

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO
DIPARTIMENTO DI TECNOLOGIE, INGEGNERIA E SCIENZE
DELL'AMBIENTE E DELLE FORESTE (DAF)

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA

Scienze e Tecnologie per la gestione ambientale e forestale - XXI CICLO

**Analisi delle variazioni di produttività di
tre nuclei di faggeta aventi carattere di vetustà**

Settore Scientifico Disciplinare - AGR/05

Coordinatore: Prof. Gianluca Piovesan

Tutor: Prof. Gianluca Piovesan

Dottorando: Alfredo Alessandrini

A Delizia

INDICE

ABSTRACT.....	4
LISTA DEGLI ACRONIMI.....	7
LISTA DELLE FIGURE e TABELLE	8
1. INTRODUZIONE.....	10
2. MATERIALI E METODI.....	14
3.RISULTATI.....	29
4.DISCUSSIONE e CONCLUSIONI.....	61
6. BIBLIOGRAFIA.....	65

ABSTRACT

Lo studio della produttività delle cenosi forestali riveste una notevole importanza al fine di comprendere come le recenti variazioni climatiche agiscano sui processi di accrescimento dei boschi.

Negli ultimi decenni si sta registrando un aumento delle temperature, il cui effetto sulla crescita dei boschi è ampiamente dibattuto. Nel bacino del mediterraneo, molti autori hanno riportato come, soprattutto per le cenosi forestali montane, si stia assistendo ad una riduzione della produttività, e in taluni casi ad un arretramento del limite superiore della vegetazione. Tali processi dipendono dall'aumento delle temperature che causano un incremento dell'aridità, il fattore limitante la produttività delle cenosi forestali.

In questo contesto il presente studio ha avuto come obiettivo l'analisi della produttività di tre faggete vetuste dell'Appennino Centrale,

Per stimare la produttività, si è utilizzato l'incremento di area basimetrica (BAI), che rispetto all'incremento di diametro, presenta il vantaggio di essere meno dipendente dalle dimensioni/età, rispetto alle ampiezze anulari.

Per lo studio delle variabili climatiche, si è utilizzato un dataset di punti griglia di temperature e precipitazioni, che ha permesso di ricavare delle cronologie di tali parametri.

L'aridità è stata calcolata mediante l'utilizzo di due indici: **Z-INDEX** - Palmer Moisture Anomaly Index e **PDSI** - Palmer Drought Severity Index.

Inoltre sono stati utilizzati degli indici derivati da immagini satellitari: **NDVI** - Normalized difference vegetation index e **FAPAR** - Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation.

I risultati ottenuti, hanno permesso di chiarire quali sono i segnali climatici che regolano le variazioni di alta e bassa frequenza della produttività delle cenosi forestali, permettendo in questo modo di comprendere meglio quali possono essere le conseguenze delle variazioni climatiche sulla loro produttività.

ABSTRACT

Aim: Understand how the recent climatic changes are impacting the basal area increment (an indicator of forest productivity) of beech woods in Italy. In recent decades there has been an increase in temperature; the effects on forest growth is widely debated, especially in Mediterranean areas, where some authors described a reduction in stand productivity in consequence of increasing drought (the factor limiting woods productivity).

Materials and methods: Productivity of old-growth beech forests in the Mediterranean Basin was measured by average stem basal area increment (BAI) of dominant trees at three mountain sites in the Italian Apennines. Basal area increment (BAI) was used to estimate productivity. A dataset of gridded temperatures and precipitation series was used for the study of climatic factors controlling productivity. Drought at the two sites was quantified by the self-calibrated Palmer Moisture Anomaly Index (Z-index), and by the self-calibrating Palmer Drought Severity Index (PDSI) for summer (June through August) and the growing season (May through September). Indices derived from satellite images were also compared to productivity data: NDVI, Normalized difference vegetation index, and FAPAR, Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation.

Results: The results obtained helped to clarify the climatic signals that regulate changes in beech woods productivity. Dendroclimatic analyses revealed a moisture limitation in beech BAI at the interannual (water availability measured by Z-index) and decadal timescales (water availability measured by PDSI). This impact was clearly detected by FAPAR, reconciling the observed BAI with remote sensing data.

Conclusion: These findings have implications for modelling tree growth at the landscape level in relation to forest management options and carbon cycling estimates, especially with regard to the impact of climate variability.

LISTA DEGLI ACRONIMI

CIM - Sito di studio della faggeta del M.te Cimino

VCH - Sito di studio della faggeta della Valle Cervara

STP - Sito di studio della faggeta di Stazzo Pagano

G - Area basimetrica (m²)

NDVI - Normalized difference vegetation index

FAPAR - Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

SD - Deviazione standard

GIMMS - Global Inventory Modeling & Mapping Studies

Z-INDEX - Palmer Moisture Anomaly Index

PDSI - Palmer Drought Severity Index

BAI - Basal area increment

LISTA DELLE FIGURE

Fig. 2.1 - Localizzazione delle faggete vetuste.....	13
Fig. 2.2 - Diagramma climatico relativo alla faggeta del M.te Cimino.....	15
Fig. 2.3 - Diagramma climatico relativo alla faggeta della Valle Cervara.....	16
Fig. 3.1 - Spline 50 anni dell'indice scPDSI e temperatura - M.te Cimino.....	29
Fig. 3.2 - Spline 50 anni dell'indice scPDSI e temperatura - Valle Cervara, Stazzo Pagano.....	29
Fig. 3.3 - Spline 50 anni delle precipitazioni estive.....	30
Fig. 3.4 - Serie d'incremento area basimetrica. M.te Cimino.....	32
Fig. 3.5 - Serie d'incremento area basimetrica. Valle Cervara.....	33
Fig. 3.6 - Serie d'incremento area basimetrica. Stazzo Pagano.....	34
Fig. 3.7 - Serie d'incremento area basimetrica – Spline 50 anni.....	35
Fig. 3.8 - Serie NDVI GIMMS. Valle Cervara, Stazzo Pagano.....	36
Fig. 3.9 - Serie NDVI GIMMS (6-8). Valle Cervara, Stazzo Pagano.....	37
Fig. 3.10 - Serie NDVI GIMMS. M.te Cimino.....	37
Fig. 3.11 - Serie NDVI GIMMS (6-8). M.te Cimino.....	38
Fig. 3.12 - Serie NDVI VEGETATION. Valle Cervara.....	39
Fig. 3.13 - Serie NDVI VEGETATION (6-8). Valle Cervara.....	40
Fig. 3.14 - Serie NDVI VEGETATION (6-8) Stazzo Pagano.....	40
Fig. 3.15 - FAPAR. Stazzo Pagano, Valle Cervara.....	41
Fig. 3.16 - FAPAR (5-9). Stazzo Pagano, Valle Cervara.....	41
Fig. 3.17 - Confronto BAI e temperature.....	42
Fig. 3.18 - Confronto BAI e temperature dell'anno precedente.....	43
Fig. 3.19 - Confronto BAI e temperature di 2 anni precedenti.....	43
Fig. 3.20 - Confronto BAI e precipitazioni.....	44
Fig. 3.21 - Confronto BAI e precipitazioni dell'anno precedente.....	44
Fig. 3.22 - Confronto BAI e precipitazioni dei 2 anni precedenti.....	45
Fig. 3.23 - Confronto BAI e Z-INDEX.....	46
Fig. 3.25 - Spline 50 anni, scPDSI – BAI, M.te Cimino.....	49
Fig. 3.26 - Spline 50 anni, Temperature – BAI, M.te Cimino.....	49
Fig. 3.27 - Spline 50 anni, scPDSI – BAI, faggeta della Valle Cervara.....	50
Fig. 3.28 - Spline 50 anni, Temperature – BAI, faggeta della Valle Cervara.....	50
Fig. 3.29 - Spline 50 anni, scPDSI – BAI, faggeta di Stazzo Pagano.....	50
Fig. 3.30 - Spline 50 anni, Temperature – BAI, faggeta di Stazzo Pagano.....	51
Fig. 3.31 - Confronto BAI e NDVI GIMMS.....	52
Fig. 3.32 - NDVI (6-8) e BAI. M.te Cimino.....	53
Fig. 3.33 - NDVI (6-8) e BAI. Valle Cervara.....	54

Fig. 3.34 - NDVI (6-8) e BAI. Stazzo Pagano.....	54
Fig. 3.35 - Confronto BAI e NDVI GIMMS (1990 – 2006).....	55
Fig. 3.36 - Confronto BAI e NDVI VEGETATION.....	56
Fig. 3.37 - FAPAR e BAI, Valle Cervara.....	57
Fig. 3.38 – Confronto BAI, FAPAR.....	57

LISTA DELLE TABELLE

Tab. 2.1 – Classi indice scPDSI.....	20
Tab. 3.1 – Parametri quantitativi dei rilievi preliminari nella faggeta di Stazzo Pagano.....	28

1.INTRODUZIONE

Le recenti variazioni climatiche stanno causando, mediante un innalzamento delle temperature, l'aumento della siccità. Tale fattore ambientale viene considerato la causa della riduzione negli ultimi decenni della produttività delle cenosi forestali. (Boisvenue & Running, 2006; Ciais *et al.*, 2003). Studiare la produttività delle cenosi forestali è di primaria importanza per la comprensione dell'impatto che le recenti variazioni climatiche hanno su di esse. Tale concetto rappresenta il presupposto su cui si è sviluppata la tesi di dottorando in Scienze e Tecnologie per la gestione forestale e ambientale – XXI ciclo, che ha avuto come oggetto l'analisi della produttività di tre nuclei di faggeta che presentano caratteri di vetustà:

- la faggeta del M.te Cimino situata nel Comune di Soriano nel Cimino
- la faggeta vetusta della Valle Cervara situata nel territorio del Parco Nazionale d'Abruzzo.
- la faggeta vetusta di Stazzo Pagano nel territorio del Parco Nazionale d'Abruzzo

I siti scelti rappresentano dei modelli naturali di bosco in cui poter studiare l'effetto delle variazioni climatiche, dato che sono delle cenosi forestali che non hanno subito rilevanti alterazioni nella struttura, almeno negli ultimi 50 anni.

Nel presente studio si è scelto di misurare la produttività dei tre nuclei di faggeta vetusta, mediante l'analisi dell'incremento di area basimetrica (BAI), partendo dal presupposto che gli anelli degli alberi contengono i segnali climatici e ambientali del sito. L'incremento di area basimetrica è un ottimo indicatore della produttività forestale dato che presenta il vantaggio di essere meno dipendente dalle dimensioni/età, rispetto alle ampiezze anulari. (Biondi, 1996, 1999; Hogg *et al.*, 2005; Nakawatase & Peterson, 2006).

Per capire quali siano i fattori che determinano le variazioni della produttività forestale si è scelto di analizzare le variazioni nel lungo e breve periodo delle temperature e precipitazioni dei siti studiati. Inoltre al fine di misurare le variazioni di

aridità, si sono utilizzati degli indici di aridità: lo **Z-INDEX** (Palmer Moisture Anomaly Index) e il **PDSI** (Palmer Drought Severity Index).

Si sono applicate tecniche di remote-sensing, mediante l'utilizzo di indici di vegetazione che permettessero di poter misurare le variazioni dell'attività fotosintetica e le conseguenze che la sua variazione ha sulla produttività delle cenosi forestali. A tal fine si è utilizzato l'indice **NDVI** (Normalized difference vegetation index) e il **FAPAR** (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation).

Nel presente studio si sono tenute in considerazione sia le variazioni di bassa frequenza analizzando il trend di crescita nel lungo periodo, mediante l'utilizzo di spline di 50 anni, che quelle di alta frequenza, mediante l'utilizzo di funzioni di correlazione dei parametri climatici elaborati.

I Boschi Vetusti

Il concetto di Old-growth forest riguarda cenosi forestali con specifiche caratteristiche compositive, strutturali e funzionali che ne determinano un avanzato grado evolutivo. Tale termine prescinde dal fattore ambientale uomo e dalle modificazioni che l'azione antropica diretta (tagli, incendi, pascoli...) o indiretta (inquinamento atmosferico, cambiamenti climatici) determinano su tali ecosistemi.

Negli ecosistemi forestali temperati, esso permette di definire foreste ben conservate come quelle di Bialowieza e di Fontainbleau alle quali non può essere associata la connotazione di foresta vergine, poiché rappresentano cenosi che, nel tempo, hanno subito l'azione dell'uomo (Peterken, 1996). Infatti, il termine vergine connota quegli ambienti indisturbati che non presentano i segni delle attività umane (Clark, 1996).

Il problema principale riguarda le metodologie, con le quali le foreste incontaminate possano, all'oggi, essere classificate come vergini. L'azione che l'uomo esercita non è circoscritta al luogo in cui esso esercita il disturbo, ma è capace, attraverso i gas presenti nell'atmosfera, la percolazione e il transito delle acque sotterranee, di raggiungere distanze notevoli di migliaia di chilometri. (Vitousek, 1994).

Old-growth forest, secondo Clark (1996), può meglio identificare le foreste equatoriali, rispetto alla tradizionale definizione di foresta vergine, e, a maggior ragione, le foreste ben conservate dei climi temperati, in virtù dell'elevato impatto antropico che ha caratterizzato tali ecosistemi forestali.

Sulla base di tali premesse molti autori nella classificazione delle foreste utilizzano tale terminologia, trascurando la terminologia classica di foresta vergine e, dunque, la presenza di attività antropica ad essa correlata. Pertanto definizioni come primigenia, vergine, naturale, indisturbato, primario, originario mal si prestano a connotare le foreste delle regioni temperate.

Old-growth che nella sua traduzione letterale ha valore di "vegetazione vetusta", può, nella lingua italiana, essere reso nella lingua italiana come bosco vetusto o foresta venusta.

» possibile associare il concetto di Old-growth forest ad una foresta allorquando

essa manifesti caratteristiche compositive, strutturali e funzionali definite specifici parametri descrittivi attraverso metodi dendrometrici e dendrocronologici.

In particolare, costituiscono i parametri descrittivi di un bosco vetusto:

- il grado di patchiness, se gli habitat presenti sono molto diversificati, il soprassuolo è frazionato in una moltitudine di “unità strutturali”, ciascuna con caratteristiche quali-quantitative peculiari, di piccole dimensioni e, in genere, di estensione inferiore a 0,1 ha;
- la quantità di biomassa viva, con riferimento particolare alla presenza di alberi di grosse dimensioni;
- la quantità di necromassa di grosse dimensioni (CWD) che è distinta in alberi morti a terra (LOGS) e alberi morti in piedi (SNAGS).
- l'età del bosco, in genere superiore a 200 anni di età (Peterken, 1996).

I boschi vetusti rappresentano sul piano della ricerca scientifica un modello di bosco naturale in cui poter studiare i processi dinamici della foresta. Sul piano pratico-applicativo il riferimento per le metodologie cui la selvicoltura naturalistica dovrà attenersi.

2.MATERIALI E METODI

2.1 Siti di studio

Il presente studio è stato condotto in tre faggete vetuste dell'Appennino Centrale, già oggetto di un monitoraggio dendroecologico e strutturale in corso, da parte del laboratorio di Dendrologia dell'Università degli Studi della Tuscia (Piovesan 1997; Piovesan 2005).

Si tratta della faggeta del Cimino, della Valle Cervara e di Stazzo Pagano.

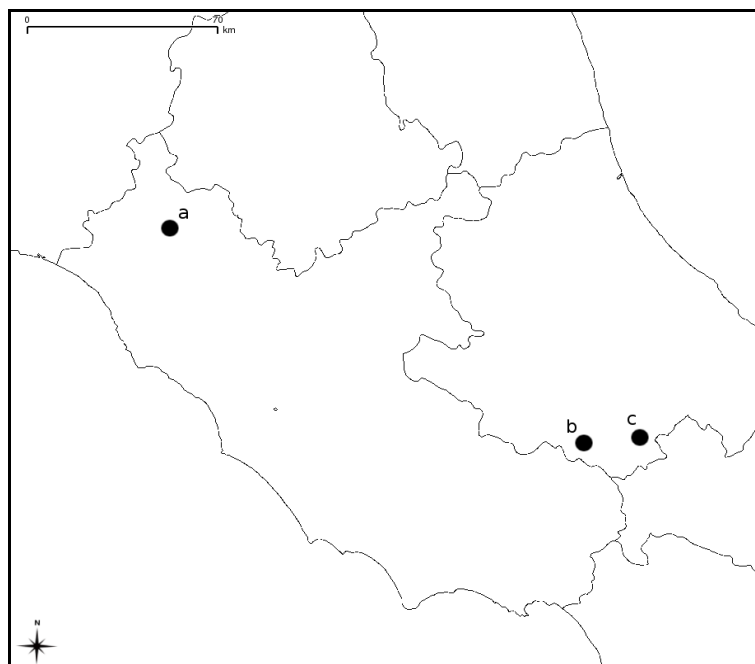


Fig 2.1. Localizzazione delle faggete vetuste. a) Faggeta del Monte Cimino
b)Faggeta della Valle Cervara c)Faggeta di Stazzo Pagano

2.1.1 La faggeta vetusta del Monte Cimino

La faggeta del Monte Cimino è situata nel comune di Soriano nel Cimino (Provincia di Viterbo) (fig. 2.1). Tale faggeta presenta delle caratteristiche di unicità in relazione alla struttura del piano dominante, formato da piante di notevole altezza (~ 40 m) e diametro (Piovesan 1997), che vanno a costituire una volta arborea a “cattedrale”, fattore che ha contribuito alla sua notorietà nel corso dei secoli.

Attualmente la faggeta si trova in una fase di transizione che la porterà nel giro di alcuni decenni ad assumere la struttura tipica di una foresta vetusta, sempre se continuerà ad essere applicata una politica di gestione orientata a tale fine.

Strutturalmente è caratterizzata da un soprassuolo nel complesso coetaneiforme e monoplano (Piovesan, 1997), dominato da alberi di grandi dimensioni (con piante che raggiungono i 45 metri di altezza e i 150 anni d'età). La continuità dello strato dominante viene interrotta dalle numerose buche create dallo schianto degli alberi, che creano le condizioni ottimali per l'evoluzione dei processi rigenerativi (fasi di rinnovazione e aggradazione). Nel complesso quindi il popolamento in questione presenta un mosaico forestale in cui sono presenti tutte le fasi successionali dei boschi vetusti.

Il sottobosco è caratterizzato dalla presenza di uno scarso strato arbustivo, e dalla presenza di necromassa (in particolare logs, ossia alberi morti a terra), anche di dimensioni notevoli. Va comunque considerato che il quantitativo di necromassa a terra è inferiore alle potenzialità del sito dato che nel corso dei decenni il legno morto è stato asportato.

Gli schianti degli alberi sono assai frequenti, dato che il sito è sottoposto a perturbazioni meteoriche caratterizzate da venti di notevole intensità. Infatti gli alberi dominanti raggiungendo una notevole altezza, presentano anche una minore resistenza meccanica alle sollecitazioni esterne (aumenta il momento angolare), che hanno la meglio sulla resistenza meccanica dell'apparato radicale superficiale del faggio.

La faggeta, ha un'estensione di 58 ha, ed è situata nella porzione sommitale del Monte Cimino, tra 950 e 1053 m s.l.m. (vetta del M.te Cimino). Essa segue in senso altitudinale gli estesi castagneti che discendono le pendici del monte, e che

caratterizzano il paesaggio circostante.

La faggeta rientra attualmente nelle aree **SIC** (*Sito d'Importanza Comunitaria*) e **ZPS** (*Zona di Protezione Speciale*), denominate “*Monte Cimino (versante nord)*” (codice Natura 2000 IT6010022).

Le attività selvicolturali sono assenti dagli anni '40, le ultime utilizzazioni risalgono al 1949. L'interruzione dei tagli ha permesso lo sviluppo delle caratteristiche che contraddistinguono i boschi vetusti, ossia elevata biomassa, necromassa di grosse dimensioni, età elevata ed elevato grado di “patchiness” (diversificazione di habitat).

Per quanto riguarda la caratterizzazione climatica il sito presenta precipitazioni medie annuali di 1400 mm, assenza di siccità estiva, e temperature medie delle minime del mese più freddo sempre negative (fig. 2.2).

I venti estivi, di provenienza occidentale, con intensità di brezza, consentono l'apporto di umidità nel periodo estivo. I venti invernali invece, di provenienza N – NE, possono raggiungere notevole velocità.

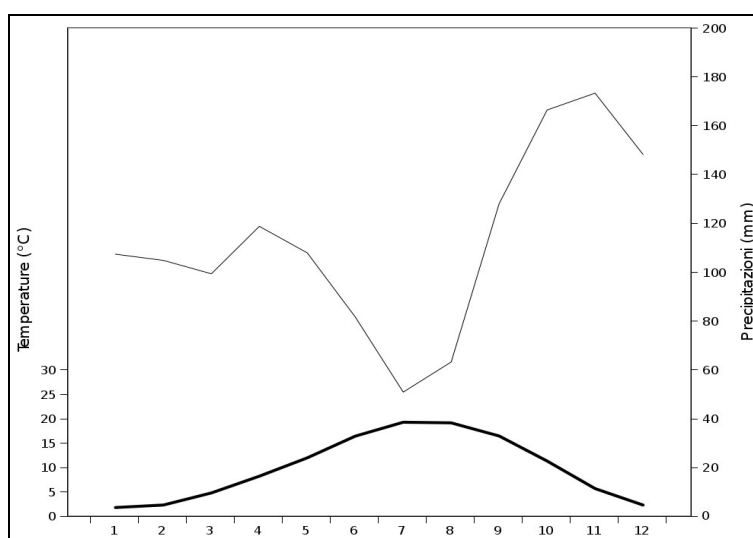


Fig 2.2 Diagramma climatico relativo alla faggeta del M.te Cimino

2.1.2 La faggeta vetusta della Valle Cervara

La faggeta della Valle Cervara è situata nel territorio del Parco Nazionale D'Abruzzo, nel comune di Villavallelonga (AQ). Si estende per 300 ha lungo la valle omonima, in direzione Est-Ovest, dai 1200 ai 1850 m s.l.m.

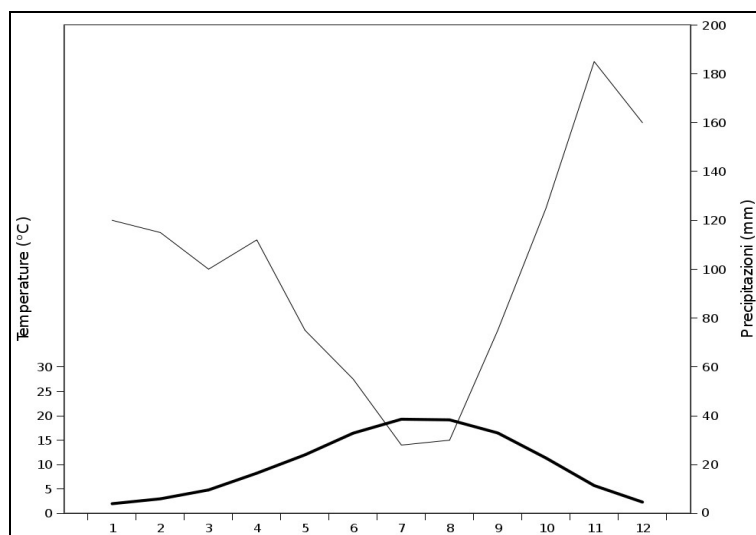


Figura 2.3. Diagramma climatico relativo alla faggeta della Valle Cervara

Per la caratterizzazione climatica si può far riferimento alla stazione meteorologica di Villavallelonga (945 m s.l.m.), caratterizzato da un clima mediterraneo Montano, con precipitazioni medie annuali di 1194,7 mm concentrate nel periodo autunnale. La temperatura media annuale è di 10,3 °C mentre la minima assoluta di - 7,1 °C. (fig. 2.3). La Valle Cervara, pur rientrando in questa tipologia climatica, presenta un mesoclima caratterizzato da una maggiore piovosità, dovuta alla formazione di piogge orografiche e da temperature medie minori.

Il sito dal punto di vista geologico la zona è formata in prevalenza da affioramenti calcarei del Cretaceo. I suoli sono di tipo bruno forestale.

La faggeta della Valle Cervara fa parte del *Polysticho-Fagetum sylvaticae* (Scoppola e Modena, 1997). Questa associazione vegetale è diffusa sull'intera catena appenninica, dalla Toscana alla Campania e dà vita alla formazione forestale più stabile e matura della serie calcicola del faggio.

La faggeta della Valle Cervara rappresenta un lembo relitto di bosco vetusto, di notevole importanza. L'età dello strato dominante raggiunge i 500 anni, e può essere considerata la faggeta più vecchia dell'emisfero boreale. Essa rappresenta un lembo relitto in cui i cicli naturali non sono stati alterati dall'azione antropica. Un modello di bosco in cui poter studiare i cicli naturali (Piovesan, 2005).

La struttura è caratterizzata dall'alternanza su piccole aree di tutte le fasi di successioni dei boschi naturali. Le singole eco-unità vanno a formare il complesso mosaico forestale in continuo equilibrio tra fasi di degradazione, rinnovazione e biostatiche.

La faggeta è caratterizzata da alti valori di necromassa ($63 \text{ m}^3/\text{ha}$), costituita in prevalenza da logs (69%), e in misura minore da snags (31%). La biomassa che ha un valore medio di $497 \text{ m}^3/\text{ha}$, è concentrata nelle classi diametriche maggiori (55% della biomassa nelle classe diametrica superiore a 55 cm di diametro) (Piovesan, 2005).

Da alcuni decenni tutta la Valle Cervara non è più soggetta a tagli boschivi, poiché l'ente di gestione del Parco, data l'importanza naturalistica dell'area, ha deciso di impedire qualsiasi tipo di utilizzazione forestale. Questa politica di gestione, consente di mantenere ed ampliare l'area interessata da tipologie strutturali assimilabili ai boschi vetusti.

La faggeta della Valle Cervara può essere considerata come un modello di bosco in cui studiare i processi naturali delle successioni caratteristiche dei boschi vetusti e come un riferimento per definire i parametri quali-quantitativi di tali boschi.

All'interno di questo bosco si possono ripercorrere tutte le fasi evolutive dei boschi naturali. Le coorti di rinnovazione sono generate dalla caduta di individui arborei di dimensioni elevate che possono raggiungere i 500 anni di età e che vanno a formare un'abbondante necromassa sul terreno. A volte gli alberi muoiono in piedi e subiscono lenti processi di degradazione andando a costituire un rifugio per micromammiferi e uccelli, nonché una fonte di alimentazione per alcune specie di invertebrati.

2.1.3 La faggeta vetusta di Stazzo Pagano

La faggeta di Stazzo Pagano si estende per circa 100 ha, in direzione ovest-est, tra il Balzo dei Tre Confini e il Picco la Rocca, dai 1500 ai 1750 m s.l.m. E' situata nel comune di Pescasseroli.

Anche per la faggeta di Stazzo Pagano possiamo far riferimento alla stazione meteorologica di Villavallelonga (945 m s.l.m.), per quanto riguarda la caratterizzazione climatica.

La faggeta di Stazzo Pagano, è situata nella zona A di riserva integrale, nel territorio del Parco Nazionale d'Abruzzo Lazio e Molise. Prima dell'istituzione del parco, negli anni '20, era zona tutelata, dato che costituiva una riserva reale di caccia. Queste forme di tutela hanno permesso di conservare dei lembi di foresta vetusta fino ai giorni nostri.

La struttura del popolamento è molto diversificata. Lo strato dominante ha un età media di circa 250 anni. Le singole fasi successionali si ripetono nell'area su piccole superfici, andando a costituire il mosaico forestale tipico dei boschi vetusti. L'insieme del mosaico è costituito dalle fasi di rinnovazione, aggradazione, biostatica e degradazione, che si ripetono nell'area.

Attualmente tale sito è oggetto di rilievi dendrometrici e dendroecologici da parte del laboratorio di dendrologia dell'Università della Tuscia. Sono stati condotti nel presente lavoro dei rilievi preliminari che hanno permesso di tracciare un quadro delle caratteristiche strutturali del bosco.

Le caratteristiche strutturali e i parametri quantitativi sono simili a quelli trovati per la faggeta della Valle Cervara, anche se l'età del bosco è notevolmente inferiore.

Nella faggeta sono state condotte delle analisi dendroecologiche che hanno permesso di ampliare la banca dati dendroecologica del laboratorio, consentendo così il confronto con gli altri siti studiati.

2.2 Dati climatici

I dati climatici (serie cronologica delle precipitazioni e delle temperature), sono stati ricavati dal dataset climatico dell'ISAC/CNR (Istituto delle Scienze Atmosferiche e del Clima – CNR), basato su 67 stazioni di rilevamento (Brunetti et al., 2006).

La griglia dei dati che presenta una risoluzione di 1° di ampiezza, sia in senso longitudinale che latitudinale, è stata ricavata per interpolazione dei dati delle stazioni di rilevamento, mediante una funzione gaussiana. I valori della griglia prendono in riferimento le anomalie di temperatura e di precipitazioni rispetto alla media del periodo 1961 – 1990, relativa ai siti studiati.

Le serie temporali di temperatura sono state ricavate mediante una media pesata dei 4 punti più vicini, in base alla distanza del punto griglia dal sito studiato. Successivamente si è aggiunto al valore ottenuto (anomalie 1961 - 1990), il valore mensile del sito, in modo da ricavare le serie temporali espresse in valori assoluti di temperatura. Il valore normale di temperatura utilizzato per il calcolo è stato ottenuto utilizzando i dati delle stazioni prossimi ai siti di studio, del Servizio Idrografico Nazionale.

Per ricavare le serie temporali delle precipitazioni, si è proceduto in maniera simile al metodo precedente, fatta eccezione per l'utilizzo di griglie con valori assoluti invece che valori di anomalie.

Oltre a ricavare le serie di temperatura e precipitazione, sono stati calcolati due indici d'aridità, in modo da poter quantificare lo stress idrico, e poterlo mettere in relazione con le serie d'incremento d'area basimetrica.

Gli indici calcolati sono lo Z-Index (Palmer Z Index) e il scPDSI (il Self-calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI) (Palmer, 1965; Wells et al., 2004)

Per l'elaborazione si è utilizzato il software sviluppato dal US National Agricultural Decision Support System, University of Nebraska, Lincoln (<http://nadss.unl.edu/>).

Entrambi gli indici, prendono in riferimento oltre che temperatura e precipitazione del sito anche il bilancio idrico del suolo.

Il PDSI e Z-INDEX, sono indici adimensionali basati sul concetto di offerta-domanda nell'equazione di bilancio idrico, ed è stato sviluppato per avere una misura non solo della carenza di precipitazione, ma anche delle condizioni d'umidità di una specifica località.

L'indice PDSI mette bene in risalto le variazioni di bassa frequenza, mentre lo Z-INDEX quelle di alta frequenza.

$\geq +4$	ESTREMAMENTE UMIDO
$+3 \leq \text{PDSI} < +4$	MOLTO UMIDO
$+2 \leq \text{PDSI} < +3$	MODERATAMENTE UMIDO
$+1 \leq \text{PDSI} < +2$	LIEVEMENTE UMIDO
$+0.5 \leq \text{PDSI} < +1$	INCIPIENTE PERIODO UMIDO
$-0.5 \leq \text{PDSI} < +0.5$	NORMALE
$-1 \leq \text{PDSI} < -0.5$	INCIPIENTE PERIODO SECCO
$-2 \leq \text{PDSI} < -1$	LIEVEMENTE SECCO
$-3 \leq \text{PDSI} < -2$	SICCITÀ MODERATA
$-4 \leq \text{PDSI} < -3$	SICCITÀ SEVERA
≤ -4	SICCITÀ ESTREMA

Tab. 2.1 – Classi indice scPDSI

2.3 Analisi dendroecologiche-auxometriche

Il presente studio, ha permesso d'integrare la banca dati dendrocronologica già esistente presso il laboratorio di Dendrologia dell'Università degli Studi della Tuscia, mediante campionamenti effettuati nei nuclei di faggeta vetusta recentemente individuati (faggeta di Coppo del Principe e faggeta di Stazzo Pagano).

I campionamenti sono consistiti in un prelievo di campioni legnosi mediante trivella di Pressler in alberi che presentassero il miglior compromesso tra stato fitosanitario e diametro. Si è tenuto conto anche della classe sociale degli alberi, scegliendo gli individui dominanti o codominanti. Per ogni pianta si è annotato il diametro, l'altezza, lo stato fitosanitario e le coordinate geografiche mediante sistema GPS.

Ogni campione legnoso è stato identificato da un codice univoco per permettere una catalogazione nell'archivio dendrocronologico esistente presso il laboratorio di dendrologia.

I campioni legnosi sono stati preparati per la lettura degli anelli, mediante l'asportazione con un bisturi di un sottile strato di legno facendo attenzione ad incidere perpendicolarmente agli anelli legnosi. Successivamente per mettere in risalto i vasi, e facilitare la lettura degli anelli si sono evidenziati i vasi mediante l'utilizzo di acqua e gesso.

Così preparati le carote legnose sono state sistemate in un listello di legno, in modo da permettere una facile lettura.

Successivamente si è proceduto alla misurazione delle ampiezze anulari mediante il sistema CCTRMD di Aniol, costituito da uno stereomicroscopio e uno strumento di lettura avente precisione al centesimo di millimetro interfacciato al software CATRAS (Aniol, 1983).

La lettura grezza così ottenuta permette di ottenere la curva elementare, ossia una serie temporale di ampiezze anulari, del raggio della pianta.

La lettura della curva elementare deve essere convalidata dato che potrebbe presentare errori di lettura, falsi anelli o anelli mancanti. Inoltre deve essere “datata” ossia deve essere collocata temporalmente. Questa procedura, definita sincronizzazione

visuale, viene eseguita confrontando la lettura con altre serie già convalidate, controllando soprattutto i punti dove sono presenti delle variazioni di crescita comuni con le letture di confronto.

Oltre alla sincronizzazione visuale può essere eseguita la sincronizzazione statistica mediante l'utilizzo del coefficiente di coincidenza e del t di Student. Nelle nostre analisi si è comunque utilizzata la sincronizzazione visuale, dato che essa è predominante nel decidere se la lettura è stata eseguita correttamente e nel convalidarla.

Successivamente può essere eseguita la standardizzazione delle curve elementari, mediante il software open-source R, al fine di eliminare il normale trend di crescita biologico dovuto sia all'età che alle dimensioni della pianta (*R Development Core Team (2004). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-00-3, URL <http://www.R-project.org>*).

La standardizzazione viene eseguita dividendo ogni serie con il trend di crescita in modo da ottenere una serie di ampiezze anulari indicizzate.

La standardizzazione può essere eseguita con tre diversi metodi, considerando il trend di crescita come la media della curva elementare, mediante una curva esponenziale negativa o una spline. Nel presente studio la standardizzazione è stata effettuata utilizzando una curva esponenziale negativa.

Da questa prima fase di elaborazione si sono ottenute delle serie temporali di ampiezze anulari. Per analizzare la produttività dei siti scelti, si è ritenuto opportuno calcolare l'incremento di area basimetrica (BAI) dato che presenta il vantaggio di essere meno dipendente dalle dimensioni/età, rispetto alle ampiezze anulari. (Biondi, 1996, 1999; Hogg et al., 2005; Nakawatase & Peterson, 2006).

Dalle serie di ampiezze anulari si è ricavata la serie temporale dell'incremento corrente di area basimetrica (BAI), mediante la seguente formula:

$$BAI = \pi/4 (D^2 - (D - 2i)^2) \quad [\text{eq.1}]$$

D = diametro a 1,3 m

i = incremento corrente di raggio

La media del sito è stata ricavata attraverso la media delle singole serie di BAI. Dal dataframe delle singole serie d'incremento di area basimetrica, si è ricavata la cronologia media stazionale.

Al fine di evidenziare la variazione dell'incremento nel lungo periodo (bassa frequenza), si è proceduto a sviluppare delle spline dell'ampiezza temporale di 15, 25 e 50 anni dalla cronologia media stazionale precedentemente ottenuta, mediante il software R.

2.4 Analisi mediante remote-sensing

Per analizzare la produttività delle faggete studiate, si è scelto di integrare i dati climatici con dati derivati da immagini satellitari mediante tecniche di remote-sensing.

Per studiare la variazione di produttività delle formazioni vegetali vengono utilizzati molti indici, derivati da analisi di immagini satellitari. La maggior parte di essi prende in considerazione la riflettanza della vegetazione, relativa alle bande del rosso e vicino infrarosso. Tra questi il più utilizzato per lo studio delle formazioni vegetali è l'indice NDVI. Tale indice prende in considerazione la diversa risposta spettrale che ha la vegetazione rispetto alle bande del rosso e vicino infrarosso e sembra essere dipendente dall'attività fotosintetica della vegetazione, dallo stato fitosanitario e dalla superficie fogliare (Leaf Area Index) (Rouse et al., 1974). L'indice considera l'elevato assorbimento nel rosso e l'elevata riflettanza nell'infrarosso per discriminare la vegetazione fotosinteticamente attiva dagli altri tipi di copertura del suolo:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

L'indice NDVI può assumere valori che vanno da -1 a +1. Le superfici coperte da densa vegetazione fotosinteticamente attiva, hanno in genere valori maggiori di 0.7. Assume valori bassi (< 0.5) o negativi in presenza di roccia, terreno nudo e corpi idrici.

Tale indice è stato anche utilizzato per lo studio della vegetazione e nell'analisi della produttività in relazione agli incrementi legnosi dei popolamenti forestali (Kaufmann, 2005; D'Arrigo, 2000)

Nella scelta del tipo di immagini satellitari da utilizzare ci si è innanzitutto orientati verso immagini gratuite. Inoltre per permettere un confronto temporale sufficientemente lungo rispetto alle serie di area basimetrica, ci si è orientati verso immagini che permettessero di estendere indietro nel tempo l'analisi.

Considerando che sarebbe stato necessario analizzare molte centinaia di immagini per ciascun sito ci si è orientati verso immagini già sottoposte alle correzioni preliminari (correzione radiometrica, georeferenziazione, correzione geometrica), in

modo da poter automatizzare il processo di analisi.

Non si è potuto utilizzare immagini ad alta o media risoluzione, sia per motivi di costo (considerando che si sarebbero dovute acquistare centinaia di immagini per sito), sia per il fatto che le immagini ad alta risoluzione sono disponibili soltanto da breve tempo, non permettendo quindi di estendere molto indietro l'analisi dei dati, rispetto all'area basimetrica.

Partendo da queste considerazioni sono state quindi scelti immagini a bassa risoluzione, rese disponibili da due progetti distinti

- Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS)
- Vegetation Programme

Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS)

Le immagini del progetto GIMMS (<http://glcf.umd.edu/data/gimms/>), coprono una serie temporale di 25 anni (1982-2006), e hanno una risoluzione di 4 km (Pinion, 2003).

Sono immagini derivate dai satelliti Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA AVHRR). Essi possiedono a bordo dei radiometri che convertono la radiazione elettromagnetica in impulsi elettrici che successivamente vengono elaborati per produrre un'immagine. Questi satelliti anche se originariamente progettati come satelliti meteorologici, dal 1981 sono stati modificati per permettere lo studio del tipo e le condizioni della vegetazione. Questi satelliti acquisiscono 5 bande spettrali: la banda del visibile, una del vicino infrarosso e tre bande termiche. Possiedono una risoluzione radiometrica di 10 bit che equivale a 1024 livelli d'informazione. Le bande che si utilizzano per il calcolo dell'indice NDVI, sono quella del visibile e del vicino infrarosso, mentre vengono escluse le bande relative al termico. La risoluzione massima delle immagini è di 1 km (Kidwell, 1998).

La procedura di calibrazione viene effettuata applicando dei parametri (gain e offset) resi disponibili dalla NOAA prima del lancio del satellite, che variano in base alla versione del satellite. Inoltre dato che tali valori possono modificarsi durante il periodo di utilizzo, è necessario effettuare una correzione mediante dei coefficienti, che

nel caso del dataset GIMMS, si utilizza il coefficiente di Vermote and Kaufman (1995). Le fasi di pre-processing includono anche la correzione atmosferica e la il controllo dei gap dovuti alla presenza di corpi nuvolosi.

Le procedure finali riguardano l'applicazione di coefficienti che correggano la degradazione del sensore e un controllo di qualità finale.

L'immagine finale prodotta è in formato TIFF ed è disponibile con accesso libero ad un archivio ftp.

Vengono utilizzate due tipi di sistemi di riferimento:

- COORDINATE GEOGRAFICHE
- ALBERS

NDVI Vegetation Programme

Le immagini del progetto Vegetation Programme, (<http://free.vgt.vito.be/>), derivano dall'elaborazione delle immagini satellitari SPOT 4 e SPOT 5.

Queste immagini hanno un'estensione temporale di 10 anni (1998-2008) e una risoluzione di 1 km.

Il progetto VEGETATION fornisce sia immagini di giornaliere che la sintesi di delle decadi.

Nel presente studio si sono utilizzate le immagini VGT-S10 products che rappresentano la sintesi delle decadi. Il dataset di un mese è costituito quindi da tre immagini.

Per l'analisi delle immagini satellitari si è utilizzato il software gis open-source GRASS 6.2. Le immagini sono state importate mediante le librerie GDAL. Nel caso delle immagini SPOT-VEGETATION è stato impiegato il modulo specifico d'importazione i.in.spotvgt.

Una volta eseguita l'importazione delle immagini si è provveduto ad ricavare l'indice NDVI.

Nel caso delle immagini GIMMS si è ricavato il valore NDVI dividendo il valore del pixel per 1000.

Nel caso delle immagini Vegetation si è applicata la seguente formula:

$$NDVI = 0.004 * PIXEL - 0.1 \quad [eq.2]$$

Dovendo elaborare più di 1000 immagini per ciascun sito, si è provveduto ad automatizzare l'analisi dei dati, mediante la programmazione di uno script in linguaggio Bash, che ha permesso una notevole riduzione dei tempi di elaborazione e l'eliminazione degli errori d'importazione dati ed elaborazione dati.

3. RISULTATI

3.1 RILIEVI DENDROMETRICI

Nella faggeta del M.te Cimino e della Valle Cervara sono già stati eseguiti da parte del laboratorio di dendrologia dell'Università della Tuscia una serie di studi finalizzati alla caratterizzazione strutturale e dendroecologica dei siti (Piovesan 1997, 2005). Questi studi hanno permesso di approfondire le conoscenze sulle dinamiche strutturali dei boschi vetusti e le relazioni che legano la produttività dei boschi con i fattori ambientali.

Sono state inoltre approfondite le conoscenze riguardanti le caratteristiche strutturali dei boschi vetusti mediante dei rilievi condotti nella faggeta di Stazzo Pagano. Nella TAB. vengono riassunti i parametri dendrometrici di rilievi preliminari riguardanti la faggeta vetusta di Stazzo Pagano. La densità media è di 124 piante ad ettaro. La biomassa totale ammonta a 641 m³/ha, mentre l'area basimetrica ha un valore di 34 m²/ha. La necromassa, presente con un valore medio di 117 m³/ha, è ripartita per il 27% (31 m³/ha) negli snags (alberi morti in piedi) e per il 73% nei logs (86 m³/ha). La biomassa è costituita in particolare da alberi di grandi dimensioni, infatti l'85% (446 m³/ha) è presente in alberi con un diametro maggiore di 52.5 cm. La faggeta presenta una struttura diversificata, nel complesso tendente alla struttura disetanea, ma con le singole unità strutturali di piccola superficie che si ripetono andando a formare il mosaico forestale caratteristico dei boschi che presentano caratteri di vetustà.

Piante/ha	G/ha (m ²)	m ³ /ha	Snags (m ³)	Logs (m ³)
124	34	641	31	86

Tab. 3.1 – Parametri quantitativi dei rilievi preliminari nella faggeta di Stazzo Pagano

I rilievi dendrometrici eseguiti sono stati preliminari a una fase successiva di studio che avrà lo scopo di approfondire le conoscenze sulle faggete vetuste dell'area. Quindi si propongono soltanto come un'indagine conoscitiva.

3.2 DATI CLIMATICI

I tre siti studiati, come si può vedere dalle serie temporali dell'indice scPDSI e della temperatura (anomalie Giugno - Agosto), presentano nel lungo periodo (1865 - 2000), una trend positivo sia dell'aridità estiva che delle temperature estive (Fig.3.1, 3.2). Le precipitazioni estive, presentano invece, nel lungo periodo un trend negativo (Fig.3.3).

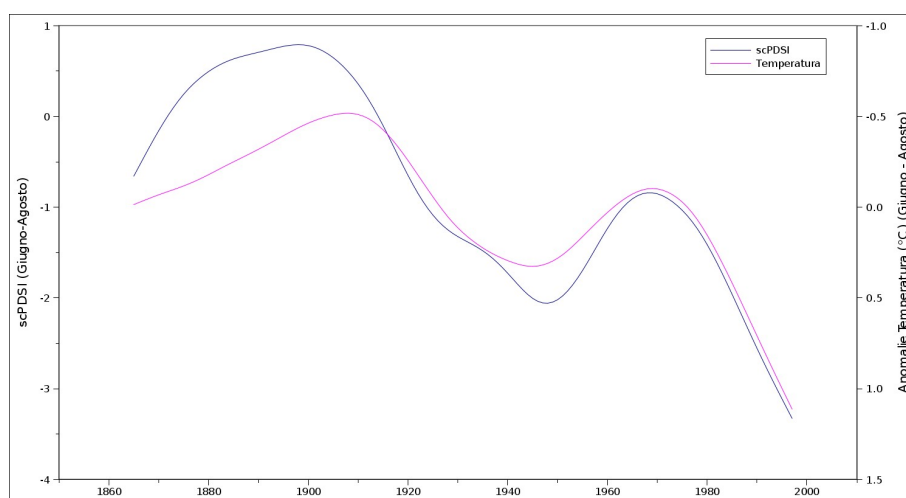


Fig. 3.1 – Spline 50 anni dell'indice scPDSI e anomalie temperatura relative alla faggeta del M.te Cimino

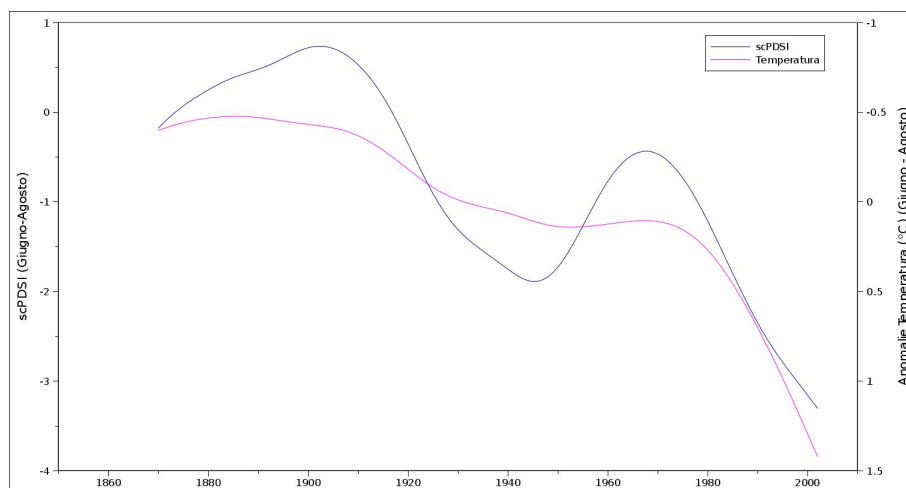


Fig. 3.2 – Spline 50 anni dell'indice scPDSI e anomalie temperatura relative alla faggeta della Valle Cervara e di Stazzo Pagano

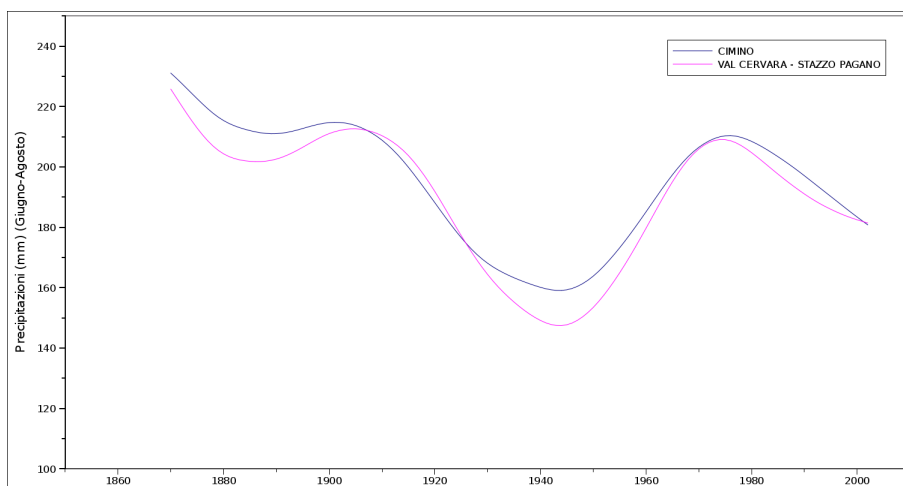


Fig. 3.3 – Spline 50 anni delle precipitazioni estive

Se analizziamo nel dettaglio l'andamento della spline relativa alla stazione del M.te Cimino (Fig.3.1), vediamo che l'indice scPDSI, si mantiene di segno positivo (assenza di aridità) e sempre inferiore ad 1, fino all'anno 1914. Successivamente a tale data l'indice assume segno negativo. Dal 1914 al 1948 l'indice scPDSI decresce fino a raggiungere un valore di -2.06 che nella scala indica un'aridità moderata. Nei 20 anni successivi (1948 – 1970), l'indice inverte il trend negativo, salendo fino a -0.84, per poi riprendere a decrescere fino ad oggi, in cui ha raggiunto valori che raggiungono i -3.32 che nella scala indicano un valore di aridità molto alto, ossia aridità severa.

L'indice scPDSI (Fig. 3.2) relativo al sito della Valle Cervara e di Stazzo Pagano (facenti parte della stessa cella di valori), presenta un andamento simile al sito del M.te Cimino, con la differenza che la culminazione della spline (anno 1902) e il passaggio da valori positivi a negativi (anno 1917) è posticipata di alcuni anni. L'andamento molto simile delle spline dell'indice scPDSI, è confermato anche dalla correlazione estremamente significativa ($r = 0.98$) che manifestano.

Le spline relative alle anomalie di temperatura del periodo estivo, presentano un trend simile all'indice scPDSI (Fig. 3.1, 3.2).

Analizzando nel dettaglio le anomalie di temperatura del periodo estivo per il sito del M.te Cimino (Fig. 3.1), possiamo affermare che fino agli anni '80 esse oscillano da -0.5°C (anno 1910) a $+0.5^{\circ}\text{C}$. Dall'anno 1987 le anomalie superano la soglia di $+0.5^{\circ}\text{C}$, periodo in cui inizia un trend crescente fino al periodo attuale nel quale si superano valori di 1°C .

Nel caso delle spline delle anomalie di temperatura relative ai siti VCH e STP (Fig.3.2), possiamo notare rispetto al M.te Cimino, un trend di decremento che si presenta più costante e con delle oscillazioni nel trend meno marcate. Anche in questo caso la soglia di temperatura di $+0.5^{\circ}\text{C}$, viene superata nell'anno 1987.

Le spline relative alle precipitazioni del periodo estivo (Fig.3.3), presentano un andamento simile. Esiste una fase durante il periodo 1865 -1945 in cui si manifesta una riduzione delle precipitazioni, che passano dai valori massimi del periodo (237 mm per il sito del M.te Cimino, 238 mm per il sito Valle Cervara – Stazzo Pagano). Successivamente al 1945 il trend diventa positivo e le precipitazioni iniziano a crescere, fino a metà degli anni '70, fase in cui torna un trend positivo e le precipitazioni raggiungono i minimi storici del periodo (anno 2002 - 179 sito CIM; 181 sito VCH, STP).

Complessivamente tali parametri mettono in risalto un aumento dell'aridità del periodo estivo dovuto all'azione congiunta dell'aumento delle temperature e riduzione delle precipitazioni.

3.3 INCREMENTO AREA BASIMETRICA

Dall'analisi dei dati si sono ottenute tre serie d'incremento d'area basimetrica relative ai siti studiati. La serie d'incremento relativa al sito del M.te Cimino, ha un'estensione temporale di 188 anni (1809 – 1996). Per l'analisi dei dati si è utilizzata una serie d'incremento derivante da un minimo 10 alberi. In tal caso l'estensione temporale della serie è di 130 anni (1867 – 1996). In Fig.3.4 è mostrata la serie totale di area basimetrica. Se consideriamo l'intervallo di tempo 1867 – 1996, la serie di area basimetrica ha una media di 23.55 cm²/anno, una deviazione standard di 7.46 cm² ed un minimo e massimo rispettivamente di 7.46 cm² e 37.82 cm².

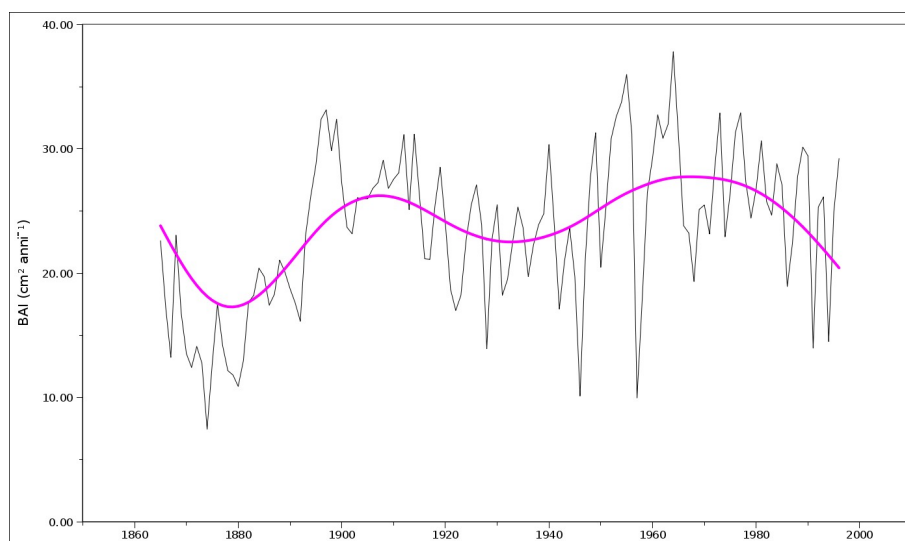


Fig.3.4 – Serie d'incremento area basimetrica con relativa spline 50 anni.
Sito M.te Cimino

La faggeta del M.te Cimino presenta delle oscillazioni nell'incremento corrente di area basimetrica maggiori rispetto alle altre due faggete studiate. L'incremento corrente subisce consistente aumento nel periodo 1880-1910, con un incremento medio di 23.38 cm²/anno, e dei massimi di 33.17 cm²/anno (anno 1897). Successivamente come per gli altri due siti, l'incremento c'è un periodo di trend negativo che si può collocare intorno al 1910 – 1940. Nei decenni successivi il trend torna positivo (1940 - 1980), per poi decrescere di nuovo dagli anni '80 ad oggi.

Nell'intero periodo la faggeta del M.te Cimino mantiene un incremento medio di area basimetrica maggiore rispetto altri due siti. L'incremento medio del periodo 1865 – 1996 è di 23.50 cm²/anno, mentre la faggeta della Valle Cervara ha un incremento medio nel periodo 1865 – 2002 di 20.24 cm²/anno, mentre la faggeta di Stazzo Pagano (1865 – 2007) di 20.21 cm²/anno.

La serie d'incremento di area basimetrica relativa alla faggeta della Valle Cervara ha un estensione temporale di 502 anni, dall'anno 1501 al 2002. Se consideriamo la serie costruita con un numero significativo di alberi (10), l'estensione temporale è di 348 anni, e va dal 1655 al 2002. In Fig.3.5 possiamo vedere la serie d'incremento. La media relativa è di 11.79 cm²/anno, con una deviazione standard di 8.19 cm², un minimo ed un massimo rispettivamente di 1.50 cm² e 37.04 cm².

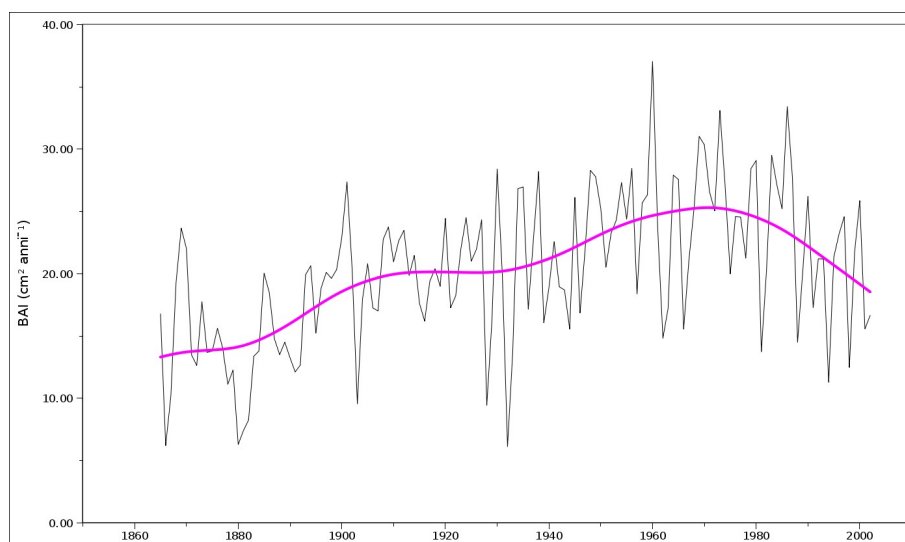


Fig.3.5 - Serie d'incremento area basimetrica con relativa spline 50 anni.
Sito Valle Cervara

La faggeta della Valle Cervara presenta un basso livello di crescita fino agli anni '40, mantenendosi l'incremento corrente inferiore a 20 cm²/anno. Soltanto successivamente agli anni '40 si manifesta un incremento della produttività che si mantiene fino agli anni '80, con una culminazione dell'incremento intorno agli anni '70. Negli ultimi 30 anni è evidente un decremento dell'incremento corrente.

La faggeta della Valle Cervara presenta dopo i picchi dell'anno 1960 (37.03 cm²/anno) e 1973 (33.10 cm²/anno), un brusco decremento della produttività con un

incremento corrente inferiore ai 20 cm²/anno dagli anni '80 ad oggi. Il minimo viene registrato nel 1994 di 11.28 cm²/anno.

Per la faggeta di Stazzo Pagano, la serie ha un ampiezza temporale di 308 anni (1700 – 2007). Considerando la serie con un numero rappresentativo di alberi, l'estensione va dal 1750 al 2007 (258 anni). La media relativa è di 14.12 cm²/anno, con una deviazione standard di 8.20 cm², ed un minimo di 1.01 cm² ed un massimo di 35.95 cm² (Fig. 3.6).

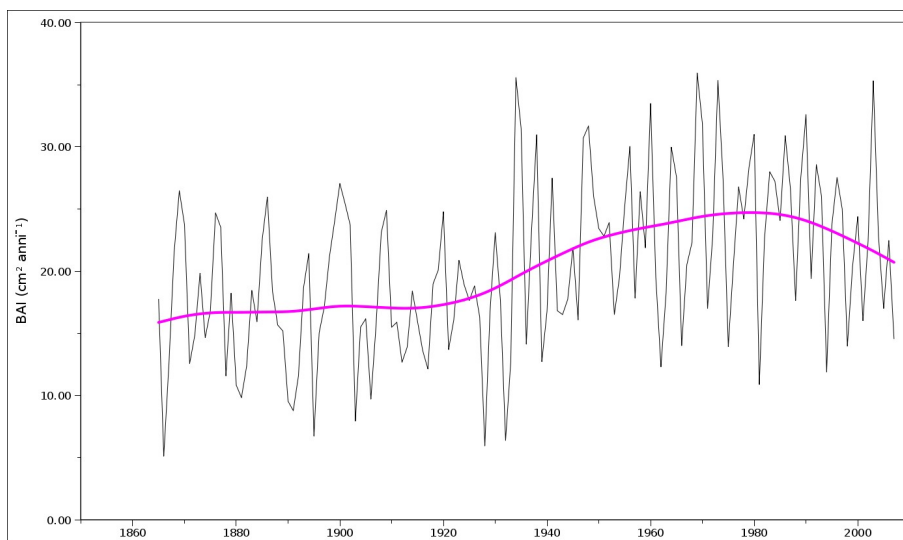


Fig.3.6 - Serie d'incremento area basimetrica con relativa spline 50 anni.
Sito Stazzo Pagano

Si può notare come nella faggeta di Stazzo Pagano l'incremento di area basimetrica presenti un basso livello di crescita fino agli anni '40. L'incremento corrente si mantiene mediamente inferiore ai 20 cm²/anno. Nel periodo 1940 – 1980 nelle due faggete si manifesta un incremento della produttività, con una culminazione dell'incremento intorno agli anni '70. Successivamente al 1980, si manifesta un marcato decremento dell'incremento corrente di area basimetrica.

La faggeta di Stazzo Pagano pur presentando anch'essa un trend negativo a partire dagli anni '80, mantiene un incremento maggiore rispetto alla faggeta della Valle Cervara, con valori che si mantengono comunque superiori alla soglia di 20 cm²/anno. Inoltre il punto di flesso dell'incremento corrente è posticipato rispetto alla faggeta della Valle Cervara di alcuni anni.

In Fig. 3.7 possiamo vedere le spline di 50 anni relative ai tre siti studiati, in modo da poter apprezzarne le variazioni nel lungo periodo.

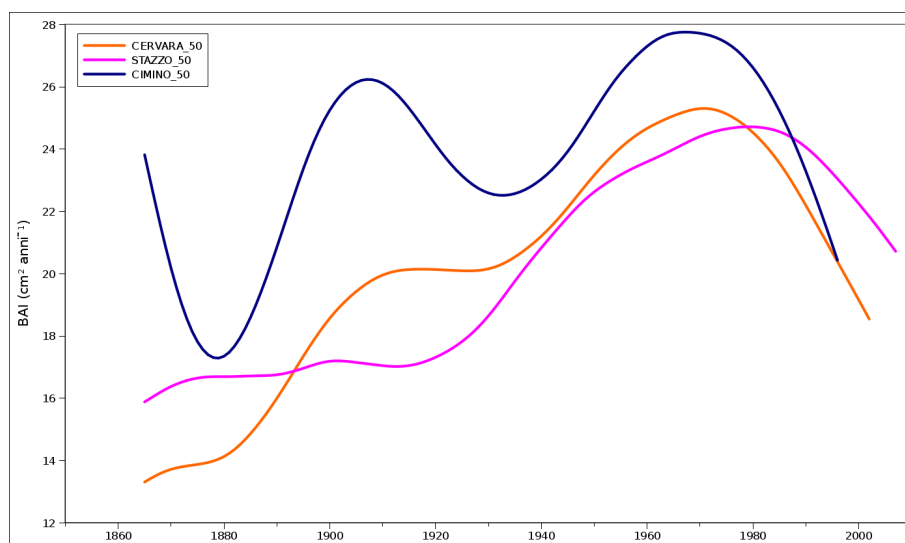


Fig.3.7 - Serie d'incremento area basimetrica - spline 50 anni.

3.4 INDICE NDVI E FAPAR

3.4.1 NDVI GIMMS

L'analisi delle immagini satellitari ha permesso di ricavare per ciascuno dei tre siti, due serie storiche dell'indice NDVI (Gimms e Vegetation) e una dell'indice FAPAR.

In Fig. 3.8 possiamo vedere la serie storica dell'indice NDVI, ottenuto da immagini AVHRR del progetto GIMMS, relativa al sito della Valle Cervara e Stazzo Pagano. In tale caso entrambi i siti si sono collocati nello stesso pixel, quindi le serie NDVI (Gimms) coincidono.

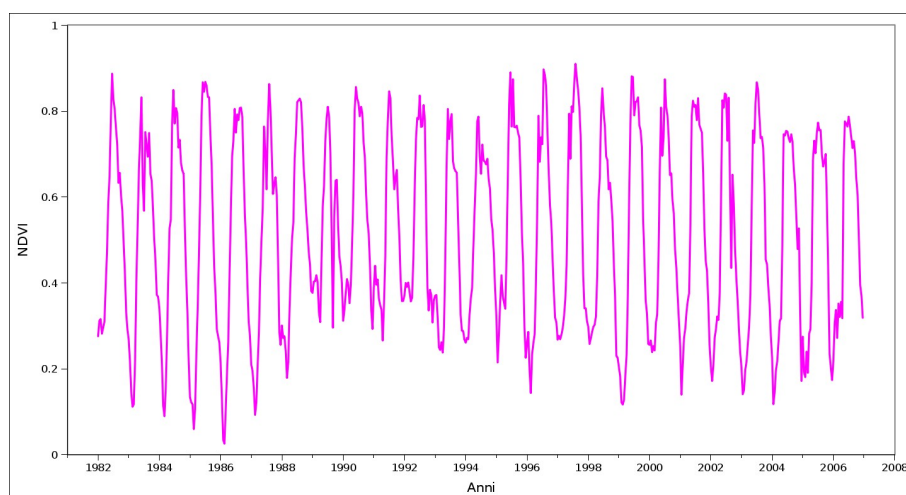


Fig.3.8 - Serie NDVI GIMMS relativa al sito della Valle Cervara e di Stazzo Pagano

Nella serie storica sono ben evidenti le oscillazioni stagionali dell'indice, che oscilla mediamente da 0.2 a 0.8. L'indice NDVI ha una media di 0.51, un massimo di 0.91 e un minimo di 0.03. La deviazione standard è di 0.224.

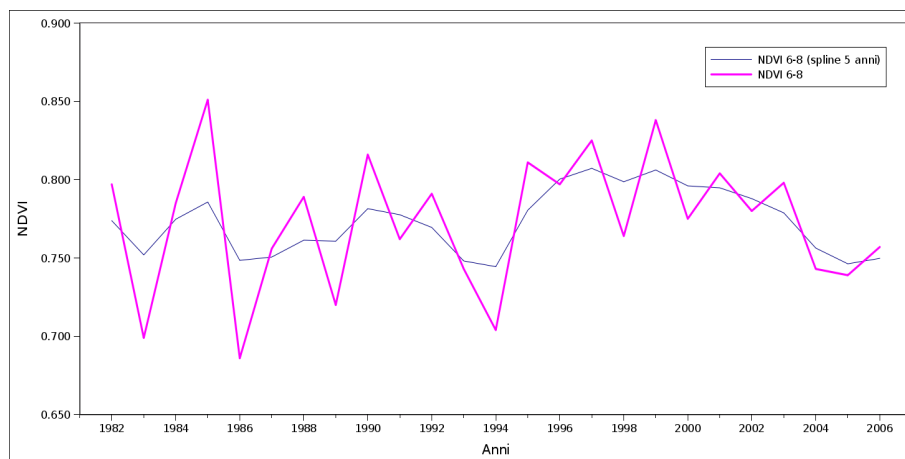


Fig.3.9 - Serie NDVI GIMMS relativa al sito della Valle Cervara e di Stazzo Pagano. Media del periodo giugno – agosto e relativa spline 5 anni.

Se consideriamo i valori dell'indice NDVI del periodo estivo (Giugno – Agosto), l'indice ha valori più alti rispetto alla serie totale, oscillando da 0.73 a 0.82 (Fig.3.9).

La media del periodo è di 0.77, con un massimo di 0.85 ed un minimo di 0.68. La deviazione standard ha un valore di 0.043. La spline a 5 anni della serie NDVI del periodo estivo (Fig. 3.9), mette in risalto un'assenza di trend nel lungo periodo. Si può comunque notare dei livelli dell'indice mediamente superiori durante il periodo 1995 – 2006, rispetto al periodo precedente.

La serie storica dell'indice NDVI (Gimms) relativa al sito del M.te Cimino (Fig.3.10), presenta un range di variazione inferiore a quella degli altri due siti. In tal caso, l'indice si mantiene nel corso dei cicli stagionali tra il valore di 0.4 e 0.7.

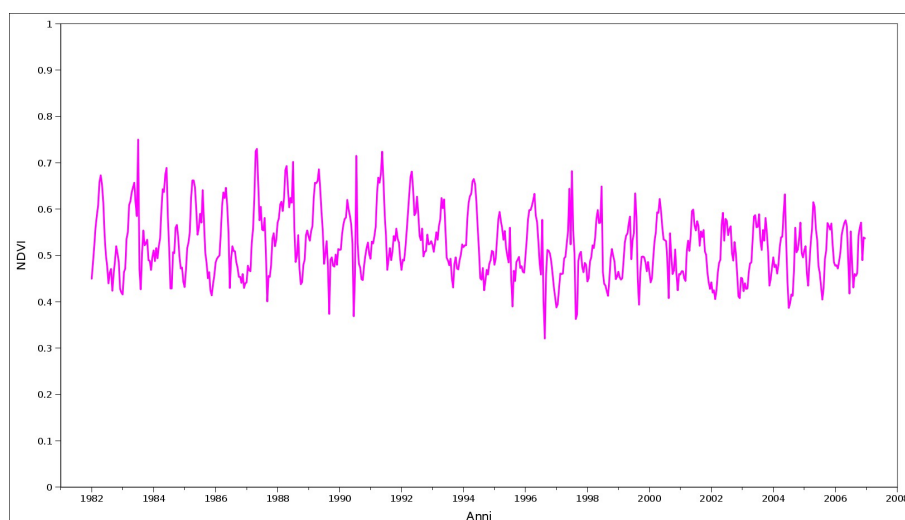


Fig.3.10 - Serie NDVI GIMMS relativa al sito del M.te Cimino.

La media dell'indice NDVI considerando tutto il periodo considerato (1982 – 2006), è di 0.52, con una deviazione standard di 0.07, un massimo di 0.75 ed un minimo di 0.32. Considerando soltanto il periodo estivo (Giugno – Agosto), l'indice oscilla mediamente da 0.48 a 0.56. L'NDVI medio del periodo estivo ha un valore di 0.52, con un valore massimo di 0.58 ed un minimo di 0.43. Dalla spline di 5 anni dell'indice NDVI, possiamo notare come l'indice mantenga nel lungo periodo un valore costante durante il periodo 1983 – 1992, pur presentando nel corso degli anni notevoli oscillazioni. Dopo l'anno 1992 subisce un trend negativo, fino al 1996 (0.46), anno in cui l'indice torna a crescere fino all'anno 2002 per poi riprendere un trend negativo fino al 2006 (ultimo anno disponibile del dataset) (Fig.3.11).

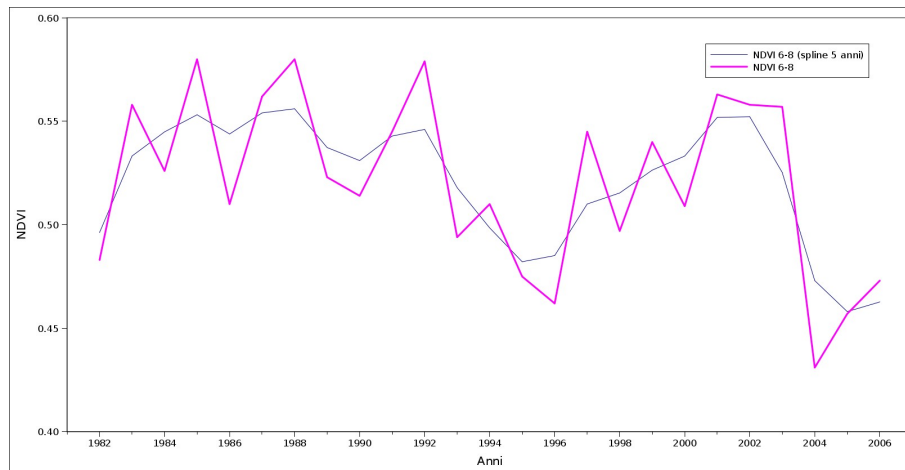


Fig.3.11 - Serie NDVI GIMMS relativa al sito del M.te Cimino.
Media del periodo giugno – agosto e relativa spline 5 anni.

3.4.2 NDVI VEGETATION

Dal dataset di immagini SPOT-VEGETATION sono state ricavate due serie temporali, relative al sito della Valle Cervara e di Stazzo Pagano. Per il sito del M.te Cimino non è stata elaborata la serie storica dell'NDVI, dato che tale dataset ha come origine temporale l'anno 1998, mentre la serie di area basimetrica di tale sito termina nel 1996, non permettendo quindi il confronto dei dati.

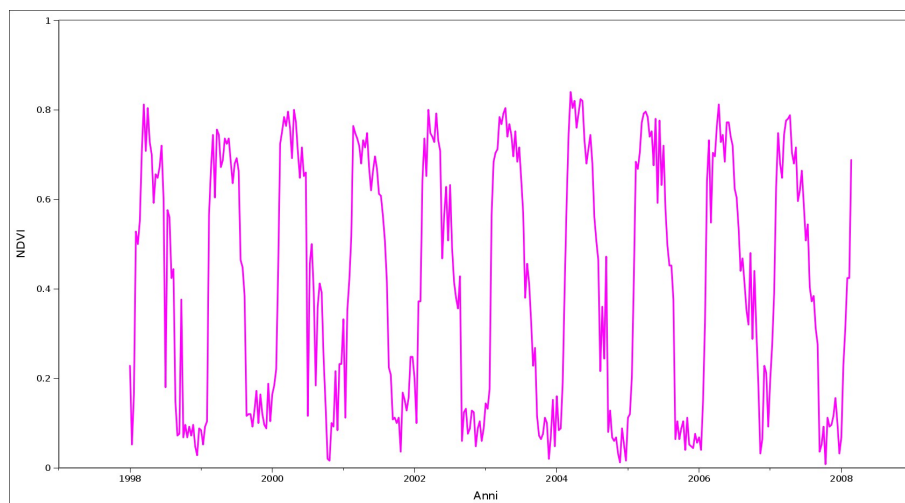


Fig.3.12 - Serie NDVI VEGETATION relativa al sito della Valle Cervara.

La serie annuale dell'indice NDVI (Fig.3.12), per il sito della Valle Cervara, oscilla da 0.14 a 0.69. La media è di 0.42, con un massimo di 0.84 ed un minimo di 0.008. La deviazione standard ha un valore di 0.27. Se invece consideriamo il periodo estivo (Giugno – Agosto) (Fig.3.13), l'indice varia da 0.70 a 0.76, con una media di 0.73. Il valore massimo che si registra nel periodo estivo è di 0.79, mentre il valore minimo di 0.70.

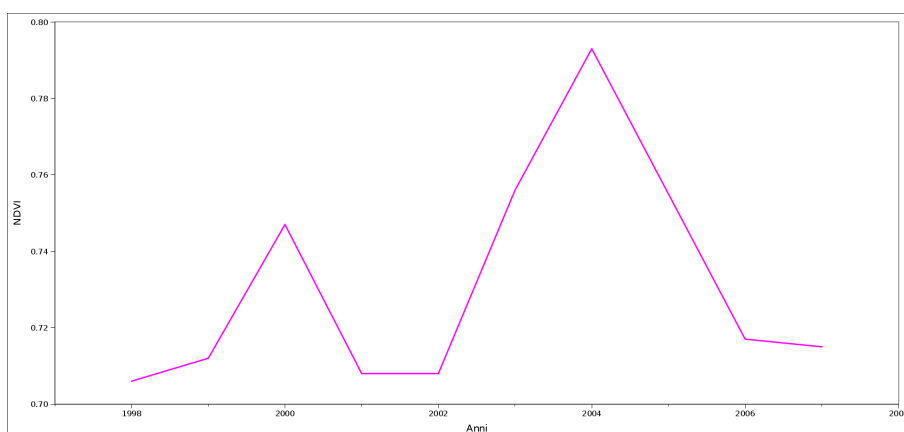


Fig.3.13 - Serie NDVI VEGETATION relativa al sito della Valle Cervara.
Media del periodo estivo (giugno-agosto).

Nel sito di Stazzo Pagano, l'indice NDVI annuale, ha un andamento simile al sito della Valle Cervara, con una media di 0.43 e una deviazione standard di 0.29. L'indice durante il periodo estivo (Fig.3.14) presenta un trend simile alla stazione della Valle Cervara, pur presentando una media leggermente superiore (0.79 invece di 0.73).

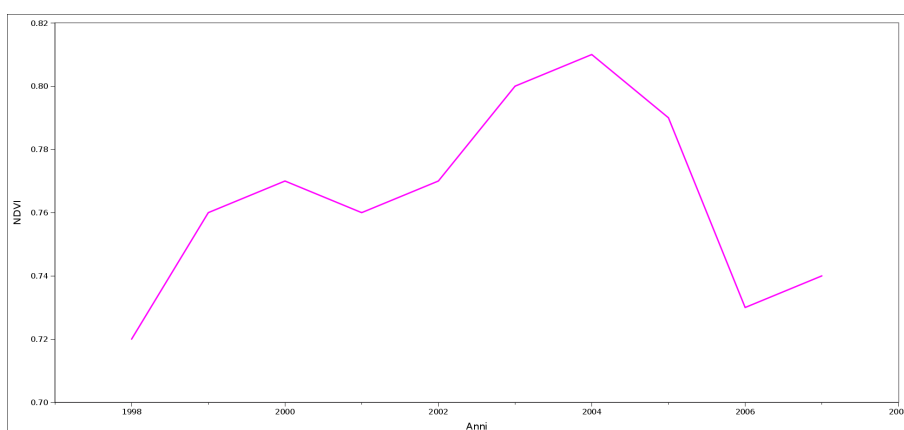


Fig.3.14 - Serie NDVI VEGETATION relativa al sito di Stazzo Pagano.
Media del periodo estivo (giugno-agosto).

3.4.3 INDICE FAPAR

La serie storica dell'indice FAPAR, prende in riferimento il periodo 1998 – 2005 (Fig.3.15). E' stata calcolata un'unica serie per entrambi i siti della Valle Cervara e di Stazzo Pagano, dato che si trovano entrambi nel medesimo pixel. Per il sito del M.te Cimino non si è potuta sviluppare la serie dell'indice FAPAR dato che la serie di area basimetrica termina nell'anno 1996, quindi prima dell'inizio della serie FAPAR.

L'indice FAPAR, considerando il periodo che va da maggio a settembre (Fig.3.16), ha dei valori che oscillano da 0.52 a 0.59. La media del periodo è di 0.562 con una deviazione standard di 0.022. Il trend inizialmente positivo fino al 2000, diventa negativo nel periodo 2000 – 2005.

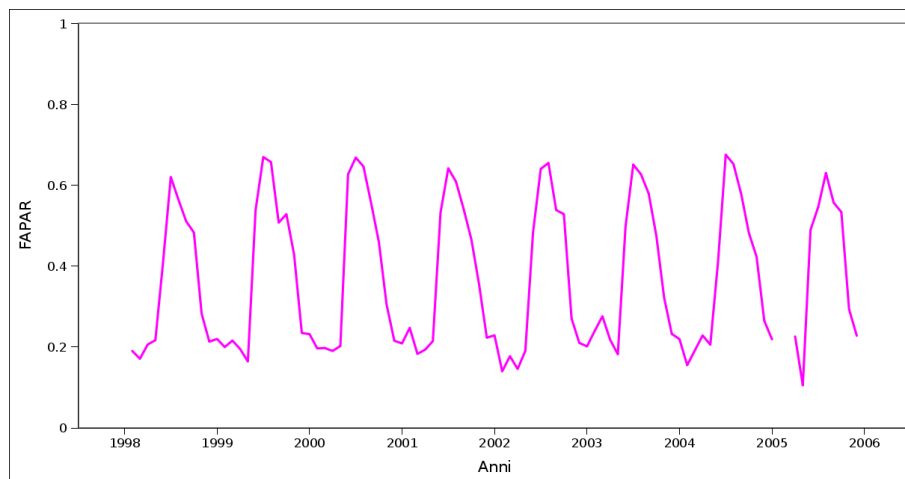


Fig.3.15 - Serie dell'indice FAPAR relativa al sito di Stazzo Pagano e della Valle Cervara.



Fig.3.16 - Serie dell'indice FAPAR relativa al sito di Stazzo Pagano e della Valle Cervara. Media del periodo maggio – settembre.

3.5 SEGNALI DI ALTA FREQUENZA

L'incremento dell'area basimetrica è stato confrontato mediante funzioni di correlazione, con le serie climatiche di temperatura, precipitazioni e scZIND, precedentemente calcolate.

Si sono analizzate sia le correlazioni relative all'anno in corso che quelle di 1 e 2 anni precedenti.

In Fig.3.17 possiamo vedere i valori delle funzioni di correlazione, derivanti dal confronto delle serie di area basimetrica relativa ai tre siti studiati, con le temperature del periodo estivo, del periodo maggio – settembre, di maggio, giugno, e della media totale annua.

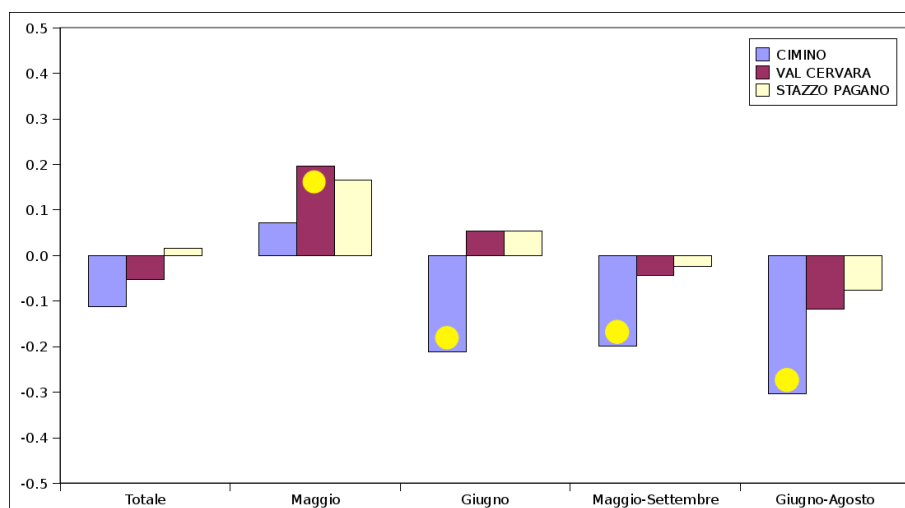


Fig.3.17 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e temperature.

L'incremento di area basimetrica relativa al sito del M.te Cimino mostra una correlazione negativa ($r = -0.30$, $p < 0.001$) con la temperatura dei mesi estivi (giugno – agosto), con il mese di giugno ($r = -0.21$, $p < 0.05$) e con le temperature del periodo maggio – settembre ($r = -0.20$, $p < 0.05$). Una correlazione positiva con la temperatura del mese di maggio è presente invece nei siti della Valle Cervara ($r = 0.20$, $p < 0.05$) e di Stazzo Pagano ($r = 0.17$, $p < 0.05$).

Per quanto riguarda invece le relazioni che i valori di temperatura degli anni precedenti hanno rispetto all'incremento di area basimetrica, è presente una correlazione

negativa riguardo alle temperature del periodo estivo dell'anno precedente, nel caso del sito della Valle Cervara ($r = -0.24, p < 0.01$) e di Stazzo Pagano ($r = -0.19, p < 0.05$) (Fig.3.18).

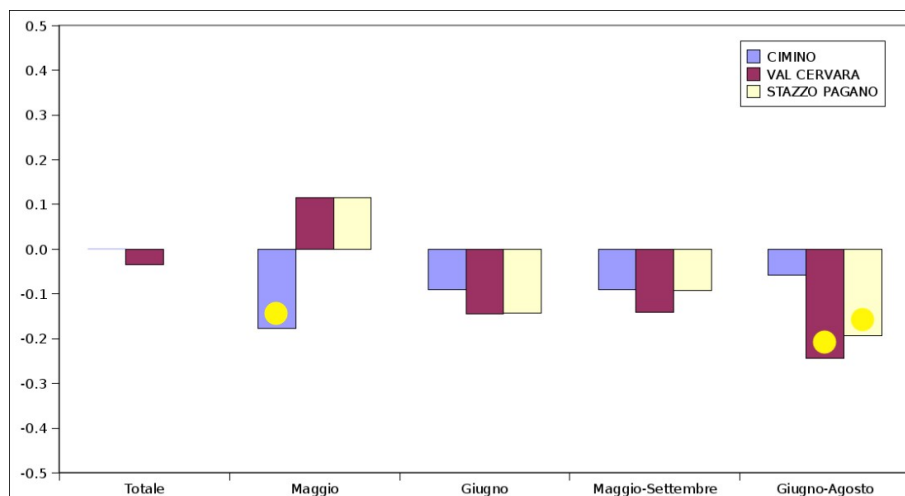


Fig.3.18 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e temperature dell'anno precedente.

Non è presente invece una correlazione statisticamente significativa con l'incremento di area basimetrica relativa alla faggeta del M.te Cimino, che presenta una correlazione negativa con la temperatura del mese di maggio dell'anno precedente ($r = -0.17, p < 0.05$) (Fig.3.18). Se consideriamo i due anni precedenti l'anno di crescita, non è presente una correlazione statisticamente significativa, tranne nel caso del M.te Cimino, che presenta una correlazione positiva con le temperature dei mesi estivi ($r = -0.22, p < 0.05$) (Fig.3.19).

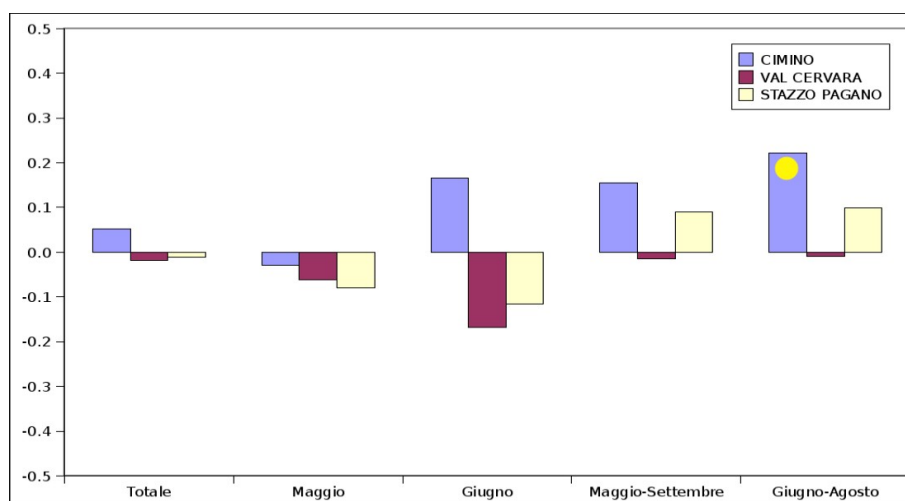


Fig.3.19 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e temperature di 2 anni precedenti.

Per quanto riguarda le relazioni rispetto alle precipitazioni dell'anno in corso l'incremento di area basimetrica è correlato positivamente con le precipitazioni dei mesi estivi (giugno – agosto), nel caso di tutti e tre i siti studiati. I valori più significativi sono presenti per il sito del M.te Cimino, infatti in tal caso la correlazione ha un valore di 0.30 ($p < 0.001$). Per il sito della Valle Cervara è presente una correlazione di 0.19 ($p < 0.05$), mentre per il sito di Stazzo Pagano di 0.24 ($p < 0.01$) (Fig.3.20).

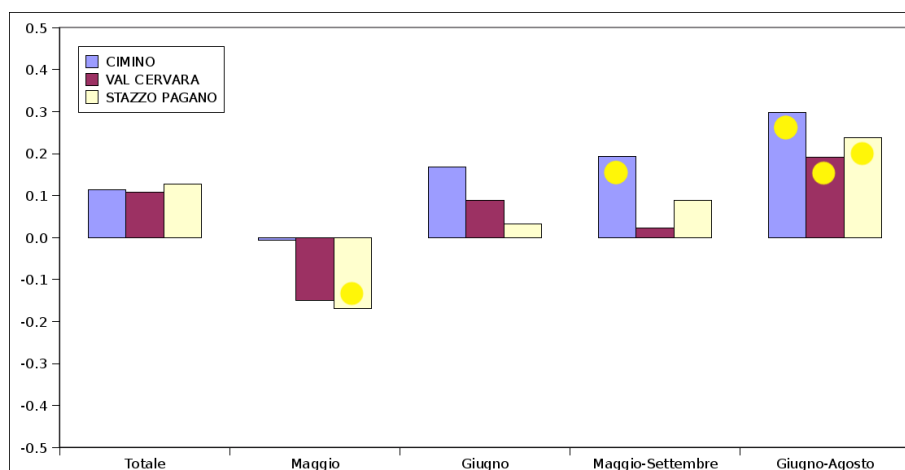


Fig.3.20 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e precipitazioni.

Soltanto per il sito del M.te Cimino è presente una correlazione positiva statisticamente significativa ($r = 0.19$, $p < 0.05$) anche con le precipitazioni del periodo maggio – settembre.

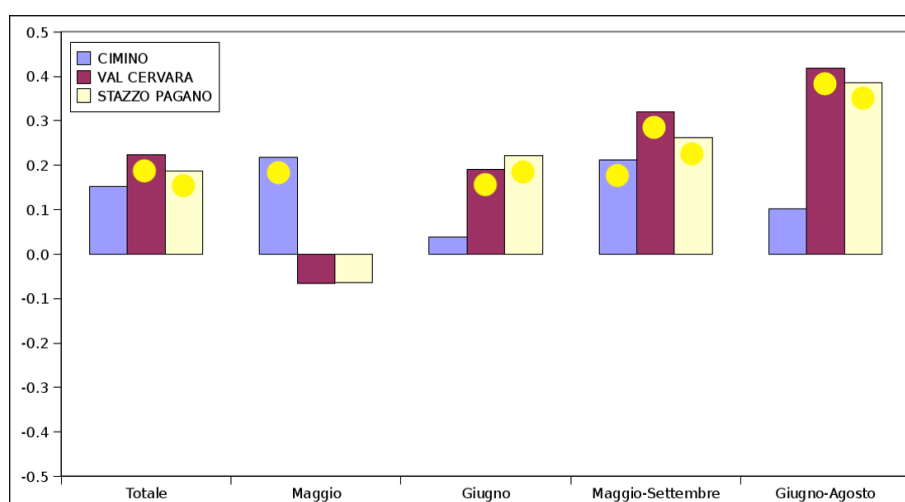


Fig.3.21 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e precipitazioni dell'anno precedente.

Se analizziamo le relazioni tra l'incremento di area basimetrica e le

precipitazioni degli anni precedenti, possiamo osservare dalla (Fig.3.21; 3.22) che esiste nel complesso una correlazione positiva con le precipitazioni dell'anno precedente all'anno di crescita. Se andiamo nel dettaglio possiamo notare come le precipitazioni del periodo estivo dell'anno precedente abbiano una correlazione positiva estremamente significativa per il sito della Valle Cervara ($r = 0.42$, $p < 0.001$) e di Stazzo Pagano ($r = 0.39$, $p < 0.001$). Non è presente invece una correlazione positiva statisticamente significativa per il M.te Cimino, che presenta invece una correlazione con le precipitazioni del periodo maggio – settembre dell'anno precedente ($r = 0.21$, $p < 0.05$). Anche gli altri due siti è presente una correlazione positiva per tale periodo, rispettivamente di 0.32 ($p < 0.001$) per la Valle Cervara e di 0.26 ($p < 0.01$) per il sito di Stazzo Pagano. Se analizziamo le relazioni tra l'incremento di area basimetrica e le precipitazioni dei mesi di giugno e maggio dell'anno precedente, notiamo che mentre i siti della Valle Cervara e di Stazzo Pagano, presentano una correlazione positiva con le precipitazioni del mese di giugno, il sito del M.te Cimino presenta invece una correlazione positiva con il mese di maggio.

In Fig.3.22 possiamo analizzare le relazioni tra le precipitazioni dei due anni precedenti l'anno di crescita. In tal caso possiamo notare come nel sito del M.te Cimino esiste una correlazione negativa con le precipitazioni del periodo estivo ($r = -0.34$, $p < 0.001$), maggio – settembre ($r = -0.25$, $p < 0.01$) e il mese di giugno ($r = -0.24$, $p < 0.01$).

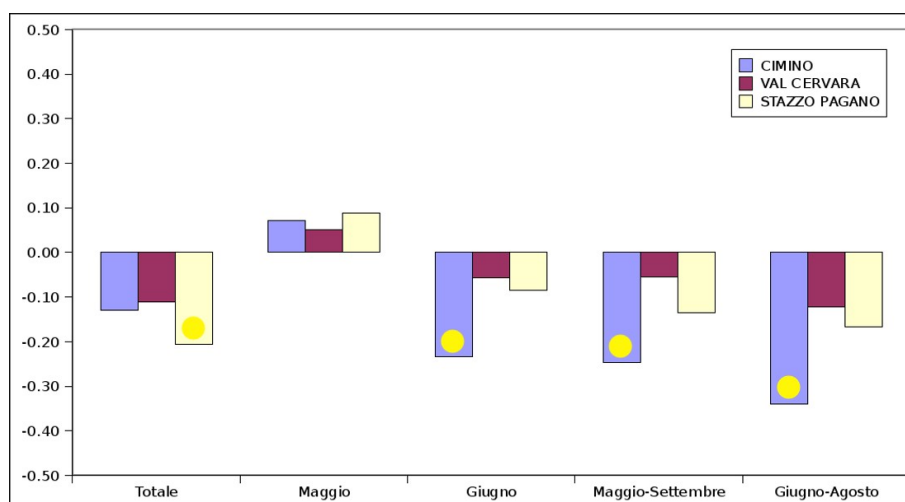


Fig.3.22 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e precipitazioni dei 2 anni precedenti.

Per quanto riguarda invece le relazioni tra l'indice di aridità (scZIND) del

periodo estivo (giugno - agosto) e l'incremento di area basimetrica, esiste una correlazione positiva per tutti e tre siti (Fig.3.23).

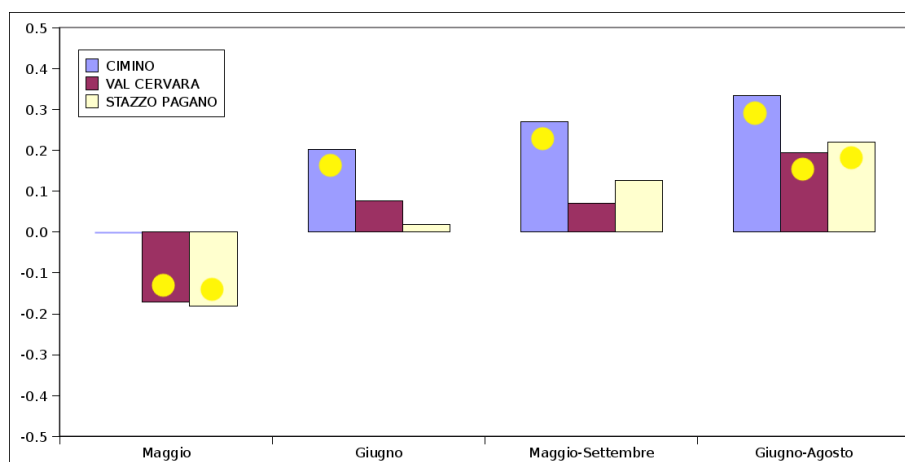


Fig.3.23 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e Z-INDEX.

Nel caso del M.te Cimino la correlazione è estremamente significativa ($p < 0.001$); molto significativa nel sito di Stazzo Pagano ($p < 0.01$) e statisticamente significativa nel sito della Valle Cervara ($p < 0.05$). Va ricordato che nel caso dell'indice di aridità (scZIND), valori decrescenti dell'indice indicano che il sito tende ad avere maggiore aridità, quindi in tal senso una correlazione positiva rispetto all'area basimetrica, sta a significare che al diminuire dell'aridità (ossia all'aumentare dell'indice scZIND), aumenta l'incremento di area basimetrica. Nel caso del sito del M.te Cimino è anche presente una correlazione positiva per il periodo maggio – settembre ($r = 0.27$, $p < 0.01$) e per il mese di giugno ($r = 0.20$, $p < 0.05$). Per il mese di maggio invece non esistono correlazioni statisticamente significative.

In Fig.3.24 possiamo analizzare le relazioni tra l'incremento di area basimetrica e l'indice d'aridità dell'anno precedente. Possiamo notare come esista una forte correlazione positiva soprattutto per i siti della Valle Cervara e di Stazzo Pagano. Nel dettaglio l'aridità del periodo estivo dell'anno precedente è correlata positivamente in maniera estremamente significativa nel sito della Valle Cervara ($r = 0.44$, $p < 0.001$) e di Stazzo Pagano ($r = 0.40$, $p < 0.001$). In entrambi le stazioni è anche presente una correlazione positiva per il periodo maggio – settembre (VCH: $r = 0.38$, $p < 0.001$; STP: $r = 0.32$, $p < 0.001$) e il mese di giugno (VCH: $r = 0.20$, $p < 0.05$; STP: $r = 0.23$, $p < 0.01$). Il sito del M.te Cimino presenta invece una correlazione positiva

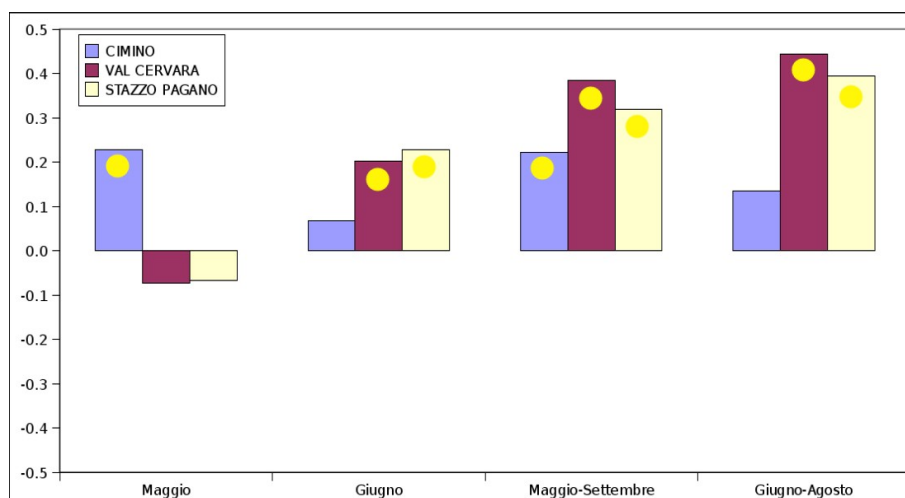


Fig.3.24 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e Z-INDEX dell'anno precedente.

soltanto con il mese di maggio ($r = 0.23$, $p < 0.01$) e il periodo maggio – settembre ($r = 0.22$, $p < 0.05$). Inoltre se consideriamo due anni precedenti l'anno di crescita, nel caso del sito del M.te Cimino è presente una correlazione negativa con l'indice di aridità estiva ($r = -0.34$, $p < 0.001$), del periodo maggio – settembre ($r = -0.29$, $p < 0.001$) e del mese di giugno ($r = -0.25$, $p < 0.01$).

3.6 SEGNALI BASSA FREQUENZA

Al fine di mettere in risalto le relazioni tra l'incremento di area basimetrica e le temperature estive e l'indice di aridità (scPDSI) estive nel lungo periodo (variazioni di bassa frequenza), sono state elaborate delle serie temporali di tali valori mediante delle spline di 50 anni.

Si è limitato il confronto delle serie dagli anni '50 ad oggi. Nel sito del M.te Cimino e della Valle Cervara, esiste un trend positivo nell'incremento di area basimetrica che inizia negli anni '50 e prosegue fino all'anno 1970, per poi assumere un trend negativo fino all'ultimo anno disponibile nella serie di area basimetrica di entrambi i siti (1997 per il sito del M.te Cimino e 2002 per la Valle Cervara). Nella faggeta del M.te Cimino l'incremento di area basimetrica si mantiene a valori più alti rispetto alla faggeta della Valle Cervara, per tutto il periodo considerato (Fig.3.7).

La faggeta di Stazzo Pagano mostra anch'essa un trend complessivo simile a quello delle altre due faggete studiate, con la differenza che la culminazione è posticipata di 10 anni rispetto a quella delle altre due faggete studiate (Fig.3.7).

Se confrontiamo le spline di 50 anni dell'incremento corrente di area basimetrica con le anomalie di temperatura del periodo estivo, possiamo notare che le temperature dei mesi estivi presentano lo stesso andamento dell'incremento di area basimetrica per il sito della faggeta del M.te Cimino e della Valle Cervara (Fig.3.26, 3.28). Entrambi le curve raggiungono il picco nello stesso periodo. Diversamente nel caso della faggeta di Stazzo Pagano, il picco delle temperature anticipa di 10 anni quello relativo all'incremento di area basimetrica (Fig.3.30). Inoltre il decremento della produttività negli ultimi anni è minore rispetto alle altre due faggete.

In relazione all'indice di aridità estiva (scPDSI), notiamo come esso segua lo stesso andamento dell'incremento di area basimetrica sia nel caso della faggeta del M.te Cimino e che della Valle Cervara (Fig.3.25, 3.27). La culminazione dell'indice di aridità e dell'area basimetrica avvengono nello stesso anno, con la differenza che nel caso del sito VCH, l'incremento di area basimetrica posticipa il picco di qualche anno rispetto all'indice di aridità (Fig.3.27).

La faggeta di Stazzo Pagano, presenta invece una culminazione dell'incremento

dell'area basimetrica posticipata di 12 anni rispetto alla culminazione dell'indice di aridità (Fig.3.29).

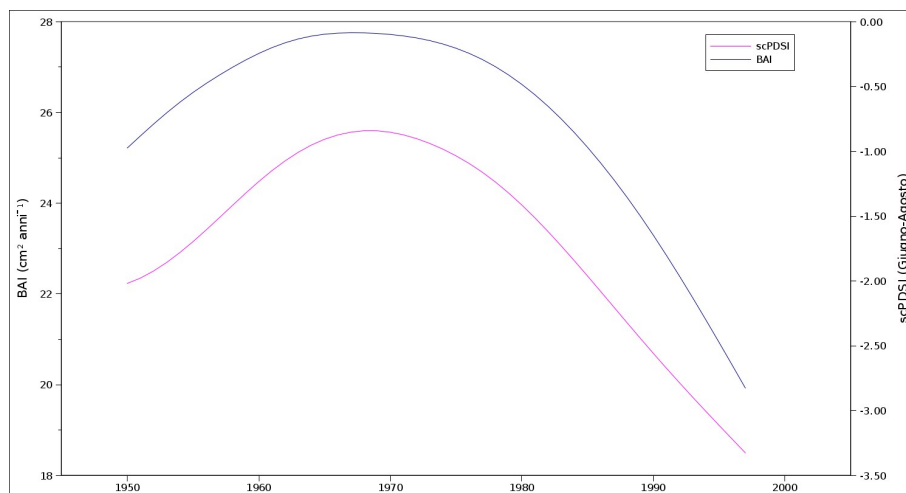


Fig.3.25 – Spline 50 anni, scPDSI – BAI, faggeta del M.te Cimino.

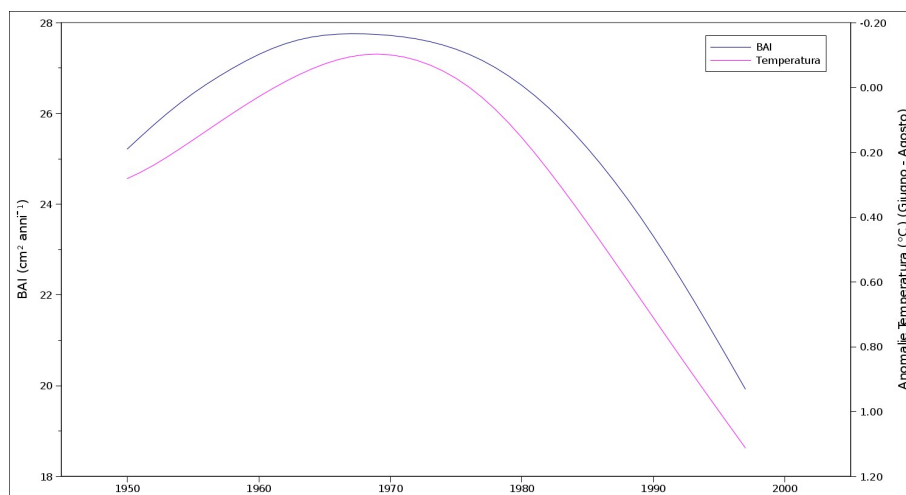


Fig.3.26 – Spline 50 anni, Temperature – BAI, faggeta del M.te Cimino.

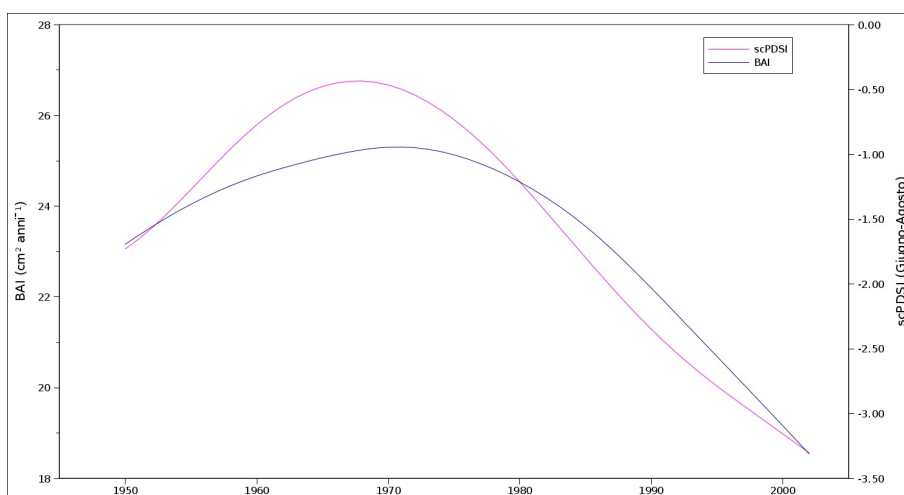


Fig.3.27 – Spline 50 anni, scPDSI – BAI, faggeta della Valle Cervara.

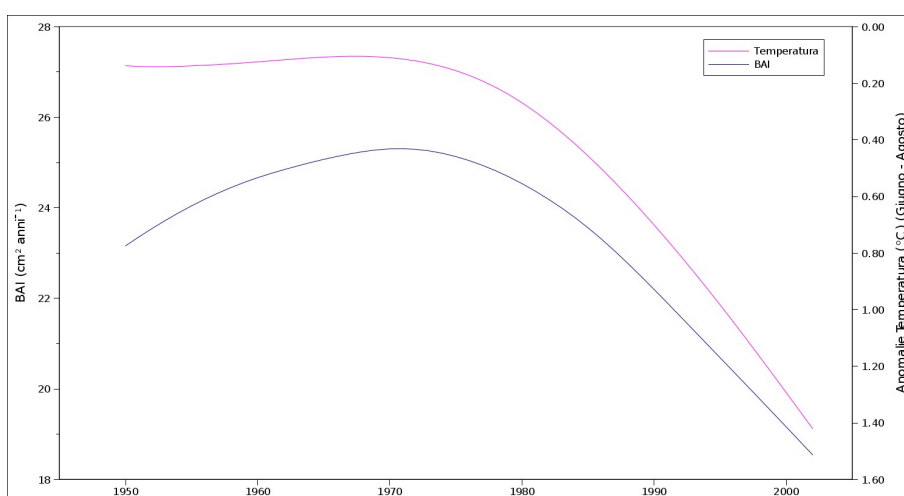


Fig.3.28 – Spline 50 anni, Temperature – BAI, faggeta della Valle Cervara.

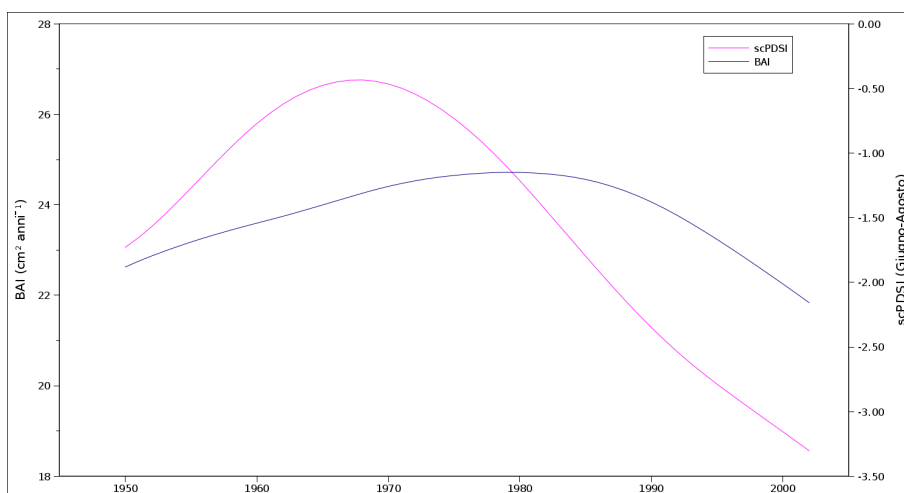


Fig.3.29 – Spline 50 anni, scPDSI – BAI, faggeta di Stazzo Pagano.

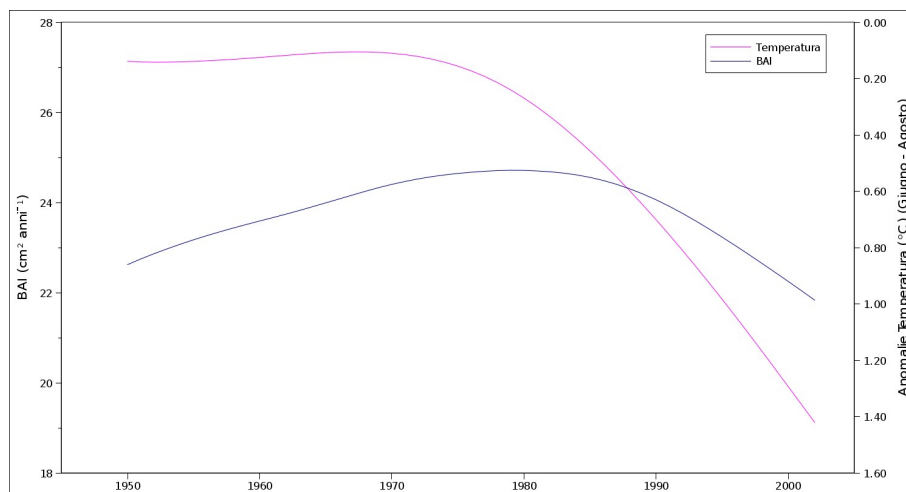


Fig.3.30 – Spline 50 anni, Temperature – BAI, faggeta di Stazzo Pagano.

3.7 PRODUTTIVITA' E INDICE NDVI, FAPAR

L'incremento di area basimetrica è stato messo in relazione oltre che a parametri climatici quali temperatura, precipitazioni e indici di aridità, anche con indici derivati da immagini satellitari, l'NDVI e il FAPAR.

Nel caso della faggeta del M.te Cimino, si è potuto utilizzare solamente il dataset GIMMS NDVI, dato che la serie di area basimetrica per tale sito, ha un'estensione cronologica che si ferma al 1996. Quindi l'estensione temporale del confronto tra le due serie va dal 1982 al 1996, coprendo un periodo di 15 anni.

Anche per gli indici ricavati da immagini satellitari, si sono utilizzati gli stessi periodi di riferimento degli indici climatici, ossia il mese di maggio, giugno, media del periodo estivo (giugno – agosto), media del periodo maggio – settembre, oltre che la media dell'anno.

Non esiste una correlazione statisticamente significativa, tra l'indice NDVI GIMMS e l'incremento di area basimetrica (Fig.3.31). Anche dall'andamento delle serie si può vedere come il trend dell'incremento di area basimetrica non è sincronizzato con l'indice NDVI (Fig.3.32).

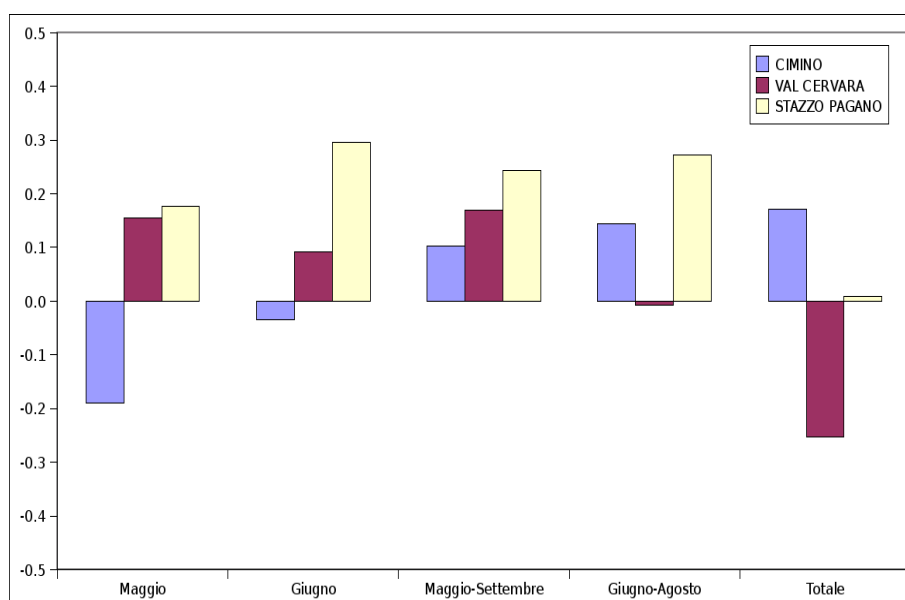


Fig.3.31 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e NDVI GIMMS

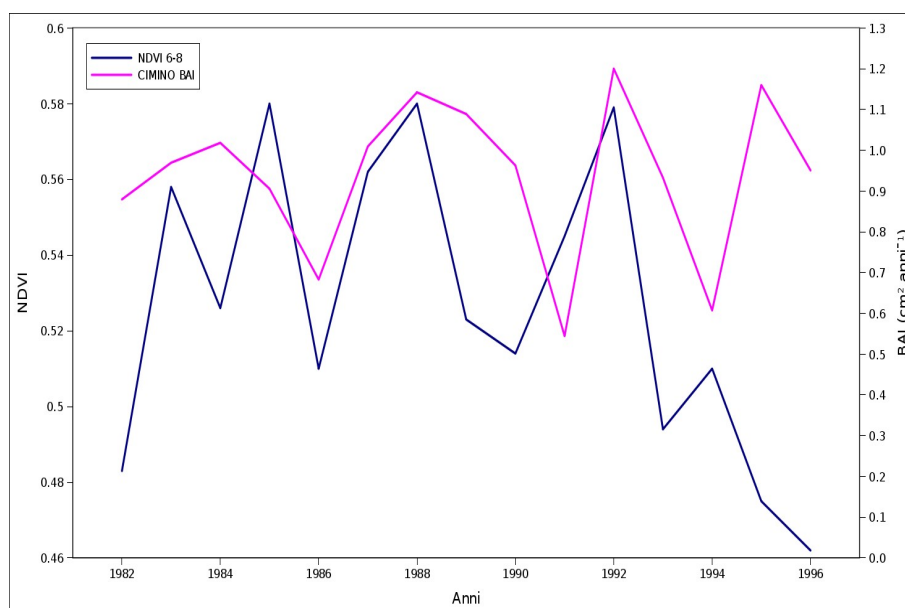


Fig.3.32 – Spline 5 anni, NDVI (giugno-agosto) e BAI. Faggeta del M.te Cimino

Per il sito del M.te Cimino non si sono potute utilizzare le serie dell'indice NDVI derivanti dal dataset VEGETATION dato che la serie copre un periodo successivo al 1998, nel quale non è disponibile la serie d'incremento d'area basimetrica. Anche nel caso dell'indice FAPAR, essendo disponibile tale serie soltanto per il periodo successivo al 1998, non si è potuto utilizzare tale serie.

Per le faggete della Valle Cervara e di Stazzo Pagano si sono invece potuti utilizzare sia le serie NDVI GIMMS che NDVI VEGETATION, che le serie relative all'indice FAPAR.

La serie dell'indice NDVI GIMMS si riferisce ad entrambi le faggete (VCH, STP), dato che esse ricadono all'interno dello stesso pixel (4 km di risoluzione) (Fig.3.9).

Nel caso della faggeta della Valle Cervara non esiste una correlazione significativa tra l'indice NDVI GIMMS e l'incremento di area basimetrica (Fig.3.31).

Il trend dell'indice NDVI del periodo estivo (giugno – agosto), non sembra essere sincronizzato con l'incremento di area basimetrica del periodo 1982 – 2002, anche se possiamo notare come dopo l'anno 1990 le serie sembrano avere una buona sincronizzazione (Fig.3.33)

Nella figura 3.34 possiamo invece vedere l'andamento della serie di area basimetrica relativa alla faggeta di Stazzo Pagano e l'indice NDVI GIMMS, anche in

questo caso, pur essendoci una maggiore correlazione positiva, tale valore non è statisticamente significativo (Fig. 3.31).

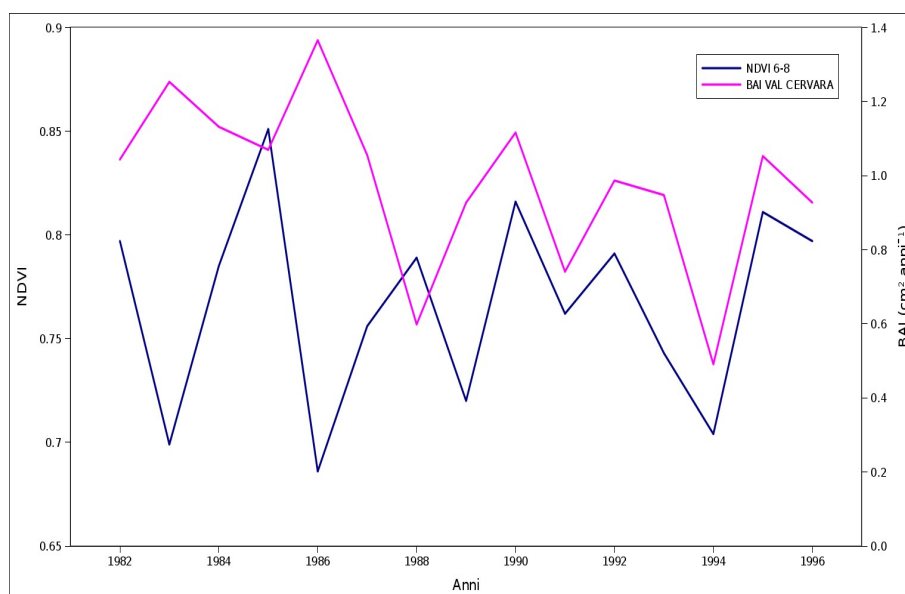


Fig.3.33 – Spline 5 anni, NDVI (giugno-agosto) e BAI. Faggeta della Valle Cervara

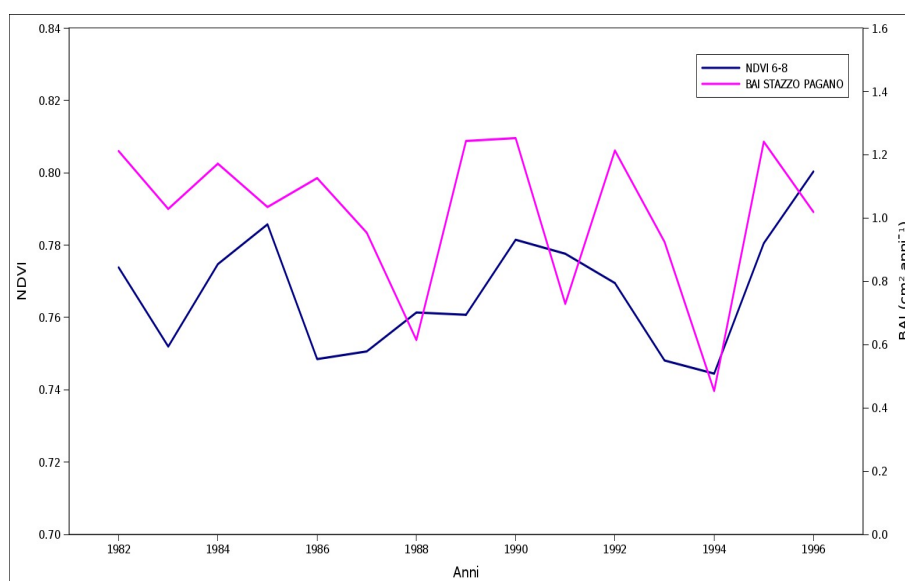


Fig.3.34 – Spline 5 anni, NDVI (giugno-agosto) e BAI. Faggeta di Stazzo Pagano

Le serie d'incremento dell'area basimetrica dei siti VCH e STP, sono state confrontate anche con serie dell'indice NDVI GIMMS relative al periodo 1990 – 2006. L'incremento di area basimetrica relativo alla faggeta della Valle Cervara, è correlato positivamente con l'NDVI GIMMS (1990 – 2006) del periodo estivo (giugno – agosto)

($r = 0.63$, $p < 0.05$) e con il periodo maggio-settembre ($r = 0.55$, $p < 0.05$) (Fig.3.35). Dalla figura 3.33 si può vedere l'andamento del trend delle due serie considerate, e notare come esista una buona sincronizzazione tra l'andamento dell'indice e dell'incremento di area basimetrica, se limitiamo l'osservazione al periodo 1990 – 2006. Non esiste invece una correlazione statisticamente significativa tra per il periodo che maggio – settembre e i mesi di maggio e giugno.

Nel caso della faggeta di Stazzo Pagano l'incremento di area basimetrica mostra una correlazione positiva sia con l'NDVI GIMMS (1990 – 2006) del periodo estivo (giugno – agosto) ($r = 0.63$, $p < 0.01$), che con il periodo maggio – settembre ($r = 0.55$, $p < 0.05$) (Fig.3.35).

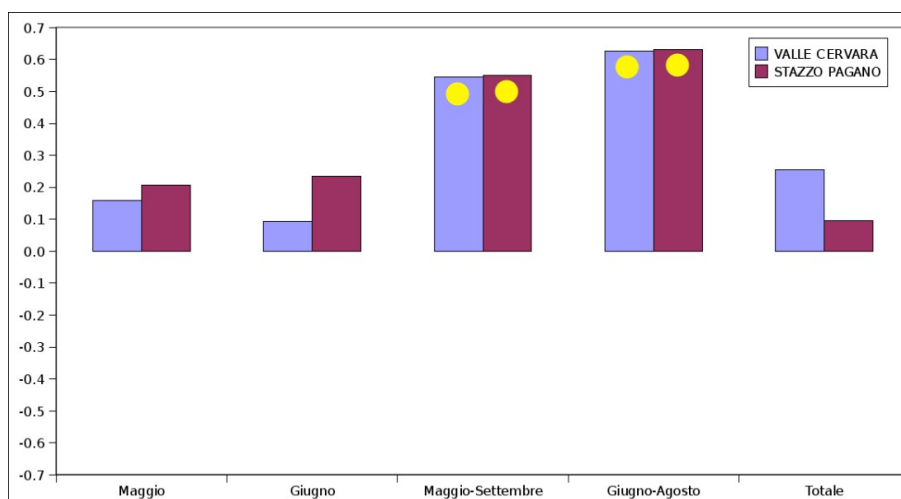


Fig.3.35 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e NDVI GIMMS (1990 - 2006)

Oltre all'indice NDVI derivato dal dataset GIMMS, sono state utilizzate delle immagini di risoluzione maggiore (1km x 1km), anche se dotate di un'estensione temporale minore (dall'anno 1998). Tale immagini derivano dal progetto VEGETATION-SPOT.

Per la faggeta di Stazzo Pagano, si è potuto effettuare un confronto temporale di 10 anni. Pur esistendo una correlazione positiva, essa non è statisticamente significativa (Fig.3.36).

Nel sito della Valle Cervara, il confronto temporale tra incremento di area

basimetrica e NDVI VEGETATION è ulteriormente ridotto a 5 anni. Anche in tal caso pur esistendo una correlazione positiva, essa non è rilevante statisticamente (Fig.3.36).

Per i siti VCH e STP si sono effettuati anche dei confronti con l'indice FAPAR, che misura la frazione della radiazione solare assorbita dalla pianta. In figura 3.37 si può vedere il confronto tra l'indice FAPAR del periodo 1998 – 2002, relativo al mese di giugno con l'incremento di area basimetrica relativo alla stazione della Valle Cervara.

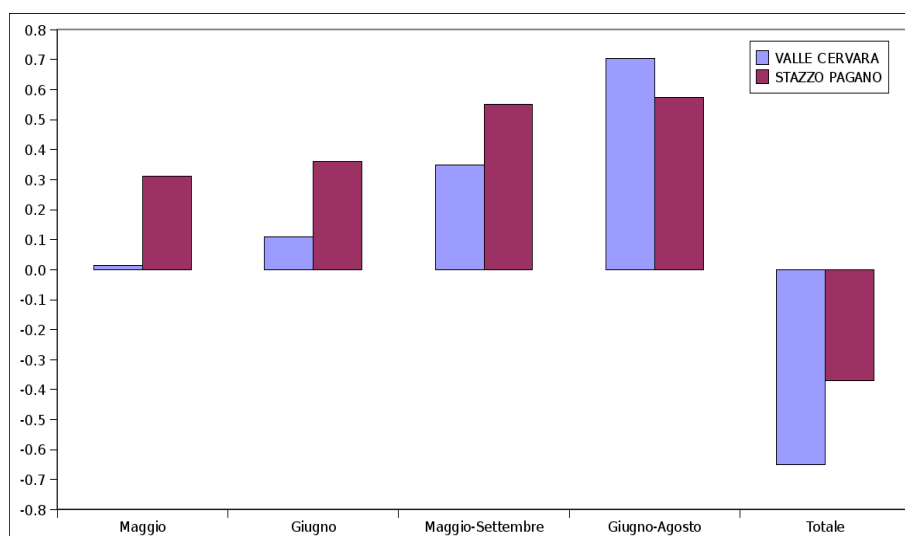


Fig.3.36 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e NDVI VEGETATION

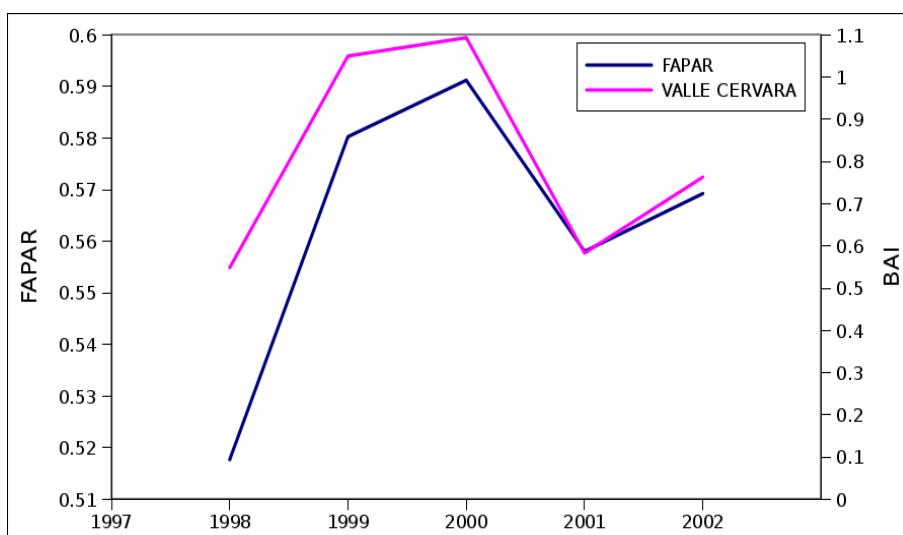


Fig.3.37 – Indice FAPAR e incremento di area basimetrica relativo al sito della Valle Cervara.

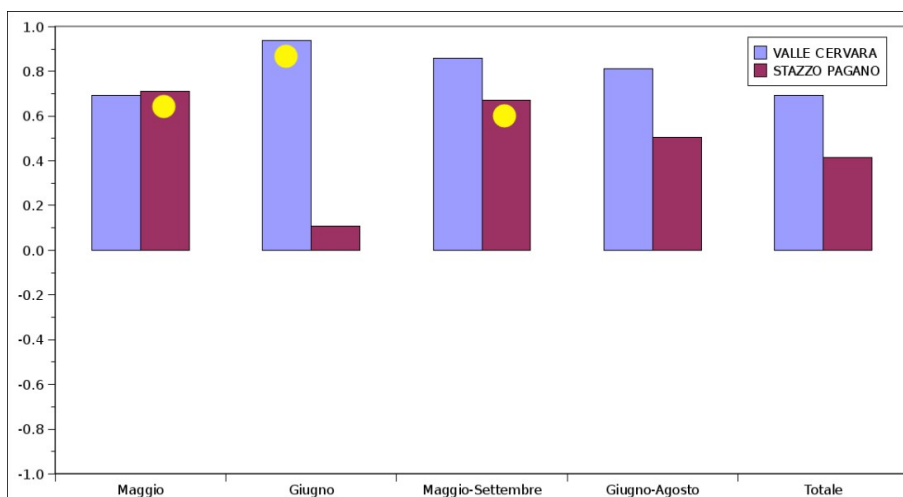


Fig.3.38 – Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione, relative al confronto tra incremento di area basimetrica e indice FAPAR

Esiste una correlazione positiva tra l'indice e l'incremento di area basimetrica ($r = 0.94$, $p < 0.05$), anche se il periodo di confronto è limitato a 5 anni, avendo la serie di area basimetrica un'estensione temporale limitata all'anno 2002. Per l'indice FAPAR relativo al periodo estivo, pur esistendo una correlazione positiva, essa non è statisticamente significativa (Fig.3.38).

Nella faggeta di Stazzo Pagano, si è potuto invece analizzare un intervallo temporale maggiore, che va dal 1998 – 2005. Esiste una correlazione positiva tra l'incremento di area basimetrica e l'indice FAPAR relativo al mese di maggio ($r = 0.71$,

$p < 0.05$). Non esistono correlazioni statisticamente significative per gli altri periodi considerati (Fig.3.38).

4.DISCUSSIONE e CONCLUSIONI

Dallo studio emerge chiaramente che negli ultimi 30 anni la produttività delle tre faggete studiate è notevolmente diminuita, come è testimoniato dal trend negativo dell'incremento di area basimetrica.

Le spline di 50 anni evidenziano come vi sia un aumento dell'incremento di area basimetrica dagli anni '50 agli anni '70. La culminazione dell'incremento si verifica negli anni '70, ed è seguita da una marcata riduzione della produttività, nei decenni seguiti fino ad oggi. L'indice scPDSI segue lo stesso andamento dell'incremento di area basimetrica, nella faggeta del M.te Cimino e della Valle Cervara, e in quest'ultimo caso va detto che la culminazione dell'incremento di area basimetrica è posticipato in realtà di qualche anno. La faggeta di Stazzo Pagano, mostra invece una culminazione dell'incremento di area basimetrica, posticipato rispetto il scPDSI di un decennio.

Nel caso della faggeta del M.te Cimino la variazione dell'incremento di area basimetrica, è determinata principalmente dall'aridità dei mesi estivi, misurata mediante l'indice di aridità Z-INDEX.

Nel caso della faggeta della Val Cervara, il fattore principale sembra essere la temperatura del mese di maggio, mentre l'aridità estiva non sembra essere determinante come nel caso della faggeta del M.te Cimino. La sensibilità alle temperature del mese di maggio può essere spiegata dalla sensibilità alle gelate tardive dei boschi situati a quote elevate (Piovesan et al., 2003).

La variabilità dell'incremento di area basimetrica della faggeta di Stazzo Pagano, è spiegata in particolare dall'aridità durante il periodo di crescita dell'anno precedente. Questo fattore sembra inoltre essere il segnale comune che influenza la produttività anche delle altre faggete.

L'esistenza di una correlazione negativa, tra l'incremento di area basimetrica e l'aridità estiva di due anni precedenti, può essere dovuta all'interazione con i processi fiorali e di fruttificazione (annate di pasciona). Fattori che agiscono nella mobilitazione delle sostanze di riserva delle piante e che quindi influenzano la produttività anche negli

anni successivi (Piovesan & Adams, 2001; Richardson et al., 2005; Di Filippo et al., 2007).

Le precipitazioni estive dell'anno di crescita sono un segnale comune che influenza la produttività delle faggete studiate. La causa di ciò è molto probabilmente correlata all'effetto che tale fattore esercita sull'aridità estiva.

Le precipitazioni del periodo vegetativo (maggio – settembre), dell'anno precedente l'anno di crescita, presentano una correlazione positiva in tutte e tre i siti, agendo come segnale comune nei confronti della produttività. Anche in questo caso, è possibile ipotizzare che il loro effetto agisca come azione indiretta, mediante lo stress idrico.

La correlazione negativa delle precipitazioni dei due anni precedenti l'anno di crescita, può essere spiegata come fattore che agisce sui processi fiorali e di fruttificazione, e conseguentemente sulle variazioni dell'incremento di area basimetrica.

Nel lungo periodo tutti e tre i siti presentano una correlazione con le temperature e l'aridità dei mesi estivi. Nel dettaglio possiamo affermare che la riduzione di produttività che si manifesta negli ultimi 30 anni nelle tre faggete studiate, è influenzata maggiormente dalle temperature del periodo estivo. Le precipitazioni invece non sembrano avere un'importanza nella variazioni di lungo periodo della produttività.

Riguardo le temperature estive, possiamo ipotizzare che l'effetto che esse hanno nell'aumento dell'aridità estiva, non compensi di fatto l'effetto positivo sull'incremento di area basimetrica.

Vari autori riportano che l'attuale riscaldamento globale, possa avere effetti negativi sulla produttività dei biomi forestali mediterranei, dato che l'effetto che l'allungamento della stagione vegetativa non compensa la perdita di produttività causata dall'aumento dell'aridità estiva (Angert et al., 2005, Jump et al., 2006).

In un quadro generale quindi l'elemento principale che controlla la produttività nel breve e lungo periodo, sembra essere di fatto l'aridità estiva. Nel caso delle faggete studiate della Valle Cervara e di Stazzo Pagano, trovandosi in una fascia prossima al limite della vegetazione, possono essere considerate maggiormente vulnerabili, ai cambiamenti climatici, dato che il peggioramento dello stato fitosanitario come conseguenza dell'aumento dell'aridità e delle temperature, può causare un notevole decremento della produttività (defogliazione), oltre che arretramento del limite della

vegetazione (Peñuelas, 2003).

L'utilizzo di indici derivati da immagini satellitari, quali NDVI e FAPAR, che misurano indirettamente la produttività dei biomi forestali mediante la stima della fotosintesi, sono stati utilizzati nel presente studio per comprendere se potessero esistere delle correlazioni la produttività. La problematica relativa alla scarsa estensione temporale di tali serie di dati, non ha permesso un confronto nel lungo periodo, con l'incremento di area basimetrica e dei parametri climatici utilizzati nello studio, quali temperatura, precipitazioni e indice di aridità. L'indice NDVI ricavato dal dataset GIMMS, pure avendo un'estensione temporale consistente (dall'anno 1981), non si è mostrato adatto all'analisi di nuclei di bosco, molto probabilmente come conseguenza della scarsa risoluzione delle immagini. Da segnalare comunque il fatto che se si considera soltanto la seconda frazione temporale del dataset (1990 – 2006), sia la faggeta della Valle Cervara che di Stazzo Pagano, presentano sia una correlazione significativa con l'NDVI del periodo vegetativo che in particolar modo con l'NDVI estivo. E' necessario un approfondimento sull'argomento per comprendere le cause che portano risultati diversi a seconda dell'estensione temporale nell'utilizzo del dataset.

Nell'utilizzo dell'indice NDVI VEGETATION, si può constatare che non esiste nessuna correlazione statisticamente significativa, essendo l'estensione temporale nella quale vengono confrontati i dati estremamente ridotta. Infatti pur presentando l'indice dei valori di correlazione elevati, non sono statisticamente significativi, data la ridotta numerosità del campione (Wang, 2004).

L'indice FAPAR invece pure presentando anch'esso una breve estensione temporale, ha una correlazione significativa con maggio, giugno e il periodo vegetativo. Tale indice si è dimostrato molto valido nella stima della produttività delle faggete studiate.

Nel quadro complessivo dell'analisi, appare chiaro che il riscaldamento climatico che sta manifestandosi negli ultimi decenni, stia causando direttamente mediante l'aumento dello stress idrico e delle temperature, in particolare del periodo estivo, una riduzione della produttività, nelle faggete vetuste studiate. I siti studiati rientrando nella tipologia dei boschi vetusti, rappresentano un modello reale attraverso il quale studiare le variazioni di produttività causate dai cambiamenti climatici presenti e futuri, dato che presentano delle dinamiche regolate dai cicli naturali.

Nel quadro delle variazioni climatiche bisogna considerare che l'aumento delle temperature che si sta manifestando, pur causando un allungamento del periodo vegetativo, l'effetto della siccità estiva ha un effetto negativo sulla produttività della cenosi (Lausi, 1972).

5.BIBLIOGRAFIA

- Angert A, Biraud S, Bonfils C et al. (2005) Drier summers cancel out the CO₂ uptake enhancement induced by warmer springs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 10823–10827.
- Aniol RW (1983) Tree-ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia*, 1: 45-53.
- Biondi F (1996) Decadal-scale dynamics at the Gus Pearson Natural Area: evidence for inverse (a)symmetric competition? *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1397–1406.
- Biondi F (1999) Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecological Applications*, 9, 216–227.
- Boisvenue C, Running SW (2006) Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12, 862–882.
- Brunetti M, Maugeri M, Monti F, Nanni T (2006) Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26, 345–381.
- Ciais Ph. et al (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**, 529-533
- Clark D. B., Abolishing virginity. *Jour. Trop. Ecol.*, 12: 735-739. 1996.
- Cook ER, Kairiukstis LA (1990) *Methods of dendrochronology - Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers.

- D'Arrigo R et al (2000) Correlation between maximum latewood density of annual tree rings and NDVI based estimates of forest productivity, *Int. J. Remote Sens.*, 21, 2329– 2336.
- Di Filippo A, Piovesan G, Schirone B (2005) Le foreste vetuste: criteri per l'identificazione e la gestione. Atti del XIV Congresso Nazionale della Societa' Italiana di Ecologia, 4–6 Ottobre 2004, Siena. In: Carlo Gaggi, Valentina Nicolardi e Stefania Santoni (editori), *Ecologia. Atti del XIV Congresso Nazionale della Societa' Italiana di Ecologia*, 4–6 Ottobre 2004, Siena. <http://www.xivcongresso.societaitalianaecologia.org/articles/Di-Filippo-61.pdf>
- Di Filippo A, Biondi F, Cufar K et al. (2007) Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring net work. *Journal of Biogeography*, doi: 10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x.
- Hogg EH, Brandt JP, Kochtubajda B (2005) Factors affecting interannual variation in growth of western Canadian aspen forests during 1951–2000. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 610–622.
- Jump AS, Hunt JM, Pen˜ uelas J (2006) Rapid climate changerelated growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12, 2163–2174.
- Jung M., Verstraete M., Gobron N., Reichstein M., Papale D., Bondeau A., Robustelli M. and Pinty B. (2008) 'Diagnostic assessment of European gross primary production', *Global Change Biology*, Volume 14, Pages 1–16, d oi:10.1111/j.1365-2486.2008.01647.x.
- Lausi D, Pignatti S (1972) Die phaˆnologie der europaˆischen buchenwaˆlder auf pflanzensoziologischer grundlage. *Phytocoenologia*, 1, 1–63.

- Mennella C (1967) Il Clima d'Italia, Vol. primo. Fratelli Conte Editori, Napoli.
- Mennella C (1972) Il Clima d'Italia, Vol. secondo. Fratelli Conte Editori, Napoli.
- Mennella C (1973) Il Clima d'Italia, Vol. terzo. Fratelli Conte Editori, Napoli.
- Kaufmann RK, D'Arrigo RD, Laskowski C, Myneni RB, Zhou L and Davi NK (2004)
The effect of growing season and summer greenness on northern forests,
Geophys. Res. Lett., 31, L09205, doi:10.1029/2004GL019608.
- Kidwell KB (1998) Polar Orbiter Data Users' Guide (Tiros-N, NOAA-6, NOAA-7,
NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-14),
National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/>.
- Nakawatase JM, Peterson DL (2006) Spatial variability in forest growth–climate
relationships in the Olympic Mountains, Washington. Canadian Journal of Forest
Research, 36, 77–91.
- Palmer WC (1965) Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Weather
Bureau. NOAA Library and Information Services Division, Washington, DC.
- Peñuelas Josep, Boada, Martí (2003) A global change-induced biome shift in the
Montseny mountains (NE Spain) Global Change Biology, Volume 9, Number 2,
February 2003 , pp. 131-140(10)
- Peterken G. F., Natural woodland – Ecology and conservation in northern temperate
regions. Cambridge, Cambridge University press. 1996.
- Pinion J, Brown ME and Tucker CJ (2003) "Nonparametric Satellite Drift Correction of
NDVI Time Series from NOAA-AVHRR Radiometers Using the Empirical
Mode Decomposition." IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing

- Piovesan G (1997) Analisi di problemi assestamentali nella foresta montana dell'Appennino Centrale. Tesi di dottorato. Facoltà di Agraria. Viterbo.
- Piovesan G, Adams JM (2001) Masting behaviour in beech: linking reproduction and climatic variation. *Canadian Journal of Botany*, 79, 1039–1047.
- Piovesan G, Bernabei M, Di Filippo A et al. (2003) A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old growth forest of Central Italy. *Dendrochronologia*, 21, 13–22.
- Piovesan G, Di Filippo A, Alessandrini A et al. (2005a) Structure, dynamics and dendroecology of an old growth *Fagus* forest in the Apennines. *Journal of Vegetation Science*, 16, 13–28.
- Richardson SJ, Allen RB, Whitehead D et al. (2005) Climate and net carbon availability determine temporal patterns of seed production by *Nothofagus*. *Ecology*, 86, 972–981.
- Rouse JW, Haas Jr. RH, Schell JA and Deering DW (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. p. 309–317. *In* Proc. ERTS-1 Symp., 3rd, Greenbelt, MD. 10–15 Dec. 1973. Vol. 1. NASA SP-351. NASA, Washington, DC.
- van der Werf Guido R., Randerson James T., Giglio L., Gobron N. & Dolman A.J. (Han) (2008) 'Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics', *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB3028, doi:10.1029/2007GB003122.
- Vermote E, El Saleous N, Kaufman RK and Dutton E (1997) "Data Pre-Processing: Stratospheric Aerosol Perturbing Effect on the Remote Sensing of

Vegetation: Correction Method for the Composite NDVI after the Pinatubo Eruption." Remote Sensing Reviews 15: 7-21.

Wang J, Rich P.M., Price K.P.; Kettle W.D. (2004) Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains. International Journal of Remote Sensing, Volume 25, Number 16, 2004 , pp. 3127-3138(12)

Wells N, Goddard S, Hayes MJ (2004) A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. Journal of Climate, 17, 2335–2351.