



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali Corso di Laurea in Tecnologie
Forestali e Ambientali

Analisi del cambiamento climatico nelle precipitazioni intense nella pianura Veronese

Relatrice:

Dott.ssa Eleonora Dallan

Laureando:

Filippo Rossignoli

Matricola:

2045976

Anno accademico 2023/2024

Indice

Riassunto	5
Capitolo 1	7
Introduzione e obiettivi	7
Capitolo 2	9
Area di studio.....	9
2.1 Inquadramento dell'area di studio.....	9
2.2 Aspetti morfologici.....	11
2.3 Aspetti geologici	11
2.4 Caratteristiche climatiche.....	12
Capitolo 3	13
Modelli climatici	13
3.1 Modelli climatici globali GCM.....	14
3.2 Modelli climatici regionali RCM.....	14
3.3 Modelli climatici a convezione permessa CPM.....	15
3.4 Scenari di emissione.....	16
Capitolo 4	18
Dati	18
4.1 Dati pluviometrici da stazioni.....	18
4.2 Dati pluviometrici da modello CPM.....	20
Capitolo 5	21
Metodi.....	21
5.1 Modello probabilistico di Gumbel	21
5.2 Confronti statistici utilizzati per l'analisi dei dati	23
5.2.1 Bias.....	23
5.2.2 Change.....	24
5.3 Elaborazione delle mappe con il programma QGIS	24
Capitolo 6	25
Risultati e discussione.....	25
6.1 Analisi del bias del modello climatico.....	25
6.1.1 Analisi del change del modello climatico.....	28
6.2 Analisi sui risultati dei quantili di precipitazione.....	30
6.2.1 Analisi del bias del modello climatico.....	31
6.2.2 Analisi del change nel modello climatico.....	33

Capitolo 7	36
Conclusioni	36
Bibliografia.....	38

Riassunto

I cambiamenti climatici rappresentano una delle maggiori sfide di questo millennio, infatti impattano direttamente sul nostro pianeta e sull'intera umanità. Con la seguente tesi si è voluto analizzare come il cambiamento climatico stia influenzando il regime delle precipitazioni estreme. Questo lavoro è stato svolto mediante l'utilizzo di modelli climatici in grado di descrivere e simulare gli eventi di precipitazione estrema di durata sub-giornaliera, inferiori quindi alle 24 ore. Il tipo di modello climatico utilizzato è stato il *Convection-Permitting Model (CPM)*, che restituisce simulazioni meteorologiche compatibili con l'area di studio, la risoluzione spaziale del modello è di 2,2 km mentre quella temporale è di 1 ora. Lo scenario di emissione assunto è il più critico, caratterizzato da un aumento costante delle emissioni di gas serra fino alla fine del secolo, tale scenario è definito RCP8.5 e simula gli andamenti dei gas serra e le variazioni di temperatura. L'area presa in analisi è quella della pianura Veronese in cui scorre il fiume Adige ed è situata nel Nord-est Italia; lo svolgimento di questo studio è stato permesso grazie ai dati sulle precipitazioni massime annuali raccolti dai pluviometri presenti nelle 17 stazioni pluviometriche, distribuite nel territorio analizzato. Il modello climatico ci ha permesso di ottenere le simulazioni di precipitazioni passate nel periodo compreso tra il 1996 e il 2005 e le simulazioni future nel periodo dal 2090 al 2099. Applicando un metodo statistico (distribuzione di Gumbel) sono stati ricavati quantili di pioggia per le durate pari a 1,3,6,12,24 ore; inoltre è stata ricavata la funzione delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica (LSPP), che mette in relazione l'altezza in mm di pioggia e la durata dell'evento stesso, associato ad un determinato tempo di ritorno (10 e 50 anni). Tutte queste operazioni sono state eseguite sia per i dati ottenuti dai pluviometri, sia per le due serie temporali ricavate dal modello CPM nei punti corrispondenti ai pluviometri. Successivamente sono stati eseguiti dei confronti tra i dati forniti dal modello rispetto ai dati reali, al fine di quantificare gli errori che derivano dalle simulazioni, ottenendo così il bias, ossia l'errore, tra la serie storica osservata dai pluviometri e la serie storica simulata dal modello. Il bias ci ha permesso di stabilire se il modello climatico tende a sottostimare o a sovrastimare i parametri e i quantili ricavati dalle elaborazioni precedenti, e ci permette di fare eventuali correzioni al modello climatico. Successivamente, è stato calcolato il change futuro, o cambiamento, previsto dal modello climatico. Queste analisi hanno messo a confronto la serie storica simulata dal modello e la serie futura, per il periodo 2090-2099, del modello climatico. Come con il bias, anche il change è stato ricavato sia per i parametri delle LSPP di ogni stazione pluviometrica, sia per i quantili di pioggia per entrambi i tempi di ritorno. Queste analisi hanno permesso di determinare che rispetto alle osservazioni, il modello CPM tende a sottostimare le precipitazioni intense a durata oraria, mentre le sue performance migliorano a 24h. Inoltre, si

evidenza nell'area un aumento futuro delle precipitazioni brevi ed intense.

Capitolo 1

Introduzione e obiettivi

La questione ambientale, con particolare riguardo ai cambiamenti climatici, rappresenta una problematica fortemente discussa a livello globale e dalla comunità scientifica. Tale tematica si trova infatti tra le priorità dei governi di tutto il mondo, tanto che l'Italia ha recentemente introdotto la tutela dell'ambiente nella propria Costituzione (artt. 9 e 41), al fine di sancire un definitivo cambio di rotta in favore della sostenibilità ambientale. L'aumento della temperatura globale e delle emissioni di gas serra provocano numerose ripercussioni quali lo scioglimento dei ghiacciai, l'aumento dei fenomeni estremi e la magnitudo con cui si verificano, rappresentando un'evidente manifestazione del cambiamento che la Terra sta gradualmente, ma costantemente, subendo. È di fondamentale importanza essere consapevoli di tale trasformazione, poiché, laddove non si riuscisse a contrastarla efficacemente, questa potrebbe rivelarsi irreversibile e provocare danni irreparabili per il Pianeta. La nostra Nazione non è immune a questi fenomeni, si pensi per esempio alle frequenti alluvioni che colpiscono la nostra penisola. Dal punto di vista dell'andamento del regime delle precipitazioni l'Italia è destinata ad una forte diminuzione dei giorni poco piovosi, mentre la frequenza di quelli con precipitazioni estreme è in aumento, soprattutto nelle regioni settentrionali (Lionello et al., 2009). Con precipitazioni estreme si intendono quei fenomeni caratterizzati da ingenti volumi di acqua che cadono in intervalli di durata di poche ore, spesso concentrati su superfici limitate e quindi sono rappresentati da valori che risultano essere molto al di sopra delle medie storiche. In particolare per questo studio è stata analizzata l'area del bacino idrografico della pianura veronese ed è stata studiata l'idrologia utilizzando i dati di precipitazioni massime annuali ottenute dalle stazioni pluviometriche prese in esame. Per lo sviluppo delle proiezioni delle variazioni climatiche future affidati ai modelli climatici, i quali simulano per durate più o meno prolungate e per orizzonti temporali più o meno prossimi, come sarà il clima futuro, evidenziando in particolare le possibili variazioni climatiche. Per rappresentare in modo significativo le precipitazioni estreme, in particolare quelle sub-giornaliere, vengono impiegati modelli climatici ad alta risoluzione, i cosiddetti Convection-Permitting Models (CPM, Prein). Le precipitazioni sono simulate, a partire da una linea di base, costituita da precipitazioni massime annuali osservate per il periodo 1996-2005 e 2090-2099. Inoltre, è stato considerato uno scenario emissivo denominato RCP8.5, caratterizzato da un aumento dell'emissione di gas serra per tutto il secolo, con un conseguente aumento di temperatura e di CO₂ in atmosfera che supera le 1000 ppm. Con l'utilizzo di queste risorse, sono stati studiati: le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica, che associano ad una determinata durata e un tempo di ritorno (10 e 50 anni) la relativa altezza di

precipitazione; i quantili di pioggia di durata sub-giornaliera per due tempi di ritorno. Le durate sub-giornaliere delle precipitazioni sono: 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore e 24 ore. Tutti i modelli climatici sono soggetti ad un determinato tipo di errore o incertezza infatti nel nostro caso abbiamo calcolato il bias che quantifica lo scostamento del modello rispetto alla realtà. Il primo obiettivo della seguente tesi è quindi la comprensione e valutazione del grado di realismo dei modelli climatici. Con il calcolo del bias, è stato possibile confrontare le serie storiche osservate dai pluviometri con le simulazioni del modello per il periodo 1996-2005. Il secondo obiettivo è la valutazione in quest'area del cambiamento futuro delle precipitazioni estreme di durata sub-giornaliera, analizzando la serie storica simulata dal modello e quella futura. Successivamente è stata eseguita una mappatura per le diverse variabili analizzate che rappresentasse le distribuzioni spaziali delle stazioni pluviometriche, associate ai rispettivi valori di bias e change.

Capitolo 2

Area di studio

2.1 Inquadramento dell'area di studio

L'area oggetto di studio (*Figura 1*) è una porzione della pianura veronese di competenza del Consorzio di Bonifica Veronese. Si estende dalla fascia delle risorgive a nord, al Fissero- Tartaro-Canalbianco a sud, dal corso del fiume Adige ad est al confine con il territorio Mantovano ad ovest. I comuni interessati sono i seguenti: Angiari, Badia Polesine, Bovolone, Buttapietra, Casaleone, Castagnaro, Castel d'Azzano, Cerea, Concamarise, Erbè, Gazzo Veronese, Isola della Scala, Isola Rizza, Legnago, Mozzecane, Nogara, Oppeano, Palù, Povegliano Veronese, Ronco all'Adige, Roverchiara, Salizzole, San Giovanni Lupatoto, Sanguinetto, San Pietro di Morubio, Sorgà, Trevenzuolo, Vigasio e Zevio. L'area di studio è attraversata da molti corsi d'acqua; in particolare il fiume Adige, il quale nasce presso il passo Resia in alta Val Venosta e sfocia nel mar Adriatico nelle località di Rosolina e Chioggia, è il secondo fiume in Italia per lunghezza (410 km) e scorre nella pianura Veronese per circa 100 km, drenando una superficie di circa 11.000 km². In provincia di Verona esiste un unico affluente degno di nota del fiume Adige, che è il torrente Tasso che nasce dalle pendici meridionali del Monte Baldo e sfocia in destra Adige in località Ragano di Rivoli Veronese; complessivamente la superficie occupata dal bacino è di 70 km² con uno sviluppo del reticolo idrografico di circa 20 km. Tutti gli altri affluenti veronesi si originano nell'area montana dei Lessini; hanno caratteristiche fisiche e idrologiche simili con regime delle portate irregolari in quanto scorrono, soprattutto nei tratti inferiori, su robusti materassi alluvionali, per cui le portate significative si hanno solo con eventi meteorici di forte intensità. Sono corsi d'acqua che hanno uno sviluppo planimetrico generalmente rettilineo e parallelo tra gli stessi e che, talvolta, confluiscono in unico collettore prima di gettarsi nell'Adige. A partire da ovest, citando i corsi d'acqua principali, si trova il Progno (termine dialettale che indica un torrente) di Fumane che si origina nella parte più occidentale dei Lessini, attraversa il centro abitato omonimo e confluisce nell'Adige circa all'altezza di Settimo. Dopo il Progno di Negrar che confluisce poco prima di Verona si nota il torrente Valpantena che si origina nella parte più elevata dei Lessini e che dopo avere riunito tre rami principali scorre con direzione nord-sud fino a confluire nell'Adige verso la periferia orientale di Verona. Più ad est si trova un complesso sistema idrografico dove, verso la confluenza nell'Adige, si ritrovano diversi corsi d'acqua con regime idrologico diverso. In particolare, dalla parte centrale dei Lessini scende il Vaio di Squaranto, tipicamente torrentizio e con portate molto irregolari, che, a valle di Montorio, si unisce con il fiume Fibbio che ha origine all'interno dell'abitato di Montorio, con portate perenni variabili a seconda dell'andamento

dell'acquifero sotterraneo; il bacino complessivo dei due collettori è di 365 km². Immediatamente più a est scendono due corsi d'acqua importanti come l'Illasi, che è lungo ca. 40 km, ha un bacino di 245 km² e che parte dalle zone più elevate dei Lessini, ed il Mezzane; entrambi sono a carattere torrentizio con portate molto irregolari e si uniscono nei pressi di Vago. Infine nel sistema Fibbio-Squaranto e Illasi-Mezzane confluiscono le acque del fiume Antanello, provenienti dalle colline veronesi; il collettore formatosi da questo complesso sistema idrografico, dopo aver superato lo scarico del canale Sava e l'inizio del canale LEB, entra nel fiume Adige nei pressi di Zevio. L'ultimo complesso idrografico è a cavallo delle province di Verona e di Vicenza ed è costituito principalmente dall'Alpone e dal Chiampo. Il primo parte dal territorio veronese, ha una lunghezza di 38 km ed un bacino di 228 km², mentre il secondo percorre l'omonima valle Vicentina, ed è lungo 43 km, e, prima di confluire nell'Alpone nei pressi di Monteforte, riceve le acque dell'Aldegà. A valle della confluenza del Chiampo, nei pressi di S. Bonifacio, nell'Alpone confluisce il Tramigna; a valle di quest'ultima confluenza l'Alpone percorre alcuni chilometri fino ad Albaredo dove confluisce nell'Adige.

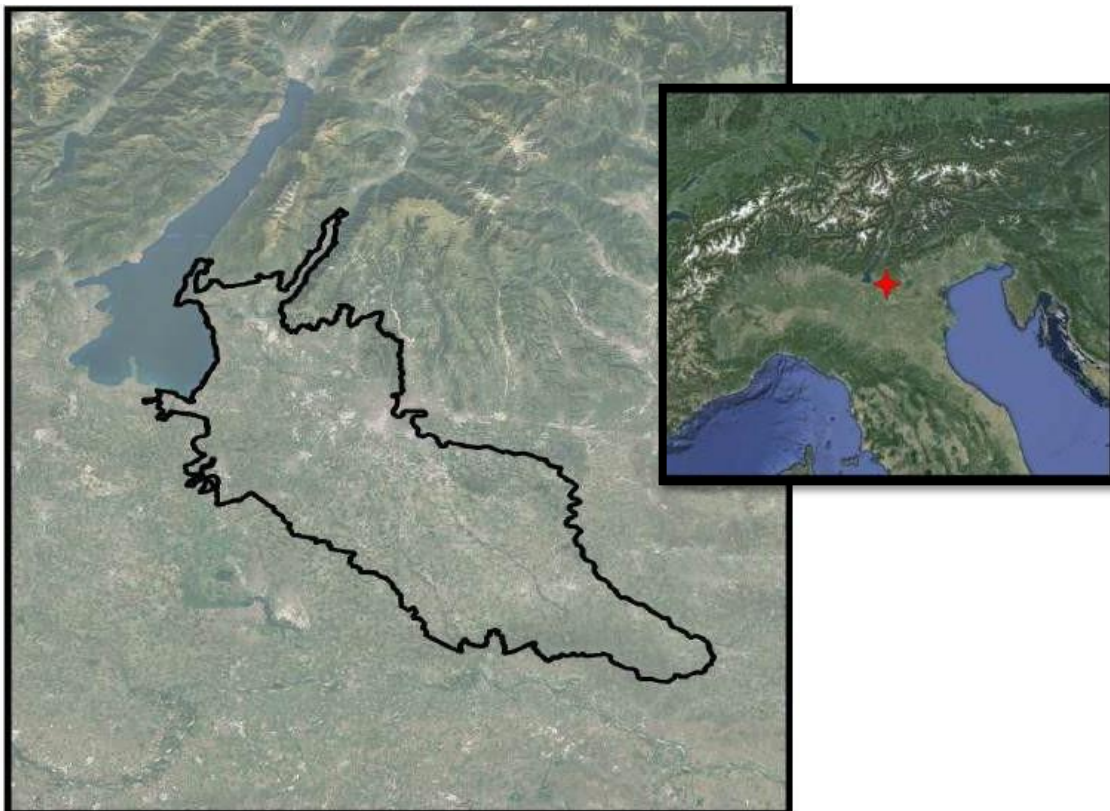


Figura 1: Inquadramento Area di studio

2.2 Aspetti morfologici

Da un punto di vista morfologico, il fiume Adige mostra caratteristiche diverse lungo il suo percorso, influenzate dal territorio che lo circonda. Infatti nella zona montana in cui si genera assume caratteristiche torrentizie quindi con acque a flusso rapido, con l'abbassarsi della pendenza e quindi entrando nella pianura Veronese, il corso d'acqua rallenta notevolmente assumendo una morfologia tipica dei fiumi di pianura. La sedimentazione si accentua e si creano ampi depositi di sabbia e ghiaia questo accumulo di materiale può formare piccole isole fluviali particolarmente visibili nei periodi di secca o nei tratti meno profondi. In pianura specialmente vicino a Verona, il fiume è incanalato tra argini artificiali per scongiurare alluvioni, questo ha modificato la naturale evoluzione del fiume, confinandolo e riducendo l'espansione nelle aree circostanti. Gli altri corsi d'acqua minori che attraversano la pianura Veronese presentano anch'essi una morfologia meandri forme e sono soggetti ad un lento accumulo di sedimenti.

2.3 Aspetti geologici

La pianura veronese si estende verso sud rispetto ai rilievi prealpini, è una pianura di tipo alluvionale, formata dai sedimenti depositati dai fiumi, i quali hanno trasportato ghiaia, sabbia e limo dalle montagne creando ampie distese pianeggianti molto fertili, adatte all'agricoltura. I corsi d'acqua che hanno modellato la pianura veronese sono il fiume Adige e il Tartaro oltre a numerosi canali irrigui e di bonifica, in particolare il fiume Adige in passato, con le sue esondazioni ha contribuito alla formazione di terreni alluvionali fertili. A causa della stratificazione dei sedimenti permeabili trasportati dai fiumi, come sabbia e ghiaia e sedimenti meno permeabili come l'argilla, si è formato il fenomeno delle risorgive, dove l'acqua riemerge dal sottosuolo dopo aver percorso un tratto sotterraneo, questo fenomeno è visibile nella parte meridionale della pianura. L'attività antropica ha notevolmente modificato il corso naturale di molti corsi d'acqua, canalizzandoli per usi agricoli e industriali. Nella parte meridionale della pianura, specialmente nelle aree vicine al fiume Tartaro, si trovano aree depresse che nel passato erano soggette a inondazioni, creando delle vere e proprie paludi, successivamente vennero fatti degli interventi di bonifica che scongiurarono questi eventi.

2.4 Caratteristiche climatiche

La pianura veronese è caratterizzata da un clima di tipo temperato subcontinentale, influenzato dalle Alpi a nord e dalla vicinanza al Lago di Garda a ovest. Le temperature della pianura mostrano una notevole escursione termica stagionale, tipica delle zone continentali, gli inverni sono generalmente freddi, con temperature medie che oscillano tra 0°C e 5°C, ma possono scendere sotto lo 0 durante i periodi di freddo intenso, le gelate infatti sono comuni soprattutto nelle aree più lontane dal Lago di Garda. Le estati sono calde e afose, con temperature medie che variano tra i 25°C e 35°C. Le precipitazioni sono distribuite principalmente durante le stagioni intermedie, con picchi in primavera e autunno, con una media annua di circa 700 mm di pioggia. La zona a maggior piovosità si trova nella parte settentrionale, presso i primi rilievi montuosi, con valori annuali oltre 1500 mm (*Figura 2*). Il Lago di Garda esercita un'importante influenza sul clima della pianura veronese, soprattutto nelle aree limitrofe in quanto le masse d'acqua del lago hanno un effetto moderatore sulle temperature, che tendono ad essere più miti rispetto a quelle delle aree interne.

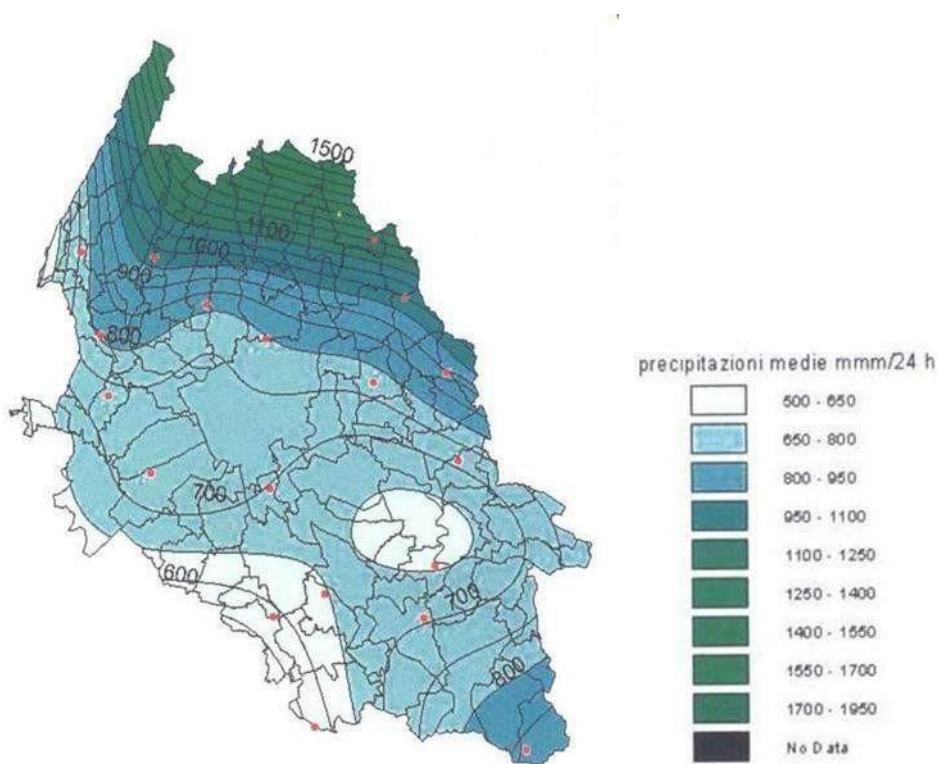


Figura 2: Precipitazioni medie nella pianura Veronese (*Fonte: consorzio di bonifica veronese*)

Capitolo 3

Modelli climatici

I modelli climatici sono degli strumenti che ricostruiscono il comportamento del sistema climatico terrestre in risposta alle influenze naturali e antropiche, permettendoci di fare proiezioni del clima futuro per il prossimo secolo ed oltre. La 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 rimane comunque un sistema complesso composto da più componenti interattive che coinvolgono e alterano dei processi fisici, descritti da leggi chimiche e fisiche su diverse scale temporali e spaziali. Le componenti che interagiscono tra di loro sono: l'atmosfera, l'idrosfera, la criosfera, la litosfera e la biosfera. I modelli climatici si basano su algoritmi fisico-matematici che descrivono le interazioni tra le diverse componenti facenti parte del sistema climatico. Simulano quindi l'evoluzione futura del clima partendo da dati climatici del passato, suddividendo la superficie terrestre e l'atmosfera in una serie di box (*Figura 3*). Per ogni box vengono formulate le equazioni del modello, che sono poi convertite in codice numerico. Questi modelli climatici non si limitano alla descrizione e alla previsione del solo strato inferiore dell'atmosfera nel quale avvengono i fenomeni atmosferici, bensì riescono a simulare anche le correnti oceaniche, le interazioni con il manto nevoso, i ghiacciai e la vegetazione. I modelli hanno due caratteristiche fondamentali: una risoluzione spaziale che ci indica l'ampiezza del box, dell'area caratterizzata da un determinato modello; e una risoluzione temporale denominata time step, espressa in minuti, ore, a scala giornaliera e annuale. Ricordiamo che, essendo rappresentazioni della realtà, i modelli presentano un certo grado di approssimazione che dobbiamo considerare nella proiezione degli scenari futuri. Data la molteplicità dei componenti, la complessità dei processi, le diverse scale temporali e spaziali e l'aumento della capacità di calcolo, si sono sviluppati diversi approcci modellistici: i modelli climatici globali GCM che valgono su larga scala; modelli climatici regionali RCM caratterizzati da risoluzioni maggiori e da domini di aree limitate; modelli climatici a convezione permessa CPM, che agiscono su scale chilometriche.

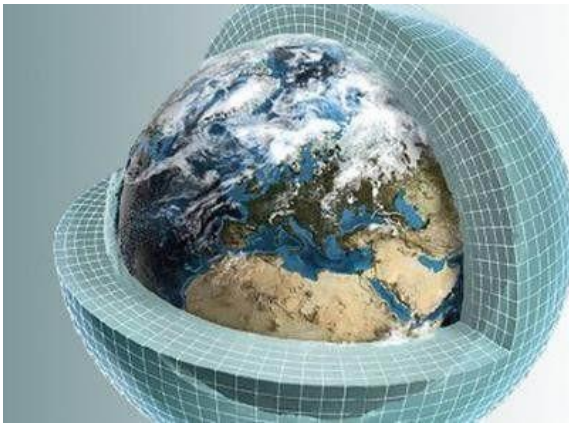


Figura 3: Rappresentazione della griglia tridimensionale del globo terrestre su cui si basa la costruzione di modelli climatici.

3.1 Modelli climatici globali GCM

I modelli climatici globali sono strumenti utilizzati per simulare e prevedere il comportamento del clima terrestre con delle risoluzioni molto ampie, tra 100 e 600 km. Permettono di comprendere l'evoluzione del clima su scala globale e vengono utilizzati ad esempio per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici in risposta a diversi scenari di emissione di gas serra. Sono modelli a larga scala e comprendono spesso aree con caratteristiche morfologiche ed orografiche differenti. Per questo motivo i GCM nonostante l'elevato progresso tecnologico, risultano avere una risoluzione spaziale grossolana.

Questa tipologia di modelli a scala globale simula il movimento dei fluidi su larga scala utilizzando delle equazioni primitive e un modello fisico, che a sua volta simula altri processi fisici come il trasferimento radioattivo, la formazione di nuvole e la convezione.

3.2 Modelli climatici regionali RCM

I Regional Climate Model (RCM) sono stati introdotti per aggiungere ulteriori dettagli alle simulazioni del clima globale e per studiare i processi climatici con maggior accuratezza. Coprono un'area limitata da subcontinentale a subnazionale con lo scopo di simulare i processi meteorologici su una scala più dettagliata rispetto ai modelli globali a risoluzione grossolana e sono sviluppati attraverso tecniche di downscaling statistico o dinamico.

Per quanto riguarda il downscaling statistico, si utilizzano relazioni statistiche che ci permettono di collegare le variabili su larga scala alle condizioni climatiche locali.

Diversamente, per il downscaling dinamico, i processi climatici sono simulati partendo da modelli climatici globali con una risoluzione spaziale bassa.

3.3 Modelli climatici a convezione permessa CPM

I Convection-Permitting Models CPM sono modelli climatici che, oltre a descrivere accuratamente le caratteristiche della superficie terrestre e dell'orografia, rappresentano anche i processi a piccola scala che avvengono in atmosfera, tra i quali assume notevole importanza la convezione. La capacità di rappresentare la convezione li rende infatti particolarmente adatti ad essere impiegati nell'ambito delle statistiche climatiche relative a convezione profonda, regioni montuose o precipitazioni estreme.

La convezione è un processo di trasferimento di calore che genera dei movimenti ascendenti e discendenti delle masse d'aria; questo fenomeno è responsabile della distribuzione di umidità, calore e massa su piccole scale temporali e spaziali.

Modelli climatici con spaziature maggiori di 10 km sono classificati come Large-Scale Models (LSM) e non permettono di rappresentare in modo accurato questi fenomeni atmosferici.

La convezione profonda è invece simulata dai CPM, i quali hanno delle griglie spaziali orizzontali < 4 km, e quindi una notevole accuratezza.

Operando a piccole risoluzioni, questi modelli riescono a riprodurre in maniera più realistica le condizioni che possono caratterizzare il clima e gli eventi di una determinata area. Ad esempio, nelle regioni con topografia complessa, bisogna tener conto di tutti i fenomeni che possono verificarsi.

Uno di questi sono le precipitazioni orografiche, delle precipitazioni che si producono quando l'aria umida viene sollevata mentre si sposta su una catena montuosa. L'aria, raffreddandosi, condensa e precipita. Queste condizioni non possono essere prese in considerazione se ad esempio si usa un modello a scala globale.

Nella *Figura 4* è possibile vedere la risoluzione spaziale sempre più accurata e l'estensione areale più limitata nel passaggio dal modello GCM al modello RCM e infine al CPM.

I CPM stanno guadagnando nel tempo sempre più attenzione in quanto sono strumenti promettenti per la rappresentazione climatica e per gli studi sui cambiamenti climatici, in particolare per le precipitazioni estreme a durate sub-giornaliere.

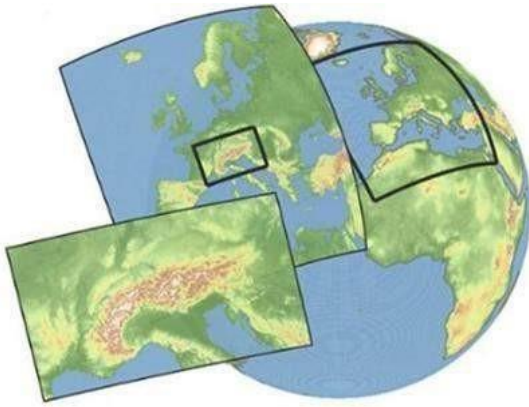


Figura 4: Modellazione climatica ad un'area limitata che consente lo studio della convezione (Fonte: Prein et al., 2015)

3.4 Scenari di emissione

I modelli climatici regolano le simulazioni future in funzione di uno specifico scenario di emissione. In particolare, gli scenari di emissione si riferiscono ai cambiamenti futuri delle quantità di gas serra e aerosol che possono modificare il bilancio delle radiazioni che arrivano alla Terra. Si deve considerare che l'entità delle future emissioni antropiche dipende fortemente dalle decisioni prese sul piano politico a livello internazionale, dall'evoluzione della popolazione e dal progresso tecnologico. Questi sono tutti fattori che incidono sulle emissioni e quindi nell'alterazione della composizione della atmosfera terrestre.

Esistono quindi molti scenari emissivi, tutti diversi tra loro in quanto rappresentano diverse politiche climatiche caratterizzate da un obiettivo climatico raggiungibile entro il 2100. Tra gli scenari più recenti troviamo i *Representative Concentration Pathway (RCP)*.

Questi modelli sono stati sviluppati da un gruppo di scienziati e ricercatori coordinato dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, l'organizzazione intergovernativa responsabile della valutazione scientifica dei cambiamenti climatici.

Gli RCP sono stati presentati nel quinto rapporto di valutazione dell'IPCC (AR5) del 2014. Più precisamente, sono stati presentati quattro scenari caratterizzati da un forzante radioattivo, l'energia aggiuntiva assorbita dal sistema Terra alla fine del XXI secolo calcolato in Watt per metro quadro. Questo aumento, come detto in precedenza, è dovuto ad un aumento dei gas serra rispetto al periodo preindustriale. Il *National Centre of Climate Services (NCCS)* definisce il forzante radioattivo 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 scenari si differenziano per livelli di criticità differenti, tali per cui lo scenario RCP2.6 considera che le emissioni globali di Green House Gas (GHG) raggiungeranno valori massimi tra il 2010 e 2020 per poi diminuire, lo scenario successivo, RCP4.5, considera un picco di emissioni nel 2040 e poi un declino; l'RCP6.0 prevede un picco di emissioni nel 2080 e cui segue una sensibile diminuzione. Infine, lo scenario più critico RCP8.5 considera un aumento continuo di emissioni per tutto il Ventunesimo secolo; il raggiungimento di tale soglia critica è una diretta conseguenza della non attuazione di politiche di mitigazione finalizzate alla riduzione e all'attenuazione dell'emissione di gas serra. Questo modello prevede, oltre a concentrazioni di CO₂ in ppm mai viste prima, un aumento della temperatura a fine secolo (2100) compreso tra i 3,2° C e i 5,4° C.

Nella *Tabella 1* sono riassunte le caratteristiche principali dei quattro scenari; nella *Figura 5* gli scenari sono rappresentati graficamente nel diagramma estratto dal report di sintesi dell'AR5.

Scenario	Descrizione	Forzante radioattivo	Aumento temperatura	Concentrazione CO ₂ nel 2100
RCP2.6	Scenario di mitigazione	2,6 W/m ²	1° C – 2,3° C	490 ppm
RCP4.5	Scenario di stabilizzazione con riduzioni consistenti	4,5 W/m ²	1,7° C – 3,3° C	650 ppm
RCP6.0	Scenario di stabilizzazione con riduzioni blande	6,0 W/m ²	2° C – 3,7° C	850 ppm
RCP8.5	Scenario ad alte emissioni	8,5 W/m ²	3,2° C – 5,4° C	> 1370 ppm

Tabella 1: Riassunto delle caratteristiche principali dei quattro scenari RCP.

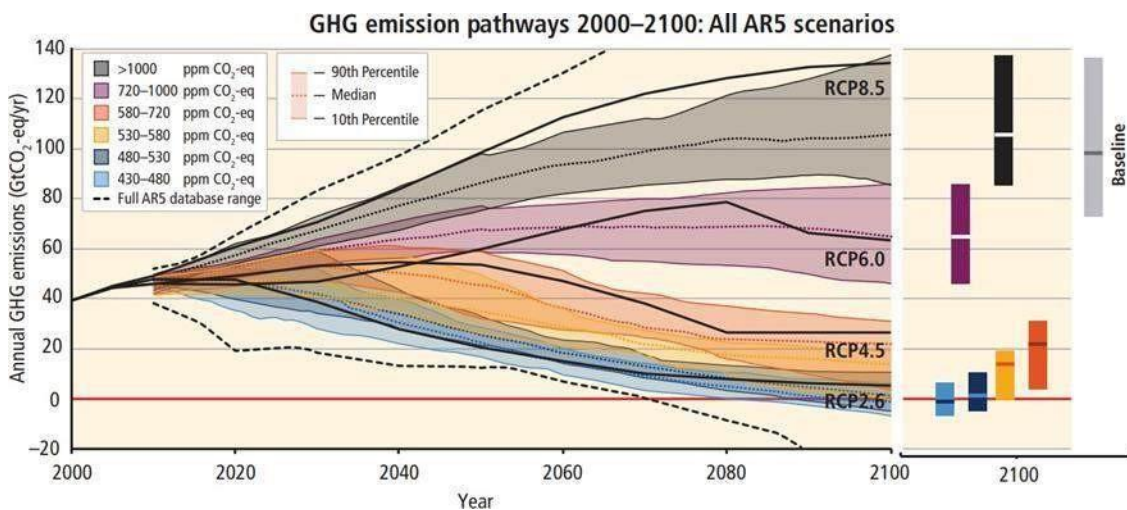


Figura 5: Andamento delle emissioni dei principali gas serra che determinano il forzante radioattivo. (Fonte: AR5 Climate Change 2014, report di sintesi)

Capitolo 4

Dati

4.1 Dati pluviometrici da stazioni

Gli eventi di precipitazione estrema analizzati in questo lavoro di tesi sono rappresentati dai valori massimi annuali di pioggia AM, registrati presso 17 stazioni presenti nell'area di studio, (*Tabella 2*). Le serie di AM sono suddivise e organizzate per specifiche durate sub-giornaliere, questo perché con il presente lavoro si vogliono studiare solamente gli eventi di precipitazione intensa con durata inferiore alle 24 ore. Le specifiche durate a cui si riferiscono i valori massimi annuali corrispondono allora a 1 ora, 3, 6, 12 e 24 ore.

In *Figura 6* è possibile osservare in una mappa la distribuzione spaziale delle stazioni presenti nella pianura veronese. I dati sono consultabili e scaricabili dal sito dell'Agenzia Regionale Protezione Ambiente per il Veneto (ARPAV).

Il dataset ottenuto è costituito da osservazioni di massimi annuali che vanno indicativamente dagli anni 90 al 2020; la disponibilità dei dati dipende dal periodo di operatività delle stazioni pluviometriche e dall'inizio delle registrazioni continuative.

La completezza della serie storica per tutto l'arco temporale di osservazione e il numero di osservazioni sono l'unico modo per garantire una validità statistica alle analisi svolte.

Codice	Nome stazione	Prov	Quota s.l.m.	Lat	Long	Inizio
VE_0104	Villafranca di Verona	VR	67	50,26051000	16,43507000	1990
VE_0108	Salizzole	VR	21	50,10730000	16,65590000	1991
VE_0113	Castelnovo Bariano	VR	10	49,89068000	16,81385000	1992
VE_0117	Sorga'	VR	24	50,09172000	16,57692000	1992
VE_0118	Bardolino - Calmasino	VR	160	50,42103000	16,37927000	1991
VE_0119	Roverchiara	VR	17	50,15038000	16,76614000	1991
VE_0120	Dolce'	VR	105	50,51316000	16,44188000	1991
VE_0123	Arcole	VR	27	50,27323000	16,79768000	1991
VE_0124	Marano di Valpolicella	VR	284	50,45711000	16,50142000	1991
VE_0125	San Pietro in Cariano	VR	127	50,41360000	16,47491000	1991
VE_0127	Buttapietra	VR	39	50,23986000	16,57503000	1991
VE_0128	Grezzana	VR	156	50,41647000	16,57288000	1992
VE_0129	Castelnuovo del Garda	VR	120	50,35104000	16,38531000	1991
VE_0131	Vangadizza (Legnago)	VR	12	50,03076000	16,79823000	2001
VE_0151	Masi	VR	9	49,99080000	16,95141000	1994
VE_0221	Trecenta	VR	9	49,88315000	16,91192000	1993
VE_0253	Valeggio sul Mincio	VR	120	50,24537000	16,35640000	2001

Tabella 2: Descrizione delle 17 stazioni analizzate nel lavoro di tesi

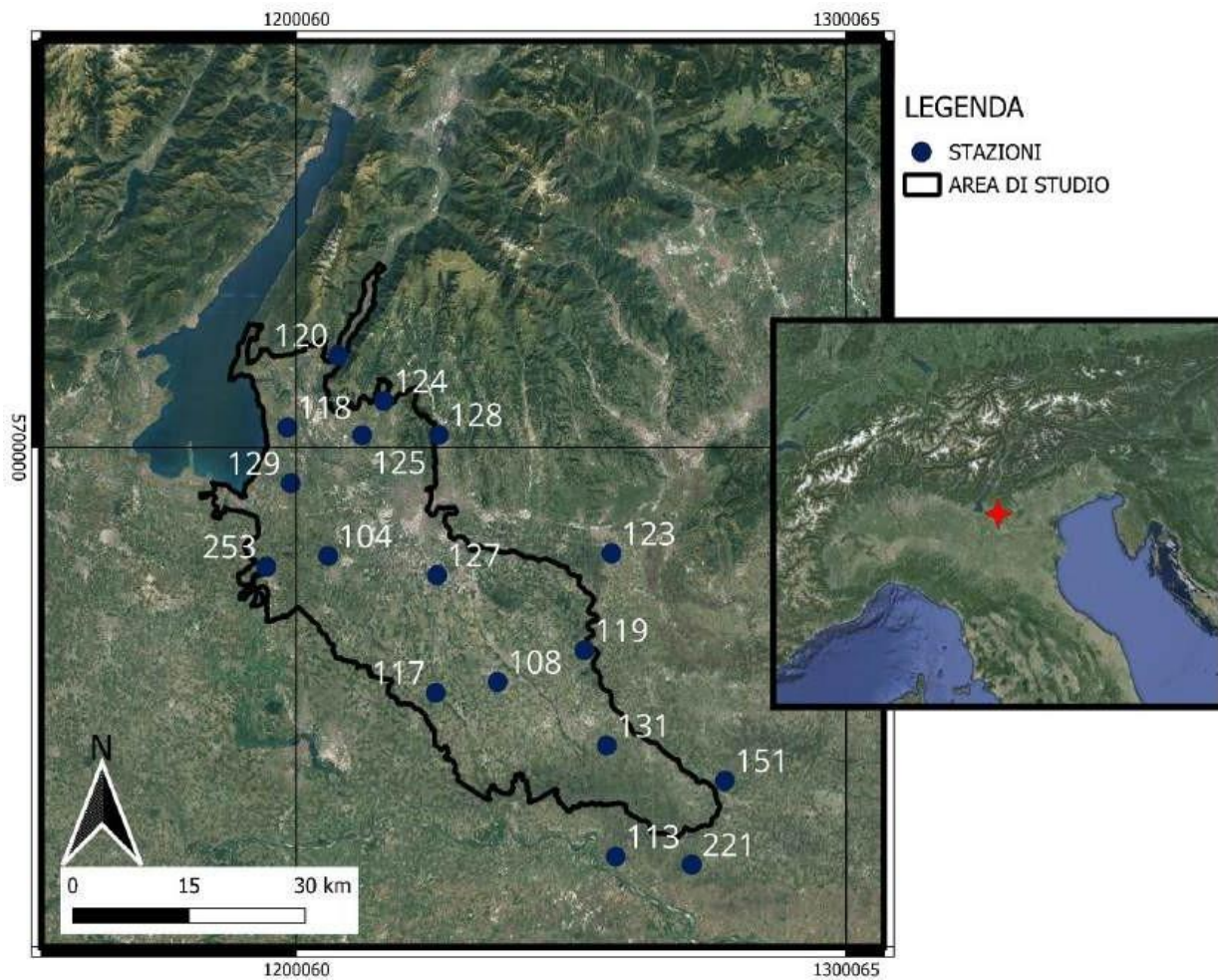


Figura 5: Andamento delle emissioni dei principali gas serra che determinano il forzante radioattivo. (Fonte: AR5 Climate Change 2014, report di sintesi)

4.2 Dati pluviometrici da modello CPM

Le serie di valori massimi annuali di precipitazione sono stati ottenuti dai dati orari di precipitazione forniti da simulazioni CPM. In particolare, sono state estratte le serie temporali di precipitazione nel punto griglia localizzato in corrispondenza di ogni pluviometro. I dataset costituenti le simulazioni ricoprono tre periodi temporali di lunghezza 10 anni: il periodo storico 1996-2005, il periodo di futuro prossimo 2041-2050, e infine quello del futuro lontano 2090-2099. Anche in questi dataset, sono state calcolate le precipitazioni massime annuali per le cinque durate: 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore e 24 ore. I dati delle precipitazioni sono stati simulati ed estratti dal modello per ogni stazione pluviometrica presente nell'area di studio. Come sopracitato, lo scenario di emissione di riferimento è l'RCP8.5, caratterizzato dall'assenza di politiche di contrasto e mitigazione delle emissioni.

Il risultato di queste operazioni di estrazione e organizzazione dei dati AM osservati e simulati di durata sub-giornaliera corrisponde a tre differenti serie di dati, le quali sono rinominate nel seguente modo:

- Obs: AM osservati dai pluviometri nel periodo 1990 – 2020;
- Hist: AM simulati dal modello CPM nel decennio 1996 – 2005;
- Fut: AM simulati dal modello CPM nel decennio 2090 – 2099.

Capitolo 5

Metodi

5.1 Modello probabilistico di Gumbel

Le serie temporali sopra elencate sono analizzate statisticamente attraverso l'applicazione del modello probabilistico di Gumbel, al fine di collegare la magnitudo dell'evento di precipitazione estrema con la sua frequenza di accadimento, corrispondente al tempo di ritorno. I tempi di ritorno utilizzati per questo lavoro di tesi sono di 10 e 50 anni, rappresentativi di precipitazioni intense di moderata e alta severità. Questo modello, definito come distribuzione del valore estremo, è uno dei metodi statistico-probabilistici più utilizzati per gli studi nel campo dell'idrologia. Inizialmente, è stata calcolata la media e la deviazione standard per tutte e cinque le durate di precipitazione, necessarie per il calcolo dei parametri di Gumbel α e u .

I due parametri sono definiti attraverso le equazioni (1) e (2):

$$a = \frac{\sqrt{6}s}{\pi} \quad (1)$$

$$u = x - n_e \alpha \quad (2)$$

dove: s: deviazione standard;
 x: media;
 n_e : costante di Eulero pari a 0,5772.

Si procede poi con la determinazione del valore della variabile ridotta W_T mediante la seguente equazione (3), la quale richiede di essere riferita a un determinato tempo di ritorno T. Nel nostro caso i calcoli sono stati eseguiti per un TR di 10 e 50 anni:

$$W_t = - \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (3)$$

A questo punto è stato possibile calcolare il valore dei quantili di precipitazione h_T (4), associati ad una specifica durata e ad un tempo di ritorno T, i quali sono così calcolati:

$$h_T = u + \alpha W_T \quad (4)$$

Rappresentando i quantili di precipitazione h_T ottenuti dal metodo di Gumbel, è stato possibile ricavare i massimi di precipitazione per qualsiasi evento piovoso di durata inferiore alle 24 ore. Con l'utilizzo di Excel è stato possibile determinare la curva di probabilità pluviometrica, la LSPP. Le curve di probabilità pluviometrica sono delle funzioni che mettono in relazione l'altezza di precipitazione con la sua durata e vengono espresse mediante una legge di potenza che assume la seguente forma:

$$h_{d,T} = a_T \cdot d^n \quad (5)$$

dove: h è l'altezza della precipitazione per il tempo di ritorno T e durata d;
 d è la durata della precipitazione
T è il tempo di ritorno dell'evento

In particolare, dall'equazione (5) possiamo ricavare i termini a ed n . Il termine n assume dei valori compresi tra 0 e 1 ed è adimensionale, a è espresso in mm e rappresenta l'intensità di pioggia per la durata unitaria. I termini a ed n sono stati riportati dal grafico ad una tabella per poi compiere dei confronti analizzati nei successivi capitoli.

L'equazione è stata ricavata interpolando h e d in Excel, utilizzando la funzione "linea di tendenza" impostata come curva di potenza. Inoltre, per avere una valenza statistica delle elaborazioni è stato visualizzato il coefficiente di determinazione R^2 nel grafico delle LSPP. I valori R^2 sono risultati molto alti, oltre lo 0,98, sottolineando la coerenza dei dati. Questi calcoli sono stati ripetuti per tutte le 17 stazioni presenti nell'area di studio, permettendoci di ottenere i quantili di precipitazione per ogni stazione, 5 durate di pioggia (1, 3, 6, 12 e 24 ore), e 3 diversi dati di partenza (Obs, Hist, Fut),

per due tempi di ritorno, 10 e 50 anni, questo, come già indicato nel capitolo di introduzione, per limitare il verificarsi di errori di campionamento.

5.2 Confronti statistici utilizzati per l'analisi dei dati

Successivamente sono state confrontate le elaborazioni descritte nel capitolo precedente: si sono eseguiti dei confronti tra i fattori a ed n delle curve di probabilità pluviometriche relative ai due tempi di ritorno; gli stessi confronti, hanno interessato i quantili di precipitazione per i due tempi di ritorno ottenuti con il metodo probabilistico di Gumbel. Per questa tesi, ci si è focalizzati sulle precipitazioni di durata di un'ora e di 24 ore. Queste operazioni permettono di realizzare un'analisi degli errori di distorsione del modello climatico e un'analisi delle variazioni future previste nel regime delle precipitazioni estreme.

5.2.1 Bias

Il calcolo del bias, ossia l'errore, ha permesso di analizzare la distorsione del modello climatico utilizzato rispetto alle osservazioni delle stazioni pluviometriche. Il valore è espresso in percentuale e quantifica quanto le simulazioni del modello climatico si discostano dalle osservazioni reali.

I calcoli sono stati eseguiti per i fattori a ed n della curva di probabilità pluviometrica e per le altezze in mm di pioggia per i quantili di durata di un'ora e 24 ore e tempo di ritorno 10 e 50 anni. Il bias è stato calcolato come differenza relativa tra osservazioni e modello His, con la seguente formula:

$$B\% = \frac{K_{hist} - K_{obs}}{K_{obs}} \cdot 100 \quad (6)$$

dove: X è il valore analizzato
obs indica che il valore si riferisce alle osservazioni
hist indica che il valore si riferisce alla simulazione del modello del passato

Per visualizzare l'andamento medio dell'errore è stata calcolata la media dei valori ricavati.

5.2.2 Change

Si è proceduto poi con il calcolo del change futuro, con lo scopo di quantificare l'aumento, o la diminuzione, delle statistiche eseguite. È stato eseguito un confronto tra il dataset relativo alla simulazione del modello sul decennio 1996-2005 e quello futuro 2090-2099. Come fatto precedentemente con il bias anche in questo caso i calcoli sono stati eseguiti per i fattori a ed n delle curve LSPP e per le altezze dei quantili di pioggia di 1 ora e 24 ore e tempo di ritorno 10 e 50 anni. Il change è stato calcolato con la seguente formula, espresso come differenza relativa tra periodo *his* e periodo *fut*, in percentuale:

$$C\% = \frac{x^{\text{fut}} - x^{\text{his}}}{x^{\text{his}}} * 100 \quad (7)$$

È stata in seguito calcolata la media dei dati ottenuti per capire se i cambiamenti, mediamente, sono positivi, negativi o nulli, nell'area di studio.

5.3 Elaborazione delle mappe con il programma QGIS

Tramite il programma QGIS è stato possibile creare delle mappe che rappresentassero in modo più apprezzabile i confronti tra bias e il change. In questo modo è stato possibile rappresentare graficamente i valori ottenuti relativi alle stazioni pluviometriche corrispondenti e valutarne l'andamento nell'area di studio.

Capitolo 6

Risultati e discussione

6.1 Analisi del bias del modello climatico

Il calcolo del bias è stato permesso grazie ai fattori a ed n ricavati dall'equazione delle linee di probabilità pluviometrica (un esempio in *Figura 7*). Questo dato ci permette di capire la differenza tra ciò che il modello ha simulato e le osservazioni eseguite dalle stazioni pluviometriche. I risultati sono riassunti nella *Tabella 3*, rappresentati da una scala di rossi se bias positivi (il modello sovrastima) ed una scala di blu se bias negativi (il modello sottostima). Nella *Figura 8* e nella *Figura 9* troviamo la rappresentazione dei valori in una mappa raffigurante il bacino e le stazioni pluviometriche. a_{10} e n_{10} sono i parametri delle LSPP riferite ad un tempo di ritorno di 10 anni, a_{50} e n_{50} per un tempo di ritorno di 50 anni.

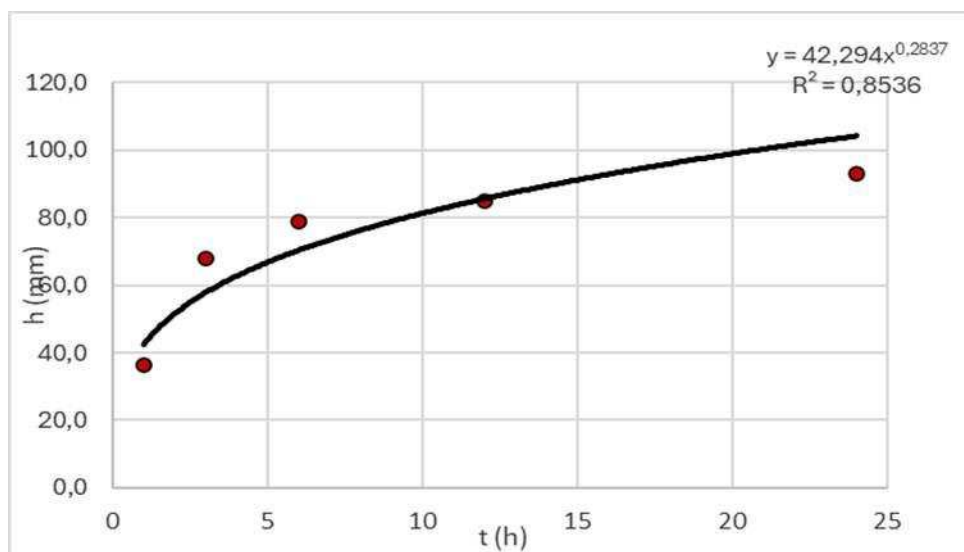


Figura 7: Esempio di equazione delle linee di probabilità da cui ricavare i fattori a ed n .

cod_stazione	a 10	n 10	a 50	n 50
VE_0104	-30,0	56,7	-34,6	83,7
VE_0108	9,7	8,4	11,8	3,3
VE_0113	3,1	72,4	8,8	86,0
VE_0117	-22,2	39,8	-28,3	53,0
VE_0118	-23,1	30,1	-27,9	43,1
VE_0119	-18,7	58,9	-21,5	66,9
VE_0120	-15,3	12,7	-19,2	18,4
VE_0123	-2,5	-3,8	-0,1	-18,9
VE_0124	-19,1	55,5	-23,7	76,0
VE_0125	19,4	-45,0	29,4	-61,4
VE_0127	-20,7	60,3	-23,6	80,3
VE_0128	1,7	-45,6	5,2	-65,6
VE_0129	8,3	31,9	10,6	48,7
VE_0131	3,5	43,6	5,5	50,9
VE_0151	-20,3	43,3	-25,1	52,0
VE_0221	-9,5	112,3	-12,1	141,1
VE_0253	5,0	1,2	0,8	10,3
MEDIA	-7,7	31,3	-8,5	39,3

Tabella 3: Bias (Errore percentuale) dei parametri a ed n delle curve di probabilità pluviometrica LSPP per i tempi di ritorno di 10 e 50 anni.

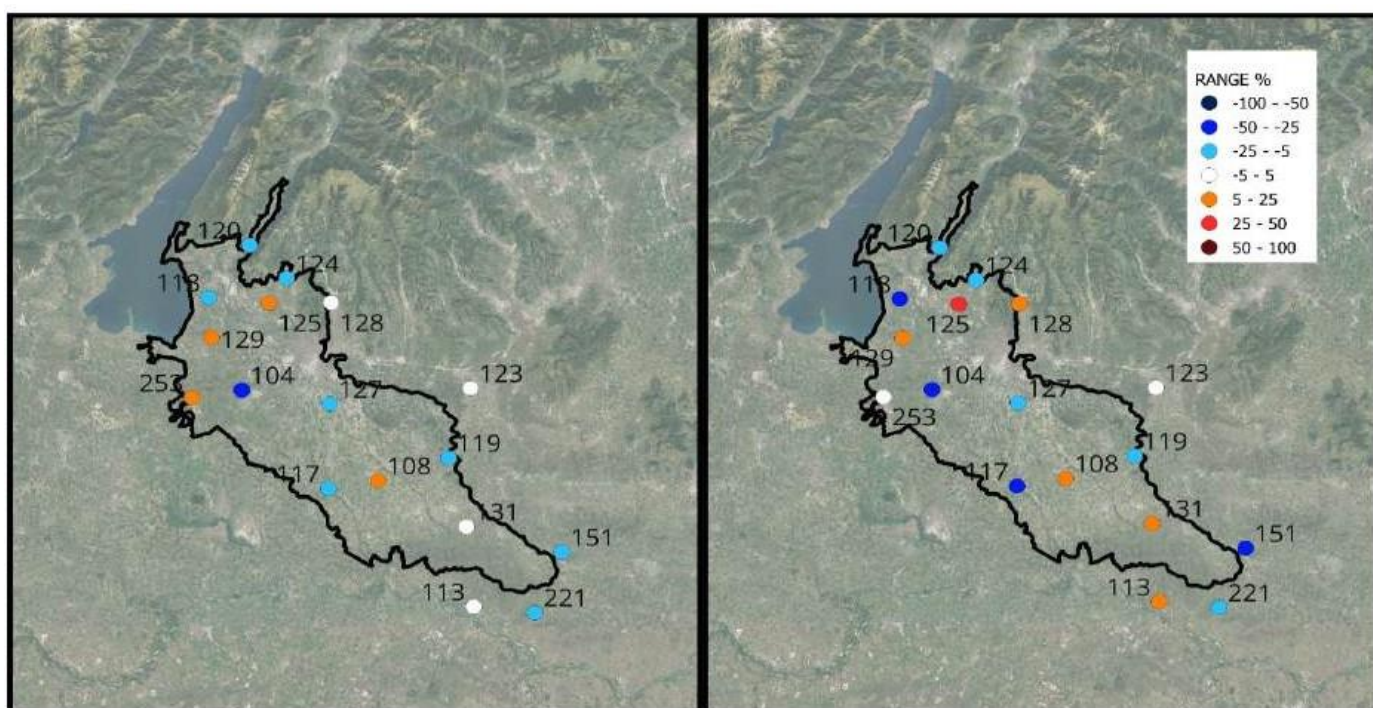


Figura 8: Bias riferito al parametro a con TR10 (a sinistra) e TR50 (a destra).

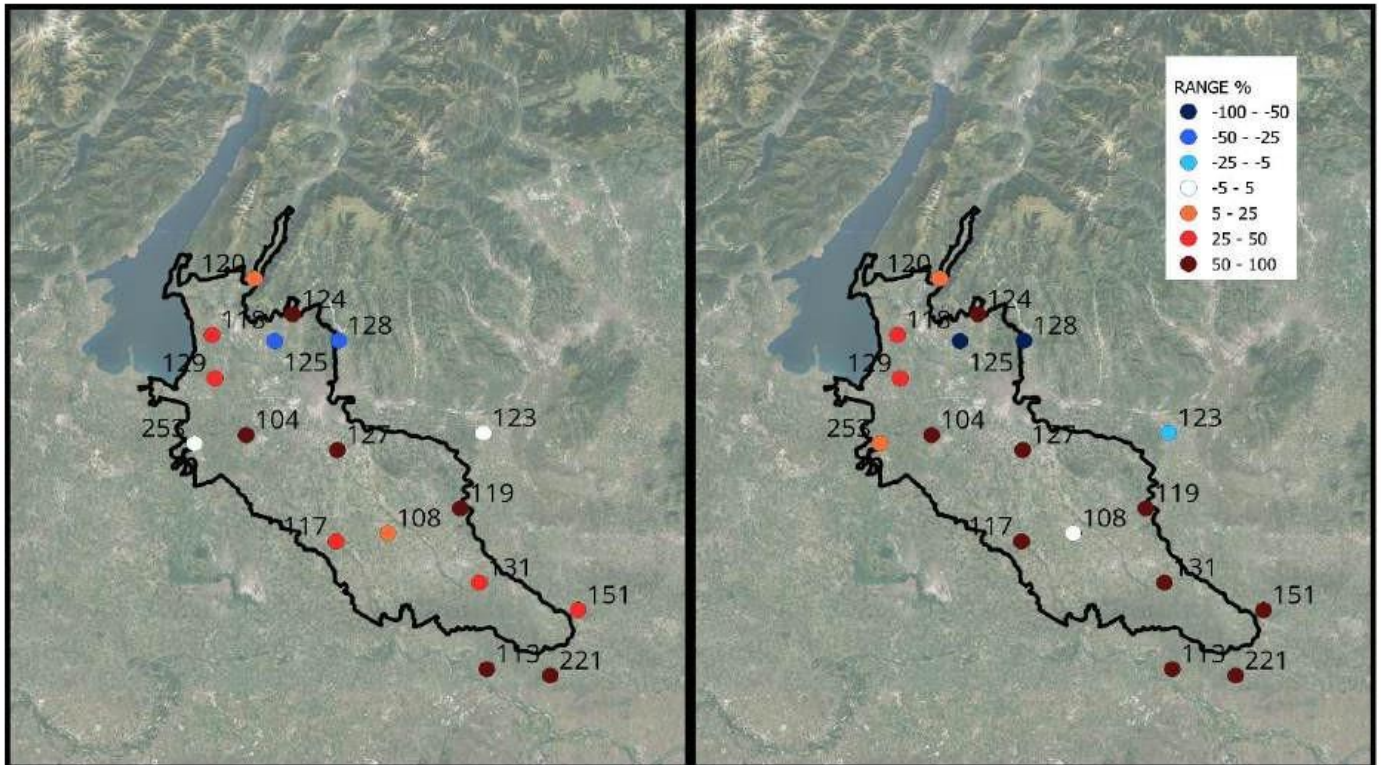


Figura 9: Bias riferito al parametro n con TR10 (a sinistra) e TR50 (a destra).

Analizzando visivamente i valori nella *Tabella 3*, si nota un'evidente e marcata differenza cromatica tra gli errori del parametro a e quelli del parametro n . In particolare, mediamente, l'errore è negativo per i fattori a riferiti agli eventi con un tempo di ritorno di 10 e 50 anni. L'errore medio su a_{10} è di -7,77%; l'errore su a_{50} misura -8,5%. I valori negativi indicano che è presente un errore di sottostima tra modello e osservazioni. Per quanto riguarda il fattore n invece, l'errore medio su n_{10} è di 31,3%, su n_{50} misura 39,3%. In entrambi i casi l'errore è positivo, indicando una sovrastima dei fattori da parte del modello. Alcune stazioni come ad esempio quelle situate nei comuni di: Salizzole, Arcole e Valeggio sul Mincio, rispettivamente le stazioni: VE0108, VE0123 e VE0253 presentano degli errori minimi, indicate con il colore bianco o con il colore rosso o azzurro chiaro. Fortemente influenzata dall'errore è la stazione VE0221, con valori molto al di sopra della media per il parametro n . Si nota inoltre che nelle stazioni VE0125 e VE0128 i fattori n assumono errori fortemente negativi. Con quest'analisi si può affermare che i parametri tendono a bilanciarsi; infatti laddove avviene una sottostima del parametro a c'è una sovrastima dell'esponentiale n , e viceversa. Nel dettaglio, il valore negativo dei fattori a per entrambi i tempi di ritorno, evidenzia la sottostima degli eventi di precipitazione riferite alla durata di un'ora, mentre la sovrastima di n indica che nel modello la precipitazione cresce con la durata più velocemente che nelle osservazioni.

6.1.1 Analisi del change del modello climatico

Il dato change ricavato con l'equazione (7) quantifica come i fattori a ed n cambieranno in futuro rispetto alle simulazioni del modello nel periodo 1996-2005.

I risultati sono elencati nella *Tabella 4*, in scala di rossi se change positivi (futuro aumento) ed in scala di blu per change negativi (futura diminuzione). Le *Figura 10* e nella *Figura 11* rappresentano i valori nella mappa raffigurante l'area di studio.

cod_stazione	a 10	n 10	a 50	n 50
VE_0104	42,9	-16,3	50,0	-15,4
VE_0108	27,3	-36,1	32,3	-40,0
VE_0113	-13,5	-21,3	-21,6	-21,0
VE_0117	13,4	-19,3	15,1	-16,8
VE_0118	10,1	-1,4	6,6	0,9
VE_0119	5,1	-13,3	-0,2	-8,7
VE_0120	14,6	3,9	14,7	7,5
VE_0123	-4,4	44,1	-14,5	94,1
VE_0124	38,9	-29,5	37,5	-28,6
VE_0125	-14,2	94,6	-26,7	139,8
VE_0127	41,3	-51,9	53,3	-61,5
VE_0128	-30,1	140,4	-41,4	145,7
VE_0129	10,3	-27,1	5,7	-27,3
VE_0131	23,3	-38,3	30,1	-27,2
VE_0151	11,9	-9,3	9,8	-7,2
VE_0221	5,5	-49,2	4,3	-53,3
VE_0253	0,1	-37,8	2,9	-45,5
MEDIA	10,7	-4,0	9,3	2,1

Tabella 4: Change dei parametri delle curve di probabilità pluviometrica LSPP.

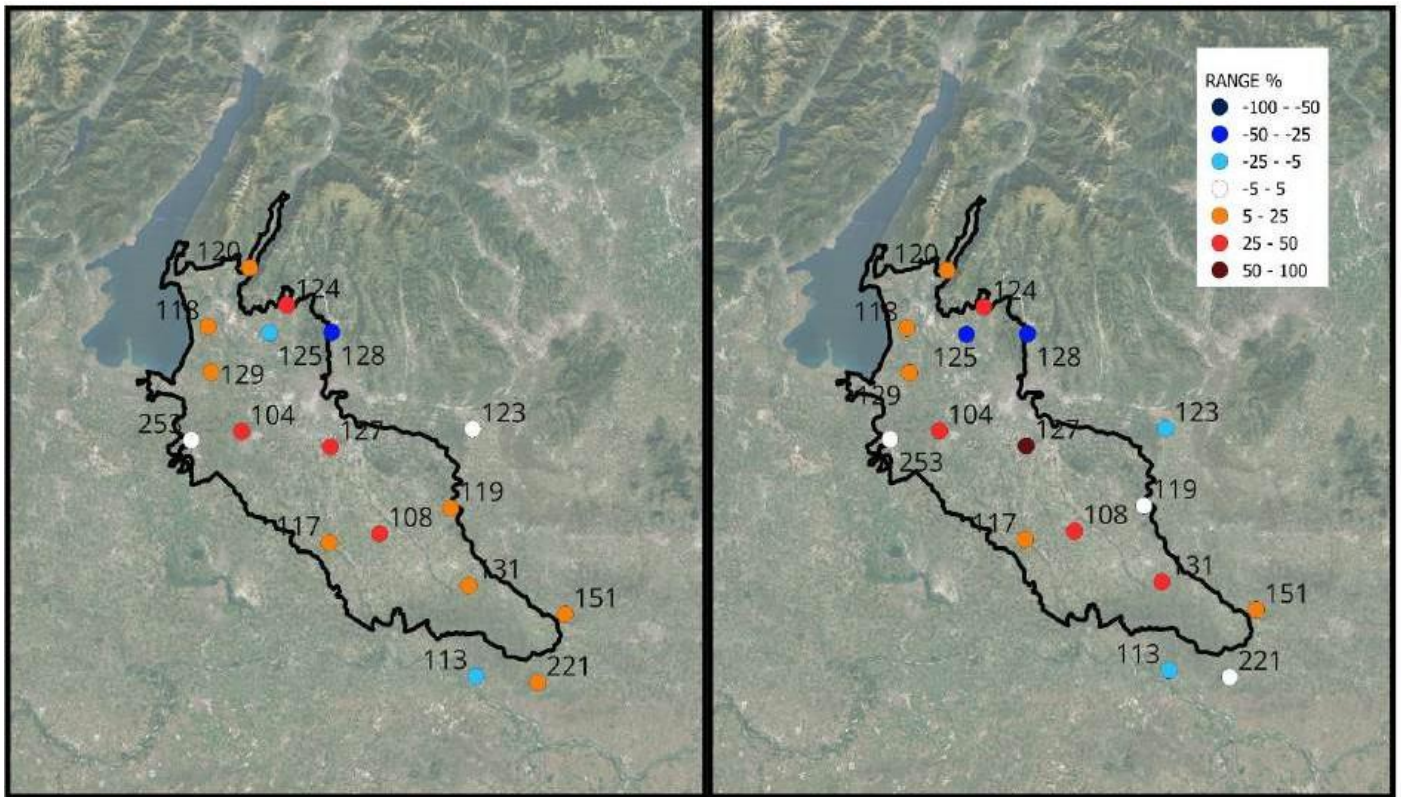


Figura 10: Change riferito al parametro a con TR10 (a sinistra) e TR50 (a destra).

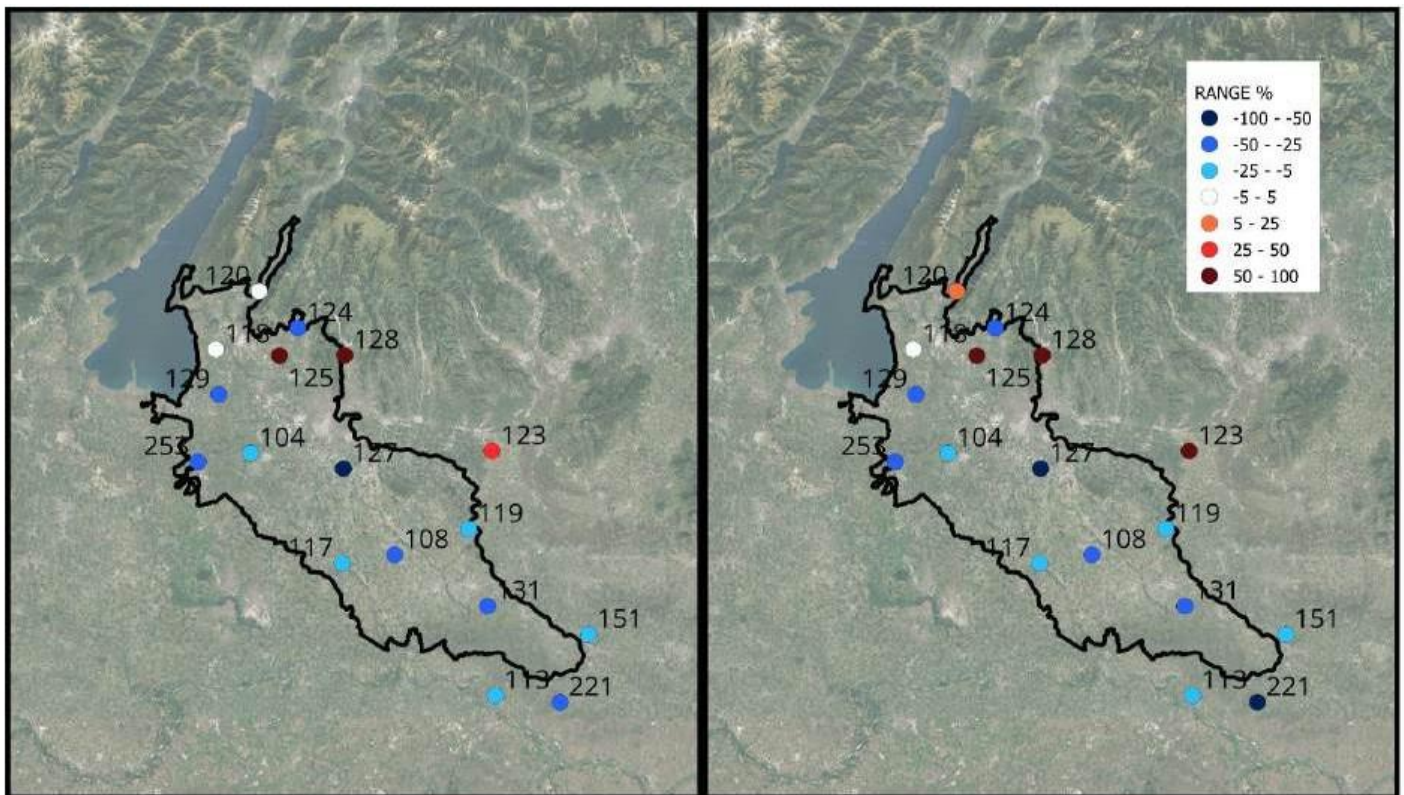


Figura 11: Change riferito al parametro n con TR10 (a sinistra) e TR50 (a destra).

La *Tabella 4* evidenzia che la media del cambiamento per il parametro a_{10} e a_{50} sono rispettivamente 10,7% e 9,3%. Questo indica che per il futuro lontano ci si aspetta un aumento medio nell'area del valore a della curva LSPP, che sottolinea un aumento delle precipitazioni della durata di un'ora con tempo di ritorno 10 e 50 anni. Per quanto riguarda invece n_{10} e n_{50} i valori medi sono discordanti ma piccoli, infatti risultano essere rispettivamente: -4,0% e 2,1%. Le stazioni VE0104, VE0108, VE0124 e VE0127 sono contraddistinte da un valore di a molto al di sopra della media per il fattore a , sia per gli eventi con tempo di ritorno di 10 anni, sia per un tempo di ritorno di 50 anni. Per quanto riguarda il fattore n , questo risulta avere valori molto al di sopra della media, sia per eventi con tempo di ritorno di 10 anni, sia per quelli con tempo di ritorno di 50 anni, nelle stazioni dei comuni di Arcole, San Pietro in Cariano e Grezzana, rispettivamente le stazioni: VE0123, VE0125 e VE0128. L'aumento di n corrisponde ad una crescita più rapida della curva, con precipitazioni più intense. Anche in questo caso notiamo che laddove il cambiamento di a risulta essere negativo, n tende ad aumentare; al contrario, nelle zone in cui a aumenta, n diminuisce. Mediamente nell'area, l'aumento futuro di a e la diminuzione di n indicano una tendenza futura ad aumenti dei quantili di precipitazione a durata oraria ma ad una crescita più lenta rispetto al presente con l'aumentare della durata di pioggia.

6.2 Analisi sui risultati dei quantili di precipitazione

Successivamente, è stata svolta la stessa analisi per i quantili di pioggia, ovvero i millimetri di pioggia, per gli eventi estremi con tempo di ritorno di 10 e 50 anni. Le precipitazioni che sono state riportate e su cui è stata svolta una lettura più approfondita sono quelle di durata di 1 ora e 24 ore, queste durate, ci permettono di analizzare in modo più efficace le differenze e le caratteristiche dell'andamento delle precipitazioni; diversamente i risultati per le durate intermedie, quindi 3,6,12 ore non sono stati riportati. Gli eventi estremi di durata oraria sono soliti nei temporali estivi, in cui abbiamo una precipitazione breve ma molto intensa. Questi eventi si generano solitamente per convezione: durante il giorno la parte di atmosfera vicino al suolo si scalda. L'aria calda, essendo meno densa, tende a salire scontrandosi con l'aria più fredda; quando quest'aria raggiunge il livello di condensazione, il vapore acqueo contenuto nell'aria condensa. Gli eventi estremi di durata maggiore invece, come quelli di 24 ore, sono tipici delle piogge stagionali, solitamente con intensità moderata su base oraria. Questo tipo di precipitazione si genera solitamente con uno scontro di due masse d'aria, una calda ed una fredda. Quando le due masse si incontrano, l'aria calda essendo meno densa tende a sollevarsi al di sopra dell'aria fredda; il vapore acqueo condensa e causa delle precipitazioni prolungate.

Facendo riferimento alla nostra area di studio, si può affermare che le precipitazioni, sono parzialmente condizionate dalla presenza del Lago di Garda, infatti il lago durante l'inverno rilascia lentamente il calore accumulato durante la stagione calda, portando a delle precipitazioni invernali meno intense e con meno nevicate a basse quote. Diversamente durante la stagione estiva, la grande superficie del lago evapora, date le elevate temperature, arricchendo di umidità l'aria circostante. Questa umidità può favorire la formazione di nubi e piogge, anche di notevole intensità, che si spingono poi nella pianura veronese.

6.2.1 Analisi del bias del modello climatico

L'analisi del bias, e quindi dell'errore del modello rispetto alle osservazioni dei pluviometri ha interessato i quantili di precipitazione. Di seguito, nella *Tabella 5*, sono riassunti i risultati per le durate di precipitazione di 1 ora e 24 ore. Mentre nella *Figura 12* e nella *Figura 13* troviamo le mappe raffiguranti l'area di studio e le stazioni pluviometriche, in cui sono rappresentati questi valori. $h_{10}(1)$ e $h_{10}(24)$ si riferiscono alle piogge di durata di 1 e 24 ore con un tempo di ritorno di 10 anni mentre $h_{50}(1)$ e $h_{50}(24)$ alle piogge di durata 1 e 24 ore con tempo di ritorno di 50 anni.

cod_stazione	$h_{10}(1)$	$h_{50}(1)$	$h_{10}(24)$	$h_{50}(24)$
VE_0104	-25,0	-27,5	-5,9	-3,0
VE_0108	13,6	16,7	17,9	15,0
VE_0113	-3,7	0,2	69,5	93,1
VE_0117	-15,7	-24,1	7,3	6,7
VE_0118	-19,1	-24,0	-3,6	-4,6
VE_0119	-25,0	-28,6	2,4	-1,6
VE_0120	-21,6	-27,0	-10,1	-12,7
VE_0123	-33,9	-41,3	22,0	23,7
VE_0124	13,0	18,3	-4,5	-8,0
VE_0125	21,7	30,3	-12,1	-14,7
VE_0127	-17,1	-20,0	17,3	17,9
VE_0128	4,4	7,7	-19,0	-24,6
VE_0129	-2,7	-4,1	24,1	34,1
VE_0131	5,1	5,5	32,9	36,3
VE_0151	-14,1	-17,2	10,5	9,5
VE_0221	-14,3	-18,9	67,4	80,1
VE_0253	-7,8	-13,7	2,9	7,1
MEDIA	-8,4	-9,9	12,9	15,0

Tabella 5: Bias dei quantili di pioggia per un tempo di ritorno di 10 e 50 anni.

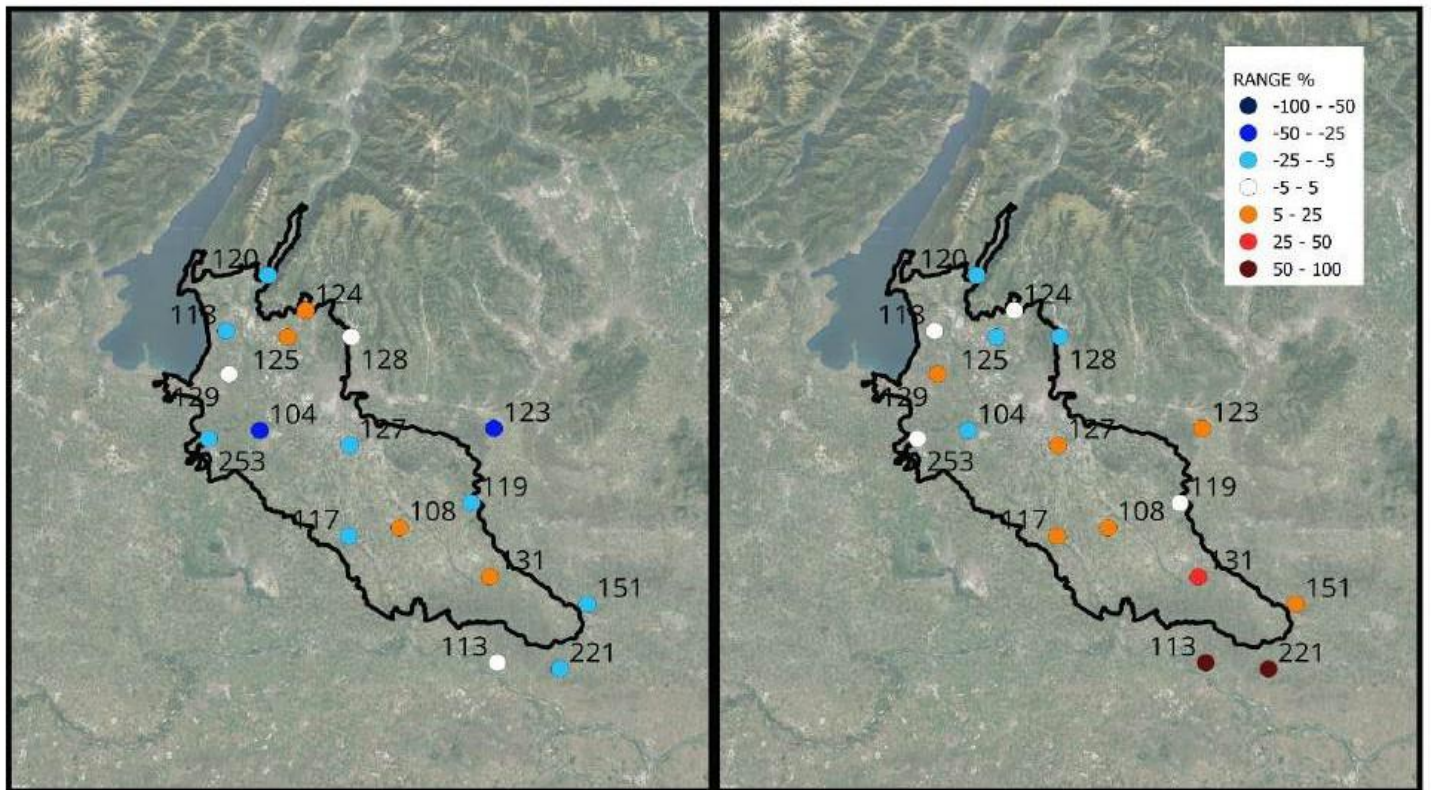


Figura 12: Bias dei quantili di pioggia di 1 ora (a sinistra) e 24 ore (a destra) per un tempo di ritorno di 10 anni.

Osservando la media dell'errore per gli eventi estremi con tempo di ritorno 10 anni nella *Tabella 5*, notiamo da subito una differenza tra 1 h e 24 h, sottolineata anche dalla diversità cromatica per i due quantili. Per le precipitazioni di durata oraria l'errore medio è di -8,04% mentre per la durata di 24 ore è pari a 12,90%. Il modello tende a sottostimare le precipitazioni di durata oraria e quindi prevede, una precipitazione, in mm di pioggia, meno abbondante rispetto alla realtà; sovrastima invece le precipitazioni di durata giornaliera prevedendo eventi piovosi più abbondanti rispetto a ciò che è stato osservato dai pluviometri. In alcune stazioni, come nelle stazioni di Castelnovo Bariano, Arcole, Buttapietra e Trecenta, rispettivamente: VE0113, VE0123, VE0127 e VE0221, c'è una differenza notevole tra i valori ad un'ora e 24 ore. La stazione VE0108, invece, sovrastima entrambe le tipologie di precipitazione. Possiamo osservare, anche grazie alle mappe, come le stazioni VE0113 e VE0221; entrambe localizzate nella parte meridionale dell'area di studio, riportino valori molto elevati del bias per le precipitazioni di durata 24 ore.

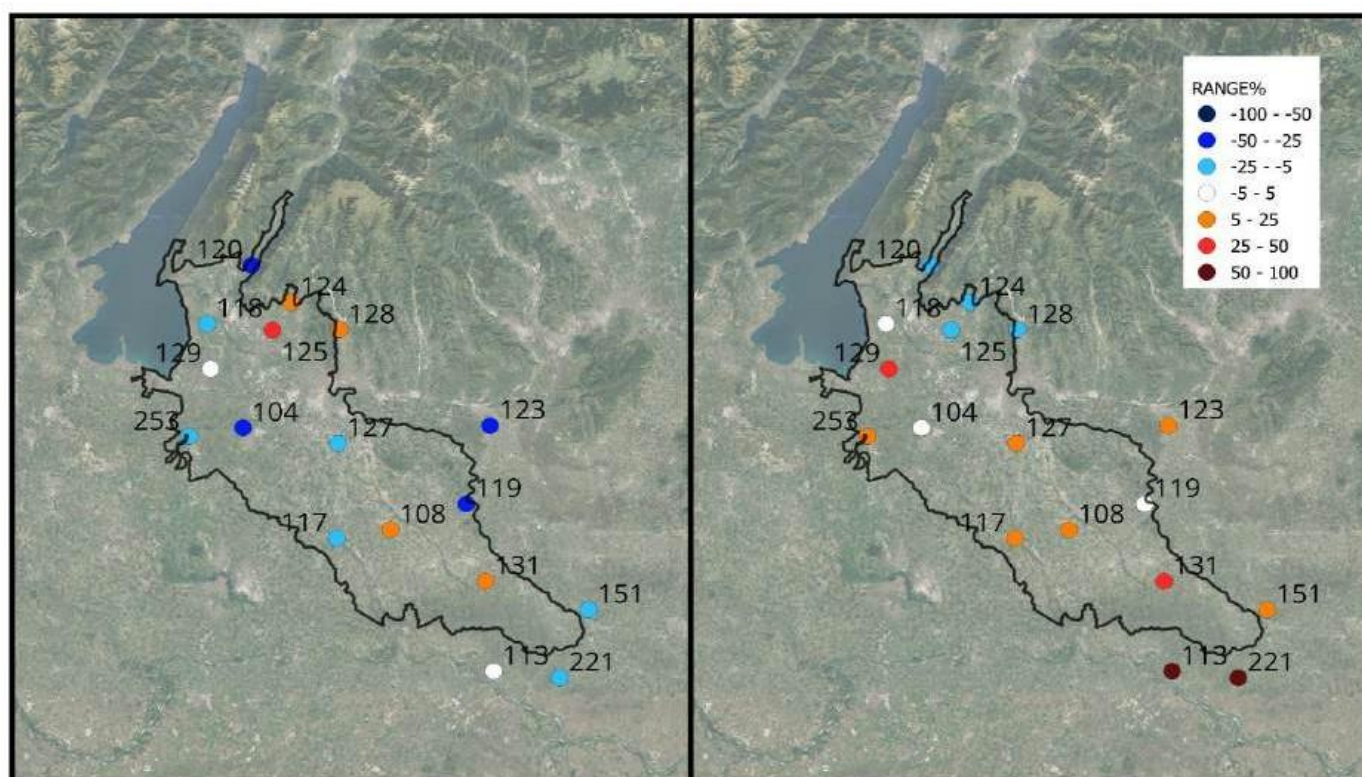


Figura 13: Bias dei quantili di pioggia di 1 ora (a sinistra) e 24 ore (a destra) per un tempo di ritorno di 50 anni.

Situazione analoga per gli eventi estremi con tempo di ritorno di 50 anni. Dalla *Tabella 5* osserviamo infatti che l'errore medio per le piogge di durata oraria è di -9,99%, mentre per le precipitazioni di 24 ore risulta essere 15,00%. Anche in questo caso il modello sottostima le precipitazioni brevi e sovrastima le precipitazioni giornaliere. Le stazioni: VE0113, VE0123, VE0127 e VE0221, come precedentemente descritto, riportano nuovamente valori molto diversi tra le durate di un'ora e 24 ore. Come per il valore dei bias dei quantili di pioggia di 24 ore per un tempo di ritorno di 10 anni nelle stazioni VE0113 e VE0221, anche i valori per i bias dei quantili di 24 ore per un tempo di ritorno di 50 anni, nelle medesime le stazioni, riportano valori molto elevati, rafforzando quanto osservato in precedenza

6.2.2 Analisi del change nel modello climatico

Di notevole interesse per la materia dei cambiamenti climatici è il dato che esprime il change delle precipitazioni estreme. Questo valore indica come e con quale intensità le precipitazioni di durata oraria e giornaliera cambieranno rispetto alle simulazioni del modello, indicando quindi se in futuro, più precisamente nel periodo 2090-2099, ci aspetteremo un aumento o una diminuzione dell'intensità di pioggia e quindi altezze in mm di pioggia maggiori o minori rispetto al presente.

Nella *Tabella 5* sono riportati i risultati per le durate di precipitazione di un'ora e 24 ore.

La *Figura 14e* la *Figura 15* invece riportano le mappe dell'area di studio in cui sono rappresentati questi valori.

cod_stazione	h ₁₀ (1)	h ₅₀ (1)	h ₁₀ (24)	h ₅₀ (24)
VE_0104	24,3	23,9	14,2	17,2
VE_0108	18,5	21,0	-6,8	-4,6
VE_0113	-11,3	-17,6	-28,7	-34,9
VE_0117	5,8	2,1	-6,8	-6,3
VE_0118	27,3	32,3	13,2	16,4
VE_0119	12,7	9,9	-0,9	0,0
VE_0120	22,4	24,7	19,1	23,7
VE_0123	45,6	51,0	-2,8	-4,6
VE_0124	4,6	-3,8	30,1	39,3
VE_0125	-15,0	-24,8	16,5	22,6
VE_0127	33,5	44,5	-12,6	-14,1
VE_0128	-32,6	-42,8	16,7	19,3
VE_0129	25,7	26,2	-8,9	-11,4
VE_0131	23,8	27,7	-6,9	-6,9
VE_0151	3,3	0,3	-5,5	-6,4
VE_0221	12,1	13,9	-43,0	-48,9
VE_0253	10,1	15,4	-28,2	-33,7
MEDIA	12,4	12,0	-2,4	-2,0

Tabella 6: Change percentuale dei quantili di pioggia per un tempo di ritorno di 10 e 50 anni.

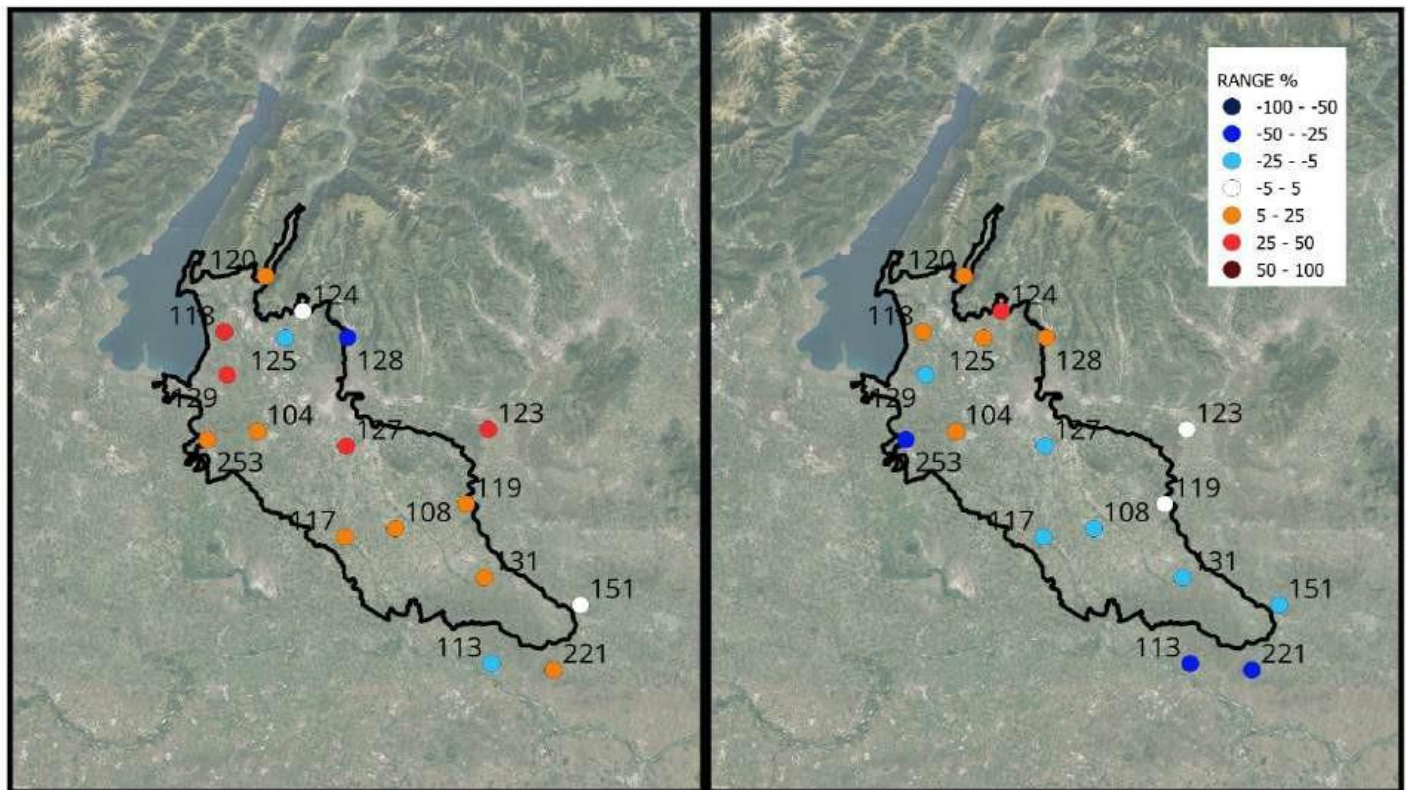


Figura 14: Change dei quantili di pioggia di 1 ora (a sinistra) e 24 ore (a destra) per un tempo di ritorno di 10 anni.

Come possiamo osservare dalla *Tabella 6*, per le precipitazioni di durata oraria, il cambiamento medio è di $-12,4\%$ mentre per la durata di 24 ore è pari a $-2,4\%$. Il modello prevede un aumento delle precipitazioni di durata oraria; e mediamente una leggera diminuzione delle precipitazioni di durata giornaliera. Questo tipo di differenza è apprezzabile anche nelle mappe soprastanti; nella mappa di sinistra i valori assumono in gran parte una colorazione rossa, mentre la mappa di destra rappresenta valori con una colorazione prevalentemente blu. Si nota a 24 h un aumento futuro nelle stazioni della zona settentrionale dell'area di studio, situata in area collinare. In alcune stazioni, in particolare nelle stazioni di: Arcole, San Pietro in Cariano, Buttapietra, Grezzana, Trecenta e Valeggio sul Mincio, rispettivamente: VE0123, VE0125, VE0127, VE0128, VE0221 e VE0253 c'è una differenza notevole tra i valori ad un'ora e 24 ore. La stazione VE0113, invece, vede diminuzione per entrambe le durate di precipitazione. Inoltre le stazioni: VE0113, VE0221 e VE0253; riportano valori molto inferiori alla media per le precipitazioni di durata 24 ore.

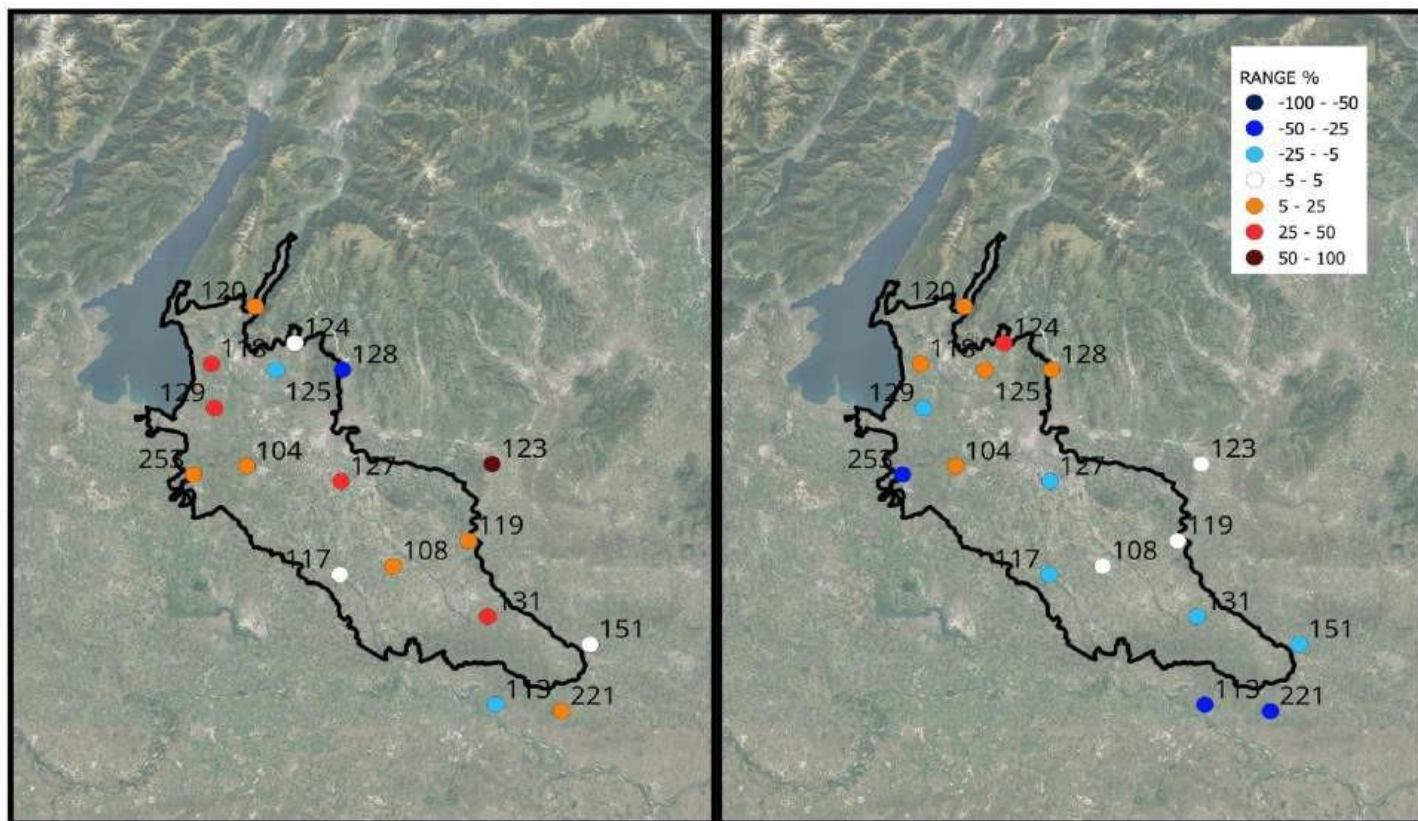


Figura 15: Change dei quantili di pioggia di 1 ora (a sinistra) e 24 ore (a destra) per un tempo di ritorno di 50 anni.

Per quanto riguarda il valore del change per i quantili con tempo di ritorno di 50 anni, possiamo affermare che si ripresenta la situazione analoga alla precedente, caratterizzata da una differenza cromatica tra le durate di un'ora e 24 ore. In particolare per le precipitazioni di durata oraria, il cambiamento medio risulta essere di 12,0% mentre quello di durata giornaliera di -2,0%, molto simili ai valori medi riportati dai quantili con tempo di ritorno di 10 anni.

Capitolo 7

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha l'obiettivo generale di comprendere in che modo e con quale intensità, le piogge estreme cambieranno in futuro nella pianura veronese. Per conseguire questo obiettivo ci si è affidati ad un modello climatico ad alta risoluzione, considerando uno scenario di emissione critico denominato RCP8.5, il quale rappresenta un aumento costante delle emissioni di gas serra per tutto il secolo e di conseguenza un aumento delle temperature medie globali, dovuto alla mancanza di politiche adeguate per contrastare l'effetto delle attività antropiche. La pianura veronese copre un'estensione notevole e di conseguenza il suo territorio varia di molto, clima e precipitazioni in particolare sono condizionate dalla presenza del Lago di Garda, il quale mitiga il clima nelle aree circostanti e allo stesso tempo favorisce lo sviluppo di fenomeni intensi soprattutto nella stagione calda. Questo tipo di caratteristiche aumenta la difficoltà del modello nel simulare tutti i fenomeni che avvengono in un territorio così vario.

Come primo obiettivo specifico, si è valutata l'accuratezza dei modelli climatici ad elevata risoluzione spaziale e temporale nella simulazione delle precipitazioni estreme di durata sub-giornaliera con un tempo di ritorno di 10 e 50 anni. Analizzando il bias e quindi l'errore dei dati ottenuti dalle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, possiamo notare come ci sia una sottostima del parametro a per entrambi i tempi di ritorno, con un valore di $-7,7\%$ per a_{10} e di $-8,5\%$ per a_{50} ; il modello quindi sottostimando il parametro a , a sua volta sottostima anche le piogge di durata oraria. Al contrario il parametro n risulta essere notevolmente sovrastimato per entrambi i tempi di ritorno, con valori di $31,1\%$ per n_{10} e $39,3\%$ per n_{50} . Se da un lato il parametro a è sottostimato, dall'altra il parametro n tende ad aumentare notevolmente soprattutto per gli eventi estremi con tempo di ritorno di 50 anni.

Il secondo obiettivo specifico è stata la valutazione del cambiamento futuro (fine secolo) rispetto al presente, nelle precipitazioni estreme sub-giornaliere. Osservando i dati relativi al change e quindi al cambiamento futuro, troviamo per entrambi i tempi di ritorno che il parametro a è in aumento, in particolare $10,7\%$ per a_{10} e $9,3\%$ per a_{50} . Il parametro n a sua volta è in diminuzione, per eventi estremi con tempo di ritorno di 10 anni, assumendo un valore di $-4,0\%$ e leggermente in aumento per eventi con tempo di ritorno di 50 anni, con un valore di $2,1\%$. Rilevante è la caratteristica di alcune stazioni in cui il sia il parametro a che il parametro n assumono valori molto al di sopra della media.

I dati relativi ai quantili di precipitazione hanno registrato bias negativi per precipitazioni di durata oraria per entrambi i tempi di ritorno, assumendo valori di $-8,4\%$ per h_{10} e $-9,9\%$ per h_{50} ;

fanno eccezione alcune stazioni in cui questo valore è al di sopra delle medie, riportando errori positivi e quindi sovrastimati. Al contrario le precipitazioni di durata giornaliera hanno riportato bias positivi, con una sovrastima del modello rispetto alle osservazioni dei pluviometri, a dare conferma di questo, sono i dati medi ottenuti, che riportano valori di 12,9% per h10 e di 15,0% per h50. Anche in questo caso troviamo stazioni che si discostano di molto dalle medie, in particolare le due stazioni poste nella parte più a sud della pianura veronese, le quali riportano errori superiori al 60%.

Per quanto riguarda il change dei quantili di precipitazione, osserviamo un aumento delle altezze di pioggia orarie, per entrambi i tempi di ritorno con valori medi di 12,4% per h10 e 12,0% per h50. Per la durata di 24 ore, si nota invece, una notevole diminuzione dell'intensità delle piogge con valori medi di -2,4% per h10 e - 2,0% per h50. Le previsioni del modello climatico, considerando le condizioni di temperatura ed emissioni peggiori, indicano un aumento del quantile di pioggia per la durata di un'ora ed una diminuzione anche se di piccola intensità, delle piogge di durata giornaliera.

Avendo una panoramica generale, possiamo affermare che il modello in alcuni casi sottostima o sovrastima notevolmente i valori del bias in alcune stazioni, questo potrebbe derivare dall'incapacità del modello stesso di simulare le interazioni tra tutte le parti interessate. Infatti come già approfondito nei capitoli precedenti, la vastità dell'area di studio, la diversa morfologia del territorio e la presenza del Lago di Garda, possono determinare degli errori più marcati in alcune zone. Tali risultati evidenziano la necessità di tecniche di correzione dell'errore nel modello CPM che tengano conto di diverse durate di precipitazione.

Le valutazioni dei cambiamenti futuri nelle precipitazioni estreme condotte nella pianura veronese, sulla base di modelli climatici ad alta risoluzione, considerando uno scenario critico di emissione di gas serra e di aumento delle temperature medie, indicano un generale aumento delle precipitazioni soprattutto per durata orarie. Tali valutazioni possono fornire indicazioni utili per una programmazione più efficace di politiche mirate a contrastare e mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici; al fine di ridurre il rischio idrologico ed idraulico e il rischio sociale ad esso associato.

Bibliografia

Capozzi V., Budillon G., (2023). *Cambiamenti climatici*.

Dallan E., Marra F., Fosser G., Marani M., Formetta G., Schär C., Borga M., (2023). How well does a convection-permitting regional climate model represent the reverse orographic effect of extreme hourly precipitation?

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al., (2014), EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, Reg. Environ Change 14, 563–578 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.

Lionello P., Baldi M., Brunetti, M., Cacciamani C., Maugeri M., Nanni, T., Pavan V., e Tomozeiu, R., (2009), Eventi climatici estremi: tendenze attuali e clima futuro sull'Italia, I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti, Bononia University Press, Bologna, 81-106

Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., et al. (2015), A review on regional convectionpermitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges, Rev. Geophys., 53, 323–361. Doi:10.1002/2014RG000475.

Rizzardi T. Influenza del cambiamento climatico sul regime delle precipitazioni intense nel Nord-Est italiano. Tesi di laurea magistrale, in Scienze Forestali e Ambientali

<https://www.arpa.veneto.it/>

<https://www.ipcc.ch/>

<https://portale.bonificaveronese.it/>