RCP2.6	Massicce misure di mitigazione	2,6	490
RCP4.5	Stabilizzazione con riduzioni consistenti	4,5	650
RCP6.0	Stabilizzazione con riduzioni blande	6,0	850
RCP8.5	Assenza di misure di mitigazione	8,5	>1370

Tabella 1: Caratteristiche principali dei quattro scenari RCP. Tratto da Moss et. al, 2010

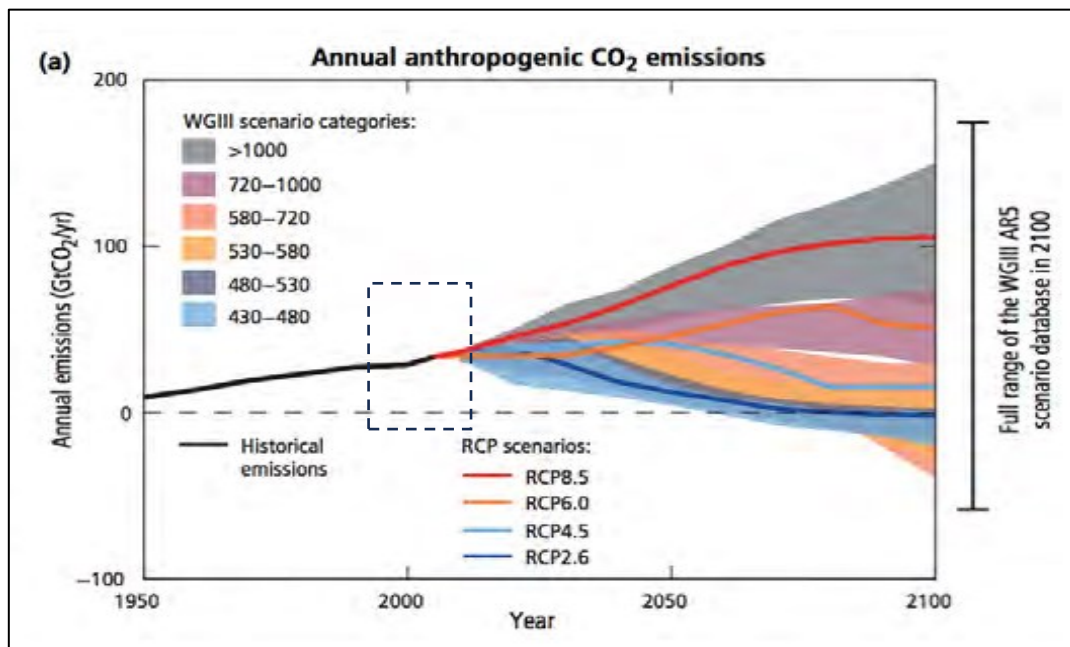


Figura 8: Andamento delle emissioni di anidride carbonica necessarie per raggiungere il valore di forzante radiativo. Tratto da IPCC Rapporto AR5. Viene evidenziato il periodo oggetto del presente lavoro.

3.3. Dati

3.3.1. *Temperature osservate*

Nel territorio della Regione Veneto è attiva una rete di stazioni di telemisura per la meteorologia, l'agrometeorologia e l'idrometria, la cui gestione attuale è affidata all'*Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPAV)*. La rete è costituita da 203 stazioni che operano in modalità automatica, effettuando la misurazione dei principali parametri in continuo ed è composta da: 78 stazioni agrometeorologiche, 85 stazioni meteorologiche, 16 stazioni ripetitrici con funzione di collegamento con la rete e 2 centrali di acquisizione dati, di cui quella principale, situata a Teolo, presso il Centro Meteorologico e la seconda localizzata a Belluno. Ogni stazione agro-idro meteorologica è dotata di uno o più sensori, con lo scopo di misurare una specifica variabile.

Nell'ambito del presente studio sono stati acquisiti dal *Dipartimento Sicurezza per il Territorio – Unità Organizzativa Meteorologia e climatologia dell'ARPAV*, i valori di temperatura dell'aria rilevata a 2 m, registrati dalla rete di misura per tutta la regione.

I dati sono stati forniti su supporto informatico, per periodi variabili compresi tra il 1989 e il 2022 ad un intervallo temporale di 15 minuti come dato istantaneo, espresso in gradi Celsius (°C).

La selezione delle stazioni da utilizzare nel presente lavoro ha visto la considerazione, quale primo criterio, della localizzazione; infatti è stata adottata quale zona di riferimento l'area di studio, come descritta in precedenza, a cui è stata aggiunta un'area buffer esterna di 5 Km attorno al perimetro, così da poter comprendere anche quelle strumentazioni che, pur ricadendo fisicamente all'esterno, possano comunque essere rappresentative del clima e contribuire ad irrobustire la base dati per questo lavoro.

È stato quindi necessario l'utilizzo di funzioni di geoprocessing e analisi spaziale, attraverso software GIS.

La copertura temporale variabile delle stazioni, rende necessario definire un periodo comune in cui sia garantita la presenza di dati. All'individuazione spaziale è quindi seguita un'analisi esplorativa e speditiva, che ha permesso di scegliere come riferimento, l'intervallo 1995-2010, il quale è emerso essere prevalentemente omogeneo e costituisce così il periodo storico osservato.

Inoltre è stato considerato come ulteriore criterio, la parallela disponibilità di serie termometriche fornite da modello climatico, attuando una verifica preliminare della copertura delle proiezioni simulate.

Il risultato di questa selezione ha permesso di identificare la base dati osservata che risulta composta dalle serie a scala sub oraria di temperatura istantanea, relative a 24 stazioni agrometeorologiche, dislocate nelle provincie di Padova, Vicenza, Venezia e Rovigo, coprendo quote comprese tra -3 m.s.l.m. della stazione di Cavarzere (VE) e 465 m.s.l.m. dello strumento posto presso Monte grande - Teolo (PD).

Di seguito si riporta la distribuzione spaziale in *figura 9* e le principali informazioni identificative in *tabella 2* delle stazioni, che risultano poste tutte in aree agricole e sub urbane, in accordo con gli obiettivi del presente lavoro.

Per ridurre il numero di valori e allinearsi così all'output del modello climatico, le serie a scala suboraria di 15 minuti, sono state successivamente aggregate ad intervalli orari, su cui sono state svolte indagini esplorative che verranno meglio descritte nel *capitolo 4.2*.

I dati acquisiti costituiscono la linea di base su cui determinare gli errori statistico-empirici prodotti dai modelli nelle simulazioni delle variabili climatiche.

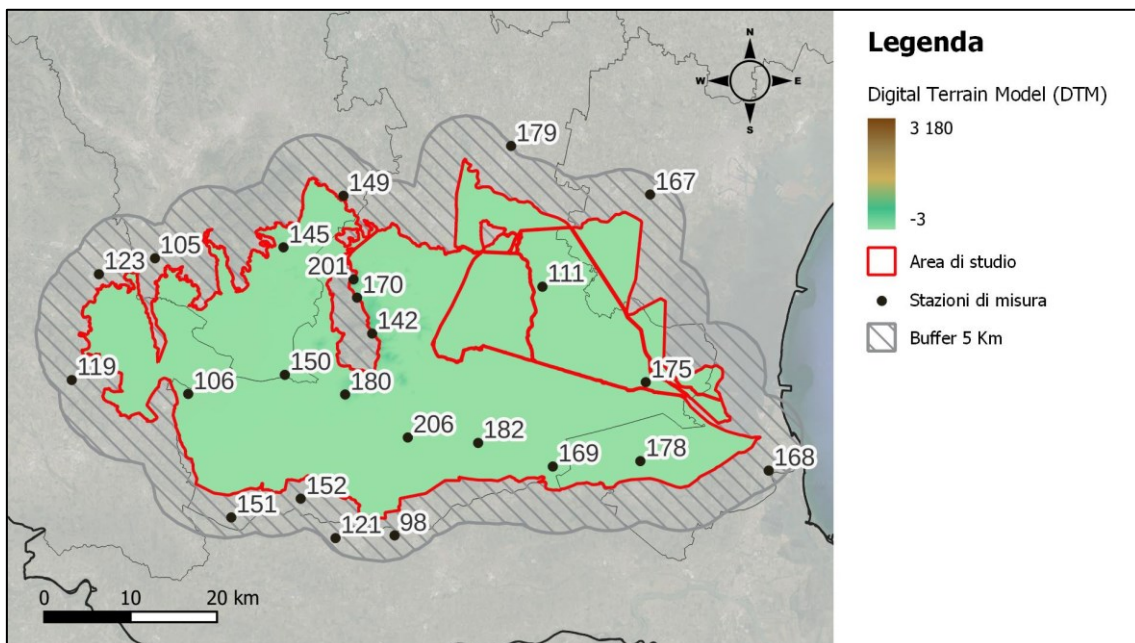


Figura 9: localizzazione delle 24 stazioni della rete di misura ARPAV, utilizzate nello studio

ID	Denominazione	Latitudine (x)	Longitudine (y)	Quota (m)	Provincia	Comune
98	Concadirame	11.72081886	45.09313663	6	RO	ROVIGO
105	Lonigo	11.37964132	45.39045584	29	VI	LONIGO
106	Montagnana	11.4227919	45.24776886	12	PD	MONTAGNANA
111	Legnaro	11.95217201	45.34734845	7	PD	LEGNARO
119	Roverchiara	11.25118706	45.2658043	17	VR	ROVERCHIARA
121	Lusia	11.63364487	45.09241907	6	RO	LUSIA
123	Arcole	11.29582046	45.37550277	27	VR	ARCOLE
142	Faedo	11.69771962	45.30471743	250	PD	CINTO EUGANEO
145	Barbarano Vicentino	11.57053751	45.39775173	16	VI	BARBARANO MOSSANO
149	Montegalda	11.66198536	45.44957583	22	VI	MONTEGALDA
150	Noventa Vicentina	11.56657613	45.2645703	13	VI	NOVENTA VICENTINA
151	Masi	11.48088305	45.11740196	9	PD	MASI
152	Balduina	11.58415552	45.13472648	7	PD	SANT'URBANO
167	Mira	12.1169216	45.43934709	3	VE	MIRA
168	Chioggia, Sant'Anna	12.27596996	45.14632401	0	VE	CHIOGGIA
169	Agna	11.95775646	45.15926189	1	PD	AGNA
170	Teolo	11.67713457	45.34272761	155	PD	TEOLO
175	Codevigo	12.09970856	45.24367259	0	PD	CODEVIGO
178	Cavarzere	12.08720348	45.16150338	-2	VE	CAVARZERE
179	Campodarsego	11.91336346	45.49551578	16	PD	CAMPODARSEGO
180	Este - Calaone	11.65477423	45.24201135	104	PD	ESTE
182	Tribano	11.8487995	45.18668992	3	PD	TRIBANO
201	Monte Grande	11.67281842	45.36192058	465	PD	TEOLO
206	Ca' Oddo	11.74523723	45.1949266	4	PD	MONSELICE

Tabella 2: Elenco delle stazioni di misura della temperatura a 2 m, ricadenti entro un buffer di 5 Km dall'area di studio, utilizzate nello presente lavoro

3.3.2. Dati da modello climatico

Le proiezioni delle variabili climatiche sono il risultato di simulazioni prodotte da modelli, che assieme ai dati osservati, rappresentano la fonte di informazioni per comprendere le dinamiche e l'evoluzione del clima passato, presente e futuro. Tuttavia i modelli climatici, sono afflitti da discostamenti (bias) che non permettono l'uso diretto, soprattutto negli studi sull'impatto del cambiamento climatico (Ehret et al., 2012).

Proprio per superare questo problema vi è la necessità di poter disporre in parallelo ai dati osservati, di variabili climatiche simulate da modello, relative al clima passato, con lo scopo di attuare un'analisi degli errori, volta alla correzione di questi bias.

In questo lavoro è stata utilizzata VHR-PRO-IT (Very High Resolution PROjections for Italy), una proiezione climatica su scala convettiva che copre la penisola italiana e le aree limitrofe (*figura 10*), ottenuta nell'ambito del progetto *Highlander*.

Questo prodotto è stato ricavato riducendo dinamicamente la proiezione climatica *Italy8Km-CM*, derivata da RCM COSMO-CLM e guidata da modello globale CMCC-CM. Presenta una risoluzione spaziale orizzontale di 2,2 Km e temporale di 1 ora, fino a prima non disponibile per l'intero territorio nazionale. Fornisce quindi una simulazione per il clima storico nel periodo 1989-2005, guidata da composizione naturale e antropica osservata e per il periodo futuro (periodo 2006-2070), quest'ultima per gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5.

Le proiezioni climatiche su scala convettiva, ad accesso aperto, sono fornite dal *Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)*, che ne cura la diffusione, attraverso un punto di accesso unico costituito dalla Data Delivery System (DDS) (<https://dds.cmcc.it/>), a cui l'utente registrato può accedervi.

I dati di temperatura a 2 m simulati utilizzati in questo studio, hanno riguardato il periodo 1995-2005 a cui è stato aggiunto l'intervallo 2006-2010, appartenente allo scenario futuro RCP4.5, che in considerazione della vicinanza temporale, trovandosi nei primi anni di proiezione futura, vede l'azione di mitigazione propria della traiettoria, blanda ed è quindi possibile assimilarlo allo scenario storico.

I set di dati sono stati estratti dal punto di griglia del modello più vicino alle coordinate geografiche WGS84 (EPSG 4326) della stazione di misura considerata, con una risoluzione temporale di 1 ora. Questi sono stati forniti in NetCDF (*Network Common*

Data Form), un formato di dati autodescrittivi e indipendenti per archiviare variabili multidimensionali, impiegato soprattutto in ambito climatologico.

Le temperature sono ottenute in gradi Kelvin, rendendo necessaria una conversione nell'unità di misura comune con i dati osservati, i gradi Celsius (°C).

Si affiancheranno quindi alle serie di temperature istantanee misurate nei 24 punti stazione, i dati riferiti ad altrettanti set di dati simulati nei punti di griglia del modello climatico ad alta risoluzione, entrambi riferiti al periodo 1995-2010. Questo consente di confrontare per ogni stazione i dati osservati con le relative simulazioni per studiare i discostamenti esistenti e implementare un processo correttivo.

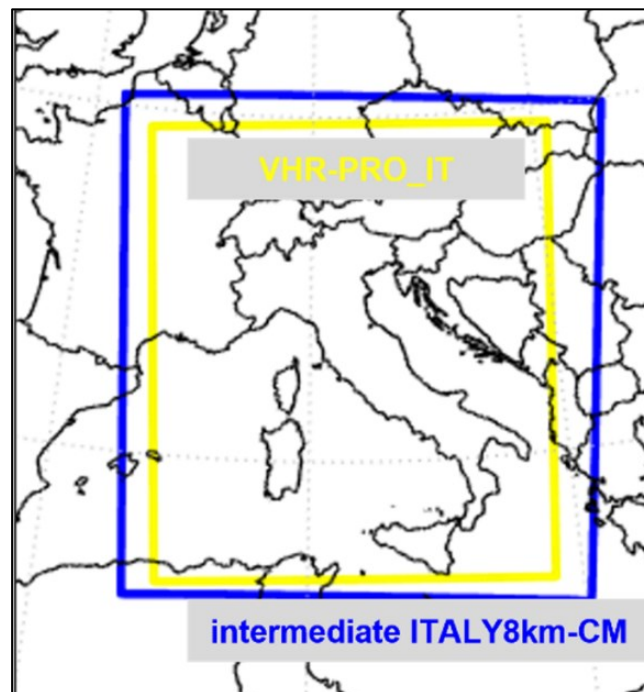


Figura 10: domini di calcolo della simulazione VHR-PRO_IT e del suo modello di guida. Tratto da Raffa et.al.,2023

Le simulazioni delle temperature sono state tratte da: Raffa, M., Adinolfi, M., Reder, A. et al. Very High Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. *Sci Data* 10, 238 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9>

4. METODOLOGIA

4.1. Estrazione delle serie di temperatura

Il dataset utilizzato in questo studio si compone di 24 serie di temperature istantanee misurate dalle stazioni agrometeorologiche, come prima individuate, costituenti una prima base dati osservata, a cui si affiancano pari dataset derivati da proiezioni climatiche. Per le temperature osservate, si è reso necessario verificare, per ogni stazione e come prima già introdotto, l'ampiezza temporale delle serie, da cui è emerso che per l'area di studio, viene garantita una copertura temporale giudicata omogenea nel periodo compreso tra il 1995 e il 2010, che costituirà il riferimento per le successive elaborazioni.

I dati di temperatura istantanea osservati, rilevati a 2 metri dal piano campagna e forniti dall'ARPAV, tuttavia presentano un intervallo di acquisizione di 15 minuti, differente dalle simulazioni da modello CPM, che invece sono disponibili a scansione di 1 ora.

Ne è nata la necessità di riorganizzare, per ciascuna stazione, il dataset in una nuova serie oraria, derivata dall'aggregazione effettuata attraverso la media dei quattro valori sub-orari.

Le serie di dati simulate da modello CPM, sono state ottenute nel punto di griglia prossimo alle singole coordinate della stazione di misura, per il periodo 1995-2010, ottenuto dall'assemblaggio della serie historical (1995-2005) e del periodo 2006-2010 afferente alla proiezione futura RCP4.5, che come già specificato nel *capitolo 3.2*, viene assimilata allo storico, per la sua vicinanza temporale e l'effetto ridotto delle politiche di mitigazione.

Gli output delle simulazioni del progetto Highlander, di cui fanno parte le proiezioni VHR-PRO IT, sono disponibili allo scaricamento, eseguito direttamente dal portale del CMCC, mediante interfaccia web e compilazione di query relativa alle serie di dati di interesse. Per ogni stazione sono state selezionate le coordinate secondo il sistema di riferimento WGS84 (EPSG 4326), proprie delle strumentazioni della rete di misura, il periodo temporale e la variabile di interesse: la temperatura a 2 m.

Prima di poter essere utilizzati, questi dataset hanno richiesto diverse elaborazioni, effettuate mediante il software di calcolo *Matlab* allo scopo di uniformare le serie:

- 1) Trasformazione dell'unità di tempo: i dati di temperatura sono forniti nel file originario, a scala oraria ed espressa come numero di secondi dal 01/01/1980, rendendo quindi indispensabile trasformare l'unità di tempo in giorno e ora a cui far corrispondere i valori di temperatura.
- 2) Trasformazione delle unità di misura: la temperatura simulata (T_{sim}) è stata fornita in gradi Kelvin, rendendo necessaria la trasformazione in gradi Celsius ($^{\circ}C$), secondo la seguente conversione:

$$T (^{\circ}C) = T(K) - 273,15 \quad (1)$$

Il risultato delle operazioni di estrazione ed organizzazione dei dati di temperatura, corrisponde quindi a 2 serie confrontabili, rispettivamente denominate:

- I) serie osservata ARPAV periodo 1995-2010 (Obs);
- II) serie CMCC historical periodo 1995-2010 (Sim).

4.2. Analisi qualitative delle temperature osservate

Le serie di temperature istantanee osservate ARPAV per ognuna delle stazioni, sono state analizzate al fine di verificare la loro qualità e completezza, con lo scopo di disporre di una base dati robusta su cui fondare il lavoro. A tal proposito si possono ricondurre queste analisi a due principali fasi:

La prima fase, di tipo esplorativo, si è concretizzata nell'osservazione dell'andamento delle temperature nel periodo 1995-2010, per verificare la presenza di valori anomali, attraverso una rappresentazione grafica dei dati, eseguita attraverso il software *Matlab*. Sono stati attenzionati in particolare i picchi di massimo e minimo annuali per ogni stazione, al fine di individuare eventuali estremi dubbi, al di fuori del normale range di temperatura globale delle 24 serie temporali. Si può già premettere che questa analisi ha permesso di verificare l'assenza di valori estremi anomali.

La seconda fase ha previsto il controllo della completezza e della continuità dei dati termometrici, durante tutto il periodo indagato, in quanto per cause diverse, la rete di misura può presentare interruzioni, anche sparse, nel suo funzionamento e quindi nella registrazione di dati. Tra le cause si può ipotizzare vi siano guasti tecnici della rete, manutenzioni programmate o danneggiamento a seguito di maltempo.

È importante individuare e definire il trattamento di queste discontinuità, fonte di incertezza nelle elaborazioni, che verranno denominate nel testo anche *gaps*, allo scopo di verificare l'impatto sull'intera serie e valutare se vi sia la necessità di una riorganizzazione dei dataset.

Per il trattamento di queste discontinuità, possono essere adottati diversi metodi, che principalmente si basano sull'eliminazione dei *gaps* più significativi o sulla loro ricostruzione. Esistono infatti procedure, implementate negli anni, più o meno empiriche che prevedono la ricostruzione dei *gaps*, principalmente divise in due gruppi: spaziali e temporali. Un esempio dei primi è dato da tecniche di interpolazione come *l'Inverse Distance Weighting (IDW)*, mentre il riempimento dei *gaps* con tecniche temporali si basa sull'autocorrelazione delle serie meteorologiche (Lompar et al., 2019).

Nel presente lavoro, è stato invece adottato un metodo di eliminazione delle lacune di valori basato sulla definizione di una soglia iterativa, da applicare alla numerosità dei *gaps* di dati termometrici, presenti per ogni singolo mese, poiché la successiva fase di correzione della distorsione viene fatta su base mensile. Questo limite è stato individuato nel 10% di dati di temperatura oraria mancanti mensilmente, oltre la quale non è stato considerato il mese ai fini delle successive elaborazioni. Si è quindi condotto, singolarmente per ogni stazione, un censimento al fine di determinare:

- a) l'ammontare dei dati normalmente presenti (in assenza di *gaps*);
- b) il numero di fasce orarie della serie prive di dati, a livello mensile;
- c) il valore soglia in termini assoluti oltre la quale non viene considerata la mensilità.

Si è reso necessario censire per singolo punto stazione, il numero di *gaps* giornalieri esistenti nella serie. Ne deriva quindi l'identificazione dei mesi che, ai fini del successivo confronto con le simulazioni da modello CPM, sono state eliminate e che quindi andranno scorporate anche da quest'ultima serie. Al termine di questo procedimento si ottengono le serie di temperatura definitive che andranno utilizzate nel proseguo del lavoro.

Nel computo di tale soglia è stata considerata la presenza nel periodo 1995-2010 di 4 anni bisestili, rispettivamente 1996, 2000, 2004, 2008.

Nella *tabella 3* vengono riportati il numero di dati normalmente presenti per ogni mese, differenziati per annualità ordinarie e bisestili e la soglia numerica di valori mancanti, oltre la quale scatta l'esclusione della mensilità.

Il criterio adottato non permette di risolvere tutte le potenziali discontinuità, ma consente quantomeno di trattare i problemi maggiormente significativi che possono influenzare le corrispondenti serie giornaliere.

MESE	N° GIORNI	N°DATI	SOGLIA DI ESCLUSIONE
	ordinario/bisestile		(N° DATI)
	ordinario/bisestile		ordinario/bisestile
Gennaio	31	744	74
Febbraio	28/29	672/696	62/70
Marzo	31	744	74
Aprile	30	720	72
Maggio	31	744	74
Giugno	30	720	72
Luglio	31	744	74
Agosto	31	744	74
Settembre	30	720	72
Ottobre	31	744	74
Novembre	30	720	72
Dicembre	31	744	74

Tabella 3: conteggio dei valori di temperatura giornaliera normalmente presenti nei singoli mesi e la relativa soglia di esclusione, fissata al 10%

4.3. Definizione delle serie di temperatura media, massima e minima

Le analisi di pre-elaborazione hanno permesso di avere un quadro completo e di consolidare le serie termometriche, individuando e scartando le mensilità caratterizzate da gaps rilevanti, sia per le serie osservate che per le omologhe derivate da modello.

L'obiettivo generale del presente studio mira tra le altre cose alla valutazione dell'evapotraspirazione potenziale, parametro il cui valore deriva spesso dall'applicazione di metodi indiretti. Nel contesto di questo lavoro è stato scelto di utilizzare il metodo di Hargreaves-Samani (1985), che verrà approfondito nel *capitolo*

4.8, per stimare i valori di evapotraspirazione potenziale; tale scelta è stata guidata dal fatto che sia richiesto di avere quali dati di input, solo le temperature, disponibili per tutte le stazioni dell'area di studio. Tuttavia necessita definire, sia per l'osservato, che per il simulato tre serie termometriche, rispettivamente medie, massime e minime. A tale scopo è risultato opportuno procedere con l'individuazione delle nuove serie, ottenute dapprima a scala giornaliera e in secondo luogo a scala mensile. Si può quindi suddividere tale procedimento nelle seguenti fasi, rappresentate schematicamente anche in *figura 11* e ripetute per ogni stazione di misura, sia per l'osservato che per i dati da modello:

- 1) Definizione delle nuove serie di temperatura giornaliera, individuando cioè tre valori rispettivamente medio, massimo e minimo per ogniuno dei giorni compreso nell'intervallo 1995-2010. Nello specifico, la serie di valori medi è ottenuta mediando le temperature fornite a scala oraria, mentre per il valore giornaliero minimo e massimo, vengono individuati i relativi due estremi.
- 2) Definizione dei nuovi valori di temperatura mensile, attraverso l'aggregazione dei dati giornalieri individuati; la temperatura (X) media, massima e minima, viene calcolata come media mensile dei rispettivi valori giornalieri secondo la seguente formula.

$$T_{X,j,mese} = \frac{\sum T_{X,j,gio\text{r}naliera,mese}}{n^{\circ} \text{giorni}} \quad (2)$$

Si arrivano ad avere poi per singola stazione, 12 dati mensili, ottenuti dalla media di ciascuna mensilità, nell'arco dei 16 anni del periodo indagato.

Per ogni stazione sono quindi state ottenute 3 serie giornaliere, 3 serie mensili di temperatura e 2 diverse basi dati di partenza: Osservato ARPAV (*Obs*) e Simulato CPM historical (*Sim*), che vengono rinominate con la seguente notazione: $TX_{s,i,j}$; X indica se si tratta di valore minimo, medio o massimo, mentre i pedici rappresentano rispettivamente, s la base dati di partenza (*Obs* o *Sim*), i il mese a cui si riferisce il valore di temperatura e j il codice della stazione a cui si riferiscono i dati osservati o da modello CPM.

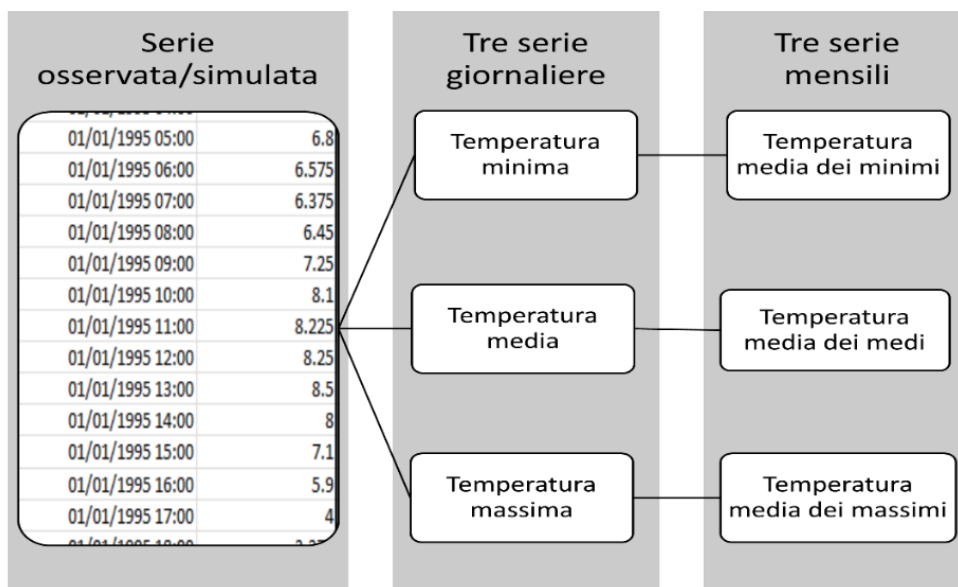


Figura 11: schema riepilogativo del processo di definizione delle serie di temperatura minima, media e massima, partendo da un set di dati acquisito dalla stazione ARPAV o simulato da modello CPM

4.4. Definizione dello schema di calibrazione e validazione

Prima di procedere con gli approcci correttivi è fondamentale analizzare l'efficacia del metodo correttivo nel ridurre gli errori della simulazione climatica. È infatti necessario pianificare le modalità di verifica della loro performance, in quanto da questa prescinde l'organizzazione delle successive fasi metodologiche.

In merito esistono in letteratura diverse tecniche di verifica delle prestazioni, le quali richiedono di scegliere un periodo di calibrazione su cui definire le relazioni di correzione tra serie osservate e simulate e un corrispettivo periodo di validazione dove analizzare l'errore caratteristico del metodo di correzione adottato. Si rende di conseguenza necessario definire le modalità e i criteri di identificazione di questi intervalli.

A tal proposito si citano tre schemi di calibrazione/validazione, trattati in Fioravanti & Piervitali (2015), a scopo di confronto teorico, per definire il metodo specifico che verrà utilizzato.

Il *Calibration Identical Validation (CIV)* è un primo metodo che utilizza un periodo comune per la calibrazione e la validazione, mentre gli altri due schemi adottano rispettivamente approcci *Leave-one-out Cross Validation (LOOCV)* e *Split-Sample (SS)*,

accomunati dall'utilizzo di un set di dati di calibrazione indipendente da quello utilizzato in validazione.

Il *Leave-one-out Cross (LOOCV)*, in particolare, si fonda sulla definizione di un periodo di calibrazione ampio e un periodo di validazione più ridotto, di volta in volta differente, che porta ad avere, dopo un numero di cicli, la correzione di tutto il periodo iniziale.

Il terzo approccio, *Split-Sample (SS)* o *campionamento suddiviso*, è stato scelto per il presente lavoro e si basa sulla suddivisione dell'intero periodo storico in due sottoperiodi di uguale durata, basandosi sull'assunto che ciascuna parte sia rappresentativa dell'intera serie. Infatti il processo di validazione ha lo scopo finale di verificare la bontà del metodo applicato ad un sottoperiodo, per estenderlo poi all'intera serie e al futuro.

Inoltre questa tecnica di validazione, permette di ricavare informazioni del metodo di correzione in condizione climatiche differenti da quelle del periodo di calibrazione.

Sulla base di quanto premesso, si individuano per il caso studio i seguenti due periodi a cui si farà riferimento nel testo e che costituiranno la base per le successive elaborazioni:

- a) periodo di calibrazione, dal 1995 al 2002, necessario per individuare i fattori di correzione;
- b) periodo di validazione, dal 2003 al 2010, che consente di applicare il fattore correttivo definito nel periodo precedente e di valutare la bontà del processo di correzione su un set di dati indipendente da quello di calibrazione, utilizzando parametri statistici, di cui verrà data più ampia trattazione nel successivo *capitolo 4.7*.

4.5. Identificazione e valutazione delle distorsioni del modello

I modelli climatici presentano nei loro output errori sistematici, i *bias*, i quali indicano, nell'ambito di questo lavoro, la differenza tra due specifici valori di temperatura e rappresentano la distorsione in media tra dati osservati e prodotti dal modello in un intervallo di tempo.

A tal proposito l'*Istituto Superiore per la Protezione Ambientale (ISPRA)* definisce come sistematici quegli errori che seguono alcune leggi o regole fisiche. Si parla infatti di bias della misura e gli errori sono distribuiti in modo asimmetrico, tendendo a distorcere il valore misurato verso l'alto o verso il basso rispetto allo zero. Un errore sistematico

quindi, posto che le condizioni di misurazione siano le medesime, ha la stessa influenza in grandezza e segno sul risultato della misura.

Questi errori possono essere causati da una serie di fattori tra cui si annoverano risoluzioni grossolane, processi termodinamici e fisici semplificati (c.d. parametrizzazioni) o incompleti e alle tecniche di downscaling utilizzate per la definizione di RCM e CPM. Pertanto l'uso di simulazioni dei modelli non corrette può dare luogo a risultati sull'impatto climatico non realistici.

La contemporanea disponibilità di dati giornalieri osservati e simulati per il periodo storico 1995-2010, permette di poter analizzare e confrontare le rispettive serie termometriche, al fine di individuare le distorsioni da cui sono affette le simulazioni da modello CPM. Questo è un passo fondamentale da eseguire per poter definire una metodologia di correzione alle simulazioni passate, propedeutiche alla determinazione dell'evapotraspirazione potenziale e che possa essere poi applicata alle proiezioni future. La ricerca dei discostamenti ha riguardato i valori medi mensili di temperatura media, minima e massima del periodo di calibrazione.

Per ogni punto corrispondente alle stazioni j è stato quindi calcolato per ogni mese i , il bias (B_{ji}) di temperatura (T) con la seguente modalità:

- a) Confronto tra valori medi mensili di T media giornaliera (bias su T media):

$$T_{media_{sim,i,j}} - T_{media_{obs,i,j}}$$

- b) Confronto tra valori medi mensili di T minima (bias su T min):

$$T_{min_{sim,i,j}} - T_{min_{obs,i,j}}$$

- c) Confronto tra valori medi mensili di T massima (bias su T max):

$$T_{max_{sim,i,j}} - T_{max_{obs,i,j}}$$

Il risultato di questi confronti ha permesso di individuare gli errori del modello climatico a convezione permessa nel ricostruire la serie storica di temperature. Un bias positivo indica una sovrastima, mentre se negativo è indicazione di sottostima.

Questi discostamenti differenziati per i 12 mesi, costituiranno il fattore correttivo che sta alla base della procedura di correzione delle simulazioni climatiche per l'area di studio.

4.6. Correzione del discostamento del modello

Le simulazioni soggette a distorsioni dei risultati necessitano di un processo di correzione, definito anche con il nome di *bias correction*, che permette di ridurre al minimo questo discostamento. Identifica quindi la correzione della simulazione CPM per una specifica sorgente di errore, che nel presente lavoro corrisponde ai bias, determinati con la procedura descritta al capitolo precedente.

Anche in questo caso esistono diverse metodologie sviluppate negli anni per perseguire questo obiettivo, tra cui per le temperature si ritrovano il *Quantile Mapping (QM)* e il *Linear Scaling (LS)*.

Quest'ultimo metodo è stato utilizzato in questo lavoro ed è una tecnica che prevede la correzione delle proiezioni, attraverso un fattore correttivo additivo, per rendere la serie CPM simile, in senso statistico, all'osservato; con il concetto di similitudine si intende il miglioramento del momento primo, ovvero del dato medio (Fioravanti & Piervitali, 2015).

Il Linear Scaling opera su valori di correzione mensili, basati sulle differenze tra temperature simulate e osservate, riferite ad un periodo storico o attuale. Per definizione, le simulazioni da modello climatico corrette, in questo approccio, concordano perfettamente nei valori medi mensili con le osservazioni (Teutschbein & Seibert, 2012). Nel caso studio questo metodo si fonda proprio sul concetto per cui il fattore correttivo è determinato in modo tale che si ottengano, nel periodo di calibrazione e a livello mensile, le medie di temperatura simulate coincidenti a quelle osservate (ARPAV).

Il coefficiente è poi utilizzato per applicare la correzione al periodo di validazione, che costituisce la fase di verifica della bontà del metodo, superata la quale è possibile estendere tale procedimento alla serie completa ed a un contesto futuro; Si veda a tal proposito lo studio compiuto da Fregona (2023).

Si assume infatti, che i fattori di correzione applicati al periodo storico, rimangano invariati anche per condizioni future.

Il fattore correttivo, di tipo additivo per le temperature, rappresenta lo scarto esistente tra le serie simulate e osservate (bias) ed è applicato a scala mensile, per tenere conto della variabilità annuale.

In questo elaborato la *bias correction*, in funzione dei risultati sulla performance, che verranno presentati nei prossimi capitoli, è stata sviluppata seguendo due approcci confrontati tra loro, allo scopo di migliorare la qualità della correzione.

Si illustra nelle righe seguenti, il processo di correzione dei bias riassumendone le principali fasi, distinte per approccio:

APPROCCIO 1 (UTILIZZO DEL BIAS SU TEMPERATURE MEDIE)

- Identificazione del fattore correttivo: per le temperature questo viene determinato dalla differenza tra valore medio mensile di temperatura media simulato e osservato nel periodo di calibrazione e corrisponde al bias B_{ji} , come determinato al punto a) del *capitolo 4.5*.
- Correzione delle serie storiche simulate: si applica il fattore correttivo delle T medie, differenziato per mese i , alle tre serie giornaliere nel periodo di validazione secondo la seguente formula.

$$T_{corr_{ij}} = T_{sim_{ij}} - B_{ji_{medio}} \quad (3)$$

- Estrazione delle nuove serie mensili: similmente a quanto fatto con le serie iniziali, a seguito della correzione dei valori giornalieri, si procede alla riagggregazione dei valori di temperatura per mese. Si differenzieranno le serie medie mensili delle temperature medie, minime e massime, ottenendo quindi nuovi valori medi per ogni stazione.

APPROCCIO 2 (UTILIZZO DI TRE BIAS)

- Identificazione del fattore correttivo: viene determinato dalla differenza tra valore mensile simulato e osservato nel periodo di calibrazione e corrisponde ai 3 bias B_{ji} , come determinati precedentemente:
 - $B_{ji_{medio}}$ per serie mensile di temperature medie;
 - $B_{ji_{minimo}}$ per serie mensile di temperature minime;
 - $B_{ji_{massimo}}$ per serie mensile di temperature massime.
- Correzione delle serie storiche simulate: si applicano i 3 fattori correttivi delle T medie, minime e massime, differenziati per mese, alle rispettive serie giornaliere nel periodo di validazione, secondo le seguenti formule:

$$T_{corr_{medio}} = T_{sim,media} - Bji_{medio} \quad (4)$$

$$T_{corr_{minimo}} = T_{sim,minima} - Bji_{minimo} \quad (5)$$

$$T_{corr_{massimo}} = T_{sim,massima} - Bji_{massimo} \quad (6)$$

- Estrazione delle nuove serie mensili: similmente a quanto già fatto con le serie iniziali e con l'approccio che precede, a seguito della correzione dei valori giornalieri attraverso tre fattori correttivi differenziati, si procede alla riaggregazione dei valori di temperatura per mese, differenziando le serie medie mensili delle temperature medie, minime e massime, ottenendo quindi nuovi valori medi corretti per ogni stazione.

L'applicazione di un metodo correttivo alle serie generate da modello climatico consente di disporre di nuove serie termometriche che tengano conto dei discostamenti che le caratterizzano. Lo scopo, oltre a quello di ottenere una serie storica simulata migliorata con tali correzioni, riguarda la messa a punto di una procedura validata per l'applicazione futura alla medesima area di studio.

4.7. Validazione della correzione

La selezione di un metodo di correzione dei bias adeguato è importante per fornire input affidabili per osservare l'impatto del cambiamento climatico, motivo per il quale necessita quindi disporre di strumenti utili alla sua valutazione.

Per analizzare le prestazioni della correzione del modello CPM esistono differenti misure statistiche che attenzionano lo scostamento ancora presente tra il modello CPM e la serie osservata, che costituisce il termine di confronto.

Queste metriche sono utilizzate per spiegare la bontà di adattamento delle prestazioni dei metodi di correzione del bias nel correggere il discostamento dei modelli RCM, rispetto alle serie climatiche osservate.

Si va quindi ad eseguire la validazione della correzione, intesa come insieme di test per verificare la capacità del modello calibrato ad essere usato come strumento predittivo entro certi limiti di accuratezza.

In questo lavoro è stato utilizzato un approccio di valutazione basato su 2 parametri, analizzati nel periodo di validazione, in quanto è in questo range temporale che viene

applicato il fattore correttivo, precedentemente determinato a partire dall'intervallo di calibrazione. Queste valutazioni sono state lo strumento che ha permesso di migliorare l'approccio di correzione 1, basato sulla correzione di tutte le serie mensili con il solo bias sulle temperature medie, con l'approccio 2, in cui sono stati utilizzati tutti e tre i bias. Vengono di seguito descritti gli indici qualitativi utilizzati in questo lavoro per confrontare i risultati e valutarne le performance della bias correction:

1. **Bias residuo dopo la correzione (Br_{ji}):** viene determinata la distorsione ancora presente nel periodo di validazione dopo la correzione ed è identificata similmente a quanto già fatto per il bias originario.

Rappresenta la differenza tra i valori medi mensili simulati corretti ($T_{sim,corretta}$) e quelli misurati dalle stazioni termometriche (T_{obs}), quindi tra la realtà osservata e il modello. Questo indice è dimensionale, calcolato secondo la formula seguente, ed è espresso in °C.

$$Br_{ji} = T_{sim,corretta} - T_{obs} \quad (7)$$

Questa analisi è stata condotta, per il solo bias esistente nel valore di T medio nell'approccio 1 e per tutti e 3 i bias nell'approccio 2.

2. **Root Mean Square Error (RMSE):** denominato anche radice dell'errore quadratico medio, è una metrica statistica standard per misurare le prestazioni di un modello in studi di ricerca sulla meteorologia, sulla qualità dell'aria e sul clima.

Rappresenta la deviazione standard dei residui, dove con residuo, si intende il divario esistente tra il valore osservato e il dato previsto dal modello. È un parametro dimensionale, in quanto si esprime in °C, che misura la differenza media tra valori previsti dal modello climatico e i valori effettivi, dati dalla serie osservata. Indica, cioè quanto sono distribuiti i residui attorno alla linea di regressione.

Esso fornisce una stima del livello di capacità predittiva del valore di temperatura simulato, da parte del modello climatico. Il suo utilizzo nella valutazione delle prestazioni della correzione, permette di confrontare i valori dell'indicatore, prima e dopo, così da poter osservare se vi sia un miglioramento. L'uso dell'RMSE permette infatti di analizzare l'effetto che i metodi di correzione hanno sulla struttura temporale delle serie simulate (Fioravanti & Piervitali, 2015).

Un valore di RMSE basso indica che la differenza tra dati simulati e quelli di riferimento osservati è piccola. Per ogni stazione, questo indicatore statistico viene calcolato per temperatura media, minima e massima.

Viene proposta di seguito la formula utilizzata per il calcolo del parametro:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{sim} - T_{obs})^2}{N}} \quad (8)$$

Dove:

- T_{sim} indica sia la temperatura mensile simulata da modello non corretto, sia il valore da modello CPM corretto, che vengono utilizzati alternativamente;
- T_{obs} rappresenta la temperatura osservata, ricavata a partire dalla serie ARPAV.
- N è il numero di dati di temperatura che corrisponde alle 12 mensilità

4.8. Determinazione dell'evapotraspirazione potenziale

Il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale (ETP) può essere ottenuto attraverso misure dirette, che tuttavia risultano complesse, caratterizzate da costi elevati e spesso non attuabili. Da ciò ne sono conseguiti studi per la ricerca di relazioni che leghino l'evapotraspirazione potenziale (ETP) con i fattori del clima, portando alla messa a punto di modelli matematici in grado di stimare questo processo, partendo dalla misurazione o stima di uno o più elementi del clima.

Uno dei metodi di riferimento per la stima di ETP è l'equazione di Penman-Monteith FAO-56, che però presenta lo svantaggio di richiedere oltre alla temperatura, altri dati meteorologici, tra cui l'umidità dell'aria, la radiazione solare, la velocità del vento, che non sono sempre disponibili in maniera omogenea per tutta l'area di studio. Esistono infatti un ventaglio di altri metodi empirici, che permette di risolvere il problema della mancanza di parametri misurati.

In questo lavoro è stato utilizzato il metodo di Hargreaves-Samani, proposto nel 1985, noto anche come metodo della radiazione stimata, che si basa sulla misura della temperatura dell'aria, il cui rilevamento avviene attraverso un sensore termometrico, che costituisce una dotazione standard delle stazioni di misura, garantendo una più ampia base dati. Questa metodologia consente di stimare la radiazione solare globale, dato non

sempre disponibile o poco accurato, a partire dalla radiazione solare extraterrestre e dall'escursione termica mensile.

Inoltre l'equazione di Hargreaves-Samani (1985) si basa sul concetto per il quale la differenza tra temperatura massima e minima, è correlata al grado di copertura nuvolosa della zona di interesse. Quindi, condizioni di cielo sereno corrispondono a temperature diurne più elevate e a bassi valori notturni con elevate escursioni. L'atmosfera, infatti, permette alla radiazione solare entrante, ad onde corte, di raggiungere la superficie terrestre riscaldandola, mentre, durante le ore notturne, la radiazione ad onde lunghe in uscita, non viene assorbita dall'atmosfera, portando ad un raffreddamento. Ne deriva che può essere utilizzata l'escursione termica come indicatore della frazione di radiazione solare, che raggiunge la superficie terrestre (Calcagno, 2007).

L'equazione mediante la quale può essere determinata ETP, in tutti quei casi in cui i dati di radiazione solare non sono disponibili o caratterizzati da bassa accuratezza, attraverso la sua stima e la temperatura dell'aria, è la seguente:

$$ETP = H_C * \frac{Ra}{\gamma} * (T_{media} + 17,8) * \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (9)$$

Dove, in questo caso di applicazione mese per mese:

- ETP evapotraspirazione potenziale (mm/gg), riferita al giorno mediano del mese;
- H_C costante empirica di Hargreaves parametrizzata con il valore di 0,0023;
- $\frac{Ra}{\gamma}$ rapporto tra radiazione solare extraterrestre (Ra) entrante espressa in MJ m⁻² giorno⁻¹ e calore latente di vaporizzazione (γ). Si ottiene così la radiazione solare espressa come equivalente in acqua, in mm/gg, riferita al giorno mediano del mese.
- T_{media} temperatura media mensile dell'aria a 2 m (°C)
- $T_{max} - T_{min}$ escursione termica mensile (°C)

La stima della radiazione solare extraterrestre (Ra) viene effettuata per ogni giorno dell'anno e per le diverse latitudini, considerando la costante solare ($G_{SC} = 0,0820$ MJ m⁻² min⁻¹), la declinazione solare e il periodo dell'anno secondo la formula:

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} * G_{SC} * d_r * [\omega_s * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \sin(\omega_s)] \quad (10)$$

In cui d_r indica la distanza relativa Terra-sole e viene calcolata secondo l'equazione seguente, dove J è il numero del giorno a partire dal 1 Gennaio:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right) \quad (11)$$

δ espresso in radianti rappresenta la declinazione solare definita da:

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1,39\right) \quad (12)$$

ω_s espresso anch'esso in radianti, rappresenta l'angolo orario al tramonto ed è definito dalla seguente formula, che include la latitudine φ (rad) del punto :

$$\omega_s = \arccos[-\tan \varphi] \quad (13)$$

Nello specifico l'applicazione del metodo di stima è avvenuta a scala mensile, determinando il valore di evapotraspirazione nel giorno centrale del mese. Infatti è stato adottato per la parte radiativa il dato mediano, portando ad ottenere 12 valori mensili per ogni stazione, determinati per la serie osservata, simulata non corretta e simulata corretta. Nell'ambito del presente lavoro, viene anche in questo caso effettuata un'analisi dei risultati ottenuti, che permette di valutare la ricostruzione dei valori evaporimetrici del periodo storico 1995-2010, attraverso la determinazione dello scarto assoluto (*formula 14*) esistente tra il modello CPM e l'osservato e tra quest'ultimo e le serie corrette.

$$scarto\ assoluto = |ETp_{CPM} - ETp_{obs}| \quad (14)$$

Considerando come l'evapotraspirazione potenziale sia ottenuta per via indiretta dai valori di temperatura, questa valutazione costituisce un'ulteriore indicazione delle prestazioni della correzione del modello. A tal proposito, valori di evapotraspirazione derivati dalle temperature ottenute da modello CPM corretto con scarto superiore al non corretto, indicano la necessità di valutare un miglioramento dell'approccio di correzione delle temperature.

Queste verifiche permettono di arrivare a validare, in aggiunta al metodo proprio di verifica della serie termometrica sopra illustrati, il procedimento correttivo delle temperature che permetta di stimare con minori discostamenti ETP e di disporre di uno strumento utilizzabile per studiare anche il futuro

5. RISULTATI E DISCUSSIONI

In questa sezione vengono esposti e discussi i risultati del lavoro di tesi, svolgendo in prima battuta alcune analisi esplorative e sulla qualità dei dati delle temperature osservate e simulate nei punti stazione afferenti all'area di studio, utili per inquadrare l'ambito da un punto di vista climatico.

In secondo luogo saranno presentati i discostamenti (bias) da cui sono caratterizzate le simulazioni, differenziando gli errori associati alle tre serie termometriche, rispettivamente minima, media e massima. Questi sono elementi centrali e propedeutici alla successiva correzione delle proiezioni, con lo scopo di ridurre l'errore da cui sono affette le simulazioni del modello climatico.

L'osservazione dei parametri statistici ha consentito di validare l'approccio correttivo, permettendo di verificare e stimare l'evapotraspirazione potenziale per l'area di studio, determinata attraverso variabili termometriche precedentemente corrette.

5.1. Analisi esplorative

Vengono di seguito riportati i risultati più significativi delle analisi sulla qualità dei dati, condotte per il periodo storico 1995-2010, afferenti alla rete di misura e alle simulazioni climatiche, collegate all'area di studio. Le indagini esplorative sono state adottate per le singole stazioni, dopo aver uniformato a scala oraria e di unità di misura i valori di temperatura impiegati.

5.1.1. Verifica della qualità dei dati

Individuare la presenza di valori dubbi è un passaggio preliminare fondamentale per garantire una base dati solida. L'analisi visiva dell'andamento, effettuata sulle serie termometriche istantanee misurate, ha permesso di sostenere l'assenza di estremi anomali. Con valori anomali sono stati intesi dati climatici al di fuori degli estremi normalmente osservabili globalmente in tutti i 24 punti stazione considerati nello studio, osservando infatti per tutta la rete di misura utilizzata, lo stesso gruppo di annualità caratterizzate da picchi simili tra loro e non riscontrando valori giudicati non coerenti.

Per supportare quanto appena affermato, si riporta a titolo di esempio, in *figura 12*, l'andamento della serie di temperature per la stazione di misura id 150, in quanto la medesima verifica è stata ripetuta con la stessa metodologia anche per tutte le altre.

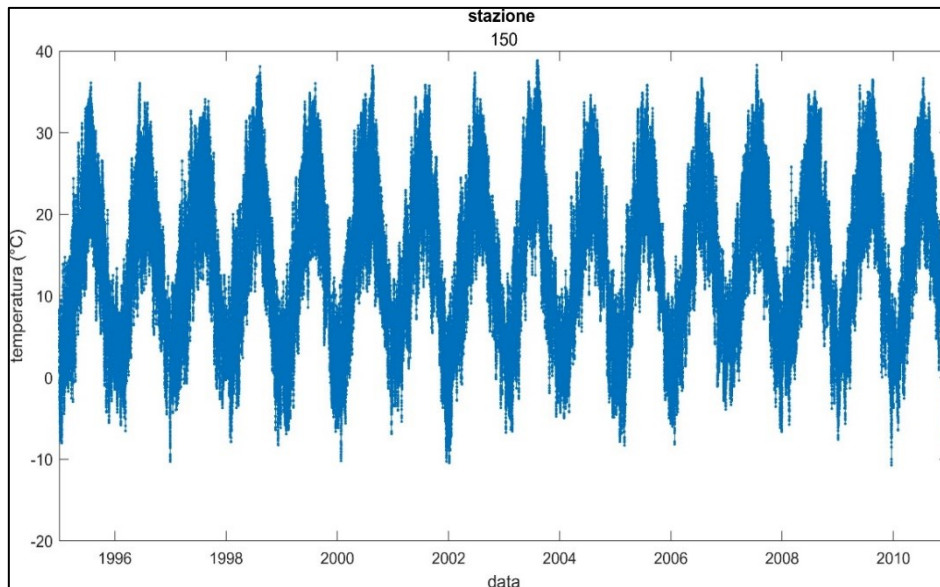


Figura 12: Esempio di rappresentazione grafica delle serie di temperatura osservate nel periodo 1995-2010, da cui si evince l'assenza di valori estremi sospetti. (Elaborazione eseguita con il software *Matlab*).

Per tutti i punti stazione considerati è inoltre stato possibile rilevare come la massima temperatura sia stata raggiunta nel mese di Agosto 2003, anno che è stato ricordato per un'ondata di caldo anomalo, accompagnato da una marcata siccità e confermando di fatto quanto rilevato a scala regionale dall'ARPAV. Infatti le massime temperature si sono mantenute per tutto il mese di Agosto, costantemente sopra i 30°C.

Per i valori minimi invece, non è stato possibile identificare un unico periodo comune alle 24 serie, in cui si sono registrati i valori estremi. Si può però rilevare come i picchi di temperatura possano essere ricondotti alle annualità 1996, 2002 e 2010.

Si precisa che si tratta ad ogni modo di una analisi esplorativa, utilizzata ai fini del presente lavoro per accertarsi della qualità dei dati, basata su serie temporali di temperatura istantanea.

Si presenta come ulteriore analisi qualitativa, la ricerca dei gaps, che ha permesso di identificare l'ammontare dei dati osservati mancanti nell'intervallo 1995-2010, qui riportati nel grafico in *figura 13*, raggruppati per stazione.

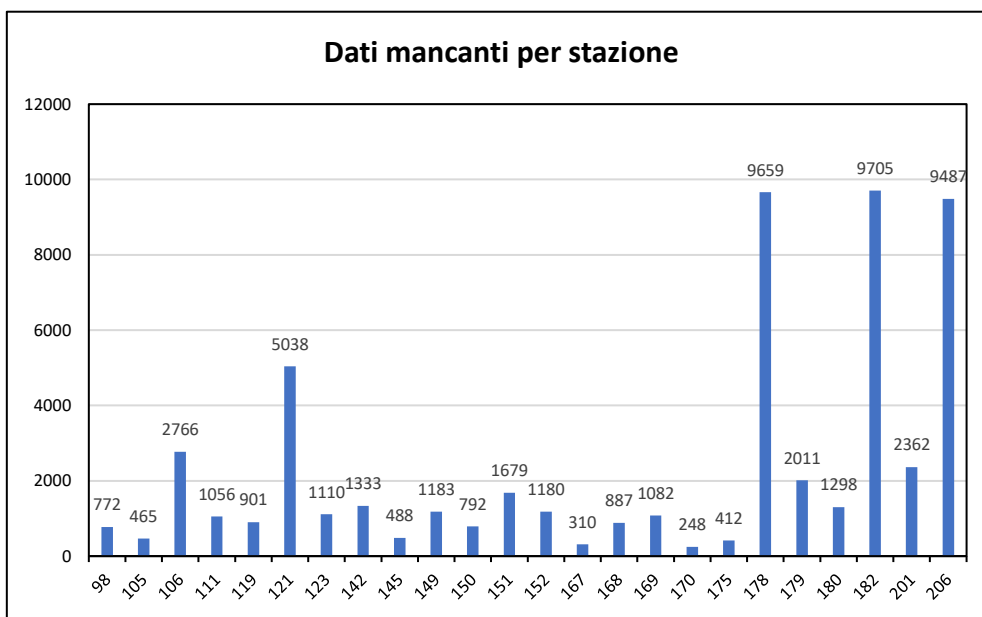


Figura 13: Quantificazione del numero di dati di temperatura mancanti, suddivisi per stazioni di misura ARPAV

In *figura 14*, sono invece quantificati il numero di mensilità, che in funzione della soglia definita (10% di dati orari mancanti mensilmente), sono state escluse dalle elaborazioni, nell'arco dei 16 anni indagati.

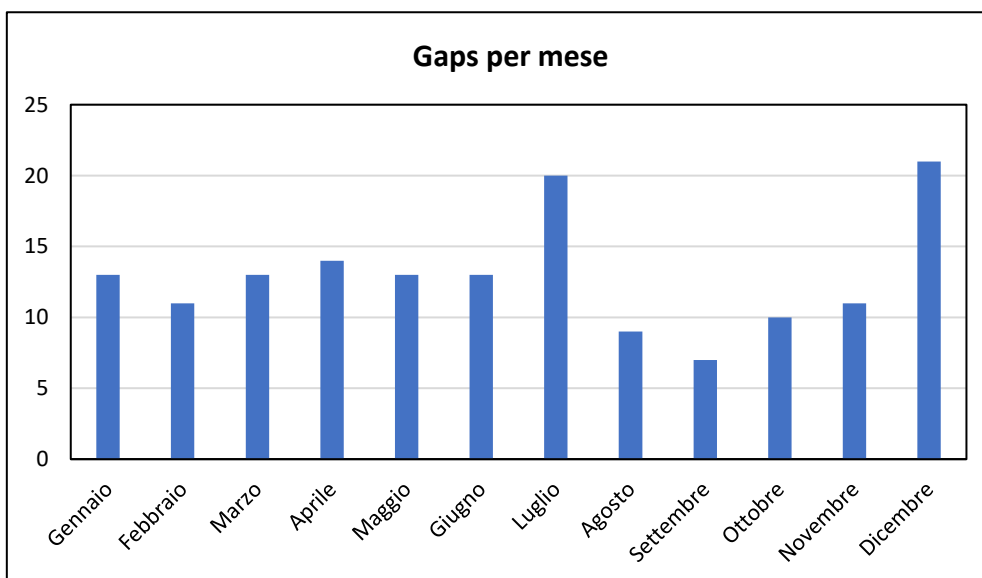


Figura 14: Gaps scartati dalle serie di temperatura osservate e simulate, suddivisi per mese

Si segnalano in questo contesto i gaps più significativi riconducibili alle stazioni 178, 182 e 206, che mancano dell'intera annualità 1995 costituita da 8760 dati, tutte localizzate tra loro vicine e nella zona meridionale dell'area di studio, ipotizzando quindi una possibile causa comune. Inoltre la stazione n° 121, risulta essere in deficit del primo semestre sempre dell'anno 1995.

Per le restanti serie osservate non si rilevano lunghi periodi di discontinuità, ma lacune sparse nei diversi mesi, che in alcuni casi, superando la soglia prevista, non sono state considerate per il proseguo del lavoro, segnalando inoltre come un'unica stazione (id 167) è esente da eliminazioni. Questo infatti, è propedeutico per individuare le mensilità interessate da gaps significativi, che si può constatare, a livello complessivo dei punti stazione, siano presenti in tutti i mesi (*figura 14*). Si va infatti da un minimo di 7 mesi scartati di Settembre, corrispondenti al 1,8 % del totale, fino al 5,4 % delle mensilità di Dicembre. Tutti i mesi autunnali (Settembre, Ottobre, Novembre) comunque risultano affetti in misura minore da gaps, rispetto al resto delle mensilità.

Una verifica effettuata sul massimo numero dei mesi scartati per singola mensilità e per singola stazione, ha permesso di constatare come Aprile e Maggio presentino una mancanza concentrata nella stazioni n°106 e 179 rispettivamente con 4 e 3 mesi nell'arco del periodo in esame. Trattasi di numerosità scartate comunque basse in termini assoluti, che tuttavia considerando l'insieme dei gaps per questi mesi a livello di ambito studiato, influiscono per oltre il 20% sul totale delle lacune, oltre che poter essere una fonte di minore accuratezza nella stima dei bias.

È terminata così la prima fase di analisi esplorative con cui sono state ridefinite per ogni stazione, le temperature osservate, procedendo al contestuale scarto dei gaps prima individuati, anche per le simulazioni e da cui sono state ridefinite le tre diverse serie.

5.1.2. Analisi delle temperature

Tra gli obiettivi specifici di questo lavoro vi è la correzione delle temperature simulate, utilizzando come riferimento i dati misurati. Nasce per questo l'esigenza di verificare a livello di ambito studiato, l'effettiva presenza di discostamenti.

La definizione di tre serie termometriche, rispettivamente minime, medie e massime, ha permesso di indagare per ognuna di queste l'esistenza di bias, che vengono illustrati in questa sezione.

Sono state confrontate sempre graficamente in *figura 15*, le misurazioni reali sull'intero periodo indagato, con il ciclo termometrico generato da modello climatico. Le tre serie di temperatura, per le due basi dati (osservato e simulato) vengono anche riportate numericamente nelle *tabelle 4 e 5*.

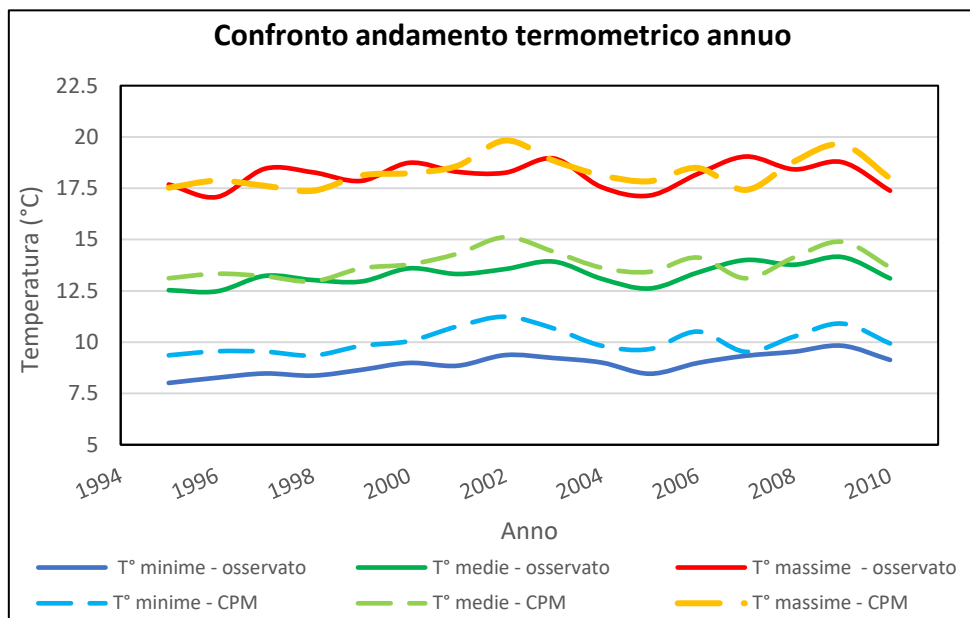


Figura 15: Andamento delle medie annuali delle temperature minime, massime e medie osservate (linea continua) e simulate (linea tratteggiata) da modello CPM per il periodo 1995-2010, nell'area di studio.

Temperature medie annue misurate (°C)																
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Massime	17.7	17.1	18.5	18.3	17.9	18.7	18.3	18.3	19.0	17.6	17.1	18.2	19.0	18.4	18.8	17.4
Medie	12.5	12.5	13.2	13.0	13.0	13.6	13.3	13.6	13.9	13.1	12.6	13.4	14.0	13.8	14.1	13.1
Minime	8.0	8.3	8.5	8.4	8.7	9.0	8.8	9.4	9.2	9.0	8.5	9.0	9.3	9.5	9.8	9.1

Tabella 4: valori di medi annui di temperatura massima, media e minima, rilevati nell'area di studio

Temperature medie annue simulate (°C)																
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Massime	17.5	17.9	17.6	17.4	18.1	18.2	18.6	19.8	18.8	18.1	17.8	18.5	17.4	18.8	19.6	18.0
Medie	13.1	13.3	13.2	13.0	13.6	13.8	14.3	15.1	14.4	13.6	13.4	14.1	13.1	14.1	14.9	13.6
Minime	9.4	9.6	9.5	9.3	9.8	10.1	10.8	11.2	10.7	9.8	9.7	10.5	9.5	10.3	10.9	9.9

Tabella 5: valori medi annui di temperatura massima, media e minima, simulati per l'area di studio

Premettendo che si tratta di valori annuali aggregati tra le 24 stazioni, anche per l'area di studio, si riscontra la presenza di errori nella ricostruzione delle temperature, che sono caratterizzate da un generale discostamento delle simulazioni, rispetto al dato misurato. Questo conferma quanto già riportato in precedenza e da diversi autori, in merito alla necessità di trattare questi bias, attraverso la messa a punto di un approccio correttivo mirato a ridurre tali divari, preliminarmente ad un eventuale studio dell'impatto del cambiamento climatico.

Analizzando più nel dettaglio le singole serie, si può infatti scorgere un andamento delle temperature massime simulate che talvolta sovrastimano e in altre sottostimano il valore osservato. Simile caratteristica si verifica anche per le temperature medie, mentre per le minime si è di fronte ad una costante sovrastima del dato climatico modellato.

Limitandosi poi ad osservare le sole serie massime, medie e minime derivate da modellizzazione, si riscontra uno stesso andamento nei 16 anni considerati, che si ipotizza derivi da una necessaria semplificazione insita nel modello, nel ricostruire le variabili climatiche.

Questa analisi permette inoltre di definire a livello di area di studio, valori medi annui di temperature massime misurate che risultano comprese in un intervallo tra 17 °C e 19 °C. Le temperature medie vedono invece un intervallo compreso tra 12.5°C e 14.1 °C, mentre per le temperature minime annue si rileva un valore inferiore pari a 8° C e il massimo si attesta a 9.8 °C.

Trattandosi di valori termometrici mediati annualmente, tale confronto risulta preliminare, fungendo da quadro generale dell'intera area di studio, rendendo necessario studiare i bias esistenti a livello di singola stazione, al fine di verificare in prima battuta la variabilità degli errori e definire di conseguenza fattori correttivi differenziati per ogni punto di griglia.

Sempre ad un fine esplorativo dei dati, si considerano quindi, i valori medi relativi ad ogni punto stazione per osservare ancora una volta la presenza dei discostamenti ed effettuarne una prima quantificazione visiva. Da ciò emerge un quadro indicativo sulla capacità da parte del modello climatico, di ricostruire con precisioni diverse tra le stazioni, le tre serie climatiche. Si può vedere infatti, in *figura 16*, come la temperatura massima simulata sia in gran parte delle stazioni, avente un maggior grado di aderenza con la realtà misurata.

Ancora una volta i valori minimi risultano i più penalizzati dalla modellazione a diversi livelli tra le stazioni, con alcuni punti di griglia che sottostimano il valore reale, mentre nella maggior parte si verifica un discostamento positivo. Infatti il simulato risulta caratterizzato da fluttuazioni di diversa entità che talvolta più si avvicinano al dato osservato.

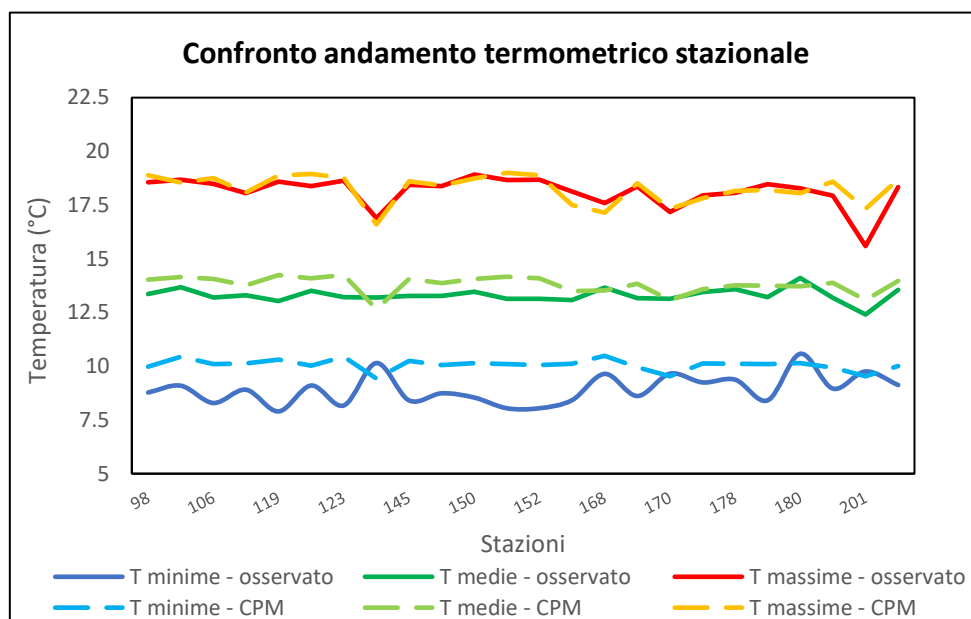


Figura 16: Andamento stazionale delle temperature minime, massime e medie osservate e simulate da modello CPM per il periodo 1995-2010, nell'area di studio

Nel complesso, quindi, si può dedurre, sia considerando le temperature annuali che mediate per singola stazione, la presenza di bias per la terna di temperature, con discostamenti più marcati nelle temperature minime, che vanno ad assottigliarsi progressivamente nei valori medi e massimi.

L'osservazione della distribuzione nello spazio delle temperature misurate sul periodo 1995-2010, permette di completare il quadro esplorativo dell'area di studio.

Nella seguente *figura 17* vengono rappresentati i punti stazione, opportunamente classificati secondo scale di temperatura, con intervallo di 0,5°C, al fine di associare i valori climatici alla localizzazione e valutare la presenza di una organizzazione spaziale.

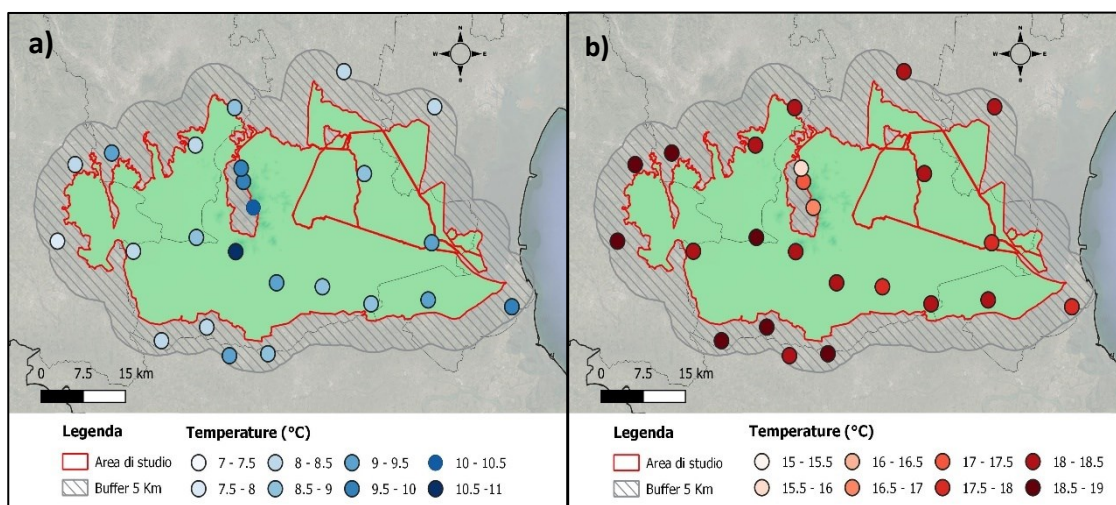


Figura 17: distribuzione spaziale delle temperature minime (a) e massime (b) osservate nel periodo 1995-2010 nell'area di studio, rappresentate attraverso scala di colore associata al punto stazione corrispondente.

Un confronto tra la distribuzione delle temperature minime e massime, permette di osservare una moderata variabilità spaziale dei valori. A tal proposito si rilevano misure più basse per il dato minimo e meno pronunciate per il massimo in vicinanza ai Colli Euganei e nella porzione Est dell'area di studio, dove si trova a breve distanza il mar Adriatico, esterno a quest'ultima, che potrebbe spiegare l'effetto mitigativo seppur debole. Infatti si può intravedere, seppur debolmente, che temperature più elevate tendono a localizzarsi nell'entroterra ad ovest, rispetto alla zona più prossima all'area lagunare, nel settore orientale.

Nel complesso dell'ambito indagato è possibile invece notare una tendenza, maggiormente rilevabile nel settore orientale, caratterizzata da valori termometrici minimi maggiormente bassi, che si contrappongono a temperature massime più elevate, configurando così una maggiore escursione termica.

In definitiva, non è comunque possibile definire una solida relazione spaziale delle temperature, in quanto comunque trattasi di un'area, che ad esclusione degli Euganei, è priva di orografia o elementi interni all'ambito indagato, tali da influenzare marcatamente le temperature e che permettano di spiegare la distribuzione della variabile climatica.

5.2. Identificazione dei discostamenti (bias)

I discostamenti (bias) presenti tra le simulazioni da modello CPM e le serie osservate sono stati individuati seguendo la procedura riportata al capitolo 4.5, confrontando i dati medi aggregati a scala mensile delle temperature medie, massime e minime, calcolati sia sul periodo di calibrazione che in validazione.

5.2.1. Periodo di calibrazione e validazione

Vengono qui presentati graficamente nelle figure 18, 19 e 20 i bias riscontrati nella simulazione delle temperature. Si tratta sia di valori annuali aggregati per stazione, che di bias mensili ottenuti come media dei punti stazione, al fine di valutare la somiglianza tra i due intervalli, che sono alla base dello schema di validazione del metodo correttivo.

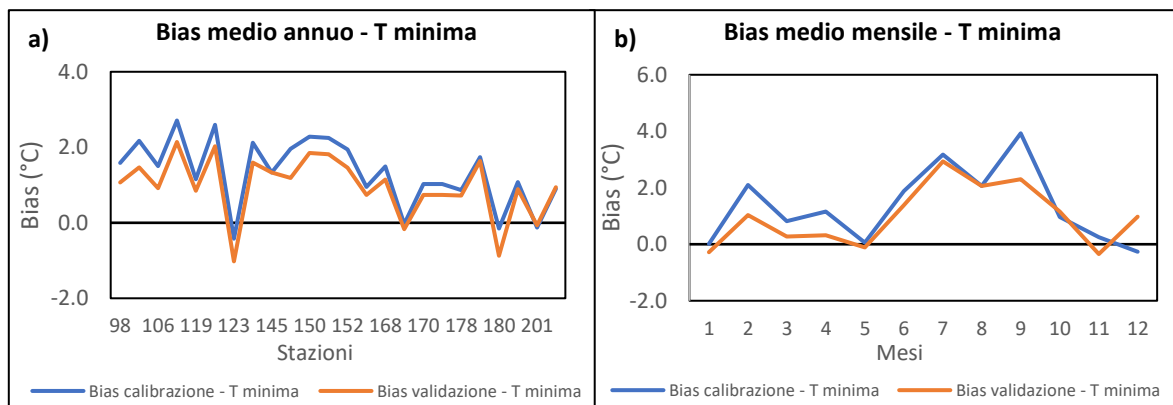


Figura 18: andamento del bias medio annuale (a) e mensile (b), relativo alle temperature minime nel periodo di calibrazione e validazione

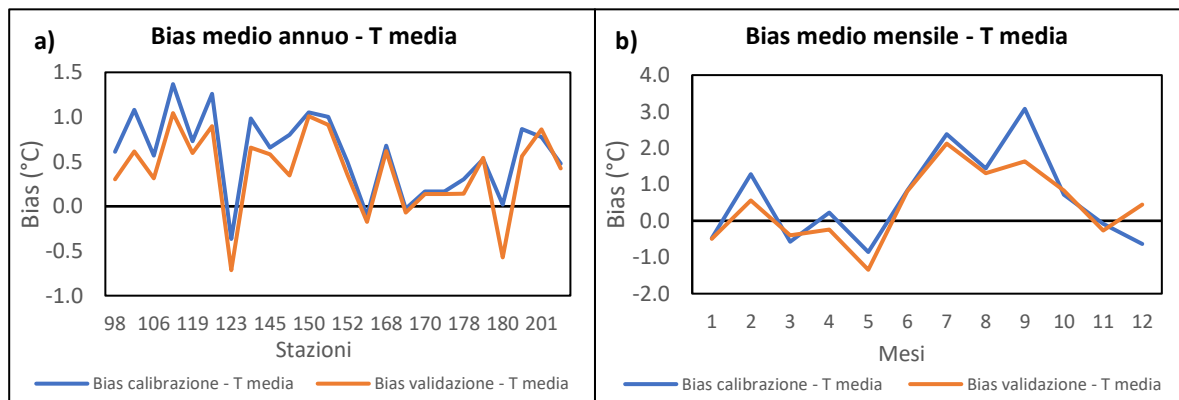


Figura 19: andamento del bias medio annuale (a) e mensile (b), relativo alle temperature medie nel periodo di calibrazione e validazione

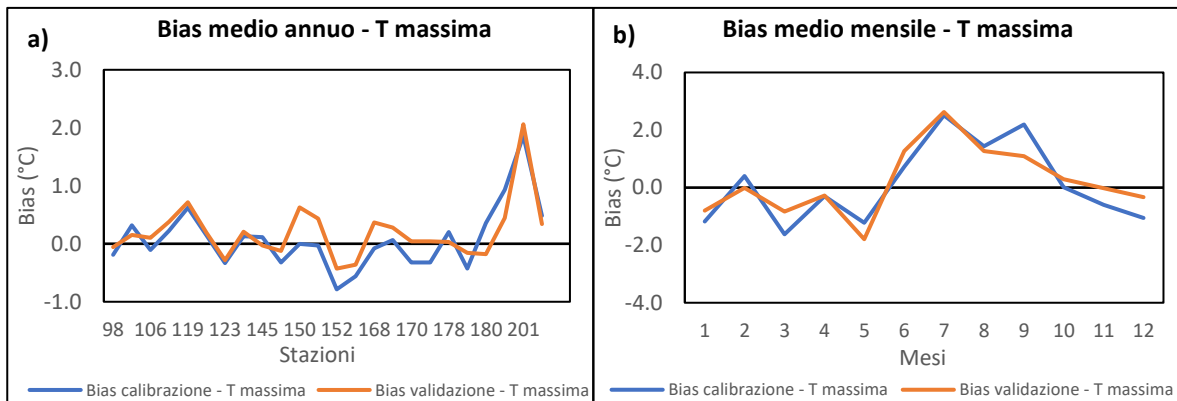


Figura 20: andamento del bias medio annuale (a) e mensile (b), relativo alle temperature massime nel periodo di calibrazione e validazione

Questo primo confronto ha lo scopo di valutare l'andamento del discostamento da cui è affetta la simulazione climatica, all'interno dei due intervalli temporali in cui sono state divise le serie. Infatti è stato adottato come metodo di validazione delle performance di correzione dei bias, l'approccio *Split Sample (SS)* o *campione suddiviso*, basato sulla suddivisione dell'intero periodo considerato (1995-2010) in 2 parti di uguale ampiezza e più precisamente: periodo di validazione (1995-2002) e di calibrazione (2003-2010).

I bias annuali nei due intervalli presentano uno stesso andamento che è possibile scorgere per tutte e tre le temperature. Tuttavia mentre per i discostamenti medi e minimi si registrano valori di bias in calibrazione leggermente superiori alla validazione, il contrario si verifica per le temperature massime, le quali comunque appaiono risentire meno degli errori sistematici del modello. Si nota come per Tmin e Tmedia ci sia tendenza alla sovrastima, mentre per Tmax il bias oscilla generalmente attorno allo zero.

Alla luce di quanto premesso, si può comunque considerare una affinità tra i due periodi, verificando, anche per l'area di studio, l'ipotesi su cui si basa il metodo *Split Sample (SS)*, per cui ciascuna parte è rappresentativa dell'intera serie.

Concentrando l'attenzione sui bias mensili è poi possibile riscontrare quanto appena visto nell'annuale (cioè bias generalmente simile tra i due periodi), ma si nota un generale picco dei divari nel mese di Settembre, per tutte e tre le temperature indagate, con valori superiori in calibrazione. Questa maggiore discrepanza si prevede porterà di conseguenza ad un bias residuo rimanente dopo la correzione più elevato.

Valutata la coerenza tra i due periodi, si considerano ora i risultati sull'intervallo di calibrazione, utilizzato per determinare i fattori correttivi.

5.2.2. Discostamenti (bias) mensili e stagionali

I bias individuati per le serie medie mensili rispettivamente di temperatura minima, media e massima, vengono riportati in *tabella 6, 7, 8*, classificati secondo una scala di colore per permettere un'identificazione più immediata, basata sulla presenza di discostamento positivo o negativo dalla serie osservata, evidenziando così, se trattasi di sottostima o di sovrastima del modello.

Bias mensile su Temperature MINIME (°C)												
Staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
98	-0.13	2.14	0.94	1.19	0.06	1.70	3.26	2.21	4.10	0.81	0.19	-0.44
105	0.80	2.60	1.03	1.46	0.50	2.15	3.22	1.95	3.63	0.93	0.56	0.23
106	0.85	3.06	1.83	1.96	1.02	3.05	4.00	3.13	4.88	1.58	0.52	0.19
111	0.14	2.47	1.04	1.49	0.18	1.86	3.19	2.22	4.04	1.25	0.38	-0.26
119	0.81	3.00	2.00	2.36	1.44	3.43	4.87	4.10	5.88	2.44	1.71	0.48
121	-0.51	1.87	0.54	0.78	-0.30	1.64	3.36	2.10	3.91	0.89	0.19	-0.62
123	1.31	3.30	1.68	1.93	1.20	3.35	4.69	3.72	5.27	2.33	1.51	0.81
142	-1.44	-0.04	-1.50	-0.30	-1.23	0.23	0.97	-0.44	1.77	-0.74	-1.09	-1.24
145	1.01	2.75	1.56	1.99	0.85	2.78	4.27	3.31	4.85	1.42	0.49	0.13
149	0.24	2.08	0.75	1.32	0.34	1.74	3.07	1.98	3.71	0.99	0.05	-0.32
150	0.69	2.85	1.57	1.89	0.92	2.69	3.91	2.73	4.29	1.30	0.62	0.09
151	0.21	2.41	1.68	2.21	1.17	3.14	4.46	3.54	5.47	2.02	1.20	-0.14
152	0.43	2.81	2.02	2.07	0.91	2.96	4.43	2.98	5.06	1.72	0.96	0.58
167	0.75	2.90	1.28	1.61	0.35	2.06	3.56	2.77	4.88	1.82	0.96	0.40
168	-0.15	2.63	0.82	0.80	-0.77	0.85	1.81	0.60	3.51	1.25	0.39	-0.34
169	0.02	2.44	1.41	1.63	0.43	2.21	3.44	2.28	4.02	0.77	-0.39	-0.35
170	-1.18	0.35	-1.03	0.13	-0.86	0.67	1.55	0.27	2.32	-0.57	-0.92	-1.14
175	-0.29	2.20	0.91	0.95	-0.59	1.25	2.40	1.55	3.77	0.70	T109	-0.61
178	-0.38	2.28	0.86	0.41	-1.17	0.72	2.50	1.36	3.38	0.40	0.17	-0.17
179	0.49	2.49	0.81	1.32	0.27	1.97	3.51	2.46	4.61	2.23	0.70	0.02
180	-1.21	0.12	-1.04	-0.26	-1.34	0.69	1.67	0.30	2.15	-0.75	-0.83	-1.34
182	-0.15	2.21	0.97	0.84	-0.35	1.84	3.24	1.75	3.55	0.30	-0.35	-0.90
201	-1.52	-0.32	-0.91	-0.15	-0.76	0.80	1.62	0.57	1.54	-0.25	-1.02	-1.11
206	-0.63	1.70	0.37	0.25	-0.85	1.40	3.14	2.03	3.67	0.16	-0.08	-0.32



Tabella 6: bias mensili calcolati sul valore medio di temperatura minima per i punti stazione

Bias mensile su Temperature MEDIE (°C)												
Staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
98	-0.38	1.36	-0.45	0.36	-0.71	0.76	2.51	1.69	3.27	0.69	-0.07	-0.65
105	-0.30	1.18	-0.80	0.22	-0.69	0.94	2.58	1.43	2.89	0.56	-0.10	-0.57
106	-0.02	1.66	-0.32	0.49	-0.20	1.57	2.86	2.32	3.79	1.22	-0.03	-0.38
111	-0.49	1.46	-0.47	0.38	-0.84	0.67	2.05	1.27	2.89	0.77	-0.07	-0.81
119	-0.15	1.73	-0.08	0.79	-0.12	1.75	3.56	2.91	4.26	1.51	0.60	-0.35
121	-0.52	1.24	-0.60	0.08	-0.94	1.02	3.15	1.89	3.48	0.75	-0.08	-0.73
123	0.03	1.74	-0.33	0.65	-0.19	1.70	3.29	2.47	3.87	1.45	0.50	-0.07
142	-1.68	-0.09	-1.70	-0.41	-1.29	0.10	1.30	0.18	1.95	-0.33	-0.98	-1.43
145	-0.09	1.45	-0.36	0.58	-0.38	1.30	3.00	2.23	3.56	1.04	0.01	-0.52
149	-0.56	1.21	-0.58	0.42	-0.59	0.95	2.57	1.66	3.16	0.76	-0.29	-0.83
150	-0.18	1.46	-0.46	0.43	-0.62	1.04	2.64	1.72	3.25	0.84	-0.01	-0.53
151	-0.20	1.45	-0.47	0.43	-0.45	1.36	3.01	2.31	3.88	1.39	0.42	-0.50
152	0.01	1.77	-0.09	0.58	-0.56	1.24	2.99	1.55	3.22	0.99	0.22	0.09
167	-0.13	1.73	-0.38	0.11	-1.20	0.09	1.42	0.66	2.92	0.95	0.22	-0.41
168	-0.26	1.78	-0.65	-0.46	-2.18	-0.94	0.16	-0.76	1.95	0.57	0.08	-0.55
169	-0.19	1.67	-0.20	0.45	-0.82	0.79	2.28	1.34	3.15	0.63	-0.46	-0.50
170	-1.50	0.19	-1.40	-0.05	-0.96	0.46	1.76	0.73	2.46	-0.01	-0.73	-1.27
175	-0.44	1.48	-0.60	-0.15	-1.59	-0.24	1.11	0.42	2.50	0.41	-0.12	-0.79
178	-0.45	1.47	-0.64	-0.41	-1.87	0.00	1.97	0.89	2.60	0.22	0.12	-0.25
179	-0.56	1.32	-0.66	0.08	-0.89	0.43	2.03	1.24	3.13	1.25	-0.17	-0.85
180	-1.23	0.27	-1.43	-0.17	-1.29	0.77	1.83	0.85	2.45	-0.09	-0.59	-1.15
182	-0.19	1.72	-0.17	0.36	-0.81	1.46	3.20	1.86	3.36	0.57	-0.23	-0.75
201	-1.30	0.45	-0.15	0.77	0.01	1.96	3.00	1.94	2.75	0.92	-0.16	-0.89
206	-0.75	1.04	-0.83	-0.17	-1.38	0.74	2.82	1.70	3.04	0.16	-0.16	-0.48

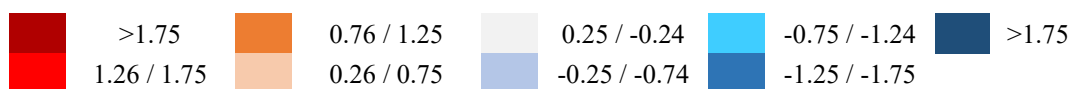


Tabella 7: bias mensili calcolati sul valore medio di temperatura media per i punti stazione

Bias mensili su Temperature MASSIME (°C)												
Staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
98	-0.79	0.44	-1.60	-0.10	-0.94	0.65	2.70	1.81	2.43	-0.05	-0.42	-0.82
105	-1.67	-0.23	-2.19	-0.74	-1.53	0.65	2.83	1.49	1.83	-0.31	-0.95	-1.44
106	-1.04	0.26	-2.02	-0.47	-0.65	1.38	2.83	2.17	2.58	0.38	-0.67	-0.95
111	-1.67	0.35	-1.50	-0.22	-1.10	0.58	1.98	0.95	1.86	-0.15	-0.85	-1.52
119	-1.24	0.21	-1.76	-0.39	-1.23	1.08	3.18	2.11	2.26	0.04	-0.49	-1.06
121	-0.52	0.45	-1.51	-0.12	-0.95	1.52	4.02	2.55	3.06	0.16	-0.41	-0.80
123	-1.36	0.20	-1.79	-0.26	-1.08	1.01	2.78	1.66	2.12	0.12	-0.60	-1.03
142	-2.05	-0.17	-2.07	-0.55	-1.34	0.43	2.11	1.01	1.86	-0.37	-1.12	-1.74
145	-1.51	0.19	-1.58	-0.31	-1.08	0.87	2.67	1.70	2.21	0.26	-0.57	-1.28
149	-1.68	0.27	-1.58	-0.30	-1.15	0.87	2.83	1.90	2.46	0.15	-0.86	-1.53
150	-1.47	-0.15	-2.23	-0.81	-1.69	0.26	2.15	1.12	1.82	-0.44	-1.00	-1.42
151	-0.93	0.14	-2.36	-0.83	-1.50	0.74	2.74	1.57	1.98	0.05	-0.69	-0.94
152	-0.80	0.44	-1.74	-0.36	-1.49	0.67	2.65	0.76	1.22	-0.38	-0.78	-0.54
167	-1.72	0.41	-1.59	-0.71	-1.89	-0.73	0.27	-0.96	0.85	-0.75	-1.05	-1.57
168	-0.66	1.12	-1.40	-0.70	-2.48	-1.26	-0.07	-0.93	1.25	-0.28	-0.47	-0.83
169	-0.75	0.60	-1.68	-0.31	-1.53	0.05	1.75	0.81	2.04	-0.30	-0.89	-0.75
170	-1.76	0.26	-1.72	-0.24	-1.08	0.71	2.48	1.52	2.39	0.18	-0.68	-1.31
175	-1.02	0.56	-1.70	-0.45	-1.53	-0.50	0.98	0.26	1.63	-0.33	-0.66	-1.13
178	-0.63	0.65	-1.48	-0.43	-1.67	0.43	2.43	1.37	2.28	-0.13	-0.06	-0.37
179	-2.19	0.10	-1.68	-0.69	-1.21	-0.05	1.61	0.77	1.78	-0.20	-1.45	-1.89
180	-0.89	0.55	-1.68	-0.08	-1.28	1.18	2.63	2.05	2.76	0.12	-0.34	-0.74
182	-0.23	1.08	-1.03	0.34	-0.63	1.90	4.04	2.63	3.19	0.50	-0.14	-0.50
201	-0.97	1.39	0.56	1.64	0.90	3.67	5.09	3.79	4.05	2.02	0.81	-0.62
206	-0.74	0.48	-1.61	-0.21	-1.28	1.19	3.59	2.29	2.66	0.03	-0.09	-0.51

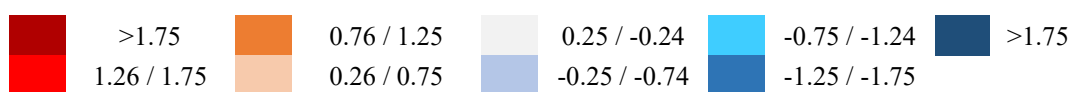


Tabella 8: bias mensili calcolati sul valore medio di temperatura massima per i punti stazione

Per tutte e tre le temperature è osservabile una generale suddivisione dei mesi che portano una sottostima del valore simulato, da quelli che invece sovrastimano il dato osservato. Proprio per la sovrastima è già identificabile un blocco di mesi estivo-autunnali in cui vi è un accordo tra i punti stazione considerati. In particolare Settembre si mostra come la mensilità che presenta per tutte le stazioni valori di bias medio più elevati, seguito dal mese di Luglio e Agosto.

Anche Febbraio, contrariamente a quanto avviene per i mesi vicini, presenta valori di discostamento medio, positivi, eccezion fatta per la stazione id 142, che comunque risulta lievemente sottostimata. Si rileva, inoltre, come le simulazioni mostrino valori che più diffusamente superano le serie misurate nelle temperature minime.

Un generale fenomeno di sottostima dei valori termometrici da modello si verifica invece, tendenzialmente nel periodo invernale-primaverile, con alcune controtendenze nei mesi di Febbraio, come già individuato e Aprile, dove si verifica una modesta sovrastima del dato climatico per alcuni punti stazione. In questo caso è possibile individuare nella simulazione delle temperature massime, una maggioranza a livello annuale (inteso come insieme dei 12 mesi), di dati sottostimati.

In generale poi, la presenza di isolati punti stazione con bias di segno opposto rispetto al resto della serie mensile, può essere legata talvolta alla localizzazione, soprattutto quando trattasi di zone in sporgenza al mare o nei pressi dei Colli Euganei. Tuttavia è necessario osservare anche spazialmente il comportamento dei discostamenti, per verificare l'effettivo legame con la morfologia e l'orografia dell'area.

Il modello utilizzato in questo studio nella simulazione climatica soffre quindi, di errori sistematici la cui causa potrebbe essere ricondotta ad una imperfetta rappresentazione di processi fisici fondamentali, che per alcune stazioni e progressivamente con il verificarsi di temperature più elevate, porta ad avere valori prodotti dal modello che si discostano significativamente da quelli osservati. Infatti nel mese di Settembre si registrano bias sulle temperature minime, che talvolta raggiungono i $5,5^{\circ}\text{C}$, mentre non corrisponde una simmetria nei discostamenti in sottostima, che raggiungono valori massimi mensili poco oltre i $2,2^{\circ}\text{C}$, nelle massime.

VARIAZIONE STAGIONALE DEI BIAS

Una suddivisione su trimestri, associabili alle quattro stagioni meteorologiche, ha permesso di effettuare un ulteriore confronto tra i tre bias (*tabelle 9 e 10*), che conferma e rende più chiaro quanto visto in precedenza. Permette di avere un quadro riassuntivo del comportamento delle simulazioni all'interno delle singole stagioni, con particolare riferimento alla periodicità degli errori.

Inverno (Dicembre, Gennaio, Febbraio)				Primavera (Marzo, Aprile, Maggio)			
Staz	bias su T° MEDIE	bias su T° MINIME	bias su T° MASSIME	Staz	bias su T° MEDIE	bias su T° MINIME	bias su T° MASSIME
98	0.11	0.52	-0.39	98	-0.266	0.731	-0.880
105	0.10	1.21	-1.12	105	-0.422	0.996	-1.486
106	0.42	1.37	-0.58	106	-0.010	1.601	-1.043
111	0.05	0.78	-0.95	111	-0.309	0.902	-0.940
119	0.41	1.43	-0.70	119	0.198	1.935	-1.126
121	0.00	0.25	-0.29	121	-0.487	0.339	-0.860
123	0.56	1.81	-0.73	123	0.042	1.604	-1.045
142	-1.07	-0.91	-1.32	142	-1.135	-1.012	-1.319
145	0.28	1.30	-0.87	145	-0.053	1.466	-0.990
149	-0.06	0.67	-0.98	149	-0.249	0.801	-1.009
150	0.25	1.21	-1.02	150	-0.216	1.462	-1.577
151	0.25	0.83	-0.57	151	-0.163	1.685	-1.561
152	0.62	1.27	-0.30	152	-0.024	1.669	-1.196
167	0.40	1.35	-0.96	167	-0.491	1.082	-1.397
168	0.32	0.72	-0.12	168	-1.098	0.282	-1.524
169	0.33	0.70	-0.30	169	-0.188	1.156	-1.171
170	-0.86	-0.66	-0.94	170	-0.802	-0.586	-1.015
175	0.08	0.43	-0.53	175	-0.780	0.423	-1.227
178	0.26	0.57	-0.11	178	-0.973	0.034	-1.194
179	-0.03	1.00	-1.33	179	-0.491	0.803	-1.194
180	-0.70	-0.81	-0.36	180	-0.962	-0.879	-1.014
182	0.26	0.39	0.12	182	-0.207	0.485	-0.442
201	-0.58	-0.98	-0.07	201	0.209	-0.606	1.033
206	-0.06	0.25	-0.26	206	-0.796	-0.078	-1.031



Tabella 9: discostamenti associati alle temperature medie, minime e massime per le stagioni invernale e primaverile

Estate (Giugno, Luglio, Agosto)				Autunno (Settembre, Ottobre, Novembre)			
Staz	bias su T° MEDIE	bias su T° MINIME	bias su T° MASSIME	Staz	bias su T° MEDIE	bias su T° MINIME	bias su T° MASSIME
98	1.65	2.39	1.72	98	1.30	1.70	0.65
105	1.65	2.44	1.65	105	1.12	1.71	0.19
106	2.25	3.39	2.13	106	1.66	2.33	0.76
111	1.33	2.43	1.17	111	1.20	1.89	0.29
119	2.74	4.14	2.12	119	2.13	3.34	0.60
121	2.02	2.36	2.70	121	1.38	1.67	0.94
123	2.48	3.92	1.82	123	1.94	3.03	0.55
142	0.53	0.25	1.18	142	0.21	-0.02	0.13
145	2.18	3.46	1.75	145	1.53	2.25	0.63
149	1.72	2.26	1.86	149	1.21	1.58	0.59
150	1.80	3.11	1.18	150	1.36	2.07	0.13
151	2.22	3.71	1.69	151	1.90	2.89	0.45
152	1.93	3.46	1.36	152	1.47	2.58	0.02
167	0.72	2.80	-0.47	167	1.36	2.55	-0.32
168	-0.51	1.08	-0.75	168	0.87	1.72	0.16
169	1.47	2.65	0.87	169	1.11	1.47	0.28
170	0.98	0.83	1.57	170	0.57	0.28	0.63
175	0.43	1.73	0.25	175	0.93	2.23	0.22
178	0.95	1.53	1.41	178	0.98	1.32	0.69
179	1.23	2.65	0.77	179	1.40	2.51	0.04
180	1.15	0.89	1.95	180	0.59	0.19	0.85
182	2.17	2.28	2.86	182	1.23	1.17	1.18
201	2.30	1.00	4.18	201	1.17	0.09	2.29
206	1.76	2.19	2.36	206	1.01	1.25	0.87

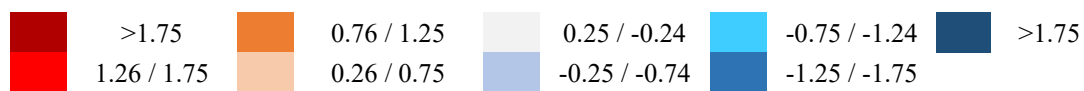


Tabella 10: discostamenti associati alle temperature medie, minime e massime per le stagioni estiva e autunnale

A supporto di quanto prima osservato a livello mensile, si identifica una correlazione stagionale degli errori del modello per tutte e tre le temperature.

In particolare, il periodo invernale mostra bias su temperature medie contenute, al di sotto del grado centigrado in senso assoluto per tutte le stazioni eccetto una, mentre i discostamenti su valori minimi mostrano invece una predominanza di stazioni sovrastimate. A tal proposito si rileva come le simulazioni delle temperature minime tendano a superare l'osservato per tutte le stagioni. Le temperature massime sono soggette invece ad una generale sottostima, che in pochi punti stazione superano il grado centigrado di differenza.

La primavera vede condizioni simili al periodo precedente, con la sostanziale differenza sul bias delle temperature medie, il quale si porta per quasi tutte le stazioni verso valori negativi, rilevando una generale sottostima del modello, seppur con valori che non superano i $-1,25^{\circ}\text{C}$.

Il periodo estivo vede invece una generale marcata sovrastima delle simulazioni per tutte le temperature, rispetto ai dati osservati per la quasi totalità delle stazioni. Non manca anche per questa stagione una controtendenza della stazione posta nell'area lagunare (id 168).

La stagione autunnale vede una riduzione del discostamento, soprattutto per le temperature massime, che rimane nel complesso positivo.

Una considerazione complessiva delle stagioni permette di osservare inoltre come vi sia una differenziazione delle stazioni 142 e 170, per cui il discostamento mostra valori negativi per tutte le temperature nei mesi più freddi; nel periodo estivo e autunnale, pur seguendo la tendenza delle altre stazioni, mantengono valori di sovrastima più contenuti. Si tratta infatti rispettivamente di punti posti a 250 e 150 m.s.l.m., nei comuni di Cinto Euganeo (PD) e Teolo (PD), che risultano localizzati ai piedi dei Colli Euganei.

Considerati i risultati sopraesposti sia a livello mensile, che per completezza basati sulle stagioni, si può quindi dedurre come, per l'area di studio, le proiezioni per il periodo 1995-2010, presentino un comportamento degli errori per cui le differenze si accentuino convergendo verso il periodo estivo e tendano a diminuire verso le stagioni più fredde.

Tenendo conto di tutte le stazioni dell'area di studio e riassumendo, si riscontrano discostamenti a livello annuale i cui valori percentuali si riportano in *tabella 11*, da cui ancora una volta si osserva il ruolo dei bias sulle temperature minime che si confermano

i più elevati e con un intervallo sensibilmente più ampio dei restanti due. Inoltre si nota chiaramente, come al contrario, la percentuale media di discostamento massimo annuale sia ridotta.

Discostamenti percentuali annuali			
	Bias su T° minime (%)	Bias su T° medie (%)	Bias su T° massime (%)
Minimo	-5 %	-3 %	-4 %
Medio	15 %	4 %	1 %
Massimo	33%	10 %	12 %

Tabella 11: discostamenti percentuali annui delle simulazione per temperature minime, medie e massime

La rappresentazione nello spazio dei discostamenti di temperatura media, minima e massima, a livello stagionale permette di osservare ed analizzare la presenza di eventuali correlazioni legate alla localizzazione.

Vengono qui riportate, in *figura 22* le mappe delle stazioni, tematizzate adottando le classi di bias precedentemente utilizzate, al fine di mantenere un'uniformità di rappresentazione e rendere più veloce la comprensione. Si sono identificate 9 classi di discostamento, rappresentate nella legenda riportata in *figura 21*.

La distribuzione spaziale mensile dei 3 bias viene riportata per completezza nell'*Allegato I* in appendice al presente lavoro, in cui si trovano le singole mappe.

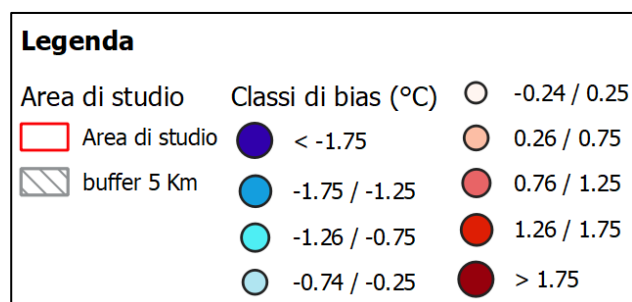
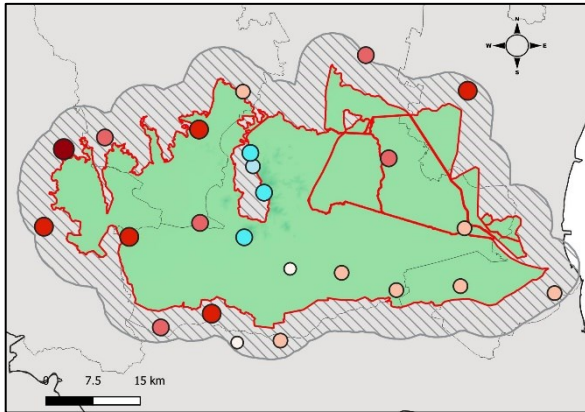
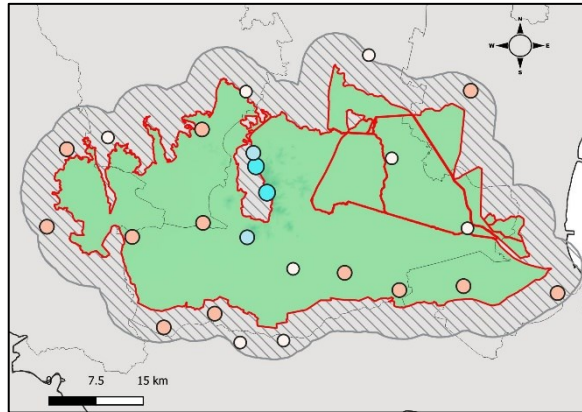


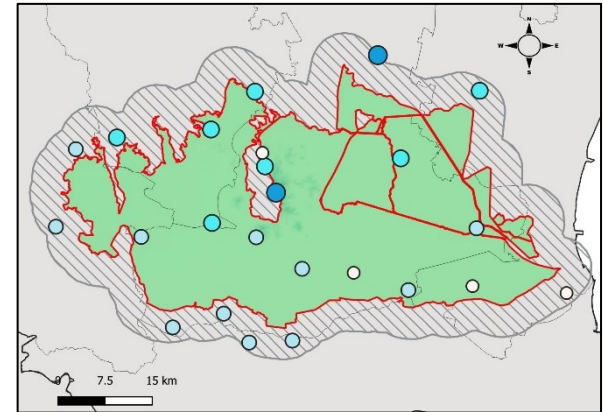
Figura 21: Legenda della mappatura spaziale dei discostamenti (bias)



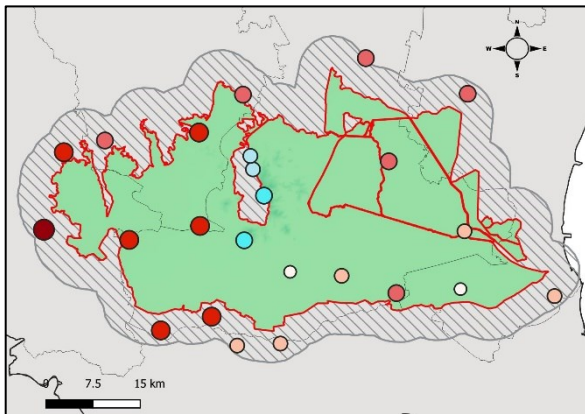
Inverno – bias su temperature minime



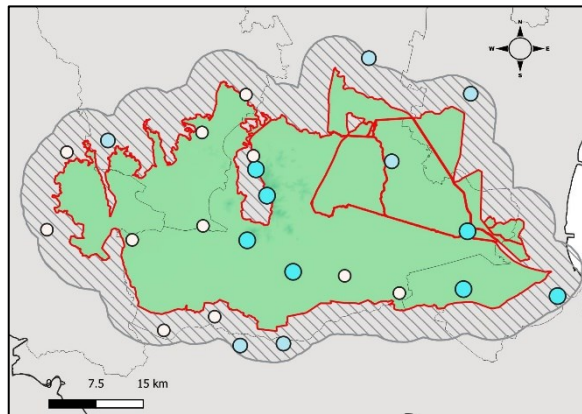
Inverno – bias su temperature medie



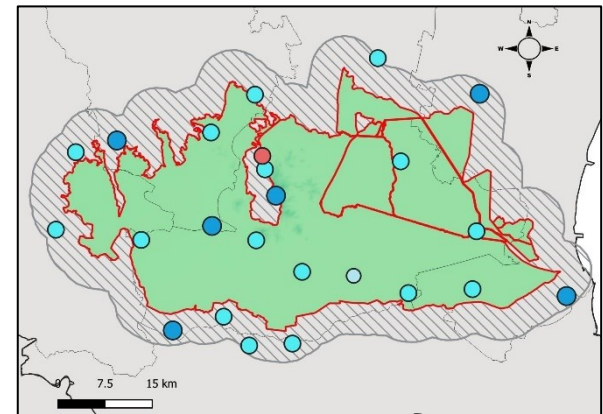
Inverno – bias su temperature massime



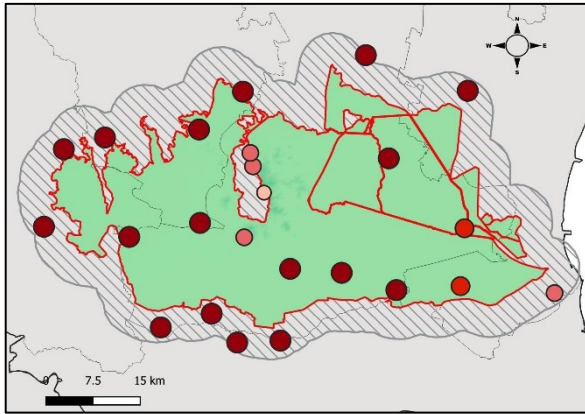
Primavera – bias su temperature minime



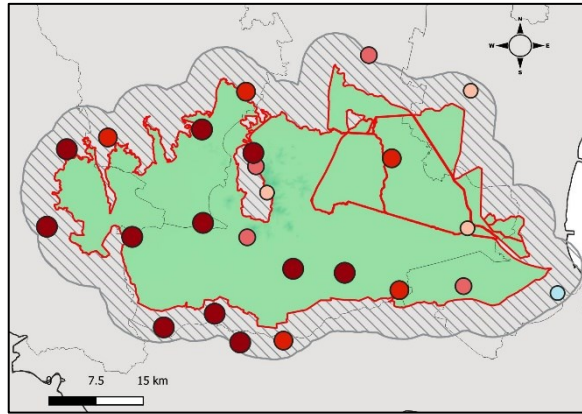
Primavera – bias su temperature medie



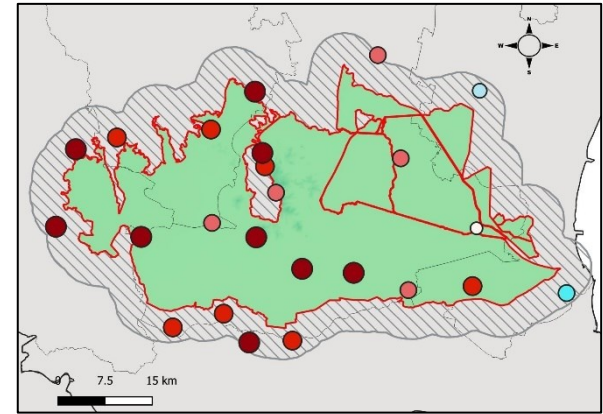
Primavera – bias su temperature massime



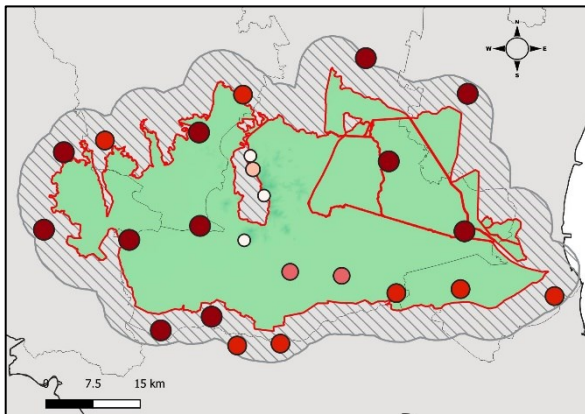
Estate – bias su temperature minime



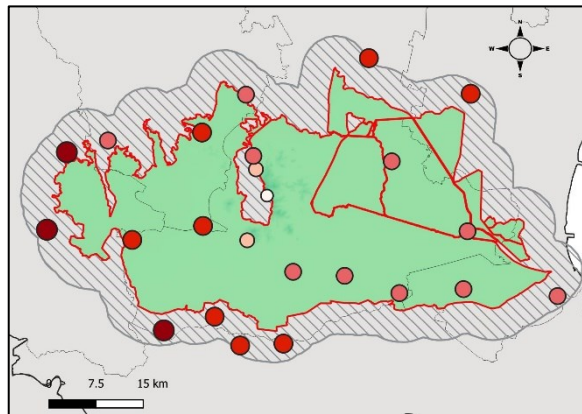
Estate – bias su temperature medie



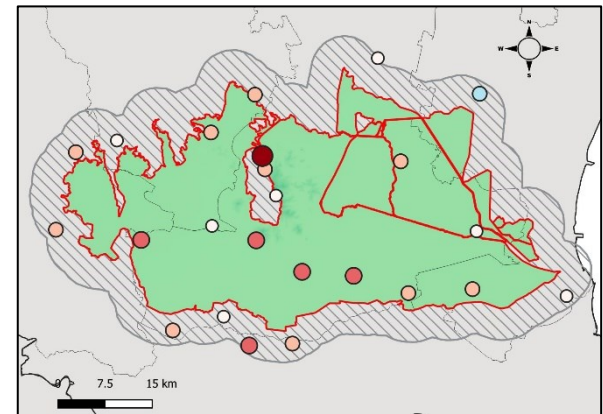
Estate– bias su temperature massime



Autunno – bias su temperature minime



Autunno – bias su temperature medie



Autunno– bias su temperature massime

Figura 22: distribuzione spaziale stagionale dei bias su temperature minime, medie e massime

Per quanto riguarda la distribuzione dei bias stagionali nel territorio dell'area studiata, si osserva come non esista un'univoca relazione spaziale tra i bias periodici.

In inverno si assiste a discostamenti generalmente limitati, con una sottostima per tutta l'area delle temperature massime. Tuttavia le temperature minime per la maggioranza delle stazioni presentano una sovrastima, maggiore nella parte occidentale dell'area, mentre le medie mostrano una maggiore omogeneità nei bias, ma entrambe fanno registrare una tendenza contraria nell'errore della simulazione nei punti posti in prossimità dei Colli Euganei, localizzati centralmente all'area di studio e di cui sono ricomprese solo le propaggini. Questo è riscontrabile anche per la simulazione delle minime nel periodo primaverile.

I maggiori bias sono attribuibili invece al periodo estivo-autunnale, come già emerso osservando i dati precedentemente, rilevando anche un sostanziale accordo spaziale verso una sovrastima, con alcuni sporadici punti stazione aventi verso dell'errore opposto. Questo si collega a quanto visto anche per le singole mensilità dove proprio per i mesi di Luglio e Settembre si assiste ad una maggiore sovrastima omogenea delle temperature a livello di area studiata. In autunno si ritorna ad avere una attenuazione dei discostamenti, con una differenziazione rilevabile nelle stazioni centrali, a ridosso dei rilievi collinari e in generale una tendenza all'omogeneizzazione dei bias a livello areale, fenomeno che si verifica anche nella stagione invernale.

Riassumendo quanto presentato finora, non sono quindi rilevabili unitariamente e per tutte le stazioni relazioni univoche tra la localizzazione e il valore dell'errore. Al netto del bias sulle minime che registra per tutte le stagioni quasi totalmente sovrastime, eccezion fatta per i punti stazione prima segnalati, per gli errori di temperatura minima e massima, non è possibile osservare una solida correlazione con la localizzazione. Altresì, nelle serie di temperature massime risulta un minore impatto degli errori da cui è affetto il modello, tendenzialmente più visibile nelle due stagioni più fredde. Questo indica come i valori massimi simulati siano tendenzialmente più aderenti alla realtà, rispetto ai minimi, che invece risentono di maggiore sovrastima.

In fase di correzione è necessario tenere conto di tale divario per poter migliorare l'approccio correttivo, considerando il fatto che tali correzioni sono funzionali alla definizione dell'evapotraspirazione, la quale richiede il valore di escursione termica ($T_{max} - T_{min}$).

5.3. Correzione delle temperature

Il metodo di correzione utilizzato in questo studio si basa sul *Linear Scaling (LS)*, adottando quali fattori addittivi i bias precedentemente determinati nell'intervallo di calibrazione, per correggere i valori di temperatura simulata.

L'obiettivo generale di questo lavoro è proprio volto a validare un metodo correttivo delle simulazioni da modello climatico CPM, per stimare l'evapotraspirazione potenziale.

Vengono qui presentati separatamente i due approcci testati nell'ambito di questo lavoro, con particolare attenzione ai parametri statistici (bias residuo e RMSE) utilizzati per valutare la bontà della correzione.

5.3.1. Correzione con il solo bias medio

È stato assunto quale primo approccio correttivo l'utilizzo del bias sulla temperatura media come unico fattore correttivo da applicare a tutte le tre serie di temperatura nel periodo di validazione, allo scopo di valutare l'efficacia di un metodo di correzione semplice.

Per poter effettuare una valutazione del metodo su tutta l'area di studio, che comprenda un confronto tra le stazioni, i bias sono stati aggregati a scala annuale, la cui rappresentazione è riportata in *figura 23*. Vengono confrontati gli andamenti dei discostamenti nel periodo di validazione, attenzionando sia il bias esistente all'origine, sia quello ancora presente dopo la correzione.

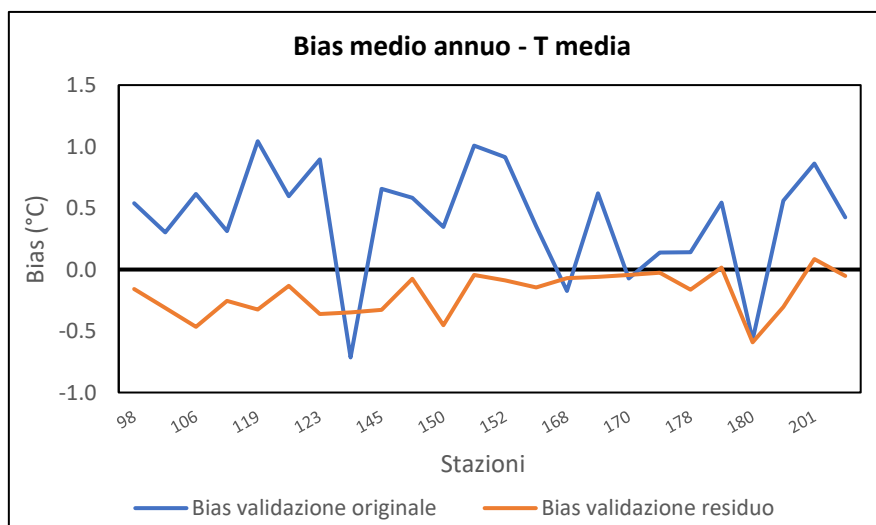


Figura 23: confronto degli andamenti annuali dei bias sulla temperatura media relativi al periodo di validazione, presenti prima e dopo la correzione.

Il bias residuo annuo registrato dopo la correzione, che risulta essere un parametro di validazione, assieme al RMSE, presenta valori per la maggior parte delle stazioni, nettamente inferiori alla situazione pre-correzione, con un range tra 0 e 0,5 °C .

Uniche eccezioni sono osservabili in due punti stazione, dove però i discostamenti sono comunque nell'intorno dell'intervallo identificato. Si ritrova quindi, l'influenza positiva della correzione, di fatto rendendo efficace la tecnica nella riduzione dell'errore di ricostruzione delle temperature del modello .

Un'analisi più approfondita viene effettuata aggregando i valori di discostamento calcolati per tutte le stazioni come media dei singoli mesi e considerando nuovamente l'intervallo di calibrazione, allo scopo di osservare la presenza di mensilità più difficoltose da correggere, la cui rappresentazione grafica è riportata in *figura 24*.

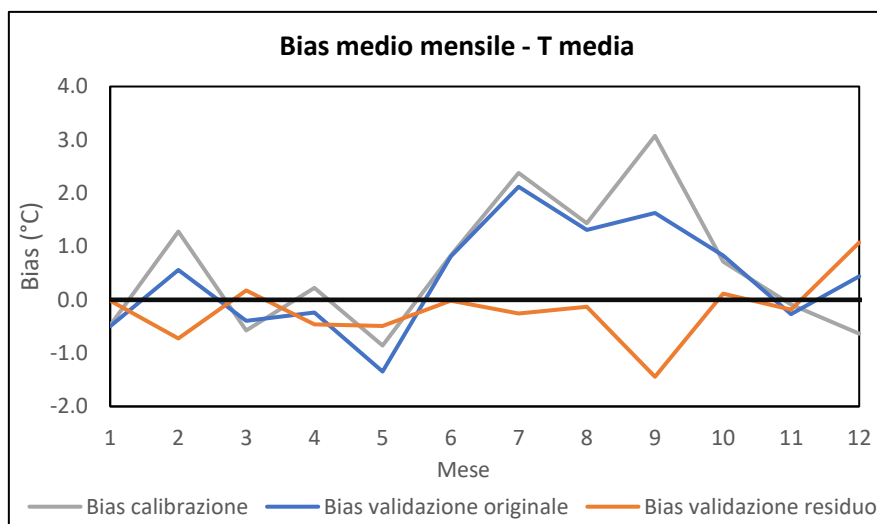


Figura 24: andamento dei bias sulla temperatura media, relativi al periodo di calibrazione, validazione e residuo dopo la correzione nel periodo di validazione.

Si evidenzia anche graficamente, a conferma di quanto sopra esposto, come il periodo estivo-autunnale, identificato tra i mesi di Giugno e Settembre, dimostri a livello di area indagata, un maggior discostamento dal dato osservato, sia nel periodo di calibrazione, che nell'intervallo di validazione. Ne consegue osservare anche il bias residuo, ottenuto dopo la correzione nel periodo di validazione in cui è stato applicato, che registra le discrepanze più elevate, proprio nei mesi in cui le differenze tra i valori del discostamento dei due periodi sono più marcate, risultando più evidente nel mese di Settembre.

5.3.2. Correzione con l'applicazione dei tre bias

Il secondo approccio correttivo ha previsto l'utilizzo differenziato di tre bias, legati alle temperature medie, minime e massime mensili del periodo di calibrazione, per correggere rispettivamente i valori climatici simulati nel periodo di validazione.

Tale scelta è nata dalla ricerca di un metodo di correzione che tenga conto delle differenze di simulazione e quindi dei discostamenti che esistono tra le tre serie di temperatura da cui dipende il calcolo di ET, al fine di confrontare poi l'efficacia del metodo rispetto al precedente. Nei grafici seguenti riportati nelle *figure 25, 26, 27*, vengono presentati i confronti, relativamente al periodo di validazione, tra bias originari e i discostamenti residui dopo la correzione.

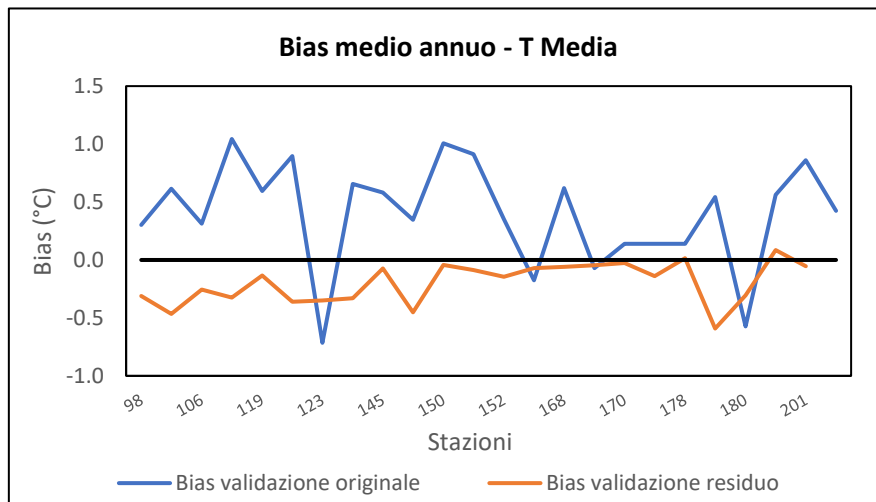


Figura 25: confronto degli andamenti annuali dei bias relativi al periodo di validazione per la temperatura media, presenti prima e dopo la correzione

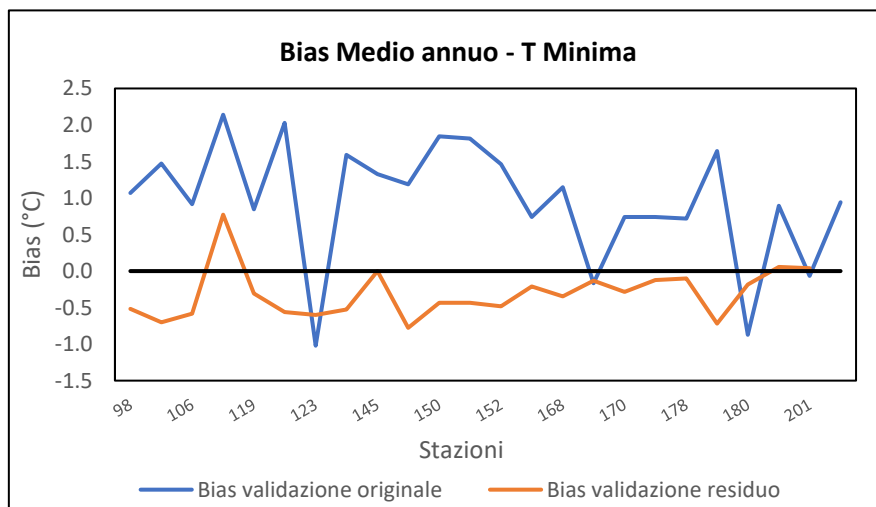


Figura 26: confronto degli andamenti annuali dei bias relativi al periodo di validazione per la temperatura minima, presenti prima e dopo la correzione

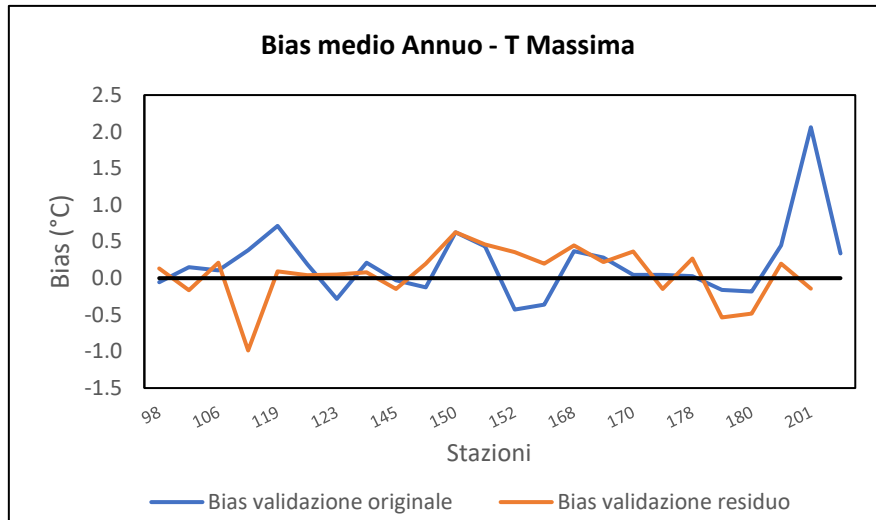


Figura 27: confronto degli andamenti annuali dei bias relativi al periodo di validazione per la temperatura massima, presenti prima e dopo la correzione.

Utilizzando tre differenti bias come fattori correttivi è possibile analizzare separatamente l'effetto della correzione sul discostamento residuo, per ognuna delle temperature, impiegate poi nella formula di stima dell'evapotraspirazione potenziale.

Per quanto riguarda il bias medio, che risulta il medesimo del precedente approccio, si conferma quanto osservato sopra. Considerando invece i discostamenti calcolati sulle temperature minime si osserva l'impatto positivo della correzione, con il bias residuo che si riduce in termini assoluti, rimanendo nel range +/- 1°C.

Discorso parzialmente diverso deve essere fatto per la temperatura massima simulata, che già nelle analisi precedenti, mostrava una maggiore vicinanza al dato reale osservato dalla rete di misura. Infatti questo può essere confermato osservando il grafico in *figura 27*, dove talvolta si vede addirittura il bias residuo superare in termini assoluti il discostamento originario, che nel complesso risulta limitato, indicando come il modello climatico utilizzato simuli già di per sé più accuratamente il dato massimo, rispetto alle temperature medie e minime.

5.3.3. Confronto tra approcci correttivi

Le prestazioni dell'approccio correttivo sono inoltre valutate, per ciascun punto di stazione di misura, utilizzando il secondo indicatore, l'RMSE o radice quadrata dell'errore quadratico medio. Questo parametro statistico è stato calcolato secondo la *formula 8* riportata al *capitolo 4.7* e rappresenta la posizione media di un valore termometrico simulato, derivato sia dal modello non corretto che a seguito di correzione, rispetto alla medesima temperatura osservata.

Il calcolo dell'RMSE ha avuto lo scopo di confrontare l'errore di simulazione del modello climatico per l'area di studio, considerando per ogni stazione e in maniera separata, le serie di temperatura media, minima e massima a scala mensile, per poter esprimere un giudizio sull'efficacia della correzione. Inoltre tra i due parametri statistici considerati nel presente lavoro, è un criterio che permette di confrontare tra loro i due approcci illustrati precedentemente, in quanto questo descrittore è una misura di accuratezza che si basa sulla scala di temperature analizzate e quindi bene si adatta al confronto di valori riferiti alla stessa variabile.

Vengono qui riportati graficamente nelle *figure 28, 29, 30* ed in termini numerici, in *tabella 12*, per le tre temperature, gli andamenti dell'RMSE, risultanti prima di applicare il fattore correttivo (in rosso) e dopo la sua utilizzazione (in verde), per entrambi gli approcci.

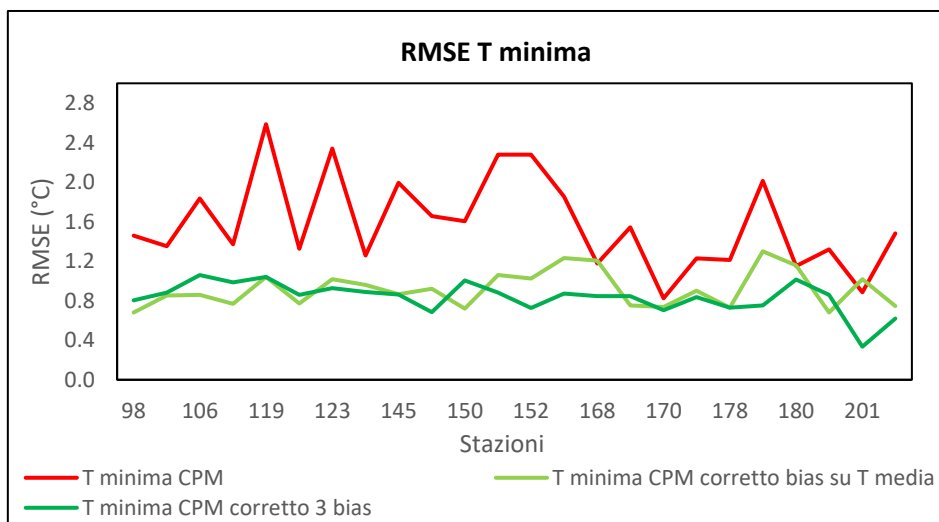


Figura 28: rappresentazione grafica dei confronti tra valori di RMSE pre-correzione e post-correzione, differenziati per temperature minime e per entrambi gli approcci correttivi

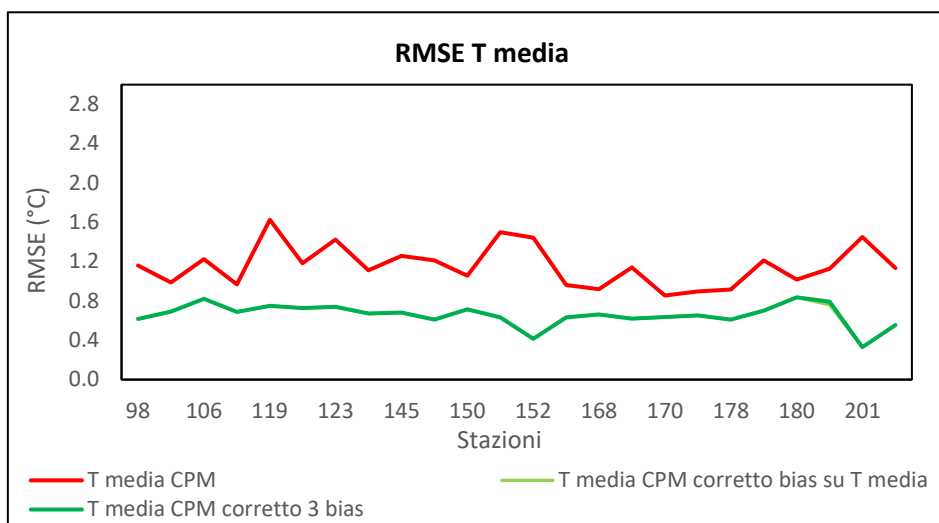


Figura 29: rappresentazione grafica dei confronti tra valori di RMSE pre-correzione e post-correzione, differenziati per temperature medie e per entrambi gli approcci correttivi. I due approcci correttivi si sovrappongono

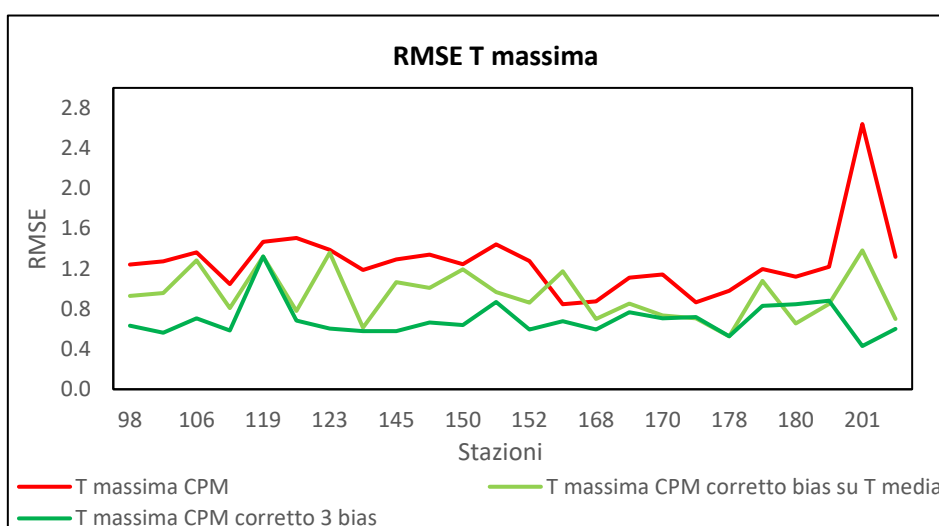


Figura 30: rappresentazione grafica dei confronti tra valori di RMSE pre-correzione e post-correzione, differenziati per temperature massime e per entrambi gli approcci correttivi

Confronto RMSE medio annuale (°C)						
Approccio correttivo	Pre-correzione			Post-correzione		
	T Minima	T Media	T Massima	T Minima	T Media	T Massima
Bias su T media	1.58	1.16	1.27	0.92	0.66	0.94
3 bias				0.83	0.66	0.69

Tabella 12: confronto dei valori di RMSE ottenuti dai due approcci, applicati nel presente lavoro, nel migliorare la ricostruzione della serie di temperature minime, medie e massime

Analizzando in prima battuta le temperature minime è possibile notare una generale buona performance della correzione per tutti e due gli approcci (correzione con il bias sulle temperature medie e correzione applicando i 3 bias), anche se si scorge una chiara diminuzione del RMSE utilizzando la terna di bias. Inoltre l'unica stazione che presentava un peggioramento nel primo caso, subisce una diminuzione dell'indicatore nel secondo. Nel complesso dell'area di studio, infatti, la media annuale del parametro RMSE dopo la correzione passa da un valore di 0,92 °C a 0,83 °C, diminuendo anche le fluttuazioni tra le diverse stazioni.

La temperatura media è risultata invece aver un egual beneficio dalla correzione con entrambi gli approcci, in quanto il relativo bias è stato utilizzato in maniera comune come fattore correttivo tra i due approcci. La serie corretta si presenta sempre ben al di sotto di quella non soggetta ad aggiustamento e con valori dello statistico, compresi tra 0,3 °C e 0,85 °C, che quindi non superano mai l'unità.

Il netto miglioramento con il secondo approccio si ha con le temperature massime, che passa da 0,94 °C del primo approccio a 0,69 °C, utilizzando i 3 bias, in quanto la correzione perseguita con un fattore correttivo unico, basato sul dato medio, non considera che le temperature massime simulate risultano già di per sé maggiormente aderenti al dato reale.

Combinando quanto appena visto per il parametro statistico RMSE con i bias residui sopra esposti per i due approcci, che costituiscono il secondo indicatore adottato in questa tesi, si può constatare come il metodo di correzione, basato sul *Linear Scaling (LS)*, sia con l'utilizzo del bias medio, che adottando i rispettivi bias di temperatura, mostri un miglioramento nella simulazione dei valori di temperatura.

Nel primo approccio, proprio per la presenza di un solo fattore correttivo, va a maggior vantaggio delle temperature medie, mentre nel secondo ci si trova ad avere un'ulteriore diminuzione anche degli altri discostamenti.

Nel secondo approccio, adottando per le singole serie di temperature, il rispettivo bias, si ha chiaramente una correzione più sartoriale e differenziata per le variabili minime, medie e massime. A tal proposito per avere un quadro completo, vengono riportati integralmente nell'*Allegato 2*, posto in appendice, i parametri statistici bias residuo e RMSE di questo secondo approccio, per serie simulata non corretta e corretta. È infatti riscontrabile una globale diminuzione di entrambi i parametri, ad indicare l'efficacia nella riduzione

dell'errore di ricostruzione con la correzione perseguita seguendo la tecnica presentata in questo lavoro.

È tuttavia necessario sottolineare come l'obiettivo finale sia la messa a punto di una correzione che permetta di migliorare i valori di evapotraspirazione potenziale stimati indirettamente a partire dai dati termometrici corretti. Di conseguenza nel successivo capitolo sarà necessario valutare l'influenza del metodo correttivo sulla variabile del bilancio idrologico, per poterne confermare l'effettiva efficacia.

5.4. Stima dell'evapotraspirazione potenziale

La determinazione dell'evapotraspirazione potenziale (ETP), ultimo passo di questo lavoro, è stata effettuata attraverso la formula empirica di Hargreaves-Samani (1985). Questo parametro, importante ai fini del bilancio idrologico, è stato stimato utilizzando i dati termometrici osservati e le simulazioni da modello, in quest'ultimo caso sia originarie che precedentemente corrette, attraverso gli approcci descritti sopra, a scopo di confronto. I risultati che si andranno a presentare forniscono quindi un'ulteriore verifica legata alla bontà dell'approccio correttivo delle simulazioni, che vanno ad influenzare l'evapotraspirazione potenziale, la cui determinazione dipende strettamente dalle temperature utilizzate nel metodo.

Anche in questo caso si procede ad illustrare separatamente i risultati per i due approcci che hanno guidato il presente lavoro, allo scopo di determinare con ragionevole certezza l'idoneità del metodo correttivo nel produrre temperature, che permettano di simulare accuratamente il dato evapotraspirativo per l'area di studio.

5.4.1. Verifica dell'evapotraspirazione potenziale giornaliera media

Nelle *tabelle 13 e 14* sono riportati per ogni stazione i seguenti tre valori di ETP, associati ai rispettivi scarti assoluti con il parametro climatico-idrologico:

- evapotraspirazione da dati osservati, che funge da linea di base;
- evapotraspirazione da dati di temperatura simulati grezzi;
- evapotraspirazione da temperature simulate corrette con i due approcci già visti.

Gli scarti assoluti di ETP da temperature corrette sono contrassegnati da coloritura rossa, quando questi superano il valore da simulazione grezza e in verde quando si verifica il contrario, indicando quindi un effetto positivo della tecnica correttiva.

L'evapotraspirazione viene espressa in mm/giorno, derivata come dato medio a livello annuale, ottenuto considerando il giorno mediano di ogni mese, mentre gli scarti assoluti, sempre espressi come altezza, sono il risultato della somma annuale degli scarti, derivati a livello dei singoli mesi. Ne consegue quindi la possibilità di effettuare una valutazione dello scarto assoluto, basata sul confronto tra ETP grezza (da dati non corretti) ed ETP da valori termometrici corretti. Una diminuzione della differenza indica che si è di fronte a stime che più si avvicinano al dato evapotraspirativo reale.

ETP ANNUALE – correzione con il solo bias sulle temperature medie					
stazioni	ETP Obs (mm/gg)	ETP CPM (mm/gg)	ETP CPM Corretto (mm/gg)	scarti CPM (SOMMA)	scarti CPM corretto (SOMMA)
98	2.79	2.73	2.67	1.26	1.43
105	2.75	2.63	2.58	2.02	2.03
106	2.81	2.71	2.62	1.76	2.32
111	2.64	2.53	2.48	1.35	1.87
119	2.87	2.71	2.59	2.13	3.31
121	2.70	2.75	2.68	1.79	0.98
123	2.83	2.67	2.56	2.12	3.21
142	2.29	2.36	2.38	1.62	1.16
145	2.78	2.64	2.56	1.82	2.64
149	2.72	2.63	2.56	1.74	1.85
150	2.86	2.69	2.63	2.18	2.81
151	2.89	2.76	2.66	1.87	2.82
152	2.89	2.73	2.64	1.98	2.96
167	2.68	2.37	2.34	3.72	4.06
168	2.49	2.23	2.26	3.06	2.78
169	2.76	2.65	2.59	1.38	2.05
170	2.43	2.49	2.48	1.60	0.90
175	2.60	2.45	2.45	1.76	1.87
178	2.60	2.54	2.52	1.10	1.04
179	2.76	2.56	2.51	2.45	3.04
180	2.52	2.56	2.57	1.46	0.85
182	2.63	2.67	2.60	1.59	0.82
201	2.06	2.49	2.40	5.21	4.09
206	2.70	2.69	2.64	1.45	0.93
MEDIA	2.67	2.59	2.54	2.02	2.16

Tabella 13: valori di evapotraspirazione potenziale (ETP) derivati da tre diverse basi dati di temperatura, corretti con il solo bias di temperatura media e relativi scarti

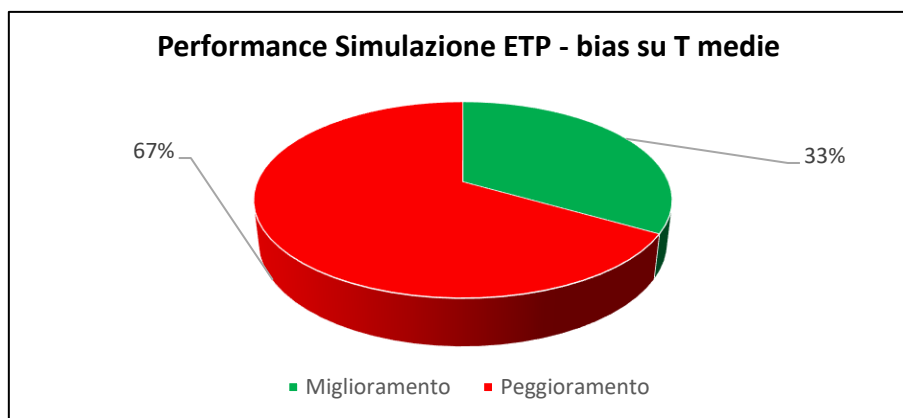


Figura 31: Performance delle temperature simulate corrette con il solo bias sulle temperature medie nella stima dell'evapotraspirazione potenziale (ETP).

ETP ANNUALE – 3 bias					
stazioni	ETP Obs (mm/gg)	ETP CPM (mm/gg)	ETP CPM Corretto (mm/gg)	scarti CPM (somma)	scarti CPM corretto (somma)
98	2.80	2.75	2.81	1.41	0.91
105	2.74	2.64	2.78	1.82	0.87
106	2.82	2.73	2.85	1.76	1.06
111	2.61	2.54	2.69	1.11	1.04
119	2.87	2.73	2.59	1.90	3.27
121	2.71	2.76	2.73	1.74	0.95
123	2.83	2.69	2.88	1.96	0.99
142	2.26	2.36	2.33	1.88	1.05
145	2.78	2.66	2.81	1.71	1.08
149	2.75	2.64	2.70	1.82	0.95
150	2.84	2.70	2.91	1.89	1.23
151	2.85	2.77	2.97	1.53	1.54
152	2.86	2.75	2.95	1.59	1.24
167	2.65	2.38	2.74	3.18	1.13
168	2.49	2.25	2.52	2.85	0.67
169	2.72	2.66	2.82	1.24	1.33
170	2.43	2.51	2.45	1.72	1.02
175	2.57	2.47	2.65	1.34	1.13
178	2.62	2.54	2.60	1.25	0.91
179	2.76	2.58	2.79	2.36	1.23
180	2.48	2.57	2.46	1.82	1.04
182	2.69	2.68	2.59	1.36	1.37
201	2.06	2.51	2.07	5.37	0.59
206	2.74	2.70	2.69	1.45	1.06
MEDIA	2.59	2.55	2.61	2.13	1.06

Tabella 14: valori di evapotraspirazione potenziale (ETP) derivati da tre diverse basi dati di temperatura, corretti con tre bias e relativi scarti

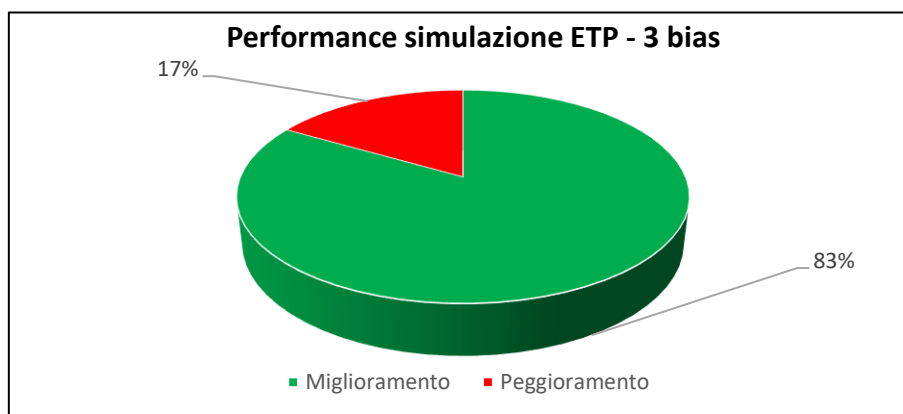


Figura 32: Performance delle temperature corrette rispettivamente con i tre bias associati alle temperature minime, medie e massime, nella stima dell'evapotraspirazione potenziale (ETP).

A questo proposito, si è potuto osservare come l'approccio correttivo con il solo bias medio non porti beneficio nella stima di evapotraspirazione per la maggior parte dei punti griglia utilizzati. Infatti solo per il 33% dei punti stazione (*figura 31*) la correzione delle temperature genera valori di evapotraspirazione, caratterizzati da minore discostamento con ETP da temperature osservate, rispetto agli omologhi stimati con le simulazioni grezze.

La bassa percentuale di miglioramenti nella stima di ETP portati dalla correzione delle temperature, non è quindi sufficiente ad accettare il primo approccio, in quanto pur avendo potuto prima validare di per sé il metodo specifico, i risultati appena mostrati hanno confermato che necessità considerare anche gli errori propri delle serie termometriche minime e massime mensili, indicando quindi un'influenza non trascurabile nella formula di Hargreaves-Samani (1985), dove oltre al valore medio, è richiesta anche l'escursione termica. Questa infatti, con tale approccio risulta troppo ampia rispetto alla realtà, in quanto il fattore correttivo basato sul bias delle temperature medie, tende a sottostimare l'errore sulle minime e sovrastima invece il discostamento sulle massime.

L'utilizzo della terna di bias, applicati come fattore correttivo alle rispettive temperature mensili simulate, permette di ottenere nuovi valori di evapotraspirazione derivati, che nel 83% di punti stazione (*figura 32*), mostrano scarti assoluti inferiori ad ETP derivata da valori climatici grezzi. Rimangono ancora 4 stazioni per cui questo approccio non porta un miglioramento, ma per 3 di queste si tratta di differenze assolute di scarto trascurabili, per cui in definitiva l'unica stazione per cui l'ETP stimata dopo la correzione, mostra un

effettivo aumento del discostamento rispetto all'utilizzo di dati simulati grezzi, è la 119. Si tratta del punto stazione considerato nello studio più ad ovest, posto nella pianura di Verona, che si caratterizza per valori di bias, in particolar modo relativi alla temperatura minima, tra i più elevati.

Considerando che l'obiettivo del lavoro mira a validare un metodo correttivo delle temperature, per stimare con maggior precisione l'evapotraspirazione in un'area di studio, questo è un risultato che indica come sia possibile accettare il secondo approccio di correzione delle simulazioni. Infatti, l'insieme dei punti, corrispondenti a valori di evapotraspirazione, viene rappresentato nello scatterplot in *figura 33*, permettendo di visualizzare e di fornire graficamente la correlazione esistente tra ETP da temperature osservate e ETP da simulazione non corretta e corretta.

A tal proposito si nota un generale miglioramento nell'utilizzare quest'ultime serie di temperatura nella stima dell'evapotraspirazione potenziale, in quanto i valori risultano maggiormente raggruppati, rispetto al caso non corretto, dimostrando una maggiore correlazione con le variabili stimate da dati reali.

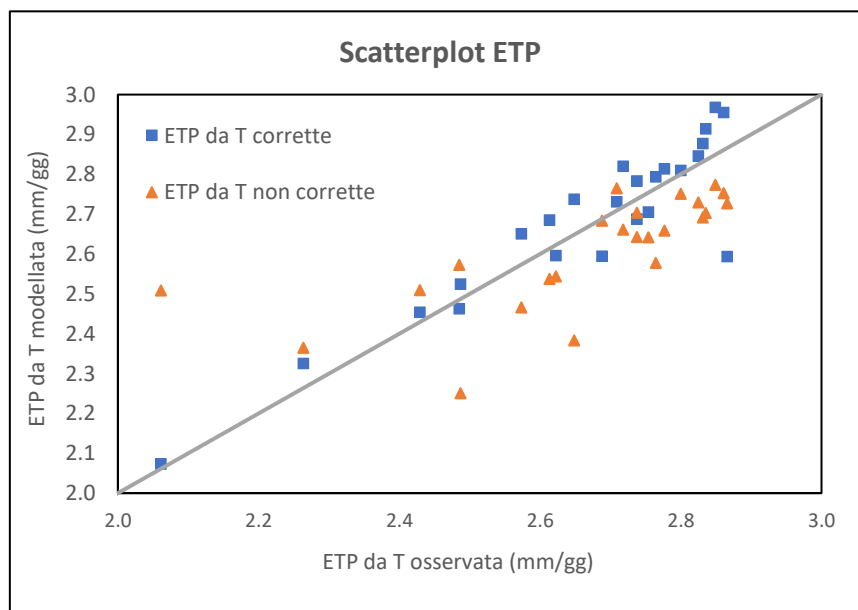


Figura 33: Evapotraspirazione potenziale (ETP) media annuale, calcolata utilizzando temperature osservate (Obs), simulate non corrette (CPM) e simulate corrette (CPM corretto), attraverso i fattori correttivi mensili, basati sui bias mensili di temperatura media, minima e massima

Un'ultima considerazione può essere svolta prendendo in esame uno studio condotto nel lungo periodo da Politeo et. al, che hanno confrontato il metodo di Penman-Montheith, considerato il riferimento, ma che richiede un numero elevato di variabili misurate con accuratezza, con il metodo proposto da Hargreaves, applicati entrambi all'Ambiente veneto, in cui ricade anche l'area di studio.

Considerando l'insieme di dati giornalieri, l'impiego dei parametri originali della formula di Hargreaves (1985), porta gli autori ad osservare una sovrastima di ETP nel 26,4% dei casi. Lo stesso gruppo di lavoro ha preso in esame una taratura sito-specifica del metodo, da cui è emerso come una modifica del parametro HC, calibrato sull'area porti ad una diminuzione delle differenze tra i due metodi sopra menzionati.

L'adozione di un parametro calibrato sul Nord-Est potrebbe quindi costituire un ulteriore miglioramento nell'approccio utilizzato nello studio, non tanto nella metodologia, ma in un'ottica di miglioramento generale del dato di evapotraspirazione potenziale stimato.

5.4.2. Distribuzione spazio-temporale dell'evapotraspirazione potenziale

La validazione di una tecnica di correzione dei bias che consenta una stima di evapotraspirazione migliorata, permette di poter confrontare anche a livello spaziale la distribuzione dei valori tra le stazioni.

La rappresentazione dell'evapotraspirazione potenziale media annua per l'area di studio, riferita al periodo storico 1995-2010 è proposta nella *figura 34* utilizzando, similmente a quanto già fatto precedentemente, una classificazione mediante scala di colore, adottando nel caso specifico un passo di 50 mm.

In considerazione del fatto che ETP, nella formula utilizzata per la sua stima, dipende tra le altre variabili, anche dalle temperature, la sua distribuzione spaziale si correla a quella delle variabili termometriche. Nel complesso risulta individuabile in maniera più marcata, rispetto alle temperature, una relazione spaziale con i valori di ETP, che altresì sono anche influenzati dalla latitudine.

Anche in questo caso si ha una differenziazione percepibile attorno all'area dei Colli Euganei, che sono caratterizzati da valori annuali più contenuti rispetto alla restante area di studio, che risultano compresi tra 800 e 900 mm/anno. I maggiori quantitativi di evapotraspirazione hanno, invece una tendenza a localizzarsi nel quadrante occidentale dell'ambito, con altezze massime poco sotto i 1100 mm/anno.

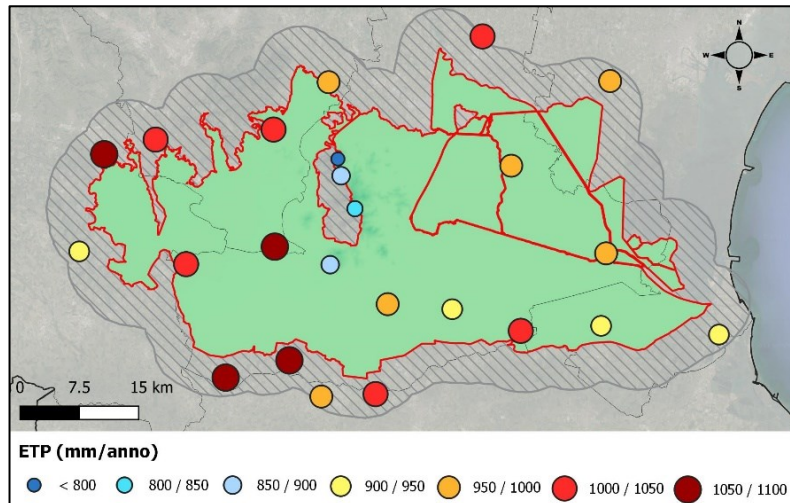


Figura 34: rappresentazione spaziale dell'evapotraspirazione potenziale, determinata attraverso le temperature simulate a seguito di correzione

Allo stesso modo è possibile analizzare l'andamento annuale dell'evapotraspirazione potenziale (*figura 35*), che mostra chiaramente ciò che ci si aspetta, ovvero una distribuzione temporale di ETP mediata tra le stazioni, che ha il suo massimo nei mesi estivi, caratterizzati da temperature più elevate, che ne aumentano i processi traspirativi delle piante e di allontanamento dell'acqua dal suolo, mentre in accordo con il flusso di calore minore che caratterizza i mesi invernali, si ritrovano in questa stagione i valori più bassi. Si può infine osservare come confrontando, anche a scala mensile ETP da variabili osservate e simulate, corrette, vi sia una sostanziale sovrapposizione ad ulteriore conferma che l'approccio di correzione delle temperatura basato su tre bias, è idoneo a ricostruire con un grado soddisfacente l'evapotraspirazione potenziale.

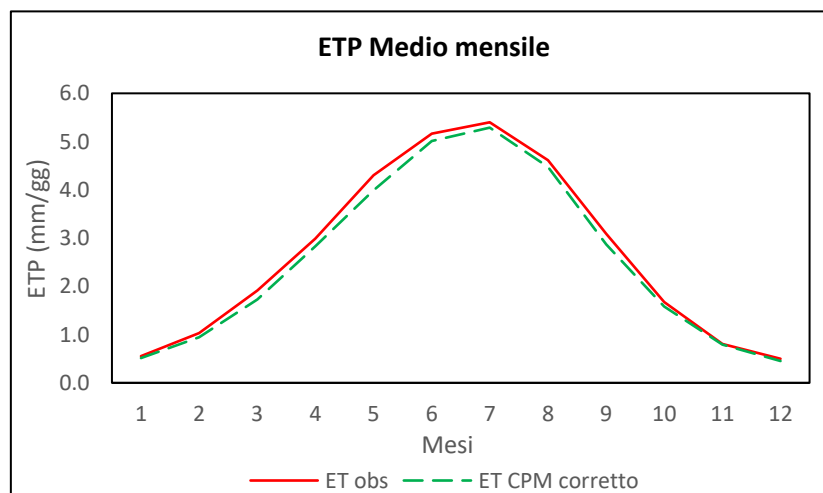


Figura 35: andamento mensile dell'evapotraspirazione potenziale (ETP) ottenuti da valori termometrici osservati (ET obs) e simulati corretti (ETP CPM corretto)

6. CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha avuto l'obiettivo generale di osservare e quantificare l'accuratezza dei modelli climatici ad alta risoluzione nella rappresentazione della temperatura, con lo scopo di sviluppare un metodo correttivo (bias correction) che permetta di ridurre gli errori sistematici da cui sono affette le simulazioni e di migliorare la stima dell'evapotraspirazione potenziale (ETP), importante parametro del ciclo idrologico, utilizzabile per studiare il cambiamento climatico nelle risorse idriche.

Nel contesto di questo lavoro è stata considerata quale area di riferimento, un ambito di bassa pianura veneta compresa tra i fiumi Brenta ed Adige, posto nel settore centro-meridionale della regione e caratterizzato da ampie superfici agricole interessate dalla pratica irrigua, per cui sono stati acquisiti dati climatici dalla rete di misura regionale e simulazioni modellistiche ad alta risoluzione, riferiti entrambi al periodo storico 1995-2010.

Per la stima dell'evapotraspirazione potenziale è stato utilizzato il metodo di Hargreaves-Samani (1985), noto anche come metodo della radiazione solare stimata. Si tratta infatti di un procedimento che si basa sulle temperature e non richiede di conoscere altre variabili meteorologiche, consentendo di stimare appunto, la radiazione solare in arrivo alla terra, prendendo a riferimento quella extraterrestre e garantendo quindi una ampia applicazione alle principali aree strumentate, tra cui l'ambito di studio.

Ha assunto di conseguenza un ruolo fondamentale la correzione delle variabili climatiche simulate da modello. Infatti, l'obiettivo specifico ha riguardato lo studio dei discostamenti (bias) delle simulazioni di temperatura a scala mensile, rispetto al dato reale misurato, al fine di valutare e applicare un metodo correttivo che permetta una stima coerente dell'evapotraspirazione.

I primi risultati ottenuti dal confronto tra dati termometrici osservati e prodotti da modello climatico, hanno confermato la presenza di un generale discostamento tra le due serie indagate, con valori medi mensili di temperatura, minima, media e massima simulate, che talvolta sottostimano e in altre sovrastimano il dato reale.

Altresì un'analisi più accurata, basata sulle singole stazioni, ha portato ad osservare come per l'area di studio la sovrastima tenda ad essere predominante e massima nel periodo

estivo, fino ad arrivare al periodo invernale dove i discostamenti positivi si fanno meno pronunciati e aumentano tra le stazioni i bias negativi.

Anche a livello di singole serie di temperatura vi è indicazione come sia presente una differenziazione degli errori, con temperature minime che rimangono per tutti i mesi dell'anno sovrastimate dal modello, mentre quelle medie e massime sono nell'ordine, via via più aderenti al dato osservato, pur presentando comunque una differenza.

Infatti nell'ambito di studio si è registrato un errore annuale medio sulle temperature minime del 15%, con limiti inferiore e superiore rispettivamente di -5% e 33%. Decisamente migliori sono i discostamenti medi annuali per i valori medi e massimi, che si attestano nell'ordine rispettivamente del 4% e 1%, dove anche l'intervallo di bias è più ridotto.

Da un punto di vista spaziale, considerata anche la relativa omogeneità nelle caratteristiche dell'area di studio, non si sono individuate solide ed univoche relazioni tra i valori di bias e la localizzazione dei punti stazione nello spazio, nonostante siano comunque rilevabili variazioni tra le stazioni considerate.

Un quadro dei discostamenti ha permesso di costruire un processo di correzione degli errori di ricostruzione delle serie termometriche, scegliendo il metodo *Linear scaling (LS)*, che basa l'aggiustamento dei valori di temperatura media mensile su bias additivi.

Il metodo utilizzato in questo studio è considerato uno degli approcci più semplici e immediati da implementare per la correzione di variabili termometriche e pluviometriche simulate, tanto da essere preso come termine di confronto rispetto a metodi più sofisticati e raffinati. Tra questi vi è il *Quantile Mapping (QM)*, che a differenza di LS, non si limita alla correzione del solo valore medio (momento primo) di una serie simulata, ma ne corregge anche la variabilità complessiva. Questo aspetto rende questa tecnica maggiormente efficace per la correzione di valori estremi.

La correzione dei bias di temperatura, che costituisce il punto centrale di questo lavoro, vede come obiettivo cardine l'applicazione e validazione di un metodo che permetta di ridurre gli errori da cui le simulazioni del modello sono affette. A tal proposito è stato adottato lo *Split Sample (SS)* o campionamento suddiviso con cui è stato definito un periodo di validazione su cui verificare l'approccio correttivo.

A tal fine è stato adottato un primo approccio basato sull'utilizzo del solo bias sulle temperature medie di ogni punto stazione, come fattore correttivo per tutte le serie, a cui

ne è seguito un successivo in cui sono stati utilizzati tutti e tre i bias per le rispettive temperature.

Per questo secondo punto si sottolinea un miglioramento sia dell'errore quadratico medio che del bias residuo per entrambi gli approcci sopra riportati, tuttavia con una migliore performance adottando tutti i tre bias, che vanno a correggere separatamente le temperature.

Il terzo punto del lavoro vede come obiettivo specifico la valutazione del metodo correttivo sulla stima dell'evapotraspirazione potenziale (ETP), che riassumendo dalle pagine precedenti, viene determinata con il metodo di Hargreaves-Samani (1985).

In questo contesto la correzione dei bias termometrici gioca un ruolo fondamentale nella corretta stima del dato evapotraspirativo.

Per questo punto si può concludere evidenziando infatti, come un approccio basato su un unico fattore correttivo, ottenuto dal bias sulle temperature medie, utilizzato anche per minime e massime, porta alla stima di valori di ETP ottenuta da variabili climatiche corrette, caratterizzati da peggioramento per oltre il 60% delle stazioni, rispetto alla simulazione grezza. Questo avviene in contraddizione al risultato della validazione del metodo correttivo che mostrava una riduzione dell'errore.

La bassa percentuale di miglioramenti di ETP portati dalla correzione delle temperature non è quindi sufficiente ad accettare questo approccio, in quanto emerge la necessità di considerare anche gli errori propri delle serie termometriche minime e massime mensili, indicando quindi un'influenza nella formula di stima dell'evapotraspirazione, dove oltre al valore medio, è richiesta anche l'escursione termica. Questa, infatti, con tale approccio risulta troppo ampia rispetto alla realtà, in quanto il fattore correttivo basato sul bias delle temperature medie tende a sottostimare l'errore sulle minime e sovrastimare invece il discostamento sulle massime.

La stima di ETP utilizzando temperature corrette con tre bias differenziati, associati alle rispettive variabili climatiche, porta ad avere un netto miglioramento per oltre l'80% delle stazioni, rispetto all'utilizzo di un dato termometrico grezzo, permettendo di individuare in questo secondo approccio, una tecnica migliore per giungere ad una stima di ETP coerente.

A conclusione del procedimento di stima dell'evapotraspirazione potenziale per l'area di studio nel periodo 1995-2010, è emerso che questo parametro risulta essere compreso tra 800 e 1100 mm/annui, con una differenziazione tra l'area prossima ai rilievi collinari, caratterizzata da quantitativi che non superano i 900 mm/anno e invece il quadrante occidentale dell'ambito dove si verificano i valori più elevati.

Le risultanze presentate in questo elaborato, hanno permesso di rispondere all'obiettivo generale del lavoro che in breve mirava a testare una tecnica di correzione delle proiezioni dei modelli climatici che tenesse conto, non solo del miglioramento in senso stretto delle simulazione di temperature, ma in un contesto più ampio, che permettesse di giungere alla stima dell'evapotraspirazione potenziale, il più fedele possibile alla realtà.

Ne deriva quindi un approccio correttivo nel complesso valido per l'area di studio nella determinazione empirica dell'evapotraspirazione, che può costituire una base applicabile agli scenari simulati futuri per lo studio dei trend e dell'influenza del cambiamento climatico su questa variabile.

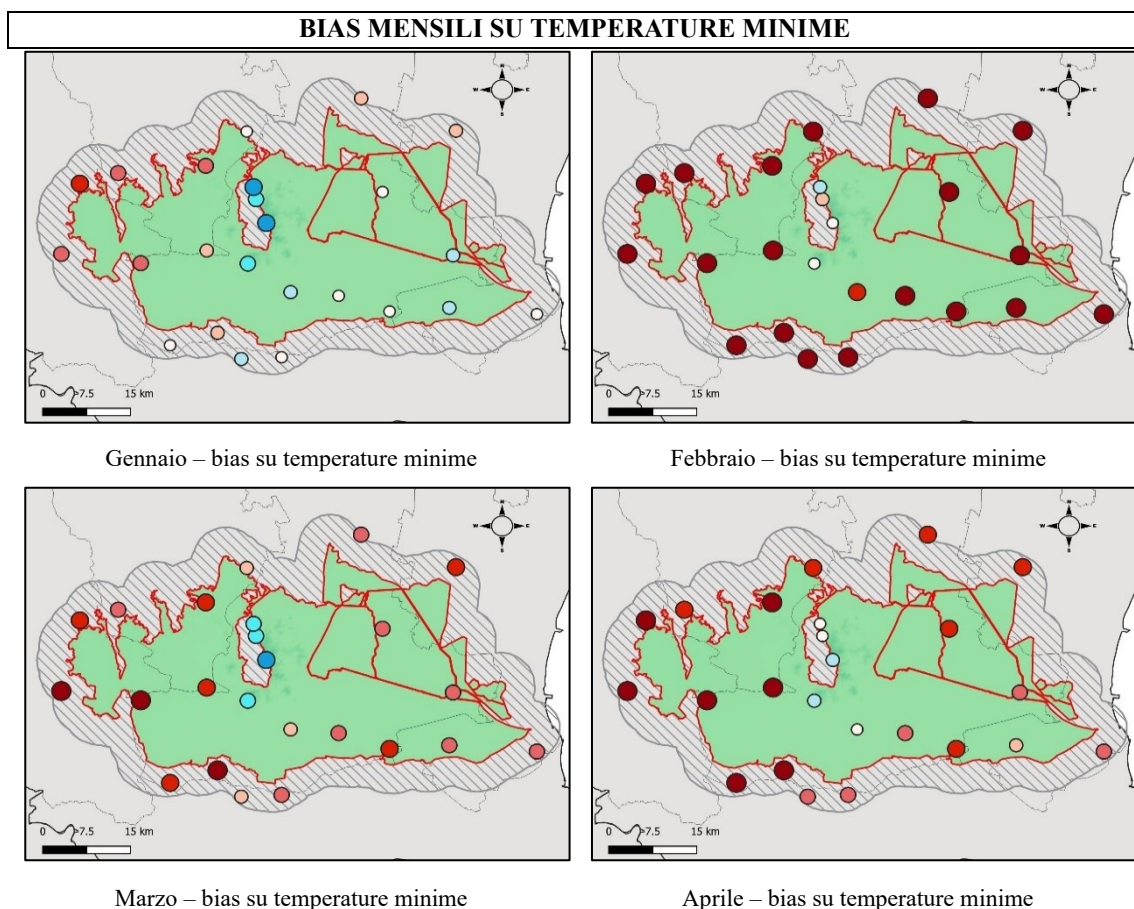
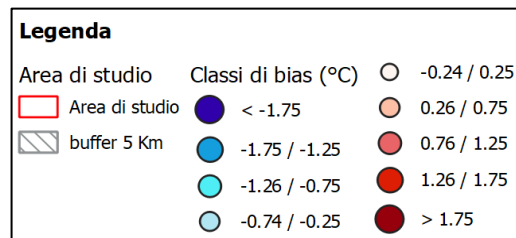
Appendice

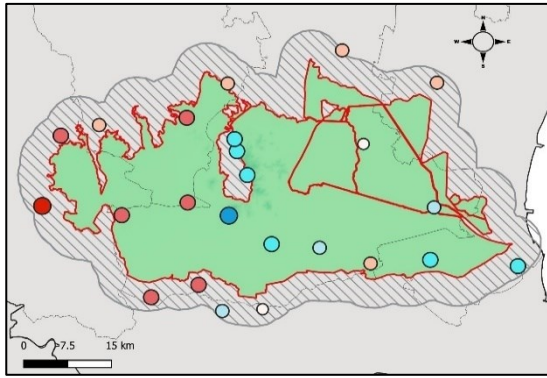
In questa sezione sono riportati gli allegati a completamento di quanto presentato in questo lavoro, che supportano e permettono un ulteriore approfondimento dei risultati sopra esposti.

- **Allegato 1: Mappe di localizzazione spaziale dei bias di temperatura**

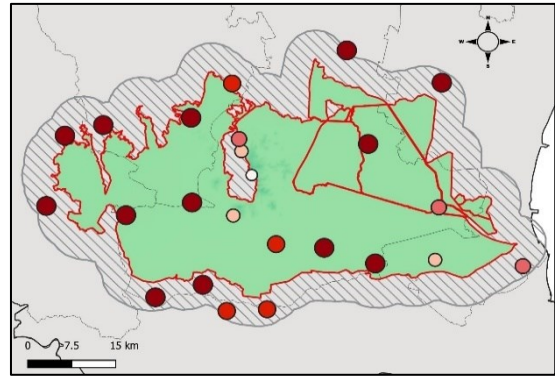
Sono qui presentate le distribuzioni spaziali dei bias calcolate nell'ordine sulle temperature minime, medie e massime per ogni mese. Queste rappresentano per ogni stazione, il grado di discostamento proprio di ogni mensilità.

A tal proposito si ripropone la legenda, già utilizzata in precedenza che classifica a scala di colore i discostamenti.

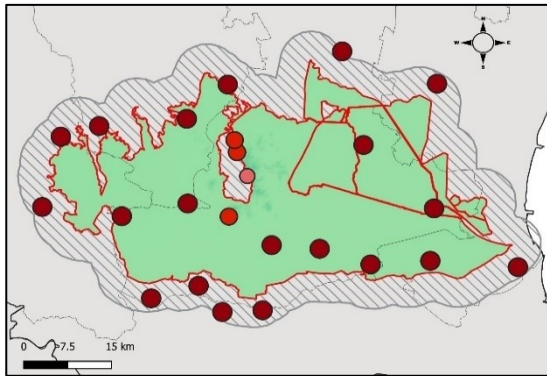




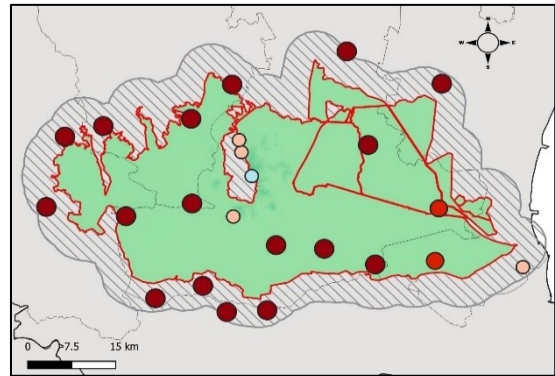
Maggio – bias su temperature minime



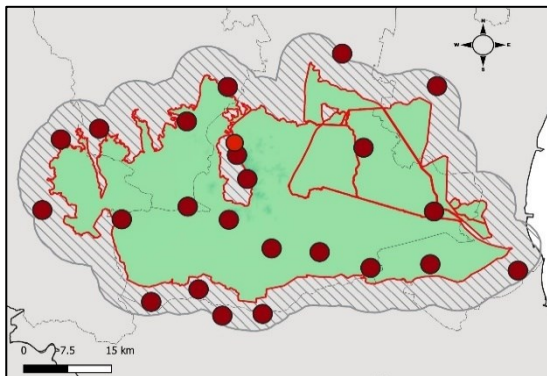
Giugno – bias su temperature minime



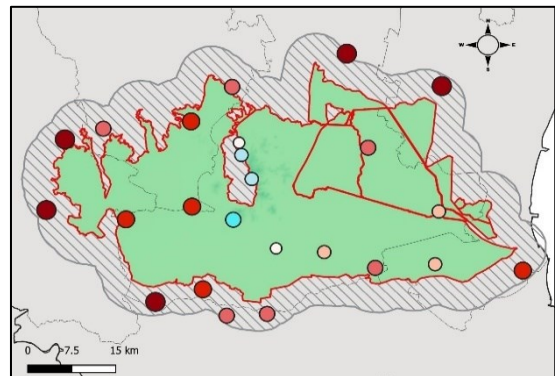
Luglio – bias su temperature minime



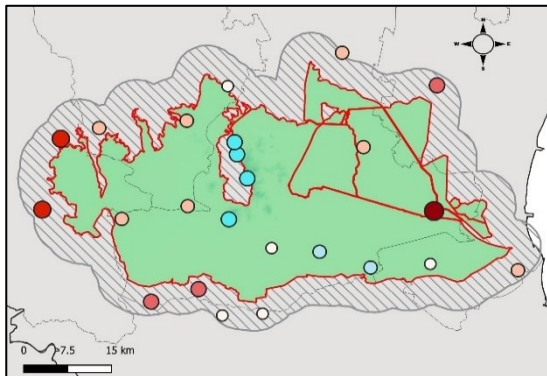
Agosto – bias su temperature minime



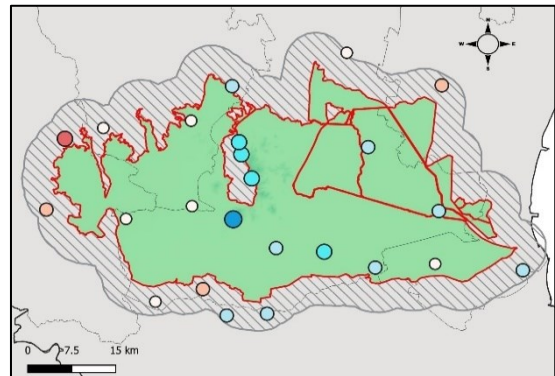
Settembre – bias su temperature minime



Ottobre – bias su temperature minime

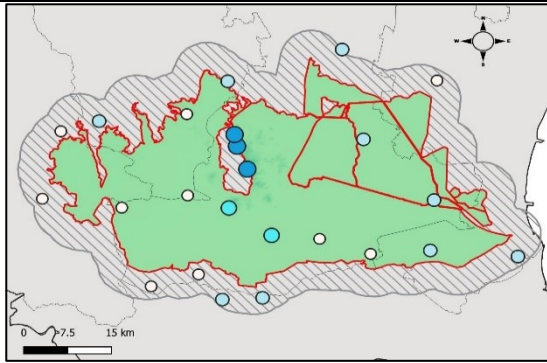


Novembre – bias su temperature minime

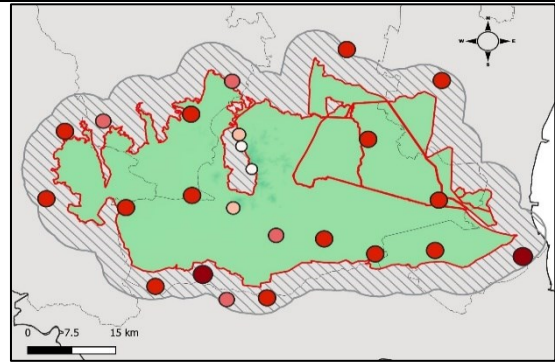


Dicembre – bias su temperature minime

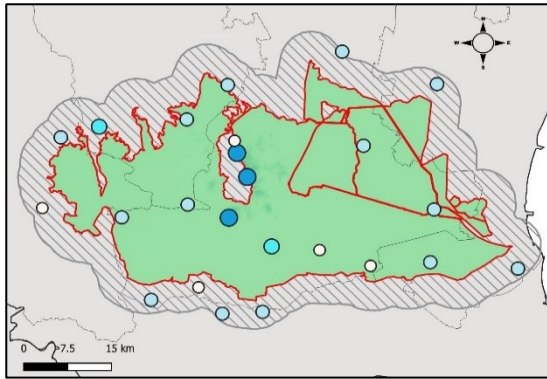
BIAS MENSILI SU TEMPERATURE MEDIE



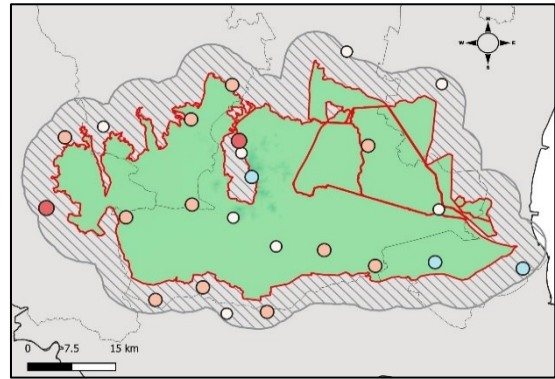
Gennaio – bias su temperature medie



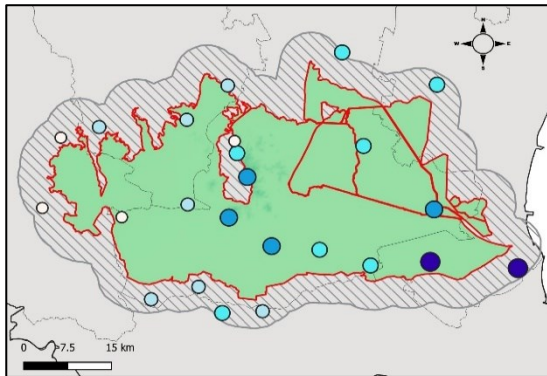
Febbraio – bias su temperature medie



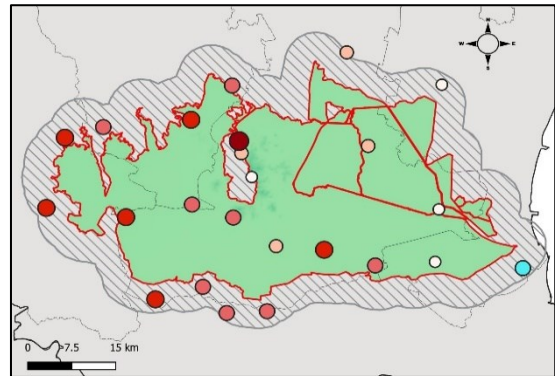
Marzo – bias su temperature medie



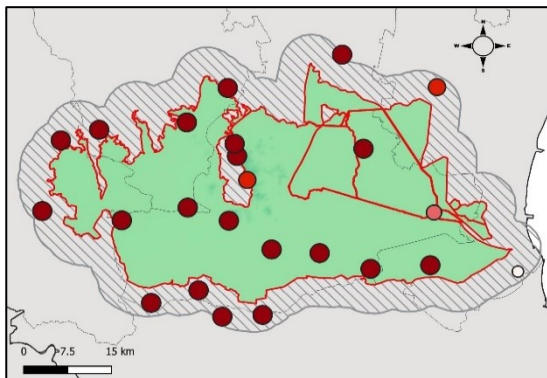
Aprile – bias su temperature medie



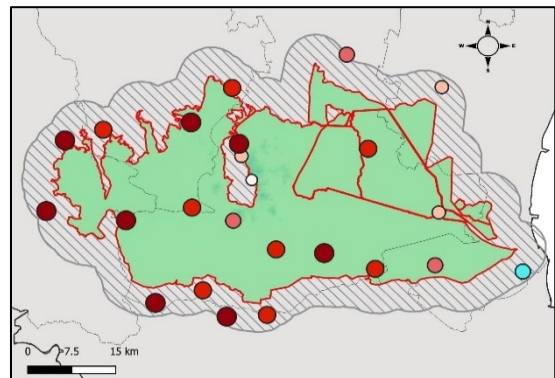
Maggio – bias su temperature medie



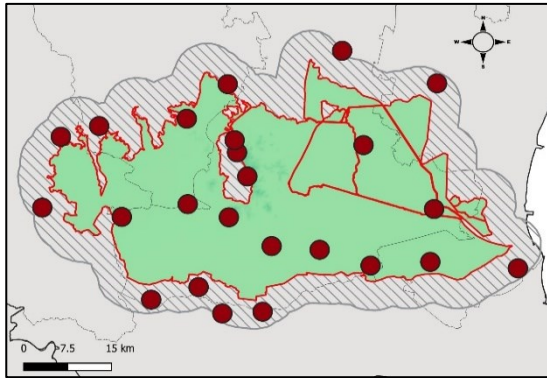
Giugno – bias su temperature medie



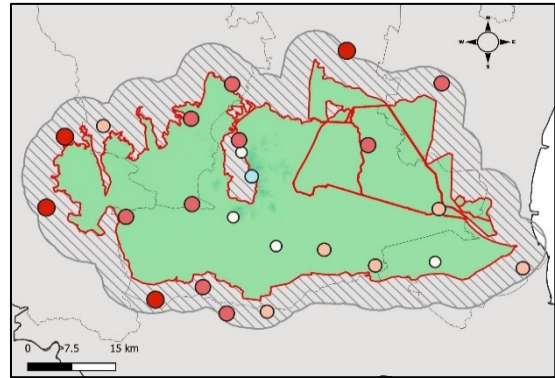
Luglio – bias su temperature medie



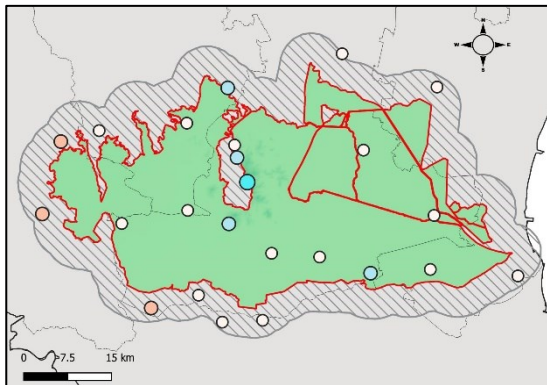
Agosto – bias su temperature medie



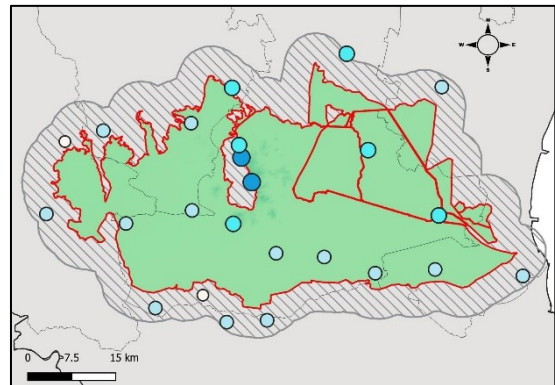
Settembre – bias su temperature medie



Ottobre – bias su temperature medie

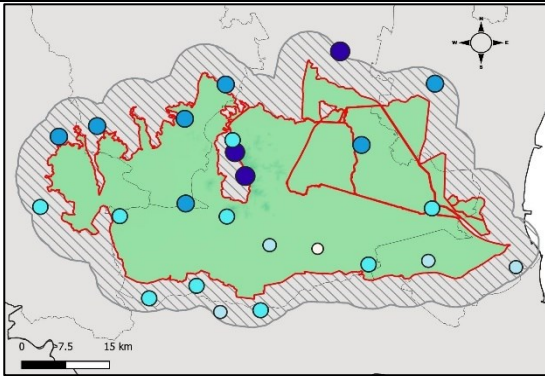


Novembre – bias su temperature medie

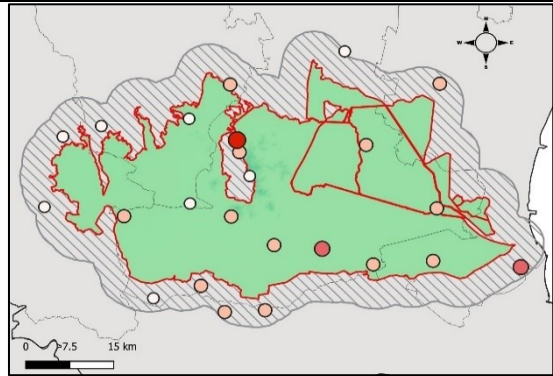


Dicembre – bias su temperature medie

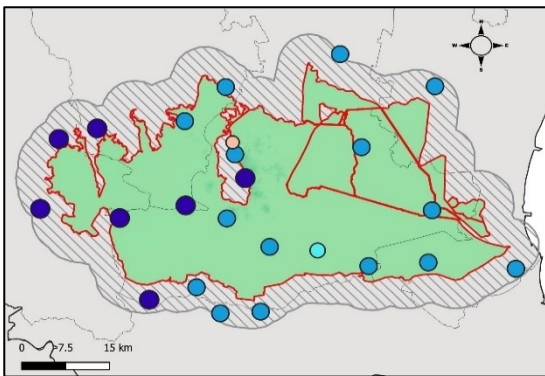
BIAS MENSILI SU TEMPERATURE MASSIME



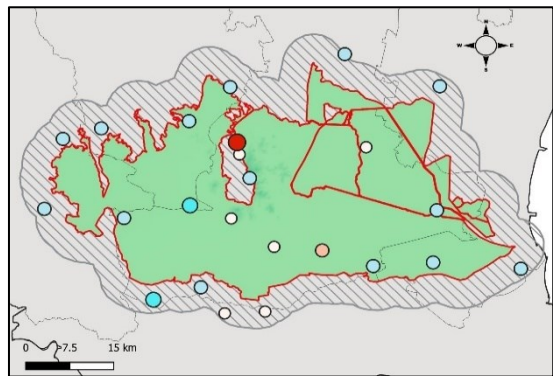
Gennaio – bias su temperature massime



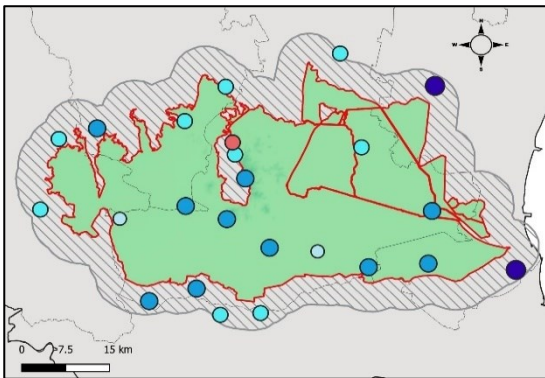
Febbraio – bias su temperature massime



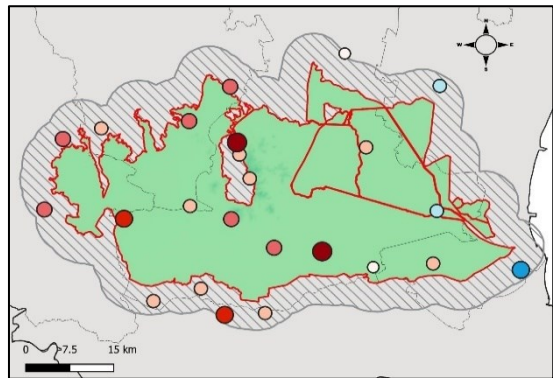
Marzo – bias su temperature massime



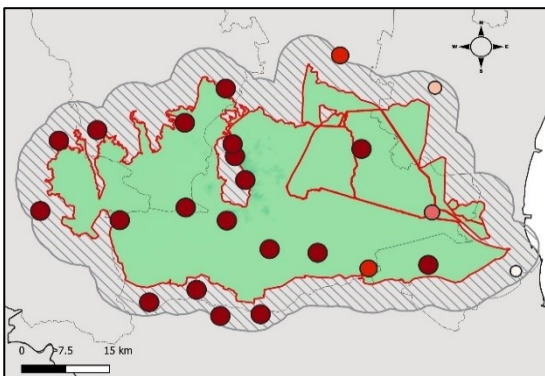
Aprile – bias su temperature massime



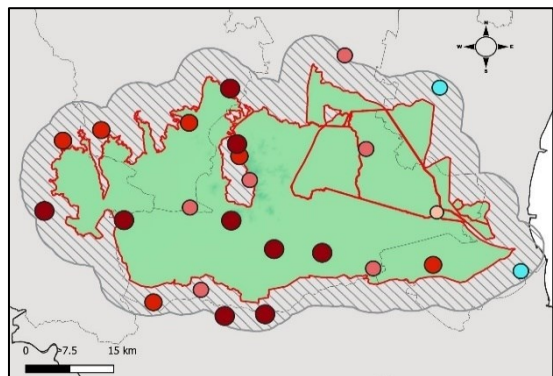
Maggio – bias su temperature massime



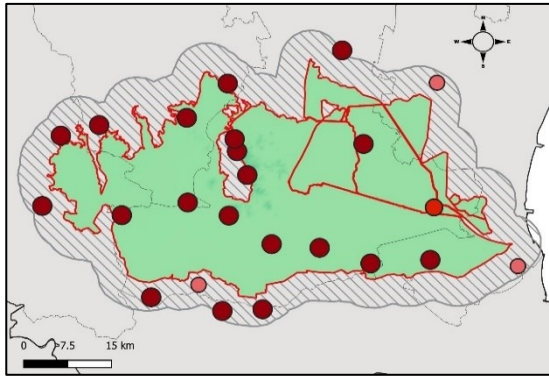
Giugno – bias su temperature massime



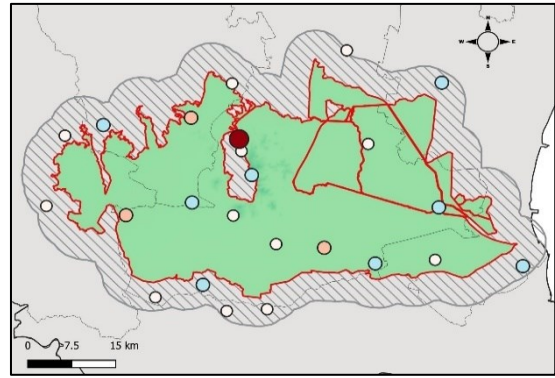
Luglio – bias su temperature massime



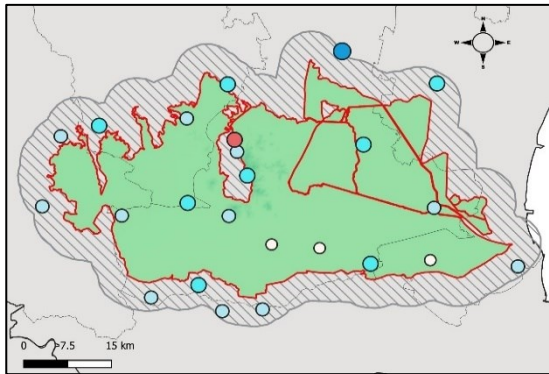
Agosto – bias su temperature massime



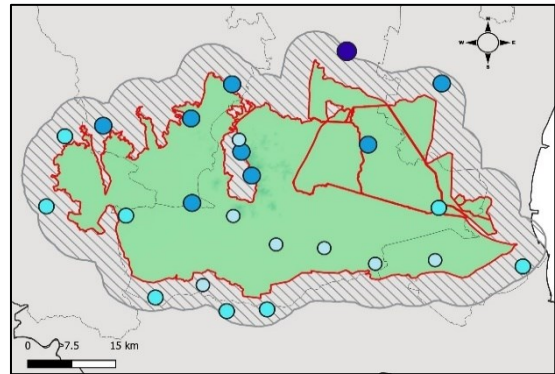
Settembre – bias su temperature massime



Ottobre – bias su temperature massime



Novembre – bias su temperature massime



Dicembre – bias su temperature massime

• *Allegato 2: Parametri statistici del metodo correttivo*

In questo allegato sono riportati i parametri di performance legati all'approccio correttivo delle temperature basato sull'utilizzo dei tre bias associati, adottato per il calcolo dell'evapotraspirazione.

Si trovano perciò riportati per ognuna delle serie di temperatura di ciascuna stazione presa in esame, il bias residuo e l'RMSE che hanno permesso di validare il metodo correttivo delle variabili climatiche, verificate anche per la stima dell'evapotraspirazione potenziale.

Parametri di performance – 3 bias												
Staz	T minima CPM (°C)		T minima CPM corretto (°C)		T media CPM (°C)		T media CPM corretto (°C)		T massima CPM (°C)		T massima CPM corretto (°C)	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
98	1.07	1.46	-0.35	0.80	0.30	1.16	-0.16	0.62	-0.06	1.24	-0.06	0.63
105	1.47	1.35	-0.52	0.88	0.61	0.99	-0.31	0.69	0.15	1.27	0.13	0.56
106	0.92	1.83	-0.70	1.06	0.31	1.23	-0.47	0.82	0.10	1.36	-0.17	0.71
111	2.14	1.37	-0.58	0.99	1.04	0.97	-0.26	0.69	0.38	1.05	0.21	0.58
119	0.85	2.59	0.77	1.04	0.60	1.63	-0.32	0.75	0.71	1.47	-0.99	1.32
121	2.03	1.33	-0.31	0.86	0.90	1.19	-0.13	0.73	0.19	1.50	0.09	0.68
123	-1.02	2.34	-0.56	0.93	-0.71	1.42	-0.36	0.74	-0.28	1.39	0.04	0.60
142	1.59	1.26	-0.60	0.89	0.66	1.11	-0.35	0.67	0.21	1.19	0.05	0.58
145	1.33	1.99	-0.53	0.86	0.58	1.26	-0.33	0.68	-0.03	1.29	0.08	0.58
149	1.19	1.66	0.00	0.68	0.35	1.21	-0.07	0.61	-0.12	1.34	-0.15	0.66
150	1.85	1.61	-0.78	1.00	1.01	1.06	-0.45	0.71	0.63	1.25	0.20	0.64
151	1.81	2.28	-0.43	0.88	0.91	1.50	-0.04	0.63	0.43	1.44	0.63	0.87
152	1.46	2.28	-0.43	0.73	0.35	1.44	-0.09	0.42	-0.43	1.28	0.46	0.59
167	0.74	1.85	-0.48	0.87	-0.18	0.96	-0.14	0.63	-0.36	0.85	0.36	0.68
168	1.15	1.18	-0.21	0.85	0.62	0.92	-0.07	0.66	0.37	0.87	0.20	0.59
169	-0.17	1.54	-0.35	0.85	-0.07	1.14	-0.06	0.62	0.28	1.11	0.45	0.77
170	0.74	0.82	-0.13	0.70	0.14	0.85	-0.05	0.64	0.04	1.14	0.22	0.71
175	0.74	1.23	-0.29	0.84	0.14	0.90	-0.03	0.65	0.04	0.87	0.37	0.72
178	0.72	1.21	-0.12	0.73	0.14	0.91	-0.14	0.61	0.03	0.98	-0.15	0.53
179	1.64	2.01	-0.10	0.75	0.54	1.21	0.02	0.70	-0.16	1.20	0.27	0.83
180	-0.87	1.15	-0.72	1.01	-0.57	1.02	-0.59	0.84	-0.18	1.12	-0.54	0.85
182	0.89	1.31	-0.19	0.86	0.56	1.12	-0.30	0.79	0.45	1.21	-0.48	0.88
201	-0.07	0.89	0.06	0.33	0.86	1.45	0.09	0.33	2.06	2.64	0.20	0.43
206	0.94	1.48	0.04	0.62	0.42	1.14	-0.05	0.56	0.34	1.32	-0.14	0.60

Bibliografia

- Arpav - Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio - UO Meteorologia e Climatologia - UO Clima, scenari e supporto alle strategie di adattamento e mitigazione. (2022). *Clima e cambiamenti climatici in Veneto*
- Arnell, N. W., Lowe, J. A., Challinor, A. J., & Osborn, T. J. (2019). Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 155(3), 377–391. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02464-z>
- Barbi, A., Cola, G., Mariani, L., (2018). *Inquadramento climatico del Veneto*.
- Ben Hamouda, G., Tomozeiu, R., Pavan, V., Antolini, G., Snyder, R. L., & Ventura, F. (2021). Impacts of climate change and rising atmospheric CO₂ on future projected reference evapotranspiration in Emilia-Romagna (Italy). *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1–2), 801–820. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03745-3>
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A. L., & Mercogliano, P. (2016). High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *International Journal of Climatology*, 36(2), 735–756. <https://doi.org/10.1002/JOC.4379>
- Calcagno, G. (2007). *Analisi dei flussi energetici per la stima dell'evapotraspirazione attraverso tecniche di telerilevamento satellitare*. Università degli Studi della Basilicata, Università della Calabria, Politecnico di Bari, Università del Salento. Tutor Prof. Ing. Giuseppe Mendicino. Dottorato di ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio.
- Carobin, R. (2007). *Confronto tra metodi di calcolo di ET₀ per la stima di consumi idrici nella Pianura Veneta*. Università degli Studi di Padova, Relatore Prof. Berti A., Correlatore Chiaudani A., Facoltà di Scienze MM.FF. e Agraria, Corso di Laurea in Scienze e tecnologie per l'ambiente.
- Cocchi, M. (2016). *Geomorfologia e stratigrafia della bassa pianura veneta tra S. Donà di Piave e S. Stino di Livenza*. Università degli Studi di Padova, Relatore Dr. Fontana A., Correlatore Dr. Cohen K., Scuola di Scienze, Dipartimento di Geoscienze, Corso di Laurea in Geologia e Geologia tecnica.

- Dong, Q., Wang, W., Shao, Q., Xing, W., Ding, Y., & Fu, J. (2020). The response of reference evapotranspiration to climate change in Xinjiang, China: Historical changes, driving forces, and future projections. *International Journal of Climatology*, 40(1), 235–254. <https://doi.org/10.1002/JOC.6206>
- Dosio, A., & Paruolo, P. (2011). Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: Evaluation on the present climate. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(16). <https://doi.org/10.1029/2011JD015934>
- Edwards, P. N. (2010). History of climate modeling. *Ltd. WIREs Clim Change*, 2, 128–139. <https://doi.org/10.1002/wcc.95>
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., & Liebert, J. (2012). HESS Opinions “should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391–3404. <https://doi.org/10.5194/HESS-16-3391-2012>
- Fioravanti, G., & Piervitali, E. (2015). *Calibrazione e test di metodi per il downscaling empirico-statistico e la correzione degli errori dei modelli climatici*.
- Ghiat, I., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2021). A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications. *Water 2021*, Vol. 13, Page 2523, 13(18), 2523. <https://doi.org/10.3390/W13182523>
- Giménez, P. O., & García-Galiano, S. G. (2018). Assessing Regional Climate Models (RCMs) Ensemble-Driven Reference Evapotranspiration over Spain. *Water 2018*, Vol. 10, Page 1181, 10(9), 1181. <https://doi.org/10.3390/W10091181>
- Hargreaves, G. H., Asce, F., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129, 53–63. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94372003129:153>
- Kendon, E. J., Prein, A. F., Senior, C. A., & Stirling, A. (2021). Challenges and outlook for convection-permitting climate modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2195). <https://doi.org/10.1098/RSTA.2019.0547>

- Kim, K. B., Kwon, H. H., & Han, D. (2022). Intercomparison of joint bias correction methods for precipitation and flow from a hydrological perspective. *Journal of Hydrology*, *604*, 127261. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.127261>
- Lompar, M., Lalić, B., Dekić, L., & Petrić, M. (2019). Filling gaps in hourly air temperature data using debiased ERA5 data. *Atmosphere*, *10*(1). <https://doi.org/10.3390/atmos10010013>
- Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Trambly, Y., Berg, P., Lemonsu, A., Kotlarski, S., & Caillaud, C. (2021). Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *12*(6). <https://doi.org/10.1002/WCC.731>
- Lund Sørland, S., Brogli, R., Kumar Pothapakula, P., Russo, E., Van De Walle, J., Ahrens, B., Anders, I., Buchignani, E., Davin, E. L., Demory, M.-E., Dosio, A., Feldmann, H., Früh, B., Geyer, B., Keuler, K., Lee, D., Li, D., Van Lipzig, N. P. M., Min, S.-K., ... Thiery, W. (2021). COSMO-CLM regional climate simulations in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) framework: a review. *Geosci. Model Dev*, *14*, 5125–5154. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5125-2021>
- Maraun, D., & Widmann, M. (2018). Cross-validation of bias-corrected climate simulations is misleading. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(9), 4867–4873. <https://doi.org/10.5194/HESS-22-4867-2018>
- Mengato, G. (2015). *Indagine geomorfologica e stratigrafica di un paleoalveo del fiume Brenta nei Pressi di Curtarolo*. Università degli Studi di Padova, relatore Prof. Mozzi P., Correlatore Dr. Rossato S., Scuola di Scienze MM.FF.NN., Dipartimento di Geoscienze, Corso di Laurea Triennale in Scienze Geologiche.
- Ministero dell'ambiente e della Sicurezza energetica (2023). *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)*.
- Moberg, A., & Jones, P. D. (2005). Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901-99. *International Journal of Climatology*, *25*(9), 1149–1171. <https://doi.org/10.1002/JOC.1163>

- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Peripoli, G. (2008). *Caratterizzazione chimica del fiume Adige lungo gradienti longitudinali*. Università degli studi di Padova, relatore Prof.ssa Braioni M.G., Correlatore Salmaso N. Facoltà di Scienze Naturali MM.FF.NN., Corso di Laurea Specialistica in Scienze della Natura.
- Politeo, M., Chiaudani, A., Berti, A., & Borin, M. (n.d.). *Confronto di Lungo Periodo di ET 0 Calcolate con i Metodi Penman e Hargreaves nell'Ambiente Veneto*.
- Pontrandolfi, A., & Zucaro, R. (2007). *Monitoraggio dei sistemi irrigui delle regioni centro settentrionali - Agricoltura irrigua e scenari di cambiamento climatico*.
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., Van Lipzig, N. P. M., & Leung, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, *53*(2), 323–361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>
- Qiu, L., Im, E.-S., Min, S.-K., Kim, Y.-H., Cha, D.-H., Shin, S.-W., Ahn, J.-B., Chang, E.-C., & Byun, Y.-H. (2023). Direct and indirect application of univariate and multivariate bias corrections on heat-stress indices based on multiple regional-climate-model simulations. *Earth System Dynamics*, *14*(2), 507–517. <https://doi.org/10.5194/esd-14-507-2023>
- Raffa, M., Adinolfi, M., Reder, A., Marras, G. F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M., & Mercogliano, P. (2023). Very High Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. *Scientific Data*, *10*(1), 238. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9>

- Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Paride Gianoli, ;, & Mancini, M. (2012). *Modified Hargreaves-Samani Equation for the Assessment of Reference Evapotranspiration in Alpine River Basins*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943)
- Rizzardi, T. (2022). *Influenza del cambiamento climatico sul regime delle precipitazioni intense nel Nord-Est italiano*.
- Rossi, C., De Prez, S., Siciliano, O., Cannavà, C., Turco, F., & Negri, P. (2004). *Applicazione dell'Indice di Funzionalità Fluviale (I.F.F.) al fiume Bacchiglione*.
- Rummukainen, M. (2010). State-of-the-art with regional climate models. *John Wiley & Sons, Ltd, 1*. <https://doi.org/10.1002/wcc.008>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.05.052>
- Tomas-Burguera, M., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2021). Climatology and trends of reference evapotranspiration in Spain. In *International Journal of Climatology* (Vol. 41, Issue S1).
- Tomozeiu, R., Agrillo, G., Cacciamani, C., & Pavan, V. (2014). Statistically downscaled climate change projections of surface temperature over Northern Italy for the periods 2021–2050 and 2070–2099. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 72(1), 143–168. <https://doi.org/10.1007/S11069-013-0552-Y>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/S10584-011-0148-z>
- Weisman, M. L., Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (1997). *The Resolution Dependence of Explicitly Modeled Convective Systems*.

Wilcke, R. A. I., Mendlik, T., & Gobiet, A. (2013). Multi-variable error correction of regional climate models. *Climatic Change*, 120(4), 871–887. <https://doi.org/10.1007/S10584-013-0845-x>

Sitografia

- Euro-Cordex: <https://www.euro-cordex.net/>
- National Centre for Climate Services: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/>
- Geoportale della Regione Veneto: <https://idt2.regione.veneto.it/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/>
- Centro Euro-mediterraneo sui Cambiamenti climatici: <https://dds.cmcc.it/>

I dati di temperatura simulati utilizzati in questo lavoro sono disponibili al seguente link: <https://doi.org/10.25424/CMCC-J90A-5P12>

Software utilizzati

- L'estrazione dei dati da modello, la conversione in formato compatibile con la lavorazione su fogli di calcolo e alcune preliminari elaborazioni, hanno richiesto l'uso del software **Matlab versione R2023a update 4**.
- Le elaborazioni dei dati sono state effettuate con **Microsoft Excel per Microsoft 365, versione 2309**.
- Il lavoro in ambiente GIS è stato effettuato mediante i software **QGIS versione 3.22.11 (Białowieża)** e **OpenJump versione 20210425 snapshot rev.6674**

Ringraziamenti

Al termine di questa tesi trovo importante dedicare questo spazio per ringraziare quanti mi hanno sostenuto nella riuscita di questo percorso. Ebbene Sì!! Sono passati (già) 5 anni, di impegno, di sacrifici e anche di soddisfazioni.

In primis devo dire grazie ai miei genitori pilastro fondamentale, che mi hanno permesso di poter intraprendere il percorso universitario ed arrivare fin qui, senza dimenticare i valori che mi hanno trasmesso, improntati all'impegno e alla fiducia reciproca.

Mio padre, spesso ascoltatore dei miei ripassi prima degli esami, a cui va un grazie per la pazienza, con la sua celebre frase "qualche punto del voto, poi me lo darai anche a me". Ecco! Adesso posso dire che questo traguardo è anche un po' merito tuo.

Mia madre, sempre presente e premurosa, a cui va un ringraziamento speciale per il suo supporto, ma soprattutto per avermi sopportato e spronato in questi anni. Anche a lei va parte del merito di questo traguardo.

Dedico questo traguardo anche a chi, nella mia famiglia, fisicamente non c'è più, ma che porto comunque sempre con me e sicuramente in modo diverso mi ha aiutato in questi anni.

Grazie ai miei nonni, parte insostituibile, che, nonostante non possano condividere questo risultato, hanno comunque contribuito con i loro insegnamenti e che spero di aver reso orgogliosi.

Non posso fare a meno di menzionare i miei amici e compagni di corso con cui in questi anni di università sono stato bene e con i quali ci siamo aiutati e consigliati a vicenda nelle lunghe sessioni di esami...e che hanno ascoltato i miei lunghi messaggi audio. Grazie per i bei momenti passati.

Un grazie va anche a Tobia, con cui durante questi mesi di realizzazione della tesi ho condiviso dubbi, perplessità, elaborazioni e le lunghe videoconferenze in Zoom.

Ringrazio anche gli amici di vecchia data, che durante questo mio percorso, soprattutto nei periodi di esami e di tesi, hanno avuto pazienza di fronte alle mie mancate uscite con loro.

Un ringraziamento va anche alla mia relatrice Dottoressa Eleonora Dallan e al mio correlatore Professor Marco Borga, per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro e per il costante supporto nella stesura di questa tesi.

Come ultimo ringrazio anche Lorenzo (me stesso), che è cresciuto e ha imparato a credere in se stesso anche grazie a questo percorso, fatto di sì, di fatica, ma anche di obiettivi raggiunti.