

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
Dipartimento del Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in  
Tecnologie Forestali e Ambientali

**Analisi dell'influenza del clima sull'anatomia delle cellule  
xilematiche di *Picea abies* nel sito di Renon (BZ).**

Relatore

Prof. Castagneri Daniele

Laureanda

Provenzale Eleonora

Matricola n. 1221744

Anno accademico 2021/22

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| 1. Riassunto.....  | 3  |
| 2. Summary.....  | 3  |
| 3. Introduzione.....   | 4  |
| 4. Materiali e metodi.....   | 6  |
| 4.1 Area di studio.....  | 6  |
| 4.2 Preparazione dei campioni.....   | 7  |
| 4.3 Analisi dei campioni.....  | 8  |
| 4.4 Costruzione delle cronologie anatomiche.....                               | 9  |
| 4.5 Analisi della correlazione tra cronologie anatomiche e dati climatici..... | 9  |
| 5. Risultati.....  | 10 |
| 6. Discussione.....  | 21 |
| 7. Conclusioni.....  | 24 |
| 8. Bibliografia.....   | 25 |

## 1. Riassunto

Lo studio degli effetti del clima sugli alberi può avvenire sia attraverso l'osservazione diretta dei processi, sia tramite un approccio retrospettivo. L'analisi delle caratteristiche anatomiche delle cellule xilematiche lungo serie dendrocronologiche appartiene alla seconda tipologia. Questo approccio permette di comprendere come determinate caratteristiche funzionali dello xilema siano influenzate dalle variazioni intra-stagionali del clima.

In questo studio sono state analizzate le caratteristiche anatomiche degli anelli di abete rosso (*Picea abies* (L.) Karst.) nel sito di Renon, a circa 12 km da Bolzano. I campioni sono stati raccolti a 1735 m s.l.m. in un ambiente con condizioni climatiche ottimali per la specie. Si ritiene quindi che non esistano fattori climatici fortemente limitanti per l'accrescimento radiale e la formazione dello xilema.

In questa tesi sono state processate le carote raccolte da tre alberi. In laboratorio, le carote sono state tagliate con il microtomo rotativo in sezioni di 12  $\mu\text{m}$  di spessore. Le immagini scannerizzate sono state processate con il software ROXAS per ottenere le caratteristiche dimensionali e di posizione di tutte le cellule presenti nell'immagine. I dati relativi alle dimensioni del lume e della parete cellulare sono stati utilizzati per costruire delle cronologie, che sono state successivamente incrociate con i dati climatici per valutare le relazioni tra caratteristiche anatomiche e temperature e precipitazioni del sito. Da queste correlazioni sono emerse risposte diverse e di intensità variabile. Le risposte più forti sono state ottenute mettendo in relazione le temperature medie con l'area delle cellule, lo spessore della pareti e il numero di cellule, mentre l'influenza delle precipitazioni ha portato a segnali più deboli, brevi e difficili da interpretare. L'analisi effettuata ha dunque permesso di rilevare con alta risoluzione temporale come il clima influenzi la struttura anatomica del legno in condizioni climatiche ottimali per la specie.

## 2. Summary

The study of the effects of climate on trees can be done either through the direct observation of processes or through a retrospective approach. Analysis of the anatomical characteristics of xylem cells along dendrochronological series belongs to the second type.

This approach provides insights into how certain functional features of xylem are affected by intra-seasonal variations in climate.

In this study we analyzed the anatomical characteristics of the rings of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at the Renon site, about 12 km from Bolzano. Samples were collected at 1735 m a.s.l. in an environment with optimal climatic conditions for the species. Thus, no strong limiting climatic factors for radial growth and xylem formation were expected.

In this thesis we processed cores collected from three trees. In the laboratory, the cores were cut with the rotary microtome into 12-  $\mu\text{m}$ -thick sections. The scanned images were processed with ROXAS software to obtain the size and characteristics of all cells in the image. Lumen

and cell wall size data were used to construct chronologies, which were subsequently cross-dated with climatic data to assess relationships between anatomical features and precipitation. Different responses of varying intensity emerged from these correlations. The strongest responses were obtained by relating mean temperatures to cell area, cell wall thickness and cell number, while the influence of precipitation resulted in weaker signals that were short and difficult to understand. The analysis allowed us to detect with high temporal resolution how climate affects the anatomical structure of wood under optimal climatic conditions for the species.

### **3. Introduzione**

Nella valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi forestali è particolarmente importante lo studio dell'influenza che il clima può avere sulla formazione del legno.

Come è noto, le foreste sono dei fondamentali serbatoi di carbonio, che viene sottratto all'atmosfera e fissato nel processo di fotosintesi. Le foreste ricoprono circa il 30% della superficie delle terre emerse e del territorio italiano, costituendo così il bioma più diffuso sulla Terra. Si stima che attualmente lo stock di carbonio nelle foreste italiane ammonti a circa 141 t/ha e che ogni anno vengano fissate in media 5 t/ha di anidride carbonica (Gasparini et al., 2013). Specialmente a causa dell'aumento delle temperature e alla siccità, i cambiamenti climatici possono essere fonte di stress per le piante e potrebbero impattare sul processo di formazione dello xilema e conseguentemente sulla loro capacità di fissare carbonio e conseguentemente sul processo di formazione dello xilema (Castagneri et al., 2017).

Nei climi temperati e freddi è solitamente possibile associare la formazione di un anello ad una stagione vegetativa. Pertanto, è possibile incrociare i dati climatici con i dati di accrescimento radiale avvenuto nello stesso anno mediante l'approccio dendrocronologico. Oltre all'ampiezza degli anelli, anche le caratteristiche anatomiche possono essere assegnate all'anno di formazione dell'anello e quindi possono essere associate alle caratteristiche climatiche dell'anno in cui le cellule xilematiche sono state formate (approccio dendroanatomico).

Le cellule xilematiche sono responsabili della conduzione dell'acqua all'interno della pianta e le conferiscono sostegno meccanico. Nelle conifere questi due compiti sono svolti dallo stesso tipo di cellule: le tracheidi.

Queste cellule hanno origine dal cambio cribro-vascolare, costituito da cellule meristematiche situate tra xilema e floema e responsabile dell'accrescimento secondario (e quindi diametrico) degli alberi. Negli ecosistemi temperati e boreali la formazione di queste cellule non è continua durante l'anno, poiché l'attività del cambio è ciclica e stagionale: alle nostre

latitudini coincide con i mesi primaverili ed estivi, mentre in inverno le piante sono in riposo vegetativo.

Nella maggior parte delle conifere è evidente all'interno dell'anello la successione formata da legno primaticcio (o *earlywood*), che viene prodotto all'inizio del periodo vegetativo, e legno tardivo (o *latewood*), prodotto più tardi nella stagione vegetativa. Il legno primaticcio in sezione trasversale ha l'aspetto di un anello più chiaro ed è caratterizzato da cellule con lume più ampio, in grado di trasportare in modo efficiente l'acqua nella pianta. Il legno tardivo invece appare come una porzione più scura e le cellule che lo compongono hanno diametro minore e parete cellulare più spessa, rendendolo quindi adatto a conferire sostegno meccanico.

La formazione delle cellule del legno è determinata dall'azione combinata di elementi intrinseci della pianta, come l'effetto di ormoni quali auxine e gibberelline, e da fattori ambientali, quali la disponibilità di carbonio, acqua, calore e nutrienti (Rossi, 2006). Nel presente studio ci si concentrerà sull'influenza del clima sulla struttura delle cellule che formano gli anelli.

Il processo di xilogenesi si articola nelle seguenti fasi:

- 1) divisione mitotica delle cellule del cambio, che porta a nuove cellule figlie;
- 2) *cell enlargement* o espansione cellulare, in cui la nuova cellula xilematica si espande in direzione radiale. Questo processo è guidato dal turgore della cellula, che necessita di una sufficiente disponibilità di acqua, zuccheri e amminoacidi per esercitare pressione sulla parete e permettere quindi la distensione della stessa. Questa pressione non porta ad una diminuzione dello spessore della parete cellulare, perché nuovo materiale viene man mano depositato all'esterno del protoplasto;
- 3) deposizione di cellulosa ed emicellulose, ovvero formazione e ispessimento della parete cellulare secondaria (*cell wall thickening*) che dà il via al processo di lignificazione della cellula;
- 4) maturazione della cellula, con il completamento del processo di lignificazione della cellula al termine del quale la cellula muore e inizia a svolgere le funzioni di trasporto idraulico (De Micco et al., 2019; Rathgeber et al., 2016).

Gli studi compiuti con questa tecnica sono ancora limitati, anche su specie ampiamente diffuse come l'abete rosso. Uno studio svolto con queste modalità è stato effettuato su abeti rossi a Croda da Lago, andando ad indagare sull'influenza del clima su spessore delle pareti, diametro e numero di cellule xilematiche di piante situate a diverse altitudini (Castagneri et al., 2017). Un ulteriore esempio è costituito dallo studio delle dimensioni delle cellule e delle pareti di diverse conifere dell'emisfero boreale in relazione al clima (Björklund et al., 2017). Infine, un altro studio ha analizzato gli stessi parametri anatomici che sono stati presi in considerazione in questa tesi, riferiti però a campioni prelevati da esemplari di *Picea abies* situati a Cortina d'Ampezzo (Carrer et al., 2016).

Il presente studio è stato effettuato su esemplari di abete rosso nel sito di Renon, in provincia di Bolzano, ad una quota di 1735 m s.l.m.

L'obiettivo di questa tesi è analizzare l'influenza del clima sulla struttura delle cellule xilematiche attraverso l'analisi di diversi parametri anatomici delle cellule (dimensione del lume, numero di cellule e spessore della parete).

Considerato che gli alberi campionati sono situati in condizioni climatiche adatte per la specie, dove non sono attesi fattori ambientali fortemente limitanti per l'accrescimento della pianta, come siccità, temperature elevate o molto basse, si ipotizza che i parametri analizzati non presentino una forte risposta ai fattori climatici.

## 4. Materiali e metodi

### 4.1 Area di studio

I campioni usati per lo studio sono stati prelevati dal sito di Renon, localizzato in Trentino-Alto Adige a circa 12 km a Nord-Est di Bolzano (Figura 1). Il sito, oggetto di monitoraggio da diversi decenni da parte della Provincia di Bolzano e della Libera Università di Bolzano, si trova ad una quota pari a 1735 m s.l.m. e il suolo è classificato come podsol. Il popolamento forestale è di origine naturale, composto prevalentemente da abete rosso (*Picea abies* (L.) Karst.) e in misura minore da pino cembro (*Pinus cembra* L.) e larice (*Larix decidua* Mill.). Il popolamento è disetaneo con all'interno dei gruppi più omogenei e in passato è stato impiegato per la produzione di legno. L'altezza massima raggiunta dagli alberi equivale a 29 m, mentre il valore medio di *leaf area index* (LAI) è  $5,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ . Le estati sono tendenzialmente fresche e gli inverni sono moderatamente freddi. Nell'ultimo decennio le temperature medie sono state circa di  $6^\circ\text{C}$  e le precipitazioni annuali circa 964 mm (<https://www.icos-italy.it/wp-content/uploads/2021/03/renon.pdf>).

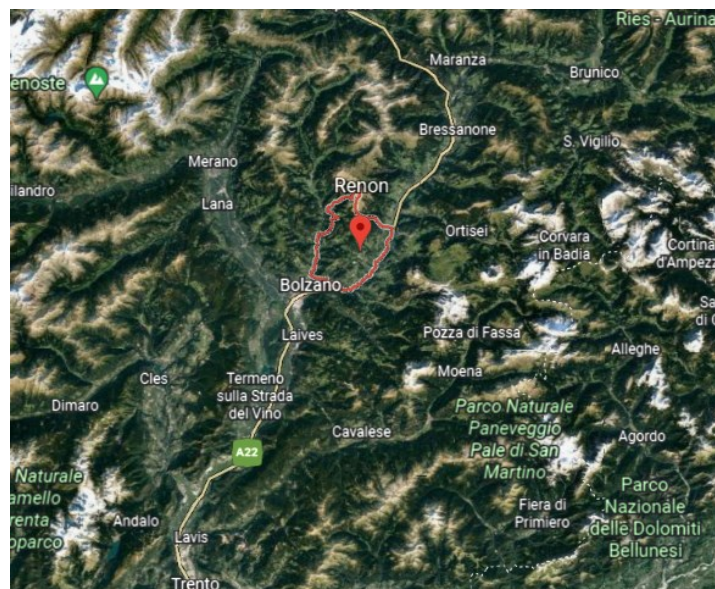


Figura 1 – immagine tratta da Google Earth che illustra la posizione di Renon

## 4.2 Preparazione dei campioni

Nell'estate 2021 i componenti del gruppo di ricerca del TESAF hanno carotato venti alberi utilizzando un succhiello di Pressler di 5 mm di diametro a 1,30 m di altezza dal suolo. In laboratorio, l'ampiezza degli anelli è stata misurata con una risoluzione di 0,01 mm usando TsapWin (Rinntech, Heidelberg, Germania) associato a LINTAB table. I campioni sono stati visivamente e statisticamente crossdatati.

Dei campioni prelevati in campo per la presente tesi sono state selezionate tre carote di 5 mm di diametro, ognuna prelevata da un albero situato a Renon. Questi sono stati identificati e denominati con la seguente dicitura: REN 149, REN 202 e REN 331.

Una volta in laboratorio, le carote sono state suddivise in pezzi longitudinali della lunghezza di circa 5 cm effettuando dei tagli in diagonale, in modo che almeno un anello si trovasse in due pezzi di carota adiacenti. Ogni pezzo è stato numerato con numeri romani, dove il numero più basso corrispondeva alla porzione più interna della carota e il numero più alto a quella più esterna e vicina alla corteccia.

Questi segmenti sono stati sezionati con il microtomo rotativo (Figura 2) effettuando dei tagli perpendicolari alle fibre. Per fare ciò, ogni pezzo è stato immerso per dieci minuti in un contenitore riempito di acqua distillata, avendo cura che il campione si trovasse completamente in immersione. Successivamente sono stati lasciati ad asciugare appoggiati su un piano per circa cinque minuti, in modo da raggiungere un'imbibizione che rendesse la consistenza del legno adatta ad eseguire le sezioni con il microtomo.



Figura 2 – microtomo rotativo

Sono quindi state ricavate in totale sei sezioni di 12  $\mu\text{m}$  di spessore per ogni segmento di carota, e sono stati utilizzati un punteruolo e dell'acqua distillata per trasferirle sui vetrini. Questi vetrini erano stati precedentemente denominati associandoli al numero dell'albero e del pezzo di carota da cui provenivano le sezioni.

In seguito sono state colorate con qualche goccia di Safranina (che tinge la lignina di un colore rosa-rosso) e Astra-blu (che si associa alla cellulosa), il cui eccesso è stato risciacquato nella cappa aspirante prima con acqua distillata, poi con una soluzione di alcool etilico (EtOH) diluito al 50% con acqua distillata e infine con etanolo puro.

Dopo aver tamponato l'eccesso di liquido e sempre all'interno della cappa aspirante, le sezioni colorate ottenute sono state fissate in modo permanente. Per farlo, sono stati utilizzati alternativamente due prodotti:

- Euparal, la cui completa asciugatura necessita di qualche settimana;
- glicerolo, che richiede anche dell'applicazione di uno strato di smalto trasparente sul margine tra vetrino e coprioggetto.

Le superfici dei vetrini fissati sono state pulite tramite l'utilizzo di lamette, per raschiare eventuali residui di Euparal. Per una pulizia ulteriore e per rimuovere le possibili tracce di



glicerolo fuoriuscito accidentalmente dal vetrino è stato utilizzato un foglio di carta assorbente imbevuto di alcool etilico.

Tra le sei sezioni ricavate per ogni pezzo di carota è stata scelta la migliore tramite osservazione al microscopio. Questa era identificata come la sezione con minor numero di pareti cellulari danneggiate o come quella con minor numero di imperfezioni all'interno (bolle, sporcizia, frammenti di tessuti rotti durante il taglio, ...).

### 4.3 Analisi dei campioni

Le sezioni scelte sono state scannerizzate in modo automatico con lo scanner Zeiss.

Ogni immagine è stata poi elaborata con il software Zen, in modo da ritagliare dalle immagini un numero variabile di rettangoli simili a quello osservabile in Figura 3. La base maggiore di questi rettangoli doveva essere il più possibile parallela alle file di cellule xilematiche e, di conseguenza, perpendicolare agli anelli. I rettangoli sono stati poi numerati in base alla loro posizione nella carota: nuovamente, i numeri più bassi corrispondevano ad una posizione più vicina al midollo e i numeri più alti erano più prossimi alla corteccia. Ad esempio, il rettangolo più interno del secondo segmento della carota appartenente all'albero REN 149 è stato denominato e salvato nel seguente modo: REN\_149\_2\_1.

La posizione dei rettangoli è stata scelta anche in modo da evitare possibili zone danneggiate o imperfezioni presenti all'interno della sezione, che potevano essere bolle, un elevato numero di canali resiniferi, etc.

Queste immagini venivano automaticamente salvate dal programma in orizzontale, ma per essere processate dal software ROXAS dovevano essere ruotate di 90 °, come in Figura 3, così da avere il legno primaticcio nella parte superiore dell'anello. Per fare ciò, è stato utilizzato GIMP, un software per l'elaborazione delle immagini.

Successivamente le immagini sono state elaborate con ROXAS (von Arx e Carrer, 2014), che permette di ottenere informazioni su dimensioni, posizione e altri parametri anatomici di tutte le cellule presenti nell'immagine tramite la distinzione tra pieni (ovvero le pareti cellulari) e vuoti (il lume). Il procedimento usato si può riassumere nei seguenti punti:

- 1) delimitazione dell'AOI (*Area Of Interest*), cioè l'area di interesse che successivamente verrà considerata dal software. Questa area è stata tracciata in maniera automatica per le immagini "migliori", ovvero quelle prive di imperfezioni, mentre per le altre è stata determinata manualmente;
- 2) *manual editing* di ogni immagine processata, che è stato effettuato sui bordi degli anelli per rimuovere o correggere possibili bordi tracciati in modo errato, e poi sulle singole cellule al fine di eliminare le cellule compagne che contornano i canali resiniferi, i raggi parenchimatici erroneamente scambiati per cellule xilematiche ed eventuali



Figura 3 – rettangolo ottenuto con il software Zen



cellule rotte o dai contorni danneggiati. Tutte queste cellule e i bordi disegnati in modo sbagliato avrebbero portato ad un calcolo errato dei parametri anatomici da parte del software;

- 3) datazione degli anelli grazie al confronto con le letture dello spessore degli anelli misurate precedentemente dai ricercatori del dipartimento TESAF su tutte le carote prelevate nel sito di Renon. È stato quindi preparato un file Excel in cui sono stati riportati i valori delle ampiezze anulari precedentemente effettuate. Confrontando questi dati con i dati di spessore degli anelli provenienti da ROXAS e associandoli grazie alla somiglianza tra i valori, è stato possibile risalire alla datazione degli anelli di ogni rettangolo realizzato con ROXAS. Dopodiché sono state riaperte tutte le immagini su ROXAS ed è stata inserita la datazione manualmente.

#### **4.4 Costruzione delle cronologie anatomiche**

Per la costruzione delle cronologie anatomiche, alle tre piante analizzate in questa tesi sono state aggiunte le informazioni di altre sette piante precedentemente analizzate.

Per ogni cellula stati calcolati i seguenti parametri anatomici:

- *cell area* (CA), ovvero la dimensione del lume delle cellule, che deriva dalla fase di *cell enlargement* e da cui dipende la capacità della cellula di trasportare acqua. CA diminuisce procedendo nell'anello dal legno primaticcio a quello tardivo;
- lo spessore della parete o *cell wall thickness* (CWT), che dipende strettamente dalla fase di *cell wall thickening* e il cui valore aumenta nel legno tardivo.

Utilizzando uno script in R precedentemente realizzato dai ricercatori del dipartimento TESAF, ogni anello è stato diviso in dieci settori tangenziali di uguale ampiezza. Per ogni settore è stato calcolato il valore mediano della distribuzione della dimensione di CA e CWT. Per ogni pianta sono state costruite dieci serie sia per CA sia per CWT, che rappresentavano le variazioni inter-annuali delle caratteristiche anatomiche delle tracheidi a livello intra-anulare (Castagneri et al., 2017).

I primi otto settori corrispondevano all'incirca all'*earlywood* e gli ultimi due al *latewood*.

Sempre con R è stato calcolato il *cell number* (CN), cioè il numero di cellule presenti nel legno primaticcio e nel legno tardivo.

I trend di dimensione ed età in tutte le serie anatomiche sono state detrendizzate usando una funzione spline con ampiezza di 15 anni (Carrer et al., 2015; Cook e Kairiūkštis, 1990).

Le cronologie medie standardizzate sono state ottenute con il pacchetto R *dplR* (Bunn, 2008).

#### **4.5 Analisi della correlazione tra cronologie anatomiche e dati climatici**

Sono state calcolate le correlazioni di Pearson tra le cronologie anatomiche di CA e CWT per settore e CN per *earlywood* e *latewood* e i dati di temperature medie e precipitazioni ottenuti dall'E-OBS climate database (lon = 11.25 - 11.50, lat = 46.50 - 46.75) (Cornes et al., 2018) per il periodo dal 1981 al 2019.

Su un foglio di lavoro Excel i dati climatici giornalieri sono stati mediati per finestre mobili di 20 e 30 giorni che man mano venivano traslate di un giorno e che andavano dal 1 giugno dell'anno precedente a dicembre dell'anno corrente.

Mediante la funzione "formattazione condizionale" in Excel sono state evidenziate le correlazioni marginalmente significative ( $p < 0,1$ ), significative ( $p < 0,05$ ) e altamente significative ( $p < 0,01$ ), che sono poi state rappresentate attraverso diversi colori. Le correlazioni non significative sono state rappresentate in bianco.

## 5. Risultati

Dalle correlazioni tra i parametri anatomici delle cellule xilematiche e i fattori climatici sono emerse diverse risposte.

Vengono riportati i risultati della correlazione tra i dati di temperatura media e CA per la finestra da 20 giorni, mentre per le correlazioni dello stesso parametro anatomico con le precipitazioni sono state considerate finestre da 30 giorni, poiché hanno restituito correlazioni più forti e stabili. Per lo stesso motivo, sono state considerate finestre di 30 giorni per le correlazioni tra CWT e CN con temperature medie e precipitazioni.

Come si può apprezzare in Figura 4, dalla correlazione tra temperatura media e CA è stata osservata una relazione significativamente positiva tra la seconda metà di giugno dell'anno precedente e inizio luglio nei settori da 3 a 6 e 9. La correlazione è diventata negativa in modo significativo nei settori da 4 e 5 tra la fine del luglio precedente e l'inizio di agosto dello stesso anno.

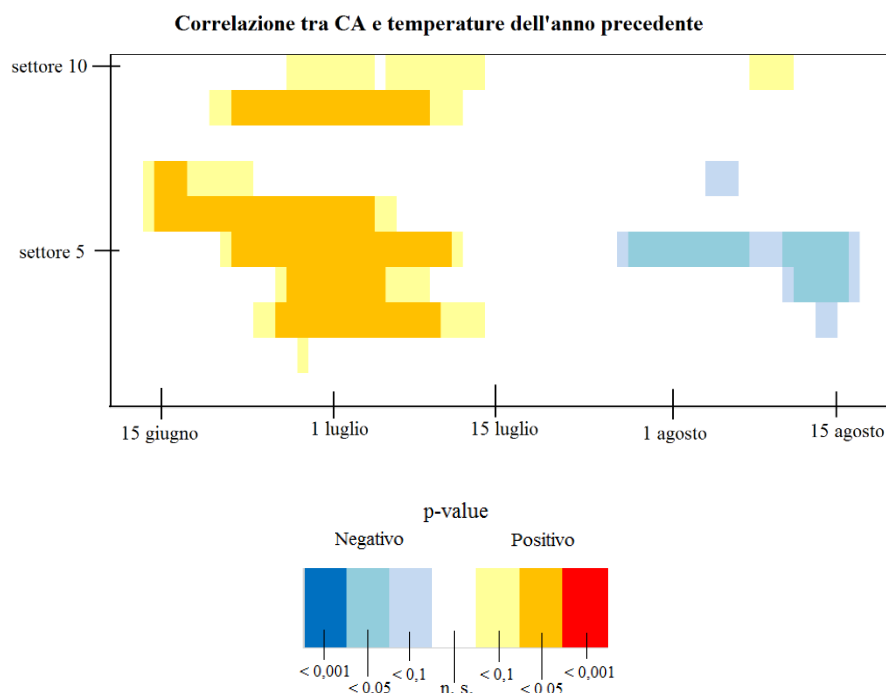
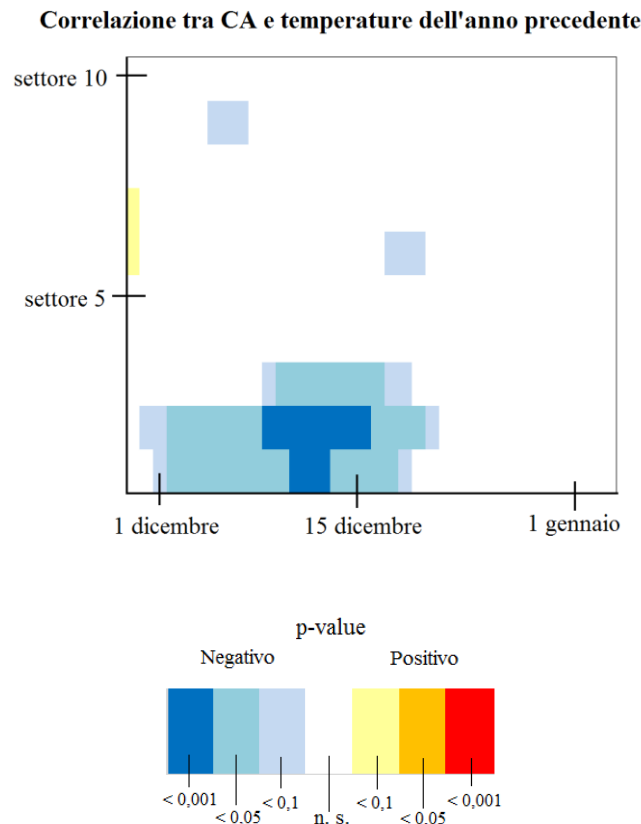


Figura 4 – rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dei mesi estivi dell'anno precedente. I dati delle

*temperature medie sono stati calcolati considerando il periodo tra il 1981 e il 2019 e sono stati raggruppati in finestre mobili di 20 giorni a partire dal 1 giugno dell'anno precedente fino al 2 dicembre dell'anno corrente. I colori rappresentano i valori i p-value ottenuti, mentre le correlazioni non significative sono rappresentate in bianco.*

In Figura 5 si può osservare un valore negativo della correlazione durante la prima metà di dicembre nei primi tre settori, con picchi (valori di r di Pearson) di -0,55.



*Figura 5 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dell'anno precedente.*

Tra la fine di febbraio dell'anno corrente e l'inizio di marzo dell'anno corrente, la correlazione era significativamente negativa nei settori 2, 3, 9 e 10, così come a maggio nei settori 9 e 10 (Figura 6).

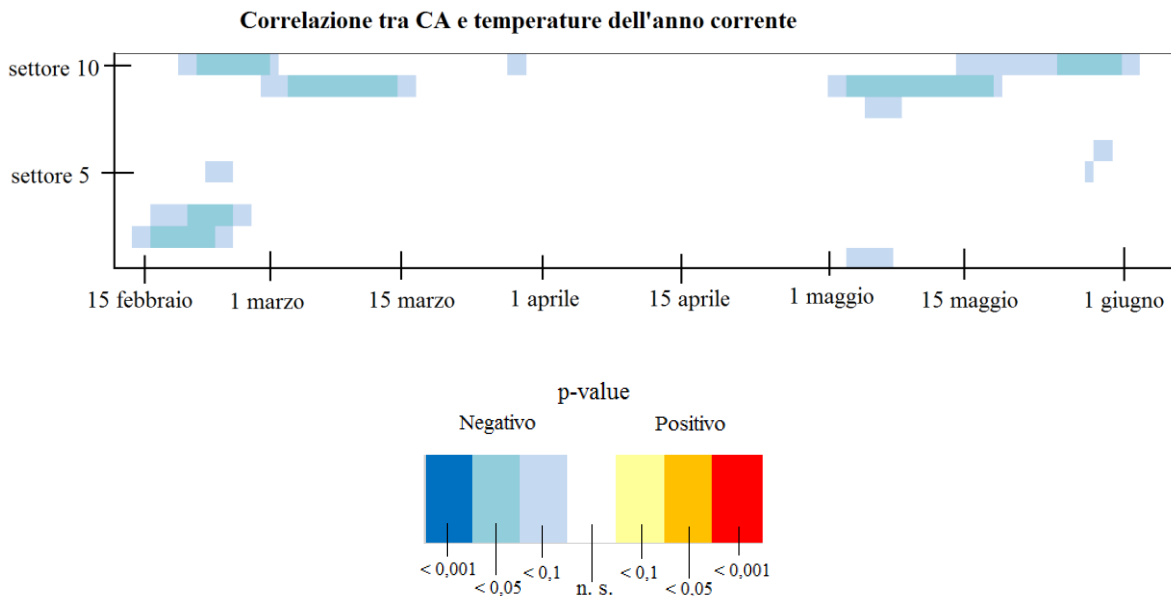


Figura 6 – rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dell'anno corrente.

Come rappresentato in Figura 7, nel periodo tra la seconda metà di luglio (giorni 195-2015) e i primi giorni di agosto (giorni 218-237) è stata osservata una correlazione negativa specialmente nei settori da 1 a 6, con picco pari a -0,59. A cavallo tra fine agosto e inizio settembre il segnale era significativamente positivo nei primi due settori, mentre era negativo nel settore 10, raggiungendo un valore di -0,54. Ad ottobre si è verificata una correlazione positiva specialmente nel settore 10.

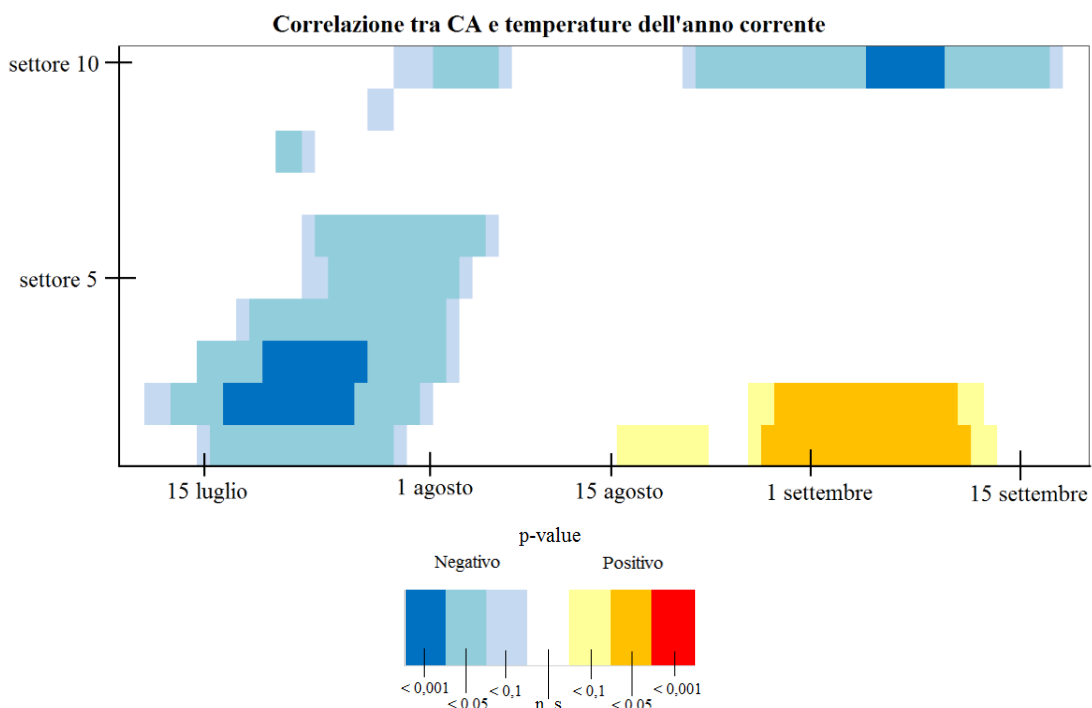


Figura 7 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dell'anno corrente.

Dalla correlazione tra temperatura media (i cui dati sono stati raggruppati in finestre di 30 giorni) e CWT è emersa una correlazione significativamente negativa nel settore 10 tra la fine di giugno dell'anno precedente e l'inizio di luglio. Il segnale era invece positivo in modo significativo tra la seconda metà di giugno dell'anno precedente e la prima metà di agosto per i primi cinque settori (Figura 8).

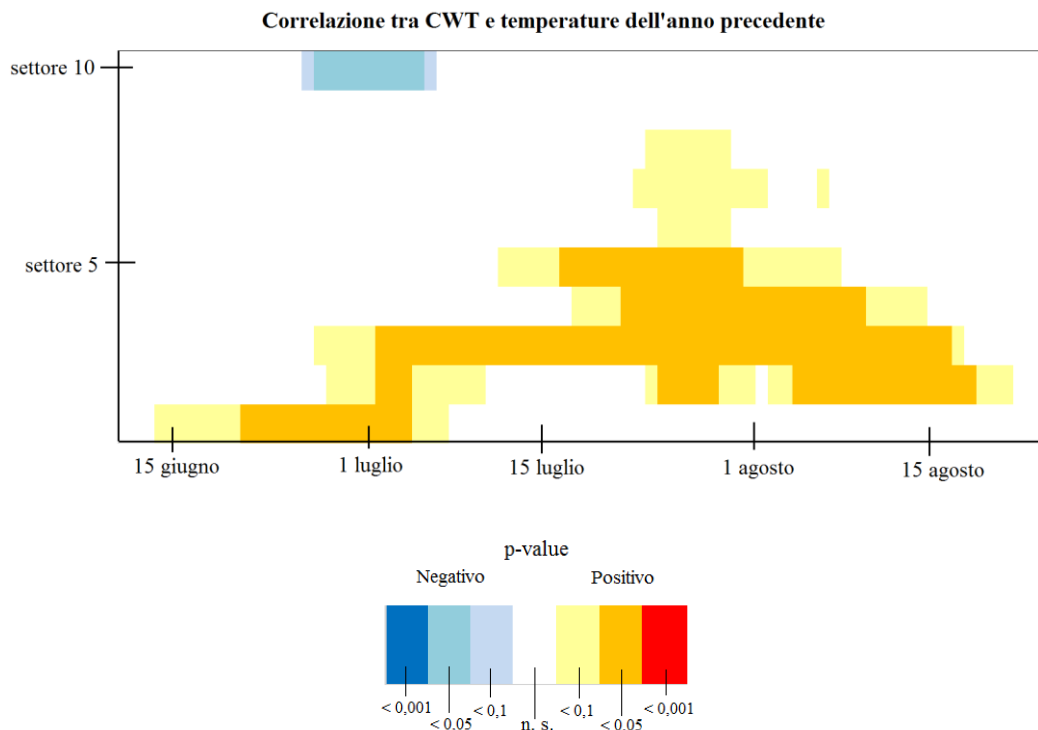


Figura 8 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dei mesi estivi dell'anno precedente. I dati delle temperature medie sono stati calcolati considerando il periodo tra il 1981 e il 2019 e sono stati raggruppati in finestre mobili di 30 giorni a partire dal 1 giugno dell'anno precedente fino al 2 dicembre dell'anno corrente.

Osservando la Figura 9, si può notare che a cavallo tra fine febbraio e inizio marzo dell'anno corrente si è verificato un segnale positivo significativo nei settori 9 e 10. Tra fine aprile e maggio la correlazione era significativamente positiva nei settori da 7 a 10, con un picco pari a 0,48 nel settore 9.

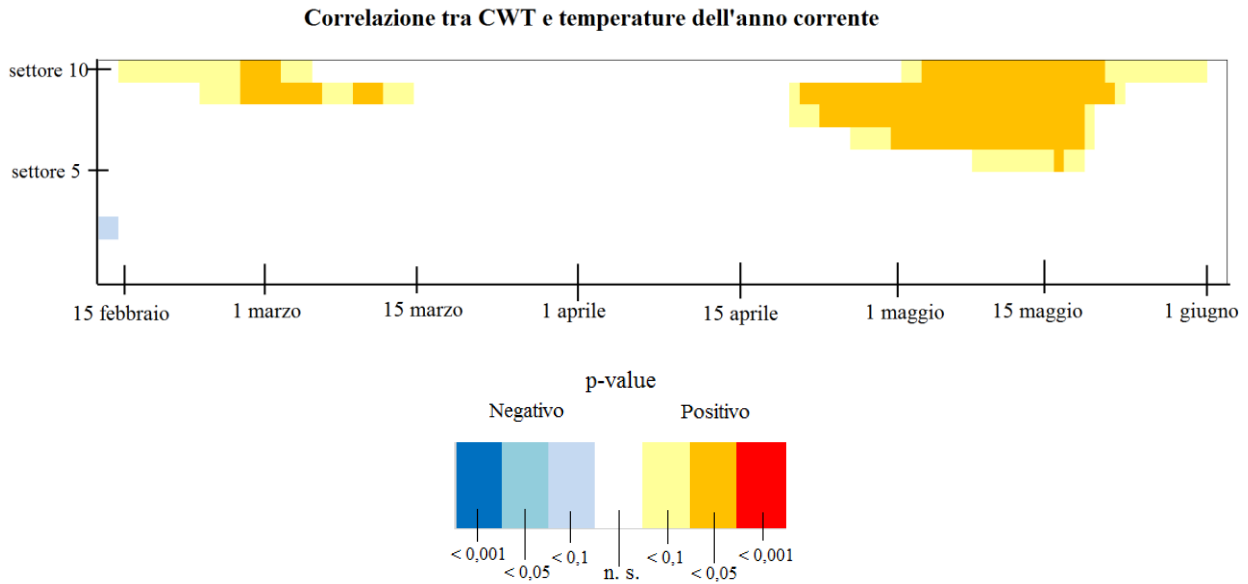


Figura 9 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dell'anno corrente.

Come rappresentato in Figura 10, a partire circa da metà giugno (giorni 164-193) fino alla prima metà di luglio (giorni 189-218) il segnale era negativo nei settori da 1 a 9, con un picco di correlazione pari a -0,50. Tra gli ultimi giorni di luglio e la prima metà di settembre la correlazione era positiva nei settori 4, da 6 a 9 e in particolar modo nell'ultimo settore, con picchi di 0,60. Ad ottobre è stata osservata una correlazione significativamente negativa nel settore 10.

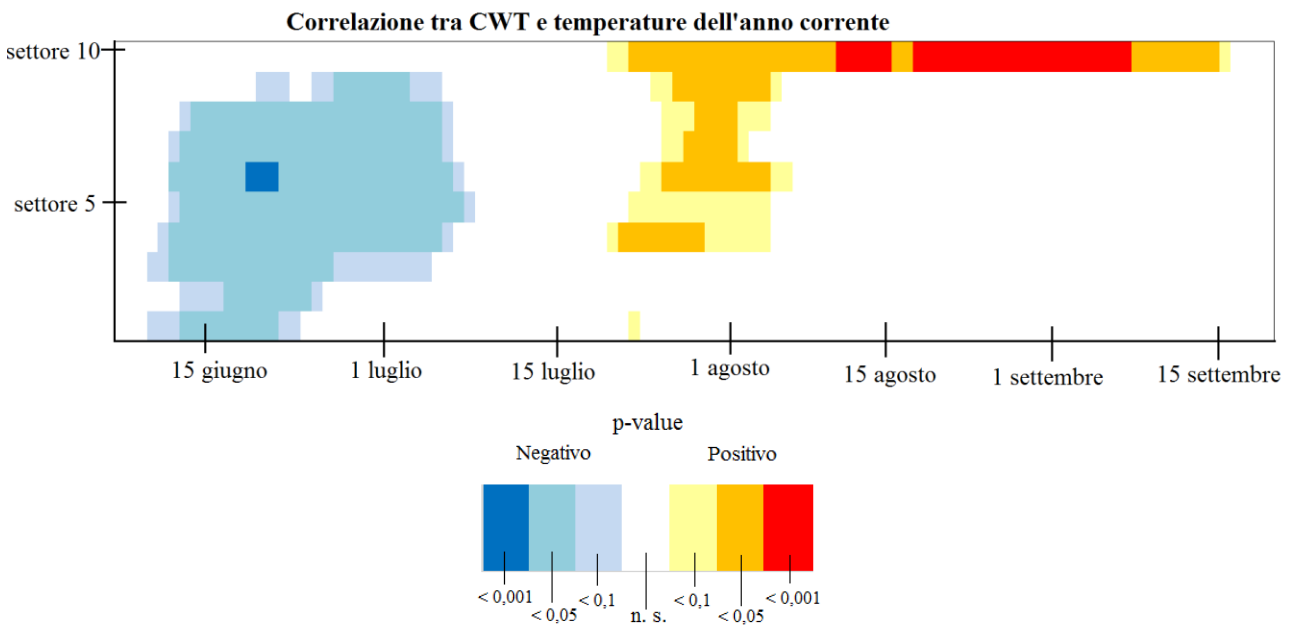


Figura 10 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dell'anno corrente.

Correlando la temperatura media in finestre mobili di 30 giorni con CN è stato ottenuto un valore negativo significativo nel luglio dell'anno precedente (Figura 11). A novembre

dell'anno precedente la correlazione era invece significativamente positiva in tutti i settori (Figura 12).

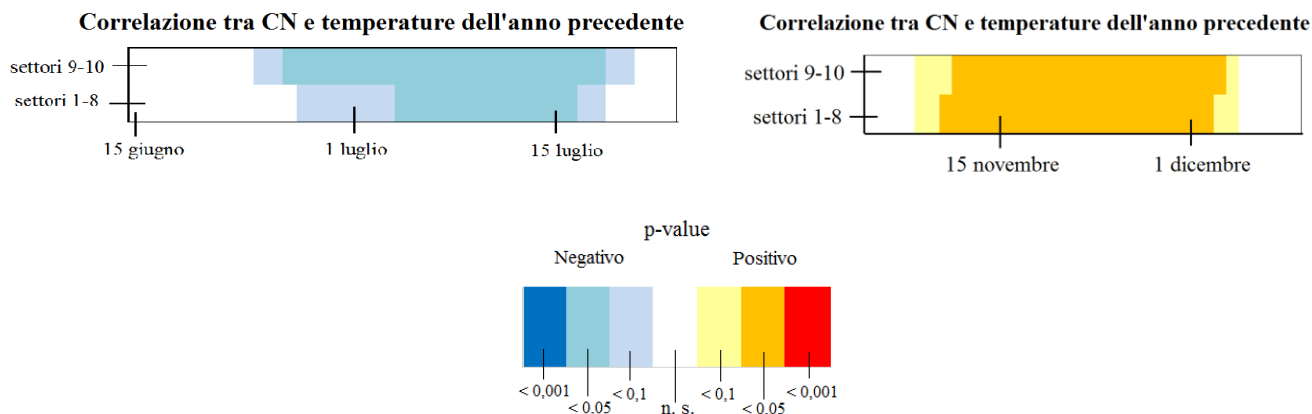


Figure 11 e 12 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CN (numero di cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dell'anno precedente. I dati delle temperature medie sono stati calcolati considerando il periodo tra il 1981 e il 2019 e sono stati raggruppati in finestre mobili di 30 giorni a partire dal 1 giugno dell'anno precedente fino al 2 dicembre dell'anno corrente.

I primi giorni di maggio dell'anno corrente si osserva un segnale significativamente positivo nel legno tardivo. Tra giugno e luglio è stato osservato in tutti i settori un valore positivo in modo significativo nella correlazione, mentre a fine agosto era significativamente negativo nei settori del legno primaticcio (Figura 13).

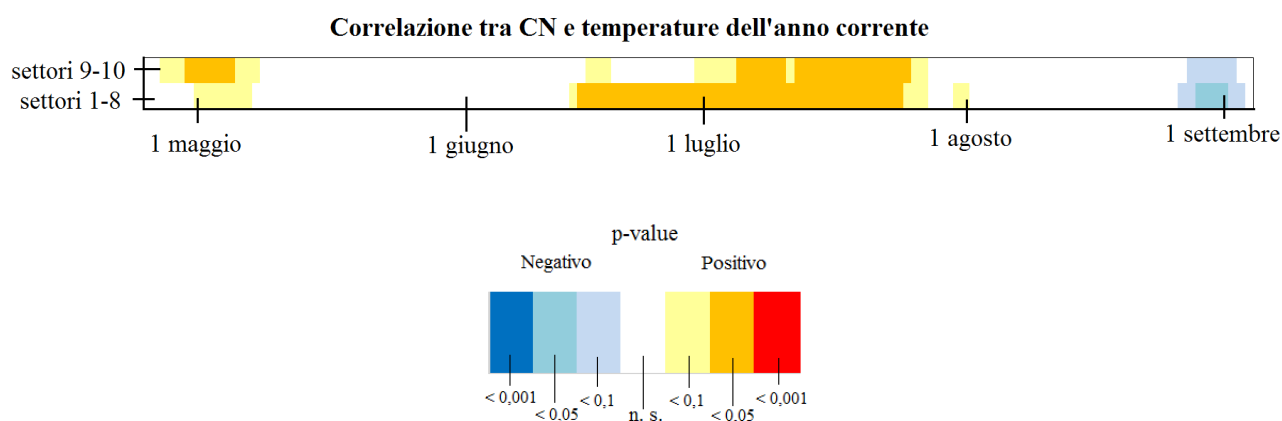


Figura 13 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CN (numero di cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle temperature medie dei mesi estivi dell'anno corrente.

Come apprezzabile in Figura 14, correlando invece CA con le precipitazioni dopo averle raggruppate in finestre di 30 giorni è stato ottenuto un valore negativo significativo nel giugno dell'anno precedente, specialmente nei settori 6 e 10. Alla fine del luglio precedente il segnale era invece significativamente positivo specialmente nel settore 4. Nel periodo tra la fine di agosto e l'inizio di settembre dell'anno precedente (più in particolare tra la finestra di giorni



233-262 e i giorni 252-281) la correlazione era positiva nei settori 1 e da 7 a 10, con picchi di 0,61.

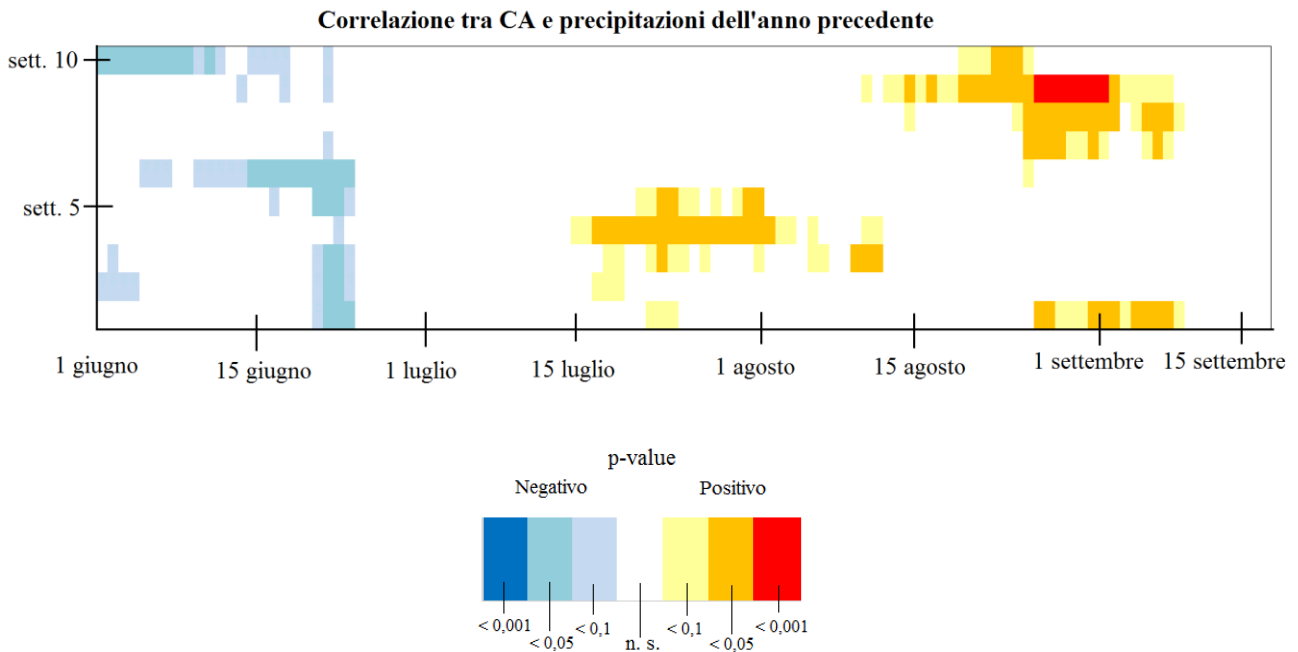


Figura 14 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dei mesi estivi dell'anno precedente. I dati delle precipitazioni sono stati calcolati considerando il periodo tra il 1981 e il 2019 e sono stati raggruppati in finestre mobili di 30 giorni a partire dal 1 giugno dell'anno precedente fino al 2 dicembre dell'anno corrente.

Ad ottobre il valore della correlazione era significativamente negativo nei settori da 5 a 9 (Figura 15).

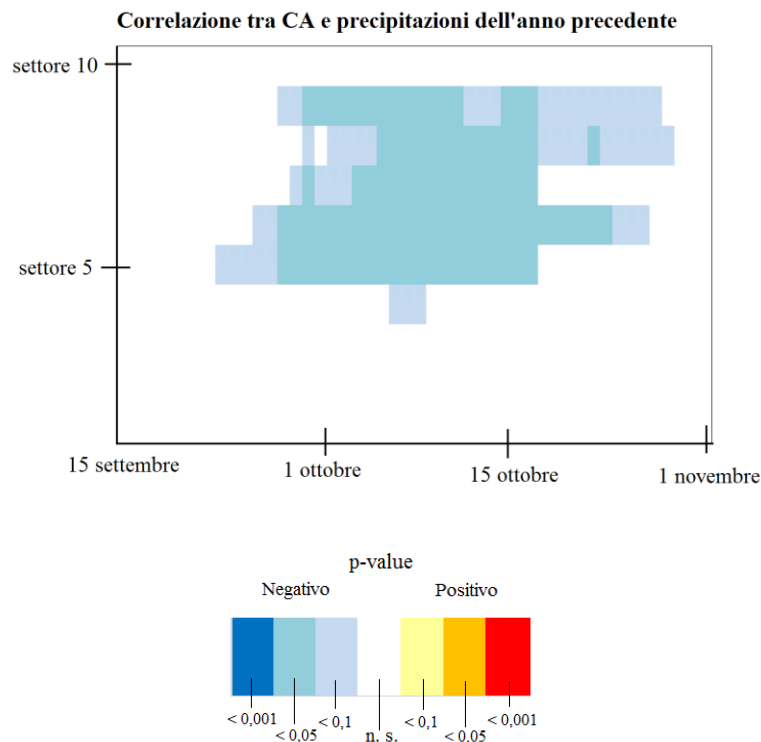


Figura 15 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dell'anno precedente.

A gennaio dell'anno corrente si è verificata una correlazione negativa in modo significativo nei settori 1 e 3. Tra fine marzo e inizio aprile è stata osservata una correlazione significativamente negativa nei primi due settori (Figura 16).

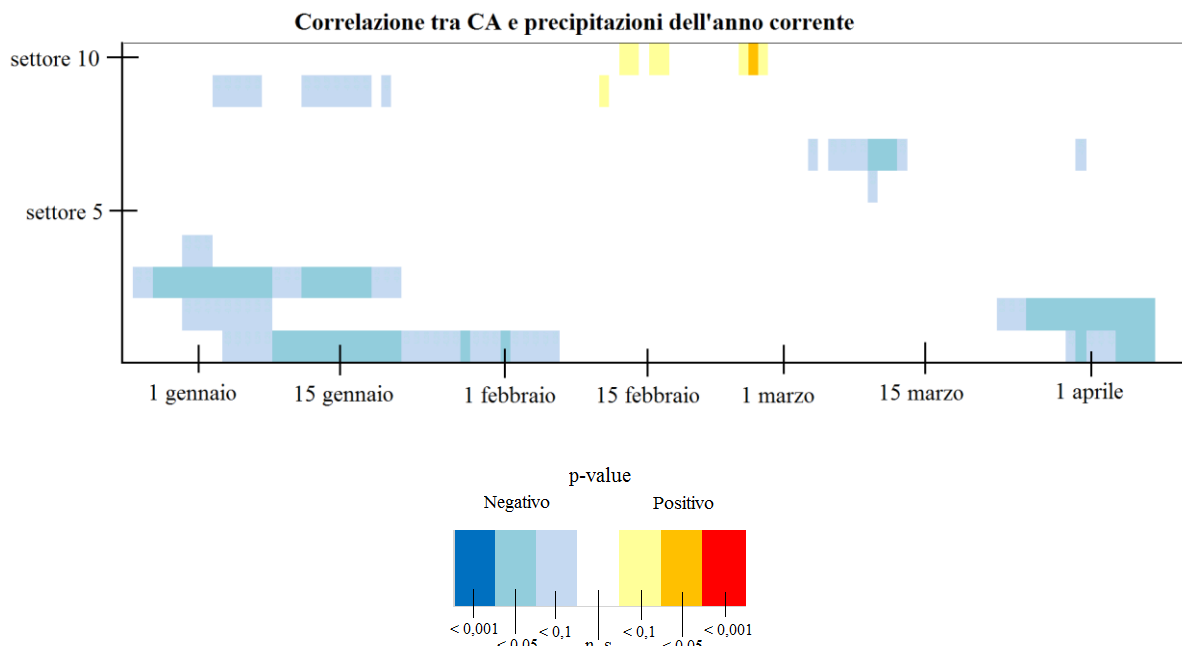


Figura 16 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dell'anno corrente.

Come si può osservare in Figura 17, a giugno il segnale era negativo nel settore 10, con picchi di correlazione pari a -0,50. Ad agosto la correlazione era significativamente negativa nei settori 8 e 9, mentre era significativamente positiva per i primi due settori a metà settembre. Ad ottobre è stata osservato un valore significativamente negativo specialmente per i settori 5, 6 e 10.

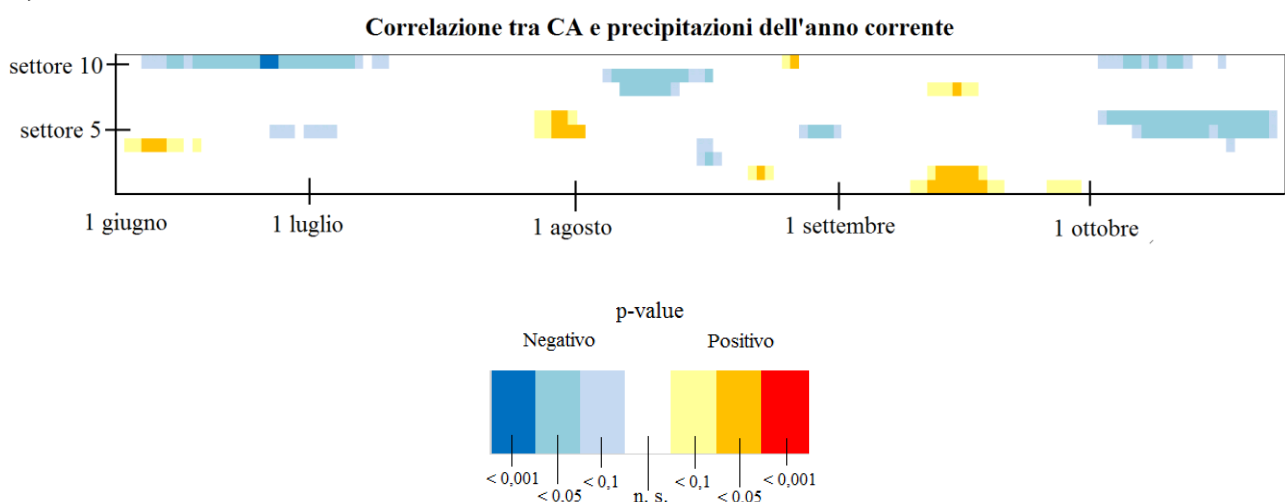


Figura 17 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CA (area delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dei mesi estivi dell'anno corrente.

Dalla correlazione tra CWT e le precipitazioni (raggruppate in finestre da 30 giorni) è risultato un valore negativo significativo nel settore 3 nel giugno dell'anno precedente. Ad agosto dell'anno precedente la correlazione osservata era significativamente negativa nei settori da 6 a 9, mentre era positiva in modo significativo nel settore 3 per alcuni giorni verso la fine del mese (Figura 18).

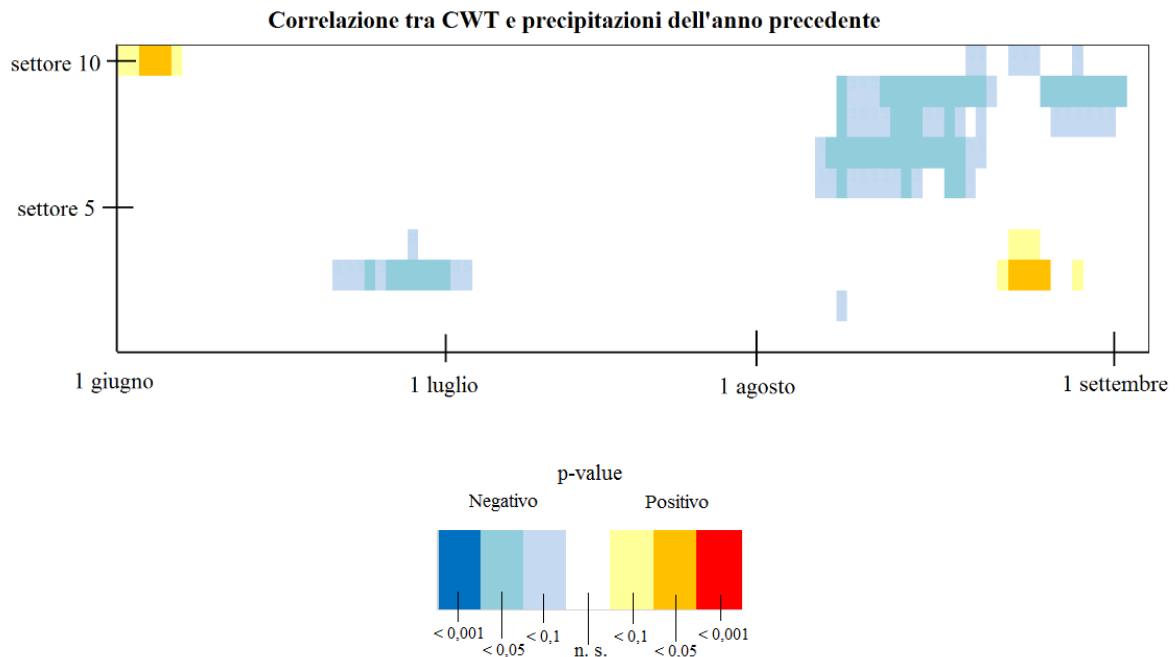


Figura 18 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dei mesi estivi dell'anno precedente. I dati delle precipitazioni sono stati calcolati considerando il periodo tra il 1981 e il 2019 e sono stati raggruppati in finestre mobili di 30 giorni a partire dal 1 giugno dell'anno precedente fino al 2 dicembre dell'anno corrente.

Nel mese di ottobre precedente la correlazione era significativamente positiva nei settori 8 e 9, così come a dicembre nei settori 2 e 3 (Figura 19).

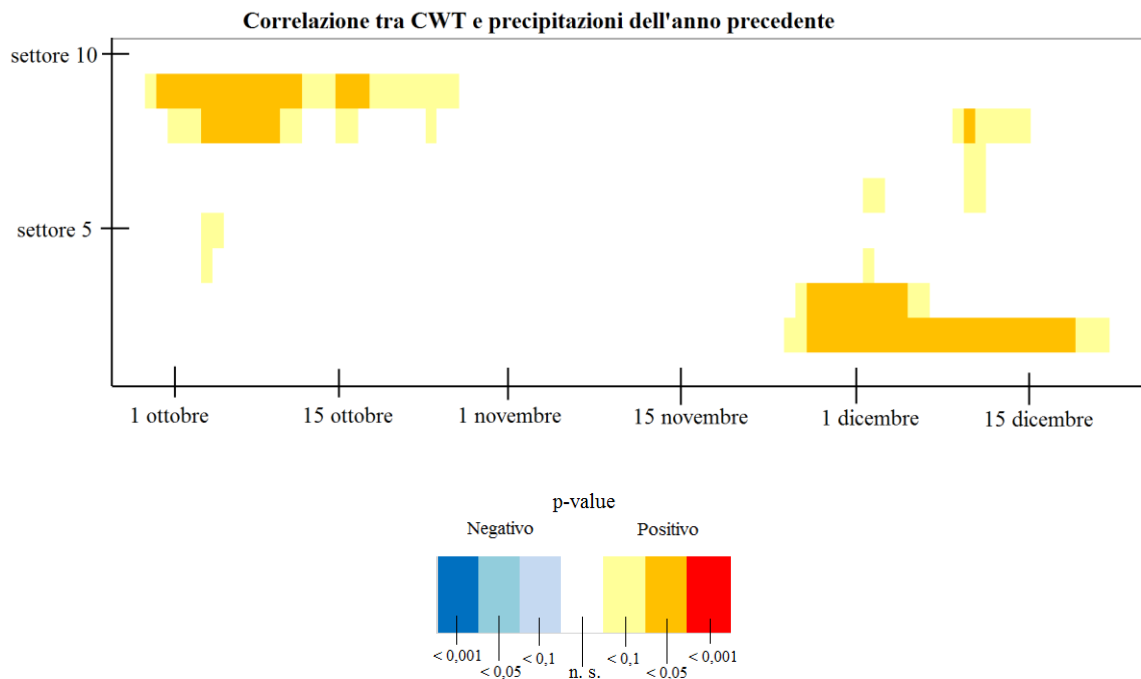


Figura 19 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dei mesi estivi dell'anno precedente.

Nel marzo dell'anno corrente è stata riscontrata una correlazione significativamente positiva soprattutto nel primo settore. Nella prima metà di maggio la correlazione era significativamente negativa nei settori 1, 6 e 9 (Figura 20).

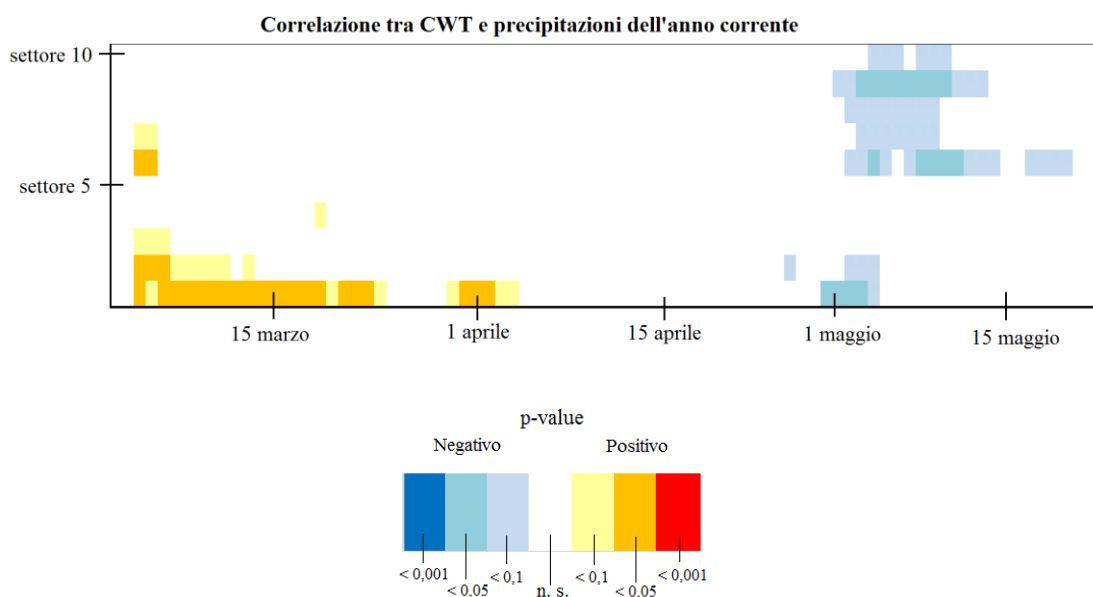


Figura 20 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dell'anno corrente.

Come si può apprezzare in Figura 21, a giugno si sono verificati valori positivi in modo significativo nell'ultimo settore, mentre erano significativamente negativi nei settori 2 e 3 per pochi giorni. Circa a metà agosto la correlazione era significativamente positiva per alcuni

giorni nel settore 9, mentre nei settori da 2 a 7 lo era tra fine agosto e ottobre. A fine novembre il segnale era significativamente negativo tra i settori 2 e 5.

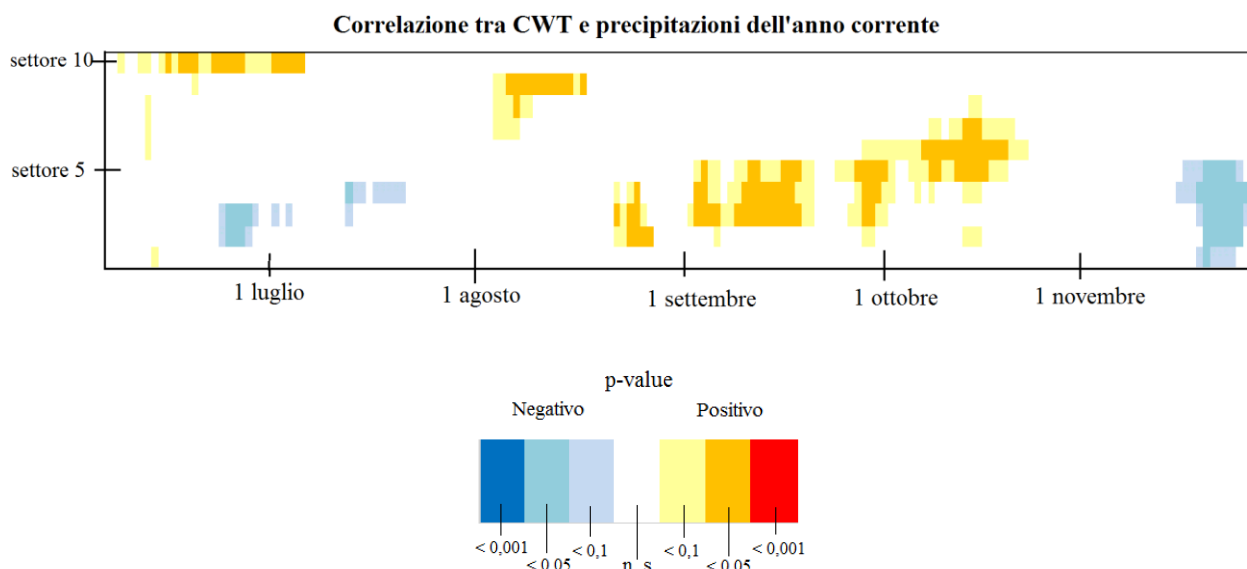


Figura 21 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CWT (spessore delle pareti delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dei mesi estivi dell'anno corrente.

Infine, per quanto riguarda la correlazione tra CN e precipitazioni raggruppate in finestre di 30 giorni è stata riscontrata una correlazione positiva tra fine giugno (giorni 174-203) e la prima metà di luglio (giorni 197-226) dell'anno precedente, con picchi pari a 0,54. Nel mese di ottobre e tra fine dicembre dell'anno precedente e i primi giorni di gennaio corrente la correlazione era significativamente positiva per alcuni giorni in tutti i settori (Figura 22).

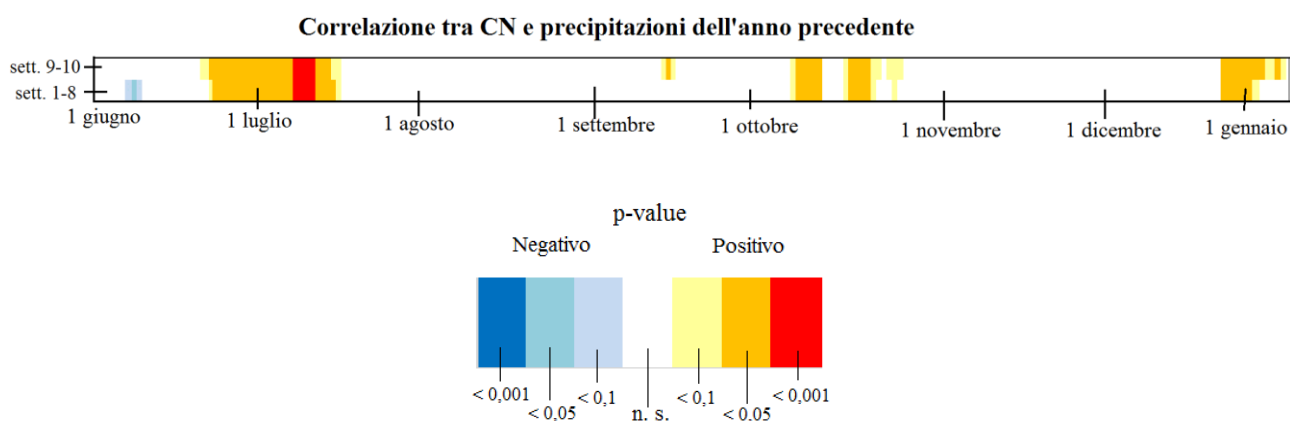


Figura 22 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CN (numero delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dell'anno precedente. I dati delle precipitazioni sono stati calcolati considerando il periodo tra il 1981 e il 2019 e sono stati raggruppati in finestre mobili di 30 giorni a partire dal 1 giugno dell'anno precedente fino al 2 dicembre dell'anno corrente.

A giugno dell'anno corrente è stata osservata una correlazione negativa in modo significativo durata alcuni giorni, specialmente nell'earlywood. A settembre la correlazione era significativamente negativa in tutti i settori (Figura 23).

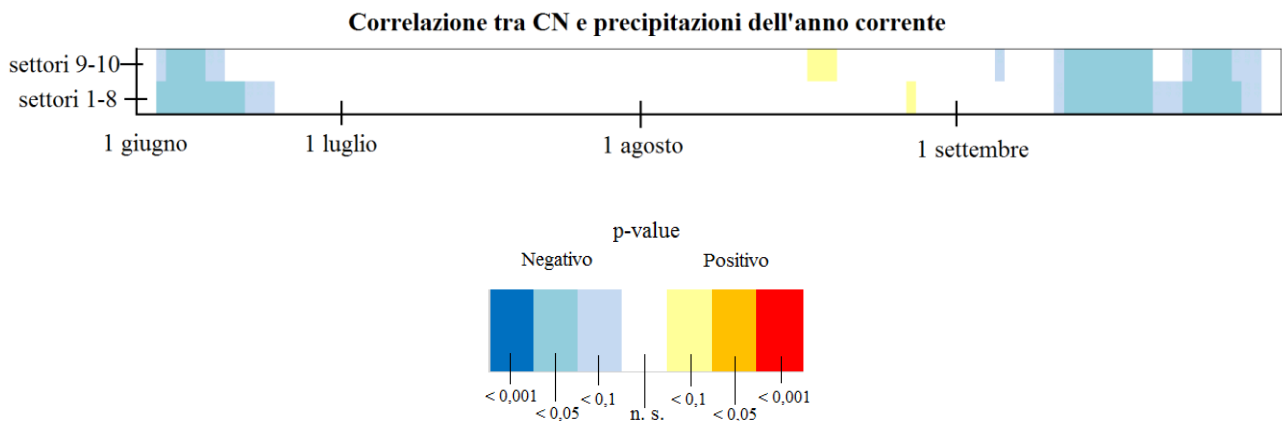


Figura 23 - rappresentazione della correlazione tra le cronologie di CN (numero delle cellule) dei dieci settori dell'anello e i dati climatici relativi alle precipitazioni dei mesi estivi dell'anno corrente.

## 6. Discussione

Tramite l'analisi dell'anatomia delle cellule xilematiche il presente studio ha dimostrato come il clima influenzi il processo di xilogenesi e di conseguenza le caratteristiche anatomiche delle cellule prodotte nell'abete rosso presso il sito di Renon, permettendo anche di studiare la variabilità delle risposte a livello intra-annuale grazie alla suddivisione dell'anello in settori.

Tra luglio e l'inizio di agosto dell'anno corrente la temperatura media ha influenzato negativamente il parametro anatomico CA, andando ad interessare solo l'ultimo settore tra agosto e la prima metà di settembre. In Figura 7 si può chiaramente osservare come questo segnale si manifesti prima nei settori corrispondenti al legno primaticcio, spostandosi col tempo al legno tardivo. In questo periodo della stagione vegetativa, CA può essere influenzato positivamente dalle precipitazioni e negativamente dalla temperatura media. Queste relazioni sono state confermate da studi effettuati precedentemente. Ad esempio, in uno studio condotto su *Picea abies* lungo un gradiente altitudinale nella valle del Boite (Castagneri et al., 2017) è stata osservata una correlazione negativa tra le temperature e la dimensione di diametro delle cellule tra la seconda metà di giugno e luglio alla quota di 1600 m s.l.m., mentre la stessa correlazione si è verificata tra fine luglio e agosto a 2100 m s.l.m.. Le precipitazioni hanno invece influenzato positivamente il diametro delle cellule tra giugno e luglio nel sito che si trovava a 1600 m s.l.m..

Durante la fase di *cell enlargement* le cellule necessitano di una buona disponibilità di acqua e di carbonio e di un determinato range di temperatura. La correlazione negativa osservata potrebbe indicare una risposta alla siccità conseguente a temperature elevate, cui l'abete rosso è particolarmente sensibile, portando alla produzione di cellule xilematiche con lume di dimensioni ridotte.

Come rappresentato in Figura 4, nello stesso periodo dell'anno precedente si è osservata invece una relazione positiva, ma l'interpretazione di questa correlazione è più complicata in

quanto il segnale climatico si osserva un anno prima rispetto alla formazione delle cellule. Numerosi studi riportano gli effetti delle condizioni climatiche verificate durante la stagione vegetativa precedente sugli accrescimenti radiali e sull'anatomia delle cellule prodotte nell'anno corrente. Difatti, un'ipotesi è che il carbonio assimilato durante la stagione vegetativa venga poi utilizzato dalla pianta l'anno successivo per la formazione delle cellule xilematiche.

Da uno studio sull'abete rosso sui Carpazi è emerso che le temperature verificate l'anno precedente hanno influenzato la crescita dell'anno corrente dell'albero, anche se in misura minore rispetto alle temperature verificate quello stesso anno. Si ipotizza che la formazione dell'*earlywood* dipenda parzialmente dai prodotti della fotosintesi accumulati durante l'anno precedente, mentre la formazione del *latewood* sia legata solo alla fotosintesi dell'anno corrente (Sidor et al., 2015).

Un altro studio ha dimostrato che le temperature dell'estate precedente sono correlate positivamente con la dimensione delle cellule xilematiche di *Larix sibirica* Ldb., anche se sono state ottenute correlazioni più forti con i dati climatici della stagione vegetativa corrente (Fonti et al., 2013).

Infine, un articolo ha evidenziato la relazione tra l'attività fotosintetica dell'anno precedente e l'ampiezza degli anelli formati nell'anno corrente dall'abete rosso (Selås et al., 2002).

Nel presente studio, tra fine agosto e inizio settembre è stata riscontrata una relazione significativamente positiva nei primi due settori dell'anello, ma questa rappresenta una correlazione spuria in quanto in questo periodo della stagione vegetativa la formazione delle prime cellule dell'anello si è già conclusa (Figura 7).

Per quanto riguarda la correlazione tra CWT e la temperatura media, il valore era significativamente positivo negli ultimi settori del legno primaticcio e nei settori del legno tardivo tra fine aprile e maggio dell'anno corrente (Figura 9), che corrisponde al periodo dell'anno in cui la pianta inizia a fotosintetizzare in maniera consistente. Si ipotizza quindi che in questo momento assorba una quantità di carbonio che non può essere usato nella formazione delle nuove cellule, in quanto la temperatura non è sufficiente per attivare l'attività cambiale. Di conseguenza il carbonio assorbito potrà essere utilizzato alla fine della stagione vegetativa per l'ispessimento delle pareti cellulari. Infatti, la fase di *cell wall thickening* del *latewood* avviene poco prima che la pianta entri in riposo vegetativo, quando le altre parti della pianta (come foglie, radici, conifere, etc) sono già state formate.

Come apprezzabile in Figura 10, tra giugno e luglio le temperature hanno avuto un'influenza negativa su CWT in tutti i settori escluso l'ultimo. Una possibile interpretazione di questa relazione è che se le temperature sono alte durante il periodo di formazione dell'*earlywood*, la pianta produce rapidamente nuove cellule e conseguentemente il carbonio viene impiegato per questo scopo piuttosto che per l'ispessimento delle pareti. Difatti in questo stesso periodo dell'anno la correlazione tra temperatura media e CN è positiva (Figura 13): la pianta produce un numero maggiore di cellule, che però hanno una parete più sottile.



La correlazione tra CWT e temperature è diventata poi positiva tra fine luglio e metà settembre, con un segnale particolarmente forte per l'ultimo settore, ovvero per le ultime cellule formate nell'anno. A questo risultato è legato il già citato effetto negativo della temperatura su CA, poiché, specialmente nell'ultimo settore (corrispondente al legno tardivo), ad un forte ispessimento delle pareti della cellula consegue un lume di dimensioni più ridotte. Risultati simili sono stati ottenuti da un altro studio, in cui sono state correlate le temperature con un ulteriore parametro fortemente associato a CWT del *latewood*: la *maximum tree ring density*. Analogamente a quanto riscontrato in questa tesi, la densità delle cellule dell'anello era influenzata positivamente dalle temperature tra aprile e maggio, negativamente tra giugno e luglio e nuovamente in modo positivo approssimativamente da luglio in poi (Björklund et al., 2017).

Anche un altro studio ha presentato risultati analoghi per la correlazione tra CWT e temperatura. Tra fine aprile e inizio maggio si è verificata una correlazione positiva in campioni prelevati da *Picea abies* situati a Croda da Lago a 1200 m s.l.m. e a 2100 m s.l.m., mentre il segnale ha assunto valori negativi a giugno per i campioni prelevati a 1600 m s.l.m. (quota più confrontabile con quella del sito di studio di questa tesi). Nuovamente, la relazione tornava positiva a partire da luglio (Castagneri et al., 2017).

In base ai risultati di precedenti studi, ci si aspettava di osservare un'influenza negativa della temperatura dell'anno precedente su CN. Infatti, come si può vedere in Figura 11, questa correlazione è stata ottenuta tra fine giugno e inizio luglio precedenti nel sito di Renon, mentre in uno studio condotto su *Picea abies* vicino a Cortina d'Ampezzo ad una quota di 1600 m s.l.m. si è verificata ad agosto dell'anno precedente (Castagneri et al., 2015).

Infine, dalla Figura 13 si può osservare come tra giugno e luglio dell'anno corrente la correlazione abbia assunto un valore significativamente positivo in tutti i settori.

Dalla correlazione dei parametri anatomici con le precipitazioni sono stati ottenuti risultati con valori meno marcati, distribuiti su pochi giorni e in pochi settori. I segnali sono quindi poco chiari, rendendo i risultati difficili da interpretare.

In Figura 14 si può osservare tra metà luglio e la prima settimana di settembre dell'anno precedente un'influenza positiva delle precipitazioni su CA, tendenzialmente prima per l'*earlywood* e spostandosi poi verso il *latewood*. È possibile che il carbonio assimilato nella stagione vegetativa precedente influenzi anche le caratteristiche anatomiche delle cellule prodotte durante l'anno corrente.

La correlazione è poi diventata negativa tra la fine di settembre ed il mese di ottobre, risposta che si può osservare sia nell'anno precedente (Figura 15) sia in quello corrente (Figura 17). Se in questo periodo si verificano precipitazioni e le temperature sono sufficientemente alte, è probabile che la pianta continui ad assorbire carbonio, che verrà poi utilizzato nella stagione vegetativa successiva.

Le risposte di CN alle precipitazioni consistevano in segnali brevi e contrastanti, di difficile interpretazione. La correlazione che si è protratta più a lungo nel tempo è quella con valore positivo osservata tra giugno e luglio dell'anno precedente, che si può osservare in Figura 22.

## **7. Conclusioni**

Grazie all'approccio dendroanatomico, sono state evidenziate risposte al clima a livello intra-annuale in tutti i parametri studiati. Dunque, anche in condizioni climatiche ottimali, è stato possibile rilevare con alta risoluzione temporale come il clima influenzi la struttura anatomica del legno. In particolare, le correlazioni più forti sono state ottenute tra i parametri anatomici e le temperature medie, mentre le relazioni con le precipitazioni hanno portato a segnali più brevi, deboli e di difficile interpretazione.

Approfondendo le conoscenze in questo ambito si potrebbero anche creare dei modelli predittivi sulla risposta degli ecosistemi terrestri alle future condizioni climatiche che, come sostenuto da due report dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) pubblicati nel 2012 e nel 2013, includeranno l'aumento delle temperature, della siccità e della frequenza e intensità dei fenomeni meteorologici estremi (specialmente in Nord America ed Europa), che a loro volta impatteranno sulla vulnerabilità degli ecosistemi modificando la loro resilienza e la capacità adattativa.

## Bibliografia

Björklund J., Seftigen K., Schweingruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M. V., Cuny H. E., Carrer M., Castagneri D., Frank D. C., 2017. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers.

Bunn A. G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR).

Carrer M., von Arx G., Castagneri D., Petit G., 2015. Distilling allometric and environmental information from time series of conduit size: the standardization issue and its relationship to tree hydraulic architecture.

Carrer M., Brunetti M., Castagneri D., 2016. The imprint of extreme climate events in century-long time series of wood anatomical traits in high-elevation conifers.

Castagneri D., Petit G., Carrer M., 2015. Divergent climate response on hydraulic-related xylem anatomical traits of *Picea abies* along a 900-m altitudinal gradient

Castagneri D., Fonti P., von Arx G., Carrer M. (2017). How does climate influence xylem morphogenesis over the growing season? Insights from long-term intra-ring anatomy in *Picea abies*.

Cook E. R., Kairiūkštis L. A., 1990. Methods of dendrochronology: applications in the environmental science.

Cornes R. C., van der Schrier G., van den Besselaar E. J. M., Jones P. D., 2018. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets.

De Micco V., Carrer M., Rathgeber C. B. K., Camarero J. J., Voltas J., Cherubini P., Battipaglia G. (2019). From xylogenesis to tree rings: wood traits to investigate tree response to environmental changes.

Fonti P., Bryukhanova M. V., Myglan V. S., Kirdeyanov A. V., Naumova O. V., Vaganov E. A., 2013. Temperature-induced responses of xylem structure of *Larix sibirica* (*Pinaceae*) from Russian Altay.

Gasparini P., Di Cosmo L., Pompei E., 2013 - Il contenuto di carbonio delle foreste italiane. Inventario nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC2005. Metodi e risultati dell'indagine integrativa. Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento, ISBN 978-88-97081-36-4, 284 pp

IPCC, 2012 – Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.) Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, 582 pp.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Rathgeber C. B. K., Cuny H. E., Fonti P., 2016. Biological Basis of Tree-Ring Formation: A Crash Course.

Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T. (2006). Assessment of cambial activity and xylogenesis by microsampling tree species: an example at the alpine timberline.

Selås V., Piovesan G., Adams J. M., Bernabei M., 2002. Climatic factors controlling reproduction and growth of Norway spruce in southern Norway.

Sidor C. G., Popa I., Vlad R., Cherubini P., 2015. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania).

Von Arx G., Carrer M., 2014. ROXAS – A new tool to build centuries-long tracheid-lumen chronologies in conifers.