

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse (DISAFRI)

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA

Ecologia Forestale XXIII Ciclo

La risposta della produttività primaria al clima ed ai suoi cambiamenti: un'analisi modellistica per alcune tipologie forestali italiane

(AGR/05)

Coordinatore: Prof. Paolo De Angelis¹

Tutor: Dott. Giorgio Matteucci²

Co-Tutor: Dott. Marcello Vitale³

Co-Tutor: Dott. Fabio Francesconi⁴

Dottorando: Marco Mancini

¹ Università della Tuscia, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse (DISAFRI)

² CNR Area di Ricerca Roma1Dipartimento Terra e Ambiente, Istituto di Biologia Agro-Ambientale e Forestale (IBAF)

³ Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Biologia Ambientale, Laboratorio di Modellistica Ambientale

⁴ Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Biologia Ambientale, Laboratorio di Tecniche Informatiche per la Vegetazione e l'Ambiente (TIVA)

INDICE

1 - <u>Introduzione</u>	Pagina 1
1.1 - <i>Fattori che influenzano il clima</i>	pag.2
1.2 - <i>Effetto del cambiamento climatico sulla distribuzione delle specie forestali</i>	pag.10
1.3 - <i>Le foreste come serbatoio (sink) di carbonio</i>	pag.11
1.4 - <i>L'uso dei modelli di processo nella comprensione del ciclo del carbonio negli ecosistemi forestali</i>	pag.14
1.5 - <i>Scenari climatici passati, presenti e futuri</i>	pag.14
1.6 - <i>I fattori ambientali</i>	pag.16
2 - <u>Scopo del Lavoro</u>	Pagina 19
3 - <u>Materiale & Metodi</u>	Pagina 22
3.1 – Il Dato Climatico	pag.22
3.1.1 - <i>Database 1961 – 1990 del WMO</i>	pag.25
3.1.2 – <i>Gli Scenari Climatici</i>	pag.28
3.2 - <i>Le specie considerate: Fagus sylvatica, Quercus cerris, Quercus ilex</i>	pag.31
3.3 – Il Dato Forestale	pag.36
3.4 – La Matrice di Frammentazione	pag.43
3.5 – La Modellistica della Produzione Primaria Netta	pag.45
3.5.1 – <i>Mo.C.A. (Modelling of Carbon Assessment)</i>	pag.47
3.5.2 – <i>Efficienza nell'uso della risorsa idrica</i>	pag.55
3.5.3 - <i>La validazione del Modello</i>	pag.56

4 - Risultati & Discussione

Pagina 57

4.1 - Carte della Produzione Primaria Netta	pag.58
4.2 - Analisi quantitativa delle carte e considerazioni ecologiche	pag.70
4.3 - Cambiamento della Produzione Primaria Netta	pag.79
4.4 - Considerazioni ecologiche sulla dinamica e la fisiologia delle specie	pag.89
4.5 - Il comportamento eco-fisiologico delle tre specie lungo il gradiente latitudinale della penisola italiana	pag.91
4.6 - Validazione delle stime di Mo.C.A.	pag.97

5 – Conclusioni

Pagina 99

6 - Bibliografia

1 - INTRODUZIONE

Il destino delle foreste europee e non, è legato in modo imprescindibile da come esse saranno in grado di rispondere al cambiamento climatico in atto.

Non a caso, quindi, questo è un tema che negli ultimi anni ha ricevuto e sta ricevendo molte attenzioni da parte del mondo scientifico.

La composizione specifica, la produttività e la vulnerabilità degli ecosistemi forestali sono stati modificati nel corso degli ultimi decenni dall'azione antropica, che ha alterato i normali meccanismi di avvicendamento successionale. A questa azione si è sovrapposta quella determinata dalla variazione dei fenomeni meteorologici che definiscono e caratterizzano il clima per una data regione; è importante notare che il cambiamento climatico regionale e globale, nelle loro diverse componenti, e modificazioni sono destinati ad accentuarsi nel prossimo secolo, secondo quanto riportato nell'ultimo rapporto IPCC (2007). Per il 2100 si prevede una concentrazione di CO₂ compresa tra 540 e 970 mmol mol⁻¹, a seconda delle assunzioni sulla crescita economica, i progressi tecnologici ed il sequestro del carbonio attraverso i processi biologici (Houghton et al., 2001).

Gli ecosistemi forestali svolgono un ruolo centrale nel ciclo del carbonio (C) a livello globale, oltre a costituire il principale serbatoio di C della biosfera. Le foreste naturali rappresentano anche un importante accumulatore netto (*sink*), contribuendo così a mitigare l'aumento di CO₂ nell'atmosfera ed il conseguente aumento dell'effetto serra.

A tal proposito un recente studio (Janssens et al., 2003) ha stimato che in Europa gli ecosistemi terrestri (soprattutto quelli forestali) assorbono tra il 7% ed il 12% delle emissioni di origine antropica. Resta da chiarire quale sarà la risposta delle foreste ai cambiamenti climatici in atto, ed in particolare all'aumento di CO₂ atmosferica e di temperatura nonché alle modifiche del regime idrico.

L'esatta quantificazione del carbonio stoccato (*stock*) e soprattutto della capacità di assorbimento nelle formazioni vegetali, ha assunto un interesse crescente alla luce del protocollo di Kyoto e delle intese che a questo sono seguite (Costa & La Mantia, 2005).

La definizione degli stock e degli incrementi di C rappresenta infatti, una delle priorità della ricerca (Magnani & Borghetti 1998; Borghetti et al., 2001). La quantificazione del C trattenuto dalla vegetazione è resa problematica, a causa dell'alta eterogeneità delle formazioni, ma anche dalla mancanza di dati sulle specie che le compongono nonché di dati inventariali.

1.1 - Fattori che influenzano il clima

La maggiore sorgente di energia del sistema climatico terrestre è la radiazione solare che raggiunge l'atmosfera. Essa è principalmente assorbita dalla superficie terrestre, dove è distribuita tra oceano, atmosfera, suolo e biosfera; deve essere bilanciata dalla quantità di energia ri-emessa, sotto forma di radiazione terrestre verso lo spazio. Se così non fosse, il clima della terra non sarebbe stabile (Oort & Peixoto 1992).

Un qualsiasi fattore in grado di alterare la quantità di energia che la Terra riceve come radiazione solare o la quantità di energia che essa emette come radiazione termica, può alterare il bilancio termico e, pertanto, influenzare drasticamente il clima del pianeta.

Questi fattori possono essere di diversa natura:

- ❖ fattori astronomici, i quali influenzano la quantità di radiazione solare che giunge alla Terra;
- ❖ cambiamenti di concentrazione nell'atmosfera dei gas in grado di assorbire la radiazione terrestre (gas serra);
- ❖ processi di variabilità interna del sistema climatico.

I dati resi disponibili dalle ricerche di paleo-climatologia indicano che, nel passato, cambiamenti dei parametri orbitali o della concentrazione dei gas dell'atmosfera hanno causato cambiamenti anche drammatici nelle caratteristiche climatiche della Terra. La lenta variazione dei parametri orbitali terrestri, le cui oscillazioni hanno scale temporali di migliaia di anni, ha prodotto fluttuazioni nel bilancio radiativo terrestre, modificando la quantità di radiazione che dal Sole raggiunge la Terra. Come risultato, queste variazioni hanno contribuito all'alternarsi delle ere glaciali e dei periodi interglaciali che hanno caratterizzato la storia del clima terrestre.

I gas serra più importanti, quelli cioè che hanno il maggior impatto sul bilancio radiativo della Terra, sono: il vapor acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4), il biossido di azoto (N_2O) e l'ozono (O_3) troposferico. Un'altra proprietà dei gas serra, e specialmente della CO_2 , è rappresentata dai loro lunghi tempi di permanenza nell'atmosfera terrestre.

Una volta emessi in atmosfera essi possono permanervi per secoli, avendo così un impatto che si protrae a lungo sul bilancio radiativo.

Cambiamenti climatici a lungo termine possono essere indotti da processi di variabilità interna al sistema climatico, come ad esempio le variazioni nella circolazione oceanica profonda e nella

distribuzione dei ghiacci marini, l'alterazione della concentrazione dei gas serra nell'atmosfera, dovuta al grande consumo di combustibili fossili.

L'immissione nell'atmosfera di grandi quantità di gas serra, può produrre significative alterazioni dell'equilibrio radiativo, che, a sua volta, può indurre cambiamenti nel clima terrestre che si sovrappongono alle variazioni dovute a cause naturali.

A scala più vasta, l'alterazione del ciclo globale del carbonio ad opera delle attività umane, è stata incrementata dal consumo dei combustibili fossili a partire dall'inizio della rivoluzione industriale.

Il tasso di accumulo attuale della CO₂ atmosferica a seguito dell'utilizzo dei combustibili fossili è senza precedenti nel corso degli ultimi 2000 anni (Houghton et al., 2001) e probabilmente nei prossimi 100 anni la concentrazione potrebbe raddoppiare (Keeling & Whorf, 2005). A causa della forzatura radiativa positiva dovuta all'elevata concentrazione di CO₂ atmosferica, le previsioni di aumento della temperatura globale entro la fine del XXI secolo spaziano tra 1 e 6 °C, a seconda dei diversi scenari di proiezione (Houghton et al., 2001; IPCC, 2007b).

Un notevole fattore limitante della scienza del clima rispetto ad altre discipline scientifiche, è la difficoltà ad eseguire esperimenti. Il nostro pianeta è il nostro solo esperimento possibile, quindi per verificare le ipotesi e le teorie, è essenziale ricorrere all'uso di modelli numerici, basati sulla rappresentazione matematica dei processi fisici e chimici dell'atmosfera e delle interazioni che riteniamo essere attive nel sistema climatico (Gualdi & Navarra, 2005).

I modelli contengono l'essenza della conoscenza del sistema climatico e ne sono la miglior rappresentazione a nostra disposizione. Essi rappresentano, quindi, il miglior strumento di cui disponiamo attualmente per indagare i meccanismi che governano il clima e per cercare di prevederne il comportamento. L'efficienza dei modelli nel riprodurre le caratteristiche del clima terrestre è attentamente verificata mediante il confronto dei risultati che essi riproducono con le osservazioni dirette dell'atmosfera e degli oceani.

Negli ultimi decenni sono stati compiuti considerevoli progressi nel campo dell'analisi numerica ed attualmente i principali centri di ricerca europei e non, dispongono di modelli numerici in grado di riprodurre le principali caratteristiche del clima e della sua variabilità (AchutaRao et al. 2002; Flato et al. 2004, Meehl et al. 2004).

La complessità del sistema climatico e le limitate possibilità di eseguire esperimenti rendono difficile l'approccio scientifico classico. In conseguenza di ciò, a volte, può risultare difficile separare i fatti dalle opinioni. Almeno due sono i fatti inconfutabili che rendono attendibile l'ipotesi sull'attuale situazione climatica globale: la concentrazione di CO₂ è costantemente aumentata nel corso degli ultimi 50 anni dalle 315 parti per milione (ppm) alle 370 ppm misurati alla fine del secolo scorso; oggi c'è unanime consenso nella comunità scientifica, riguardo il progressivo

aumento della temperatura globale del pianeta, al termine però di una lunga discussione (scientifica e non) che è durata decenni.

Un periodo strumentale lungo (più di 100 anni) da consentire una chiara identificazione di una costante tendenza di crescita della temperatura media globale del pianeta, identifica questo *trend* per il periodo 1861-2004, dove risulta chiara un'evidente crescita della temperatura superficiale della Terra. La tendenza alla crescita delle temperature superficiali terrestri denunciata dai dati raccolti dall'*Hadley Centre*, è oggi confermata anche da osservazioni indipendenti della temperatura troposferica effettuate dai satelliti (Vinnikov & Grody 2003). I dati a nostra disposizione indicano chiaramente che la Terra si sta scaldando.

La regione del bacino del Mediterraneo è una regione dall'equilibrio climatico delicato e molto sensibile alle perturbazioni. Essa, infatti, si trova nella zona di transizione tra due regimi climatici differenti tra loro. Il “*clima Mediterraneo*” è il risultato di un delicato equilibrio fra le regioni a regime climatico tropicale a sud, caratterizzate dai regimi monsonici e dalle celle di circolazione meridionale (cella di *Hadley*), e le regioni delle “medie latitudini” a nord.

L'estate 2003 è passata alla storia come una delle più calde e siccitose mai registrate nel centro-sud Europa. Le possibili interazioni tra questo evento climatico estremo e la risposta degli ecosistemi europei è stato oggetto di un'attività di modellizzazione in una recente ricerca (Ciais et al., 2005).

I flussi di CO₂ raccolti nel 2003 (tramite la tecnica denominata *eddy covariance*) in 14 ecosistemi forestali nel centro-sud Europa hanno evidenziato una generalizzata riduzione, rispetto agli anni precedenti, sia della produttività primaria lorda (GPP – *Gross Primary Production*) che, in misura minore, della respirazione ecosistemica (TER – *Total Ecosystem Respiration*). Conseguentemente, l'accumulo netto di CO₂ (NEE – *Net Ecosystem Exchange*) è diminuito quasi ovunque, anche se in modo meno accentuato negli ecosistemi mediterranei a causa della forte riduzione della respirazione.

Questi risultati, integrati con i dati di radiazione solare assorbita dalle piante (misurati da satellite) e di produttività agraria (provenienti dagli inventari nazionali), sono stati inseriti in un modello di simulazione per stimare le variazioni di produttività primaria nel corso del 2003 a livello continentale. Da tale analisi è emerso che, con un calo del 30% della GPP (principalmente causato dalla siccità ed in misura secondaria dalle alte temperature), il 2003 è stato l'anno meno produttivo dell'ultimo secolo in Europa. Una diminuzione così forte della produttività primaria ha provocato, a livello annuale, un anomalo rilascio netto di CO₂ verso l'atmosfera, pari a quattro anni di accumulo netto medio. Gli autori sottolineano che questa è solo un'analisi parziale: è probabile che altri effetti si manifestino negli anni successivi all'evento climatico estremo, e che quindi solo tra qualche anno si potrà avere un quadro completo. Quest'analisi indica chiaramente che eventi climatici estremi

come quelli del 2003 sono capaci di alterare per lunghi periodi il bilancio del carbonio di un intero continente.

Ad ulteriore conferma dei catastrofici effetti provocati dall'ondata di caldo e siccità del 2003, Schiermeier (2005) riporta che, nella stessa estate, gli incendi in Siberia hanno bruciato 22 milioni di ettari di foreste. È stato stimato che questi incendi, gran parte a carico della foresta boreale, abbiano rilasciato 250 milioni di tonnellate di carbonio nell'atmosfera, più o meno pari alla quantità di emissioni che i paesi industrializzati aderenti al Protocollo di Kyoto dovrebbero ridurre ogni anno tra il 2008 ed il 2012 rispetto ai valori del 1990.

Molti organismi stanno cambiando i loro cicli vitali in risposta ai cambiamenti climatici in corso (Parmesan & Yohe, 2003; Menzel et al. 2006; Rosenzweig et al. 2008). Il calendario degli eventi biologici (soprattutto in regioni con una marcata stagionalità) è fortemente controllato dal clima, ebbene questa risposta era stata prevista dai lavori di Margary (1926), Kington (1974) e Leith, (1974).

La fenologia vegetale risponde agli stimoli imposti dalle condizioni meteorologiche locali, ma molti studi hanno anche dimostrato una connessione a larga scala con i modelli di circolazione atmosferica; ad esempio l'effetto della NAO (North Atlantic Oscillation) sulla fenologia vegetale è mediata da condizioni meteorologiche a scala locale (Post & Stenseth, 1999; Chmielewski & Rötzer, 2001; Post et al. 2001; Scheifinger et al., 2002; Menzel, 2003; Stöckli R., Vidale PL., 2004; Menzel et al., 2005; Ahas & Aasa, 2006; Nordli et al., 2008).

È stato dimostrato, infatti, che la temperatura è uno dei fattori più importanti per la fenologia delle piante (Margary, 1926; Fitter et al., 1995; Sparks et al., 2000; Peñuelas et al., 2002; Menzel, 2003; Gordo Sanz, 2005; Ahas & Aasa, 2006; Estrella & Menzel, 2006; Lu et al., 2006; Menzel et al., 2006) e che l'equilibrio tra precipitazione ed evaporazione svolge un ruolo chiave nel funzionamento degli ecosistemi in molte regioni del pianeta (per esempio nel Mediterraneo).

Inoltre, l'effetto delle precipitazioni sulla fenologia delle piante è complesso e difficile da prevedere a causa del suo stretto rapporto con l'umidità del suolo (Gordo & Sanz, 2010).

Quindi un indicatore affidabile del cambiamento climatico globale è la fenologia vegetale che è fortemente controllata dal clima (Sparks et al., 2000; Chmielewski & Rötzer, 2001; Fitter & Fitter, 2002; Menzel et al., 2006; Ahas & Aasa, 2006; Estrella et al., 2007; Doi & Katano, 2008).

Gordo & Sanz (2010), hanno valutato la risposta fenologica di 29 specie di piante perenni (monitorate dal 1943 al 2003), usando un set di dati di più di 200000 record per sei eventi fenologici.

Essi hanno trovato delle differenze nei tempi fenologici dovuti ai recenti cambiamenti climatici, e che le specie vegetali prese in esame dimostrano una diversa sensibilità rispetto a ciò.

La primavera, che risulta essere sempre nettamente più calda, e l'autunno, sono le stagioni che presentano maggiori variazioni a livello climatico rispetto alle altre. Nella regione del Mediterraneo Gordo & Sanz (2010) hanno stimato che il cambiamento climatico ha spostato la fenologia di alcune specie vegetali; infatti, in questa regione particolarmente vulnerabile, è stato predetto un aumento delle temperature, accompagnato da una diminuzione delle precipitazioni, che accentueranno i processi che sono alla base dell'aridità (Trigo & Palutikof, 2001; Sánchez et al., 2004; Rowell, 2005; Gordo & Sanz, 2009). Le piante hanno già dimostrato alterazioni della loro distribuzione geografica in relazione al cambiamento del clima (Peñuelas & Boada, 2003; Sanz-Elorza, et al., 2003; Lavergne et al., 2006), della loro composizione genotipica (Jump et al., 2006a), della fisiologia della crescita (Jump et al., 2006b; Sarris et al., 2007; Peñuelas et al., 2008; Piovesan et al., 2008) e della fenologia (Peñuelas et al., 2002; Gordo & Sanz, 2005).

La distensione delle foglie, la fioritura e la stagione di crescita risultano essere gli eventi fenologici più influenzati dal clima, mentre la caduta delle foglie è quello meno influenzato. Inoltre, informazioni per le specie ad interesse agrario acquistano una notevole importanza poiché possono essere utili per la gestione delle colture in futuro.

Nel complesso quadro di relazioni tra uomo, ecosistemi e cambiamenti climatici, nel prossimo futuro potrebbe ridimensionarsi, non solo l'auspicato effetto fertilizzante della CO₂, che potrebbe risultare nullo, ma le foreste potrebbero diventare "vittime" degli eventi climatici estremi e, nel giro di pochi decenni, addirittura "complici" del surriscaldamento del pianeta (Grassi, 2005).

Come è riportato nel rapporto tecnico dell'*Istituto Europeo delle Foreste* (EFI – *European Forest Institute*) del 2007, tutti gli Stati membri dell'Unione Europea devono far fronte alle perdite economiche ed ecologiche, a causa di danni forestali.

La lotta contro il degrado delle foreste è un contributo alla sicurezza umana e il benessere e lo sviluppo sostenibile è una priorità per l'Europa.

I programmi dell'UE contribuiranno alla prevenzione, alla mitigazione e al controllo del degrado delle foreste. Gli strumenti più importanti dell'Unione europea nel contesto della lotta al degrado forestale sono definiti secondo tre Regolamenti: quello che disciplina lo sviluppo rurale Regolamento (CE) n. 1257/1999, sostituito dal Regolamento (CE) n. 1698/2005 e dal Regolamento Forest Focus (CE) n. 2152/2003. Tali strumenti hanno fornito un sostegno agli Stati membri per ottenere preziose informazioni e creare una buona rete di competenze nell'ambito della gestione forestale sostenibile (*Sustainable Forest Management* - SFM) il cui obiettivo principale è la lotta al degrado forestale.

Il monitoraggio dello stato delle foreste diventa quindi uno strumento indispensabile per controllare e rilevare gli effetti negativi del deperimento forestale a breve e a lungo termine. La raccolta di

informazioni costituisce la base per sviluppare e attuare adeguate misure di prevenzione e mitigazione.

I danni di matrice non biologica, causati da eventi climatici estremi come le tempeste, siccità e ondate di calore ed anche indotti dalle attività antropiche quali gli incendi boschivi ad esempio, hanno bisogno di un'attenzione particolare a causa della loro carattere catastrofico, che colpisce non solo le foreste, ma anche il benessere umano e l'economia.

Inoltre, ai danni dovuti ad agenti fisici vanno aggiunti quelli causati da quelli di carattere biologico dannosi, come il proliferare d'insetti patogeni, malattie e pascolo della fauna selvatica, che possono avere un impatto considerevole sulla salute e sulla vitalità delle foreste, anche se i danni spesso sono di minore effetto a livello economico.

Uno studio pubblicato dall'*Agenzia Ambientale Europea* (EEA - *European Enviromental Agency* del 2005) concludeva che le modifiche delle condizioni ambientali indotte dal cambiamento climatico, aumenteranno la vulnerabilità delle foreste europee e porteranno a processi di adattamento. Sebbene le foreste abbiano risposto al cambiamento climatico per tutta la loro storia evolutiva, una forte preoccupazione per gli ecosistemi forestali è data dalla rapidità del cambiamento. Il cambiamento climatico avrà un forte impatto sulle utilizzazioni del territorio, sulla salute e sulla vitalità delle foreste, nonché sulla fornitura sostenibile di beni e servizi per la popolazione (EEA, 2005).

La frequenza e la forza di eventi climatici come siccità, forti precipitazioni, cambiamenti nei modelli di vento, ecc ..., e dei disturbi relativi, incendi, tempeste, proliferazione di insetti nocivi e malattie, sono fattori che incidono sulle foreste europee ad ampia scala.

Durante l'estate del 2003 e del 2004 gran parte dell'Europa è stata colpita da estreme ondate di calore e siccità, uno di quei fattori di stress che si manifesta con una accelerata defogliazione, una diminuzione della produttività e una maggiore vulnerabilità nei confronti degli altri agenti dannosi.

Dal rapporto della EEA del 2005 si afferma che la siccità prolungata nella regione del Mediterraneo può aumentare il pericolo di incendi boschivi (vedi gli incendi degli anni: 2003, 2004 e 2007) e che può contribuire ad una accelerazione della desertificazione. Tali effetti del cambiamento climatico possono essere solo in parte mitigati dalla gestione delle foreste, poiché le minacce transfrontaliere in natura espongono le foreste a maggiori rischi, provocando degli effetti negativi a cascata. Tali minacce possono essere un uso del territorio non pianificato e i mercati del legno, che possono andare ad alterare le funzioni di protezione, ecologiche e socioeconomiche che le foreste svolgono.

I rischi futuri per la salute e la vitalità degli ecosistemi forestali causati dai cambiamenti climatici sono considerati solo in misura minore nei programmi di gestione forestale (EFI, 2007).

I provvedimenti da adottare nell'immediato futuro sono le misure di mitigazione e controllo, oltre alle già esistenti attività di prevenzione.

Nell'*Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) - Fourth Assessment Report (AR4)* completato nel 2007, è fornita una visione integrata del cambiamento climatico. Alcune delle principali conclusioni sono elencate per illustrare gli impatti e gli effetti del cambiamento climatico:

- ❖ Il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile, come è ora evidente dalle osservazioni degli aumenti globali della temperatura media dell'aria e dell'oceano, dallo scioglimento diffuso di neve e ghiaccio e dall'aumento globale medio del mare;
 - ✓ la temperatura mondiale potrebbe aumentare di un valore compreso tra 1,1 e 6,4 ° C nel corso del 21 ° secolo;
 - ✓ la probabilità che questo è causato da processi naturali climatici da solo è inferiore al 5%.
- ❖ Le osservazioni in tutti i continenti e nella maggior parte degli oceani, dimostrano che molti sistemi naturali possono essere colpiti da cambiamenti climatici regionali, in particolare dagli aumenti di temperatura.
- ❖ Le emissioni globali di gas serra dovute alle attività umane sono aumentate sin dal tempo pre-industriale, con un incremento del 70% tra il 1970 e il 2004.
- ❖ Molti studi concordano che con le attuali politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici e le relative pratiche di sviluppo sostenibile, le emissioni globali di gas serra continueranno ad aumentare nei prossimi decenni.

Sebbene il ciclo di vita naturale dei boschi sia sempre caratterizzato da una notevole variabilità climatica ed ambientale, il cambiamento climatico in corso influenzerà in modo nuovo e non facilmente prevedibile la dinamica e l'accrescimento dei popolamenti forestali, a causa non solo dell'aumento di temperature e delle richieste evapotraspirative, ma anche della maggiore frequenza di eventi estremi, dell'irregolarità di precipitazione, dell'aumento di concentrazione atmosferica di CO₂, delle deposizioni azotate (Magnani & Matteucci, 2009).

La produttività e le dinamiche di accrescimento dei boschi europei negli ultimi 40-50 anni sono state influenzate in senso positivo da aumento di CO₂, deposizioni azotate e variazioni climatiche.

La composizione, produttività e vulnerabilità degli ecosistemi forestali sono stati modificati nel corso degli ultimi decenni dal cambiamento climatico e globale, nelle loro diverse componenti, e tali modificazioni sono destinate ad accentuarsi nel prossimo secolo.

La fissazione di carbonio da parte delle foreste può contribuire in maniera significativa alla riduzione della concentrazione atmosferica di CO₂, mitigando in tal modo il temuto aumento della temperatura globale e le conseguenti modificazioni del clima globale (Nabuurs et al., 2007).

Studi manipolativi a livello di intero ecosistema, come quelli condotti nel progetto *Free Air Carbon Enrichment* (FACE), in cui l'intero bosco è stato esposto per anni a livelli di CO₂ ben superiori a quelli attuali, hanno dimostrato l'effetto dell'alta CO₂ su crescita e fissazione di carbonio da parte del bosco, anche se tale effetto benefico è risultato in genere inferiore alle iniziali aspettative (Ainsworth et al., 2005).

Studi a scala globale hanno inoltre suggerito un effetto benefico dell'aumento della temperatura globale sulla crescita delle foreste, portando ad un aumento della densità forestale soprattutto alle alte latitudini (Myneni et al., 2001). In ambiente mediterraneo, al contrario, le aumentate temperature e la conseguente maggiore attività evapotraspirativa sembrerebbero avere influito in senso negativo sulla produttività forestale, in particolare al limite meridionale dell'areale delle specie (Peñuelas et al., 2008; Piovesan et al., 2008).

Facendo riferimento alle foreste italiane, quindi, è ragionevole attendersi effetti contrastanti dell'aumento di CO₂ e del cambiamento climatico a seconda della fascia altitudinale e della latitudine; inoltre, non bisogna dimenticare i possibili effetti di un mutato regime climatico sui processi di fruttificazione e disseminazione (Poncet et al., 2009) ed i rischi indotti da gelate tardive o precoci.

Ci si attende pertanto che le modificazioni globali in atto, portino ad un aumento della crescita del bosco, mettendo al contempo a rischio la perpetuità di alcune tipologie di ecosistemi, in particolare quelli mesofili, e causando una variazione nella distribuzione delle specie, con spostamenti di areali e fasce fitoclimatiche.

1.2 - Effetto del cambiamento climatico sulla distribuzione delle specie forestali

L'effetto complessivo di queste modificazioni ambientali sulla crescita del bosco sono già evidenti da specifiche analisi dei dati degli inventari forestali europei: la produttività delle foreste del continente è infatti aumentata sensibilmente nel corso degli ultimi 50 anni (Ciais et al., 2008); l'effetto, peraltro, appare molto più limitato nella regione mediterranea, a causa delle già ricordate limitazioni imposte dalla disponibilità idrica (Gold, 2003).

Gli ecosistemi montani sono sensibili a livello mondiale al riscaldamento globale a causa della riduzione del loro habitat con l'aumentare della quota (Diaz et al., 2003; Beniston, 2006). Questi rapidi cambiamenti di temperatura insieme ad altri parametri climatici ad elevate altitudini, si prevede possano avere effetti dirompenti sulle comunità vegetali (Guisan et al., 1995; Beniston et al., 1996; Guisan & Theurillat, 2000; Walther, 2003; Attorre et al., 2007a; Attorre et al., 2008b).

Un primo impatto biologico è possibile individuarlo con lo spostamento e innalzamento del limite degli alberi (*treeline*) nelle aree di quota delle Alpi (Gehrig-Fasel, 2007) e con la riduzione del corteggio floristico di specie alpine e nivali (Grabherr et al., 1994; Pauli et al., 1996, 2007; Walther et al., 2005). Nell'ultimo decennio, i modelli di distribuzione delle specie (*Species Distribution Models* - *SDM*; Guisan & Zimmermann, 2000; Guisan & Thuiller, 2005) sono diventati strumenti importanti per valutare il potenziale impatto dei cambiamenti climatici sulla distribuzione delle specie vegetali (Bakkenes et al., 2002; Thomas et al., 2004; Thuiller et al. 2005; Attorre et al., 2007b; Attorre et al., 2008a).

1.3 - Le foreste come serbatoio (sink) di carbonio

Gli ecosistemi forestali sono la più grande riserva di carbonio organico fra gli ecosistemi terrestri (Houghton 1999; Houghton et al., 2001). Le foreste sono coinvolte direttamente negli scambi di carbonio con l'atmosfera grazie ai processi di fotosintesi e di respirazione autotrofa.

I flussi di scambio sono i più grandi misurati tra gli ecosistemi terrestri (Field et al., 1998; Houghton, et al., 2001), quindi il disturbo portato agli ecosistemi forestali dai processi naturali e da quelli antropici, porta delle perturbazioni nel ciclo globale del carbonio.

Nel passato ci sono stati numerosi studi che si sono concentrati sull'interazione tra le future condizioni climatiche e la risposta della vegetazione (Curtis & Wang, 1998; Norby et al., 2005; Korner, 2006; Matthews, 2006; Schlesinger, 2006; Iverson & Prasad 1998, 2001; Attorre et al., 2008a; Attorre et al. 2011.).

Lo scambio di carbonio tra la biosfera e l'atmosfera è uno dei processi chiave che deve essere valutato nell'ambito del Protocollo di Kyoto. Diversi studi suggeriscono che la biosfera sta guadagnando carbonio, ma queste stime sono ottenute principalmente con metodi indiretti, e i fattori che controllano lo scambio del carbonio sono oggetto di dibattito.

Dai dati collezionati tra il 1996 e il 1998 per 15 foreste europee viene confermato che tali ecosistemi forestali agiscono da serbatoio di carbonio (Valentini et al., 2000).

Il bilancio annuale di carbonio va da un assorbimento di $6.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, fino ad un'emissione di $1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, con ampia variabilità tra le foreste. I dati infatti mostrano un incremento significativo del sequestro del carbonio con il diminuire della latitudine, mentre la GPP sembra essere indipendente da questo punto di vista. Le osservazioni fatte, indicano che la respirazione degli ecosistemi determina uno scambio netto di carbonio. Inoltre per una valutazione accurata del bilancio del carbonio non sono sufficienti studi a livello satellitare, ma è necessario uno studio integrato fra diverse tipologie di dati provenienti da campagne di rilevamento, inventari forestali ed analisi modellistiche.

I serbatoi di carbonio della terra sono stimati essere dell'ordine delle $2 \pm 1 \text{ Gt C yr}^{-1}$ (Dixon et al. 1994; Ciais et al., 1995; Myneni et al., 1997; Nabuurs et al., 1997; IGBP Terrestrial carbon working group, 1998). Diverse sono le tecniche che ci permettono di stimare i flussi di carbonio a diverse tipologie di scala: analisi isotopiche, misure della concentrazione di CO_2 , analisi di dati da satellite, analisi di trend di crescita e modellistica. Tutte queste tipologie di studio, assumono un certo grado di incertezza.

Lo scambio netto del carbonio negli ecosistemi terrestri è il risultato di un bilancio tra l'assorbimento di C (attraverso il processo di fotosintesi) e la perdita di C (attraverso il processo di respirazione), che mostra una forte variabilità a livello stagionale, annuale e giornaliero.

In condizioni favorevoli, il flusso netto di carbonio è dominato dalla fotosintesi durante il giorno, dalla respirazione nelle ore notturne e per le piante caducifoglie è regolato anche dal periodo della perdita fogliare. In questo l'influenza del clima e della lunghezza della stagione vegetativa possono essere cause che fanno passare gli ecosistemi da *sink* a *source* di carbonio e viceversa (Lindroth et al., 1998; Goulden et al., 1998; Oechel et al., 1993). Inoltre gli stock di carbonio sono fortemente influenzati dai cambiamenti dell'uso del suolo e dalle attività forestali (Valentini et al., 2000). Misure a lungo termine dei flussi di carbonio attraverso la tecnica micro-meteorologica dell'*eddy covariance* (Baldocchi, et al., 1988, 1996), offrono la possibilità di valutare ad una scala locale i tassi di sequestro del carbonio per diverse tipologie forestali e diversi usi del suolo.

La tecnica dell'*eddy covariance* può anche fornire una migliore comprensione della vulnerabilità del bilancio del carbonio degli ecosistemi alla variabilità climatica, e può essere utilizzata per validare modelli e fornire dati per quantificare i regimi di scambio nei modelli globali. Esiste una rete globale di misura di queste torri in tutto il mondo, FLUXNET (Running, 1998), con protocolli di misure standard, controllo di qualità dei dati e protocolli standard di immagazzinamento dei dati (Aubinet, et al., 2000).

Le misure effettuate dalle torri portano alla stima diretta della NEE (*Net Ecosystem Exchange*) e, se sommate annualmente, permettono di stimare direttamente il bilancio ecosistemico del carbonio.

I risultati della rete EUROFLUX per il 1996-1998 mostrano una capacità sink pari a $6.6-6.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ per due foreste dell'Europa del sud e per una piantagione di *Picea abies* in Scozia, indicando che le vecchie foreste boreali europee sono vicine all'equilibrio (Valentini, et. al., 2000).

Un'analisi di statistica multivariata condotta sulla NEE in funzione dell'effetto dei singoli fattori (latitudine, precipitazione, tipo ecosistema, altitudine, temperatura media annuale, età, tipo di gestione, indice di area fogliare), ha dimostrato che la latitudine è la variabile più significativa nel modello ($r^2 = 0.55$, $P < 0.0001$), mentre la produzione primaria lorda (GPP) si mantiene pressoché costante attraverso i siti e la latitudine, indicando che sono altre le componenti responsabili della variazione del bilancio del carbonio. Generalmente, mentre la GPP tende a essere costante nei diversi siti della rete, la respirazione ecosistemica annuale aumenta con la latitudine nonostante la generale diminuzione della temperatura annuale media dell'aria, che invece è una variabile importante per gli ecosistemi mediterranei come quelli affrontati in questo studio.

Altro fattore che risulta essere importante per le analisi a livello territoriale è la cosiddetta attuale destinazione di uso di un territorio (*land use*) e la sua variazione nel corso del tempo (*land use change*), una scala più ampia è la sua storia, l'uso e i suoi cambiamenti.

La rete delle *torri eddy covariance* è in grado di fornire a livello locale vincoli ad una scala realistica sulle stime del bilancio globale del carbonio.

Alcuni risultati suggeriscono che la Produzione Primaria Netta e la respirazione eterotrofa (R_h) aumenteranno, in generale in tutta Europa, ma con notevoli differenze tra le diverse subregioni europee. Il più piccolo aumento di NPP (*Net Primary Production*), e in alcuni casi diminuzione, è previsto nel Mediterraneo, dove molti ecosistemi passeranno da *sink* a *source* di carbonio entro il 2100, principalmente a seguito di un deterioramento dell'alterazione delle componenti che regolano il bilancio idrico (Morales et al., 2007).

Il ciclo del carbonio tra gli ecosistemi terrestri e l'atmosfera è un processo legato alla biosfera essenziale con diversi *feedback* del sistema fisico a diverse scale spaziali e temporali (Houghton et al., 1998; Waring & Running, 1998). Variazioni nei pattern di vegetazione e nella NPP, con cambiamenti associati ai flussi di carbonio e al suo stoccaggio, sono attese come conseguenze del cambiamento climatico dall'aumento della concentrazione dei gas che contribuiscono all'effetto serra (Cao & Woodward, 1998).

Comprendere le probabili modifiche nel ciclo del carbonio nei suoi scambi e stoccaggi a diversa scala è importante per i responsabili politici, poiché i *sink* di carbonio come le foreste o la materia organica nel suolo (SOM) possono essere contabilizzati nel protocollo di Kyoto (Conference of the Parts, 1998).

Da non sottovalutare è la comprensione e la dinamica del bilancio idrico delle specie, poiché come è noto, le specie arboree adottano diversi sistemi per resistere alla siccità (Rambal et al., 2003).

1.4 - *L'uso dei modelli di processo nella comprensione del ciclo del carbonio negli ecosistemi forestali*

I modelli di processo (Process-Based Models) sono ampiamente usati per comprendere il ciclo globale del carbonio e per valutare i cambiamenti dei cicli biogeochimici associati al cambiamento climatico (Cramer et al., 2001; Bachelet et al., 2003; Fowler et al., 2003; Masera et al., 2003). Le valutazioni degli impatti potenziali dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi in Europa che usano questi modelli, si affidano a scenari di clima futuro costruiti a partire da modelli di circolazione globale (*General Circulation Model* - GCM; Parry, 2000; Schröter et al., 2005; Schaphoff et al., 2006).

I modelli di processo sono finalizzati a fornire riscontri sulla risposta dei processi funzionali (come la fotosintesi o la conduttanza stomatica) alle variazioni del clima, ed in particolare applicati a formazioni vegetali che sono poste in regioni con una topografia particolarmente articolata, e in quelle aree che subiscono una forte azione del mare (IPCC, 2001*).

1.5 - *Scenari climatici passati, presenti e futuri*

Scenari climatici con un'elevata risoluzione spaziale possono essere ottenuti usando un modello climatico regionale (RCM) guidato da condizioni iniziali e al contorno supportate da un GCM (Modello di Circolazione Globale - Mearns et al., 2003). Questi modelli sono applicabili per studi che riguardano impatti a livello regionale e soffrono di un'incertezza negli *output* simile a quella dei modelli di circolazione globale.

Le incertezze previste utilizzando RCM sono ulteriormente colpite da insicurezze negli scenari di emissioni future di gas serra che si usano per guidarle (Nakicenovic et al., 2000).

I recenti cambiamenti climatici hanno per alcuni aspetti rafforzato la crescita delle piante, nelle medie e alte latitudini. In un'indagine globale delle risposte della vegetazione ai cambiamenti climatici attraverso l'analisi su 18 anni (dal 1982 al 1999), sia di dati climatici che di osservazioni satellitari dell'attività della vegetazione, Nemani nel 2003 (Nemani et al., 2003) mostra alcuni risultati che indicano come i cambiamenti globali del clima abbiano attenuato alcune limitazioni climatiche critiche per la crescita delle piante, per cui l'NPP è aumentata del 6% a livello globale.

L'aumento più grande è avvenuto negli ecosistemi tropicali, infatti la foresta pluviale Amazzonica mostra il 42% di aumento globale nella produttività netta, dovuta soprattutto alla diminuzione della copertura nuvolosa e il conseguente aumento della radiazione solare.

Tra il 1980 e il 2000, la terra ha subito un drammatico cambiamento ambientale (Houghton et al., 2001). Essa ha attraversato due decenni molto caldi (1980 e 1990), tre intensi e persistenti fenomeni del El Niño e consistenti cambiamenti nella nuvolosità tropicale (Wielicki et al., 2002) e nella dinamica dei monsoni (Kumar et al., 1999). Nel frattempo, la concentrazione di CO₂ atmosferica incrementava del 9% (da 337 a 369 ppm) e la popolazione umana subiva un incremento del 45% (da 4,45 miliardi di persone a 6,08 miliardi).

I cambiamenti di NPP sono integrati con queste ed altre modifiche dei parametri ecologici, geochimici, climatici, ed antropici che influenzano la biosfera.

Diversi studi a carattere regionale hanno riportato un incremento nell’NPP (Townsend et al., 1996; Houghton et al., 1999*; Myneni et al., 1997; Hicke et al., 2002; Philips et al., 1998), ma globalmente, uno studio a carattere generale sull’impatto che il cambiamento climatico ha sull’NPP manca.

Per le latitudini medie e settentrionali ci sono meccanismi multipli che determinano un incremento dell’NPP, tra cui, deposizioni azotate, cambiamento climatico, mentre nei tropici questo aumento è primariamente attribuito ad un’azione fertilizzante della CO₂.

Attraverso lo studio di dati satellitari dell’attività vegetativa delle piante, Nemani ha dimostrato che il cambiamento climatico ha attenuato i molteplici limiti climatici per la crescita delle piante, incrementando l’NPP per vaste regioni della Terra (Churkina & Running, 1998).

1.6 - I fattori ambientali

Le principali componenti dei futuri cambiamenti climatici sono: il raddoppio della concentrazione atmosferica di CO₂; l'aumento della temperatura dell'aria; il cambiamento della distribuzione spaziale delle precipitazioni. Con il riscaldamento atteso nel futuro, per le specie arboree è stato predetto uno spostamento latitudinale secondo un certo range (Davis & Zabinski, 1992; Dryer 1995; Iverson & Prasad 1998; Iverson et al., 2004).

Temperatura, radiazione luminosa ed acqua interagiscono imponendo diverse e complesse limitazioni per l'attività vegetativa delle specie nelle diverse parti del mondo.

La disponibilità di acqua è tra i fattori che fortemente limita la crescita della vegetazione per più del 40% della superficie terrestre vegetata, mentre la temperatura per il 33% e la radiazione per il 27%. Inoltre questi fattori possono essere co-limitanti e questo dipende anche da quale zona del pianeta si considera (Fig. 1).

Un importante incremento della radiazione solare incidente è un fattore ampiamente limitante per le regioni dell'Europa occidentale, dell'equatore e dei tropici, come si può notare dalla figura.

La temperatura dell'aria che regola le dinamiche delle stagioni di crescita ha subito un incremento nel suo limite per le regioni del Nord-America e per l'Europa Nord-Occidentale, coinvolgendo anche il nostro territorio.

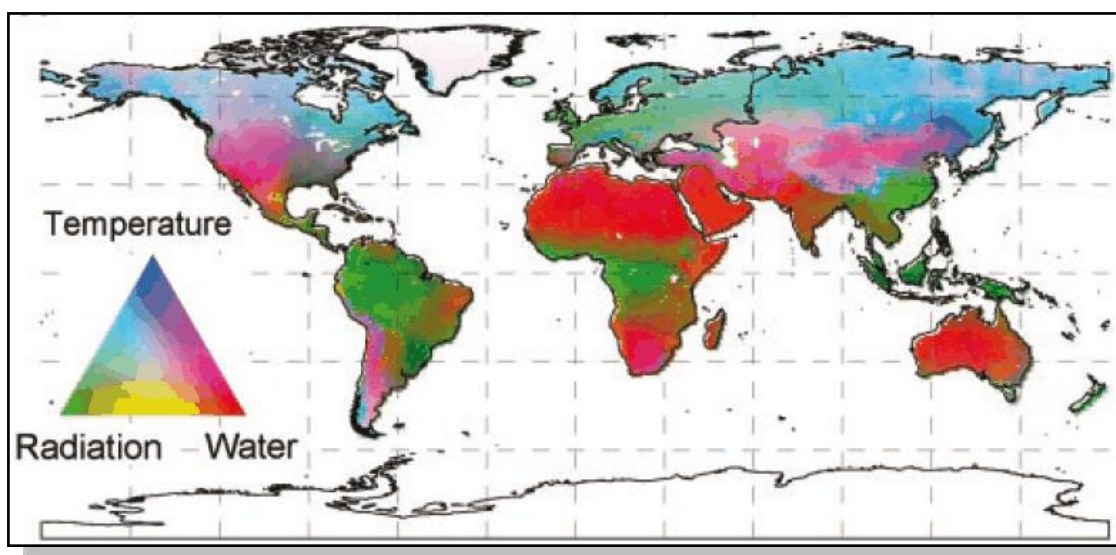


Figura 1: Distribuzione geografica dei potenziali limiti climatici per la crescita della vegetazione, derivati da statistiche climatiche a lungo periodo (Nemani, 2003).

Dal 1982 al 1999, la produttività modellizzata è incrementata del 6,5% nelle regioni che sono limitate dall'acqua e dalla radiazione, di un 5,7% in quelle limitate dalla temperatura e dalla radiazione, mentre di un 5% in quelle in cui l'effetto della temperatura e dell'acqua contengono lo

sviluppo delle specie (Nemani, 2003). L'NPP incrementa in modo significativo per il 25% delle aree globali vegetate, con un tasso medio di $6,3 \text{ gC m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$, e decrementa in modo significativo solo per il 7% delle aree, con un tasso medio di $4,2 \text{ gC m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ (Fig.2).

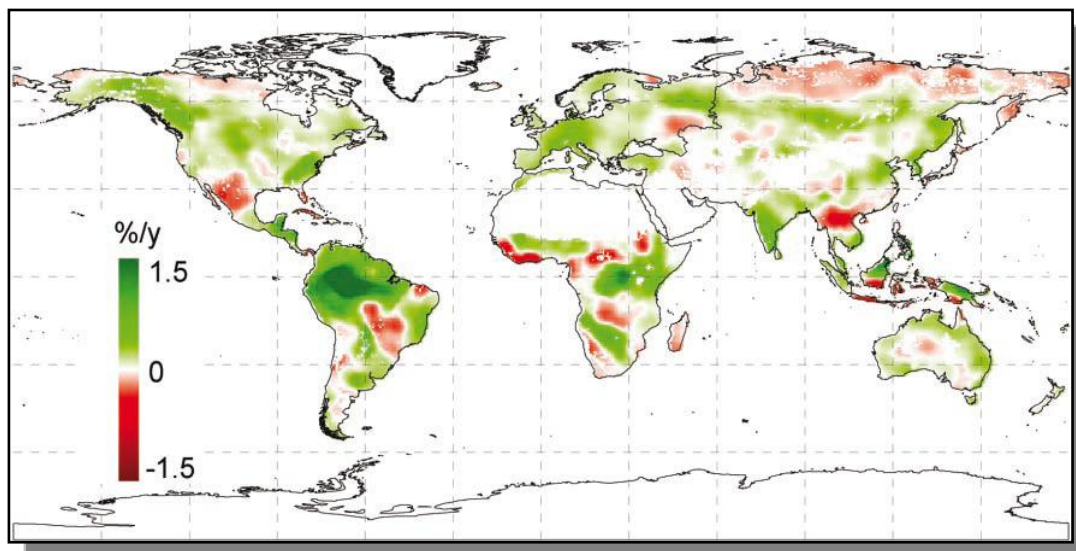


Figura 2: Distribuzione spaziale di trend lineari nella stima dell'NPP dal 1982 al 1999. NPP era calcolato con la media di FPAR e LAI derivati dal dataset di GIMMS e PAL. (Nemani et al., 2003)

Lo stesso cambiamento climatico ha causato incrementi e decrementi della produttività primaria netta, con variazioni dell'allocazione del carbonio, nei tassi di decomposizione ed altri processi del ciclo del carbonio tra gli ecosistemi terrestri e l'atmosfera.

La superficie forestale italiana è di circa 10 milioni di ettari, pari ad un terzo del territorio nazionale (INFC, 2005). Tale superficie rappresenta il 5% della superficie forestale totale europea e conferisce all'Italia il sesto posto nella classifica dei paesi europei con la maggiore estensione forestale, insieme a Svezia, Finlandia, Spagna, Francia e Germania (FAO, 2005). I popolamenti forestali italiani svolgono diversi tipi di servizi, da quelli di carattere economico a quelli di carattere socio-culturale ed ambientale. Inoltre un servizio che oggi acquista un'importanza sempre maggiore è il loro ruolo nella lotta al cambiamento globale.

Infatti la fissazione di carbonio da parte delle foreste può contribuire in maniera significativa alla riduzione della concentrazione atmosferica di CO_2 , tema che viene messo in evidenza in questo lavoro attraverso la simulazione e la stima della produttività primaria di tre specie importanti nel panorama forestale nazionale: una specie della fascia temperata, *Fagus sylvatica*; una della zona dei boschi termofili misti di latifoglie decidue, *Quercus cerris*, e *Quercus ilex*, sclerofilla che vegeta principalmente nella fascia climatica più mediterranea.

Cercando di dare un carattere quantitativo, seppur di massima, questo studio ha modellizzato il comportamento di queste tre diverse tipologie forestali, stimando la risposta fisiologica al cambiamento climatico in atto attraverso la quantificazione della loro produttività primaria in accordo con gli effetti del cambiamento climatico sulla distribuzione potenziale della specie.

Infatti attraverso un approccio modellistico con l'uso del modello Mo.C.A. (*Model Carbon Assessment*) per analizzare i processi eco-fisiologici nella stima della Produzione Primaria Netta delle specie, ed integrandolo con dati a carattere forestale di distribuzione delle specie (Attorre et al. del 2011), si è cercato di valutare gli impatti della variazione della concentrazione di CO₂ in atmosfera che causano il cambiamento climatico.

Gli scenari di emissione utilizzati sono stati quelli forniti dall'IPCC: B1 ed A1Fi, in particolare per due finestre temporali specifiche: 2031–2060 e 2071–2100.

Analizzando gli effetti previsti dagli scenari sulla distribuzione e sulla produttività delle specie indagate, è stato possibile determinare analogie, differenze e come si potrebbe modificare il panorama forestale italiano sotto l'influenza del cambiamento climatico.

2 - SCOPO DEL LAVORO

A fronte di un netto aumento della superficie forestale (oltre il 20% rispetto al 1985 in base ai dati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio, condotto dal Corpo Forestale dello Stato nel 2005) e del progressivo superamento dei pericoli dovuti all'inquinamento atmosferico industriale, le foreste italiane sono oggi esposte a nuovi rischi: le elevate deposizioni di azoto e le elevatissime concentrazioni troposferiche di ozono iniziano a danneggiare la biodiversità forestale (Ferretti et al., 2006), mentre i cambiamenti climatici stanno provocando la progressiva disgregazione di questi ecosistemi (Ferretti et al., 2006).

Le tendenze al surriscaldamento climatico in atto e quello previsto dagli scenari dell'IPCC sposteranno verso latitudini maggiori e ad altitudini più elevate gli ambienti tipici dell'area mediterranea. Questo significa che tutti gli ecosistemi del Mediterraneo tenderebbero a “migrare” verso l'Europa centro-occidentale e settentrionale. La rapidità del cambiamento climatico in atto è però di gran lunga maggiore della velocità di colonizzazione di nuovi spazi della quale sono capaci le specie vegetali, soprattutto quelle dominanti nelle foreste (Ferretti et al., 2006).

Il rapido e repentino cambiamento dell'uso del suolo, la frammentazione degli habitat, l'eccessivo sfruttamento delle risorse ambientali e la mancanza di pianificazione delle azioni antropiche, costituiscono i principali fattori del degrado di questi ambienti. Le conseguenti modifiche del paesaggio produrranno profonde modificazioni anche nei settori dell'agricoltura, del turismo.

Anche l'impatto dei cambiamenti climatici, principalmente attraverso un incremento degli episodi di onde di calore, dei periodi di siccità e di un generale aumento delle temperature, mette a rischio le capacità di resilienza e di adattamento degli ecosistemi forestali Mediterranei (Ferretti et al., 2006).

Le principali conseguenze negative per l'Europa riguarderanno l'area Mediterranea, che già di per se è caratterizzata da una stagione estiva calda e asciutta, e che, inoltre, è estremamente sensibile ai cambiamenti ambientali essendo posta a transizione tra la zona temperata e quella desertica.

Confermando studi riconosciuti ormai generalmente validi (Menzel, 2003, Gordo & Sanz, 2009), tutti i programmi europei di monitoraggio delle foreste (incluso il Programma CON.ECO.FOR. italiano, Petriccione, 2005; Corpo Forestale dello Stato, 2007) indicano un anticipo medio di 3 giorni ogni 10 anni di tutte le fasi vitali delle principali specie forestali (emissione delle foglie, fioritura e fruttificazione). Negli ultimi 50 anni, quindi, tutti cicli naturali delle foreste hanno subito un anticipo di circa 15 giorni, in grado di provocare gravi danni all'equilibrio delle componenti vegetali, animali e del suolo delle nostre foreste (Ferretti et al., 2006).

Questo ha anche delle forti ripercussioni nella produttività che hanno questi ecosistemi, con delle forti diversità tra il sud e il nord del territorio nazionale.

Ciò può consentire di pianificare gli interventi prioritari di conservazione del territorio in modo più rigoroso, indirizzando gli investimenti di risorse prioritariamente nelle aree destinate a preservare i principali ecosistemi forestali.

L'importanza di tali ecosistemi nel mitigare gli effetti dei cambiamenti globali mediante la fissazione e lo stoccaggio di grandi quantità di carbonio è ampiamente riconosciuta (Dixon et al. 1994, Brown et al. 1999). Si stima che le foreste, pur ricoprendo circa il 30% delle terre emerse, contengano più dell'80% della biomassa terrestre (Dixon et al. 1994, Dupouey et al. 1999). Con la ratifica del protocollo di Kyoto il nostro paese si è impegnato in una notevole riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra (CIPE 2002, Ciccarese & Pettenella 2002). Si tratta di una sfida rilevante che, oltre a riflessioni di politica forestale, necessita di un'attendibile valutazione e quantificazione del carbonio stoccato dalle foreste. In ragione di ciò la stima della biomassa - variabile il cui valore è direttamente proporzionale alla quantità di carbonio contenuta all'interno delle foreste - rappresenta una priorità per il mondo scientifico (Cutini et al., 2009).

Al fine di predire la produttività forestale a larga scala occorre disporre di un modello affidabile che richieda in ingresso pochi parametri di facile misurabilità (Dezi & Magnani, 2007).

La possibilità di predire il tasso di crescita e quindi la produttività di un bosco a partire da dati iniziali facilmente reperibili è uno dei principali problemi per la gestione forestale, sia nel caso di boschi già esistenti sia per la programmazione di nuovi impianti (Assmann 1970).

Modelli empirici basati interamente su misure effettuate in campo, sebbene descrivano accuratamente il sistema bosco nell'intervallo di condizioni per cui sono stati costruiti e calibrati, non sono però estrapolabili al di fuori di tale intervallo e quindi non sono applicabili ad altri contesti con scopo predittivo (Bossel 1994). Per superare tale limite risulta utile l'impiego di modelli che siano in grado di descrivere le dinamiche della pianta e del bosco basandosi sulla conoscenza delle condizioni ambientali e dei processi fisiologici che ne governano la crescita.

Nel corso degli ultimi anni sono stati sviluppati molti di questi modelli, che riflettono le nuove conoscenze di fisiologia e le sempre migliori capacità di descrivere quantitativamente tali processi e le loro interazioni (Dezi & Magnani, 2007). Questi modelli a base funzionale, però, se da un lato descrivono fedelmente la realtà, dall'altro richiedono un numero molto elevato di parametri d'ingresso, molti dei quali sono di difficile, se non impossibile, misurazione. Allo scopo di facilitare l'applicazione del modello ad un ampio numero di situazioni occorre ridurre lo spettro di parametri di ingresso ovvero analizzare quali fra essi siano realmente indispensabili e quali al contrario

possano essere trascurati o accorpati. Temperature troppo alte o troppo basse, valori elevati di deficit di pressione di vapore, la mancanza di acqua o un suolo poco fertile sono causa di una diminuzione della capacità della pianta di fotosintetizzare, inibendone così la crescita; il verificarsi anche di una sola di queste condizioni può avere conseguenze estreme (Kimmins 1997). L'esigenza di stimare su larga scala la produttività e la capacità di fissazione ed immagazzinamento del carbonio atmosferico da parte degli ecosistemi forestali ci pone di fronte al problema di disporre di un modello affidabile che richieda al contempo un basso numero di parametri di facile misurabilità o reperibilità. I modelli sono per definizione delle rappresentazioni semplificate e schematiche della realtà. Per tale motivo rischiano ovviamente di non cogliere le proprietà essenziali dell'ecosistema. Presupposto scientifico della ricerca è stato mettere sotto la lente di ingrandimento come il cambiamento climatico in atto causi questi impatti sui popolamenti forestali presi in esame, i quali sono quantificabili e compromettono la conservazione e la produttività primaria degli ecosistemi naturali e seminaturali.

L'obiettivo del lavoro è stato quello di predire per tre specie caratteristiche del panorama forestale italiano, la magnitudine e l'impatto del cambiamento climatico sulla Produttività Primaria Netta, associata alla distribuzione potenziale attuale e futura delle specie in funzione di scenari climatici.

3 - MATERIALE & METODI

Questo studio è stato realizzato grazie all'accordo di ricerca stipulato dal gruppo di lavoro del Dr. Matteucci dell'IBAF (Istituto di Biologia Forestale e Ambientale) del CNR di Montelibretti, con il Dipartimento di Biologia Ambientale della "Sapienza" Università di Roma, e con il benessere dell'Università della Tuscia di Viterbo.

3.1 - Il dato climatico

Nel 1988 la *World Meteorological Organization* (WMO) e la *United Nations Environment Programme* (UNEP) hanno fondato l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Aperto a tutti i membri dell'UNEP e del WMO, il ruolo dell'IPCC è quello di valutare tutte le conoscenze scientifiche, tecniche e socio-economiche acquisite nei vari settori di ricerca nel mondo in fatto di scienza del clima, per cercare di capire la natura del rischio dei cambiamenti climatici indotti dall'attività umana, i suoi potenziali impatti, e le opzioni per mitigare e adattare questi impatti.

I principali prodotti dell'attività svolte dall'IPCC sono rappresentati dai Rapporti di Valutazione (Assessment Report), dai Rapporti Speciali (Special Report), e dalle Pubblicazioni Tecniche (Technical Publication). Inoltre, per facilitare la cooperazione tra i vari esperti di modellistica (scenari di emissione dei gas serra, e di valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sui vari sistemi), è stato costituito il Gruppo di Lavoro sugli Scenari per il Clima e Valutazione degli Impatti (TGCIA), che attraverso il Centro di Distribuzione Dati è in grado di fornire rapidamente informazioni e dati alle comunità scientifiche internazionali che operano sul clima. Un esempio di questi dati è rappresentato dai Modelli del Clima Globale (GCMs) prodotti da diversi Centri e Istituti di Modellistica, contenuti nel Rapporto Speciale sugli Scenari di Emissione (SRES).

Nel 1990 (Houghton et al., 1990) e nel 1992 (Leggett et al., 1992; Pepper et al., 1992) l'IPCC ha distribuito un primo set di sei scenari, conosciuti con la sigla IS92 e valutati ufficialmente nel 1995 (Alcamo et al., 1995), che fornivano possibili e alternative previsioni delle emissioni dei gas serra (monossido e biossido di carbonio, metano, clorofluorocarburi, ossidi di azoto, biossido di zolfo e altri) per il periodo 1990-2100. Questi scenari furono messi a disposizione degli esperti del clima e dell'atmosfera per poter essere utilizzati nei loro modelli di cambiamento climatico e composizione dell'atmosfera.

Nel 1996 è stato sviluppato un nuovo e più completo set di scenari descritti nell'apposito SRES. Lo SRES del 1996 riporta quattro famiglie di scenari siglate semplicemente come: A1, A2, B1 e B2, suddivise sulla base delle emissioni totali (in Gigatonnellate) di CO₂ caratterizzate da specifiche assunzioni.

Schematicamente tutte e quattro le famiglie si sviluppano lungo due direzioni: globale-locale la prima, e sviluppo-ambiente la seconda. In realtà le quattro famiglie condividono uno spazio ad un numero più alto di dimensioni dato il numero delle forze guida ed altre assunzioni necessarie a definire lo scenario secondo un determinato approccio modellistico. Essi vanno da una rapida crescita economica e ampi mutamenti tecnologici ad un livello più alto di protezione ambientale; da una bassa ad una alta crescita demografica; da basse a più elevate emissioni di gas serra (GHG).

All'interno di ogni famiglia di scenari sono state prese in considerazione molte delle possibili interazioni delle forze guida, a varie intensità, che agiscono all'interno della famiglia stessa o gruppo. Il risultato finale è l'elaborazione e la selezione di quaranta scenari, raggruppati appunto nei sei gruppi/quattro famiglie, che coprono quasi interamente l'intera gamma della variabilità dei GHG emessi contemplata negli studi dagli esperti di queste dinamiche, e disponibili in letteratura (Wigley & Raper, 1990; Kelly & Wigley, 1992; Ramaswamy et al., 1992; Cess et al., 1993; Harvey, 1994; Osborn & Wigley, 1994; IPCC, 1997).

Questi quaranta scenari possono essere raggruppati in quattro categorie sulla base della CO₂ totale emessa, ad indicare che scenari con caratteristiche guida differenti possono condurre a simili quantitativi di emissioni e, viceversa, quelli con simili assunzioni possono portare a differenti categorie di gas emessi (Fig. 3).

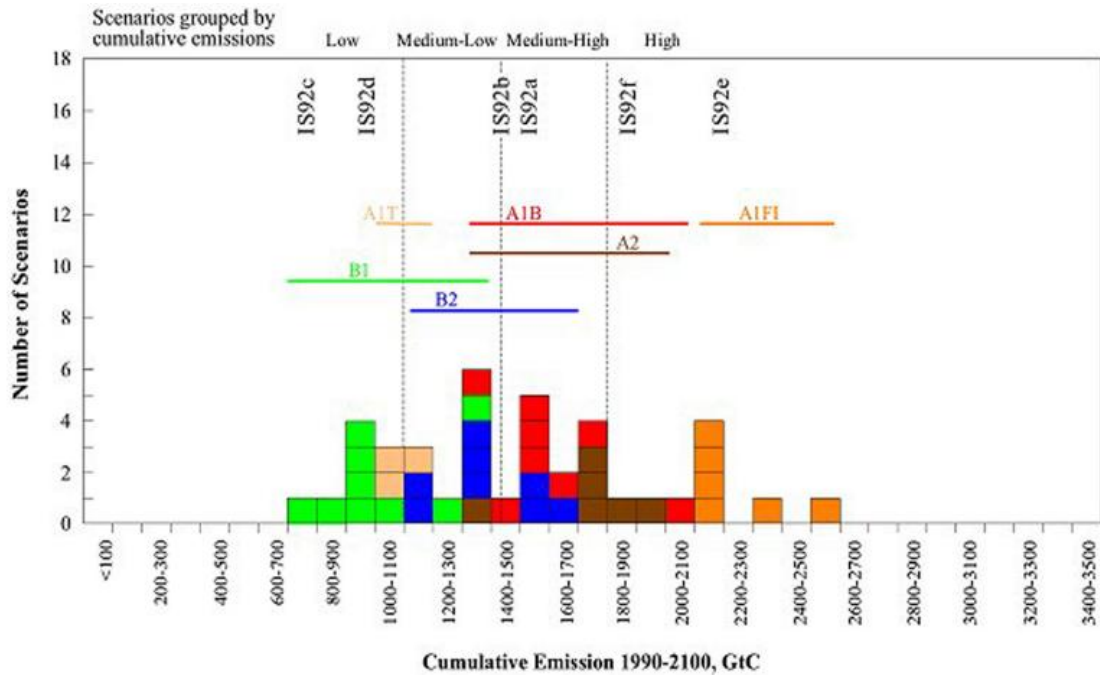


Figura 3: Classificazione degli scenari sulla base delle emissioni totali di CO₂ nel periodo 1990-2100.

Senza approfondire eccessivamente l'argomento riguardante l'elaborazione di questi scenari estremamente complessi, si riporta di seguito la formula sintetizzata che sta alla base del nostro modello, con lo scopo di vedere come vengono gestiti i singoli parametri. Per ogni particolare variabile (v), GCM (g), e scenario SRES (s), il valore (x) ad un particolare cella del grid (i) in un particolare anno (y) e mese (m) è:

$$x_{vgsiym} = c_{vim} + (p_{vgsim} * t_{gsy})$$

Dove (c) è la media climatica osservata nel trentennio 1961-1990, (p) è il pattern di risposta al forcing emesso (espresso come anomalie relative al periodo 1961-90, per grado di aumento di temperatura), e (t) è l'aumento della temperatura globale registrata nel trentennio 1961-90.

In questo lavoro le variabili studiate sono le Precipitazioni e le Temperature, mentre il modello utilizzato è l' HadCM3. Gli scenari selezionati sono due: B1 e A1Fi, con l'intento di studiare gli estremi dell'intero incremento termico previsto.

Tali scenari climatici dell'IPCC rappresentano due diverse acclimatazioni alle emissioni di CO₂, B1 (limitazione a 550 ppm di CO₂) e A1Fi (senza nessuna limitazione di emissione di CO₂). Inoltre sono state considerate due finestre temporali centrate sui periodi 2031-60 e 2071-100.

3.1.1. - Database 1961 – 1990 del WMO

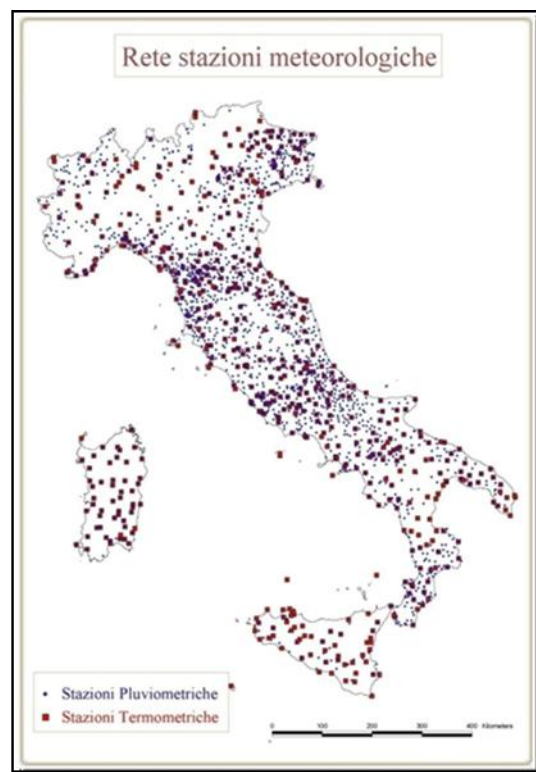
L'importanza dell'azione del clima sulla distribuzione delle specie vegetali è stata da tempo individuata e riconosciuta (e.g. Humboldt, 1807; Troll, 1939; Paffen et al., 1956). In particolare i regimi di precipitazione (P) e di temperatura dell'aria (T), assieme alla quantità di radiazione solare che raggiunge il suolo ed alla direzione e intensità dei venti, sono gli elementi climatici più importanti nella determinazione di questi processi. Per tali ragioni molti studi sulla distribuzione potenziale delle specie vegetali hanno come approccio metodologico la definizione di *envelope*, o “contenitore” bioclimatico (Box, 1981; Woodward, 1987; Huntley et al., 1989; Brzezieski et al., 1993; Franklin, 1998; Guisan et al., 1998; Samantha, 2005).

Le mappe climatiche provengono da una ricerca che attraverso due fasi ha visto realizzare una completa cartografia climatica nazionale in formato grid ad alta risoluzione a partire da una banca dati di valori medi mensili di P e T (medi, minimi e massimi) relativi al trentennio 1961-90 e riferibili ad una rete di stazioni meteorologiche di rilevamento (Attorre et al., 2007a).

I dati di base raccolti e mediati su lunghe serie temporali di osservazioni, e gli scenari previsti godono ormai di un valore di attendibilità piuttosto elevato. Questi dati devono essere presi in considerazione da chiunque oggi voglia occuparsi di ricerca e pianificazione di interventi ambientali di conservazione e protezione.

Utilizzando un interpolatore, l'Universal Kriging, con un set di covariate appositamente elaborate, si è arrivati a realizzare la cartografia climatica finale a 1 km di risoluzione a partire da una banca dati georiferita di 1600 stazioni Pluviometriche e 600 Termometriche (Fig. 4; 5), e quella bioclimatica (Attorre et al., 2008a).

Figura 4: Network delle stazioni per la costruzione del database climatico WMO 1961-1990.



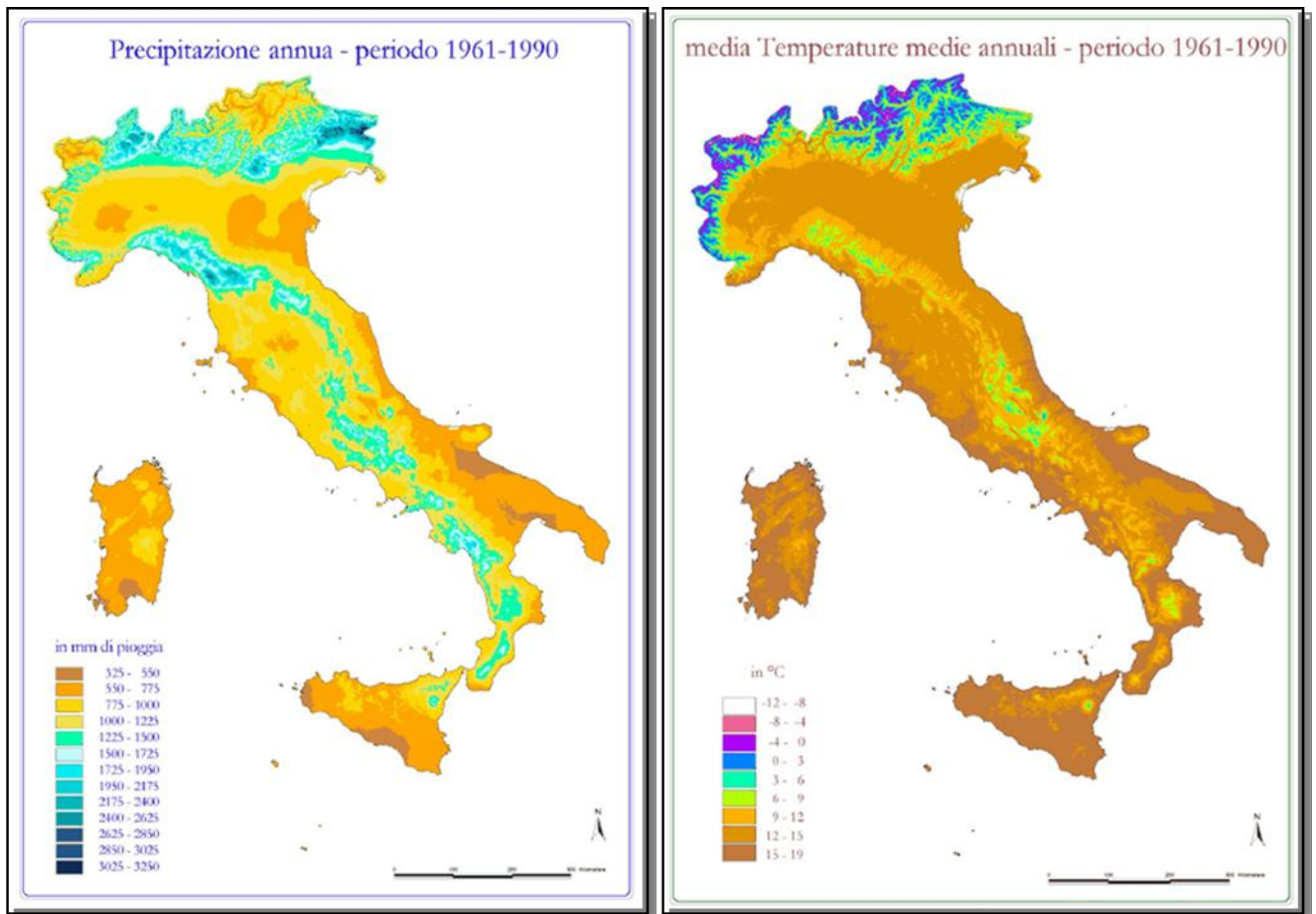


Figure 5: Carte delle precipitazioni medie annuali e delle temperature medie annuali per il trentennio di riferimento del WMO 1961- 199, a 1km di risoluzione.

L'ampiezza del riscaldamento ipotizzato, specialmente da alcuni scenari, è considerevole e repentina. Se ciò si verificasse, diventerebbe ragionevole supporre che le capacità migratorie di molte specie vegetali potrebbero risultare insufficienti a tenere il passo dello spostamento delle condizioni idonee. Questo grave squilibrio tra vegetazione e clima (Dyer, 1994) potrebbe produrre un ulteriore progressivo deterioramento delle biocenosi attuali, non più adatte al clima mutato, senza che altre più competitive possano arrivare nel nuovo habitat per sostituirle, in quanto non in grado di migrare così velocemente, a volte, anche perché impossibilitate a superare quelle barriere ecologiche prodotte dalle trasformazioni antropiche del paesaggio (IPCC, 1990; Dyer, 1994).

Questo surriscaldamento porterebbe ad un importante incremento della fascia mediterranea a discapito di quella temperata (Fig. 6), e ciò costituisce l'aspetto fondamentale delle probabili alterazioni ambientali che si registreranno nelle aree costiere e in quelle collinari, con particolare incidenza sul versante tirrenico della penisola, colpito più diffusamente dal flusso delle correnti meridionali calde e secche.

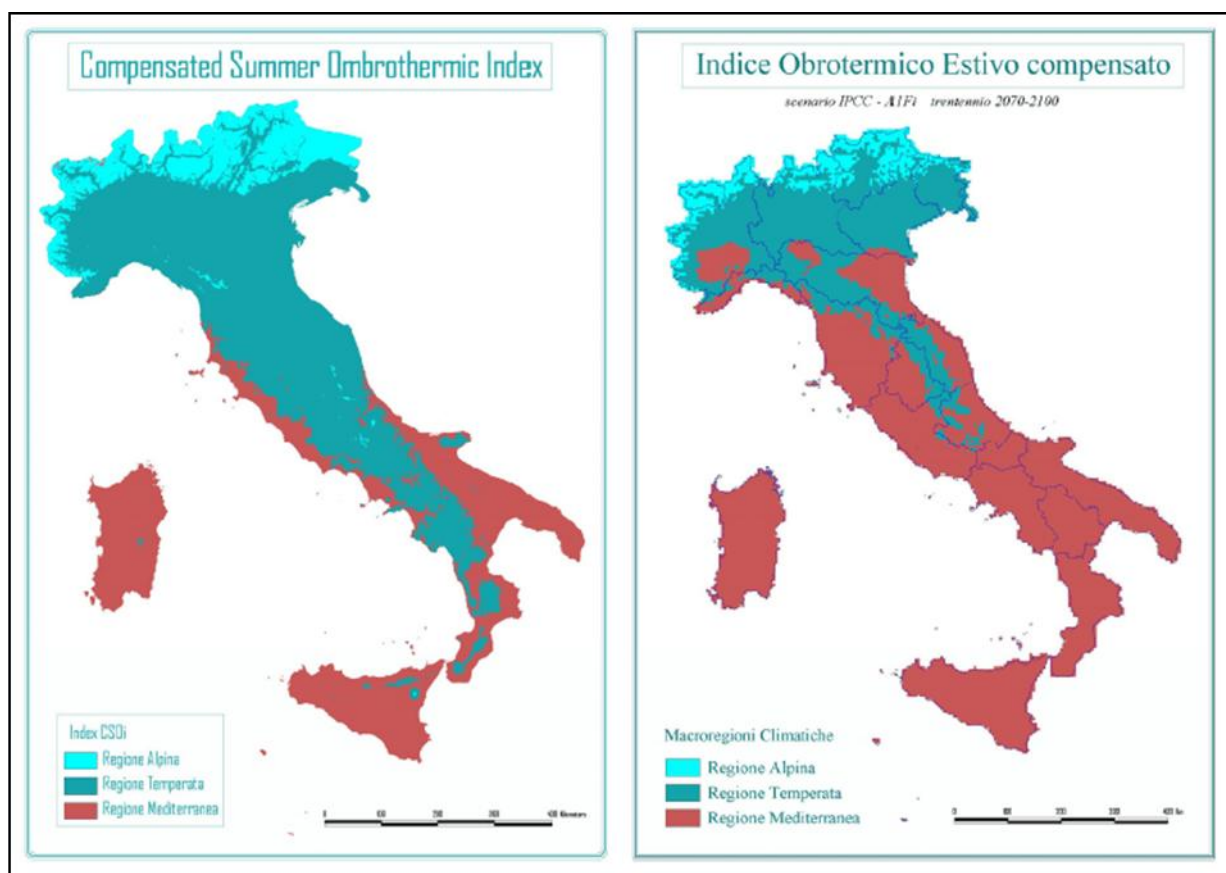


Figura 6: Macroregioni climatiche italiane: clima attuale a sx, e lo scenario A1Fi a dx, relativo agli anni 2071-2100.

Il significato ambientale di questa variazione potrebbe avere forti ripercussioni sugli habitat e sulla biodiversità attuale, e soprattutto forti conseguenze negative sui processi di formazione del suolo e sull'approvvigionamento delle risorse idriche, con dirette ripercussioni su tutto ciò che è legato all'utilizzo e alla gestione del territorio e non per ultimo sulla produttività che queste fitocenosi hanno. Il nostro paese è all'interno di una zona di transizione climatica tra la zona temperata settentrionale e quella sub tropicale meridionale, e per questo particolarmente sensibile, con un rischio di inaridimento a causa dei cambiamenti climatici con forti ripercussioni anche sulla produttività degli ecosistemi forestali.

3.1.2 – Gli Scenari Climatici

I modelli climatici globali producono simulazioni dell'evoluzione del clima sul nostro pianeta con un dettaglio di alcune centinaia di km, avendo assunto specifiche ipotesi sul contenuto di gas serra in atmosfera per determinarne le forzanti radiative. Tali ipotesi sono collegate a specifiche assunzioni sulle future condizioni di sviluppo socioeconomico (scenari). La produzione di tali previsioni numeriche è estremamente costosa in termini di risorse di calcolo, ed è quindi cruciale ottimizzare le possibilità di utilizzo e confronto delle simulazioni realizzate nei diversi centri di ricerca, che in linea di principio, non sono paragonabili a causa di differenze strutturali tra i modelli utilizzati. Un metodo consolidato per aumentare la fruibilità dei risultati è ricondurre tutte le informazioni disponibili e non immediatamente confrontabili ad un'unica base di confronto.

Attualmente i modelli di circolazione globale (GCM) non sono in grado di elaborare stime climatiche ad alta risoluzione, adeguata a studi regionali e locali, che necessitano risoluzioni di gran lunga inferiori ai 250-400 km elaborati da questi modelli. E' necessario, quindi, sviluppare complesse tecniche di *downscaling* il cui uso si è consolidato negli ultimi anni, definendosi in due distinti approcci: quello *dinamico*, che utilizza iterativamente modelli previsionali numerici a risoluzione sempre maggiore, e quello *statistico*, che richiede risorse di calcolo significativamente inferiori al primo, ma necessita di grandi quantità di dati cui applicare analisi sofisticate.

La cartografia relativa agli scenari climatici a 1km di risoluzione, utilizzata in questo studio, è stata realizzata e messa a disposizione dal Laboratorio di Tecniche Informatiche per la Vegetazione e l'Ambiente (TIVA) del Dipartimento di Biologia Ambientale della Sapienza Università di Roma. Tale cartografia deriva dal dataset TYN SC 1.0 (Mitchell et al. 2003) del *Tyndall Centre for Climate Change Research*, e contenente previsioni a scala regionale derivate dai GCM mediante tecniche di *downscaling* statistico che hanno portato l'originale risoluzione da 250 a 18 km. Sono state prese in considerazione le stime relative degli scenari B1 ed A1F1 del modello HadCM3 e validati dall'IPCC. Gli intervalli di tempo considerati sono i due trentenni centrati il primo al 2045 (2031-2060) ed il secondo al 2085 (2071-2100). Per standardizzare e rendere perfettamente sovrapponibili questi scenari a 18 km di risoluzione con la cartografia climatica relativa al trentennio 1961-90 a 1 km di risoluzione, si sono rese necessarie ulteriori elaborazioni di *downscaling* sulle anomalie calcolate (Attorre et al., 2007a; Attorre et al., 2008b).

Di seguito vengono riportati nelle figure 7-8, le carte climatiche delle variazioni riguardanti le Precipitazioni totali annue e le Temperature medie annue dove risalta immediatamente come

l'andamento delle differenze delle precipitazioni sia più un fenomeno localizzato ed estremamente variabile se confrontato con l'andamento dei cambiamenti delle temperature medie annue, dove osserviamo un trend di surriscaldamento più uniforme e continuo nel tempo e nello spazio.

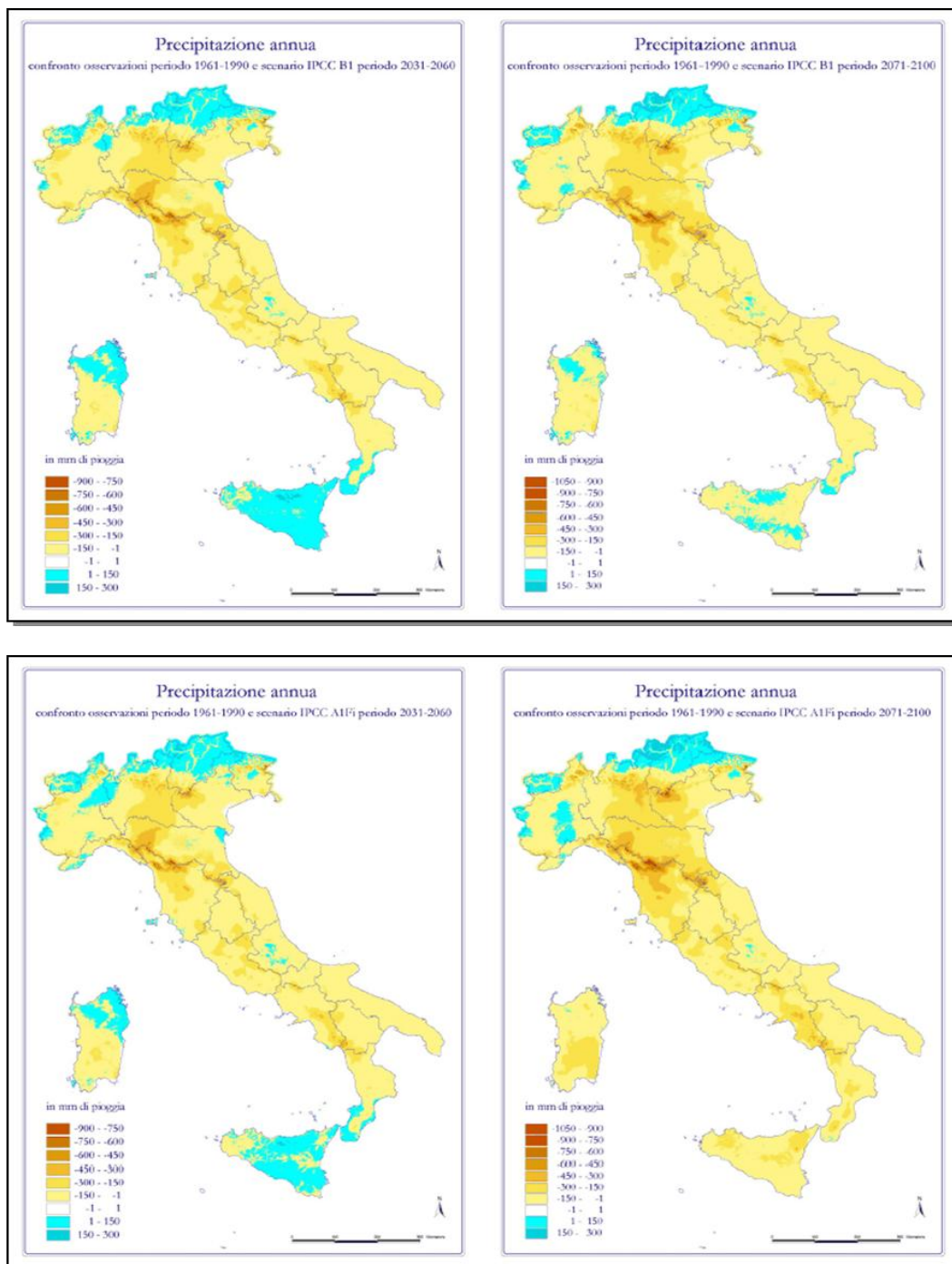


Figura 7: Nella parte superiore della pagine, la variazione climatica delle precipitazioni annue secondo lo scenario IPCC B1, nella parte inferiore, la variazione climatica delle precipitazioni annue secondo lo scenario IPCC A1Fi.

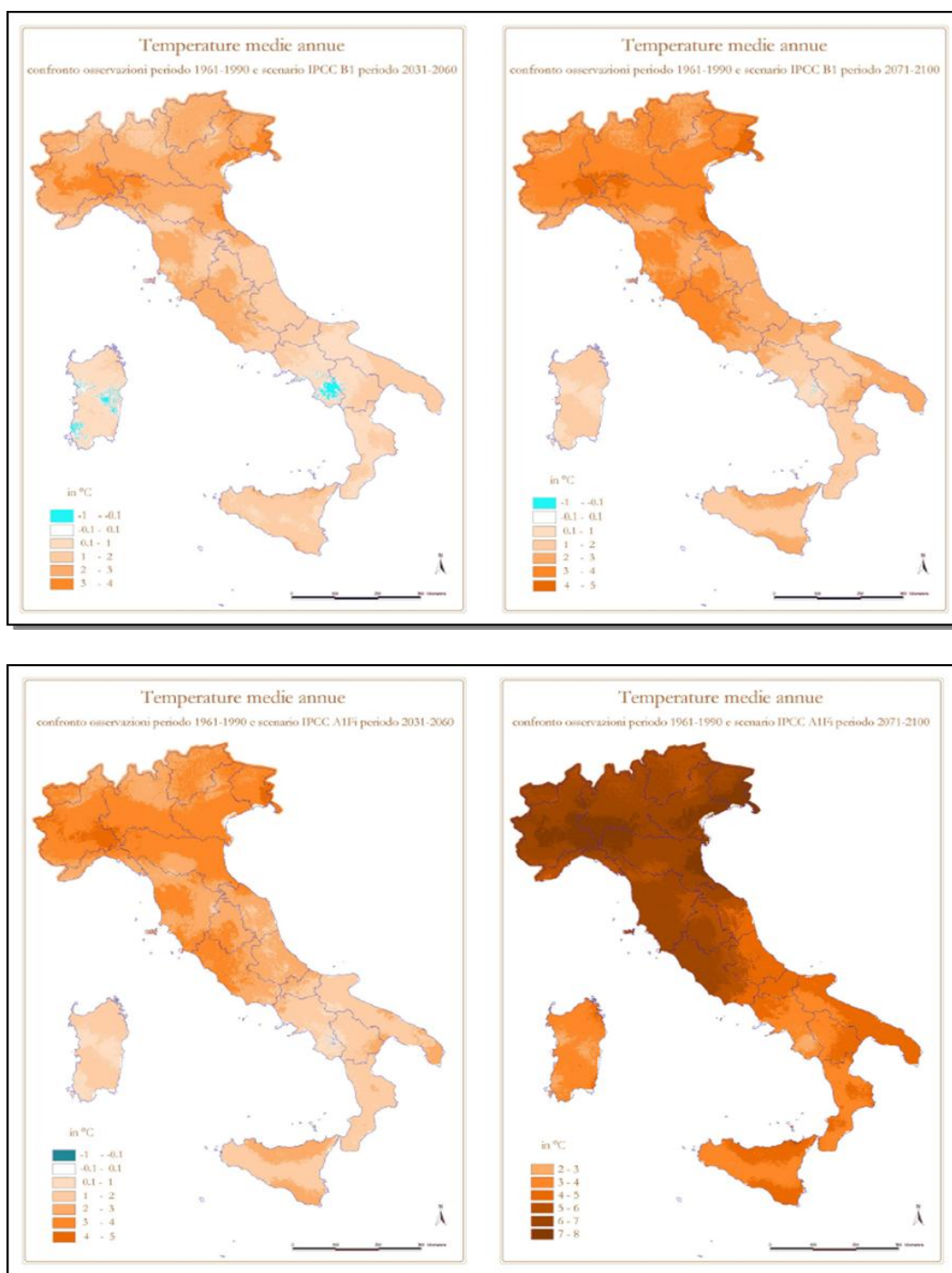


Figura 8: Nella parte superiore della pagina, la variazione climatica delle temperature medie annue secondo lo scenario IPCC B1, nella parte inferiore, la variazione climatica delle temperature medie annue secondo lo scenario IPCC A1Fi.

3.2 - Le specie considerate: *Fagus sylvatica*, *Quercus cerris*, *Quercus ilex*

Gli ecosistemi terrestri contribuiscono per una percentuale molto considerevole (circa il 64%) alla produzione primaria netta del globo; tra essi gli ecosistemi forestali rappresentano la componente più produttiva: su scala mondiale le foreste infatti raggiungono il 42% della produzione vegetale (Pignatti, 1998).

Le foreste hanno un ruolo molto importante nel ciclo globale del carbonio, poiché in esse è trattenuto in modo relativamente stabile il carbonio atmosferico fissato dalle piante durante il processo fotosintetico. La potenzialità di un bosco di trattenere il carbonio nelle proprie strutture è oggetto di molti studi. Le differenze ecologiche esistenti tra le diverse comunità possono essere sinteticamente espresse dai livelli raggiunti dalla produzione; infatti in relazione alle variazioni di altitudine nelle diverse fasce di vegetazione, oppure al variare della latitudine nelle differenti zone, la produzione delle comunità vegetali appare molto diversa. Lungo un gradiente altitudinale, ad esempio, i valori di produttività sono progressivamente decrescenti in relazione alla diminuzione delle temperature (Pignatti, 1998).

In diversi casi l'insufficiente disponibilità d'acqua e di nutrienti modificano questo andamento generale. Negli ambienti mediterranei, la massima produttività ad altitudine media viene raggiunta nel bosco caducifoglio (querceto misto, faggeta), mentre a basse ed elevate altitudini nel bosco sempreverde di sclerofille e di conifere (lecceta, pecceta) a basse ed elevate altitudini i valori di produttività sono notevolmente ridotti (Pignatti, 1995). L'entità della produzione primaria determina l'abilità di una specie di competere con le altre e la resistenza a fattori ambientali limitanti. La produzione primaria è dunque di centrale importanza per spiegare la presenza di una specie in un dato ambiente (Pignatti, 1998).

La luce che innesca il processo fotosintetico è tra i fattori ambientali di primaria importanza nella regolazione della produttività.

In linea generale la produttività primaria degli ecosistemi terrestri è bassa rispetto alla quantità di radiazione incidente, infatti la radiazione fotosinteticamente attiva che viene assorbita e utilizzata nel processo di fotosintesi è una piccola aliquota di quella che raggiunge le chiome.

Livelli alti di produzione sono in genere indicativi dell'elevata disponibilità delle risorse ambientali per le singole specie.

La scelta delle tre tipologie di bosco, deriva dalla volontà di comprendere più da vicino il comportamento di tre soprassuoli particolarmente presenti nel nostro territorio, e che rappresentano tipologie forestali che identificano la fascia dei boschi di sclerofille più termofili (fascia mediterranea del leccio), la fascia sub-mediterranea dei boschi misti con querce decidue (boschi di cerro), fino a quella dei boschi temperati di latifoglie più mesofili (fascia montana del faggio).

Tabella 1: Produttività lungo un gradiente altitudinale. La massima produttività viene raggiunta nel bosco caducifoglio (da Pignatti, 1995) modificata.

Vegetazione	Fascia altitudinale	Produttività Primaria
Fagetum	800 – 1500 m slm.	15 tC/ ha/ yr
Querceto misto	300 – 800 m slm.	14 tC/ ha/ yr
Quercetum ilicis	0 – 300 m slm	7 tC/ ha/ yr

Vengono descritte di seguito le tre specie indagate:

- ❖ *Fagus sylvatica*: è una delle più importanti specie forestali europee, sia come estensione dell'areale, che come incidenza dei consorzi forestali e qualità del legname.

Questa specie ha una distribuzione centroeuropea, localizzata soprattutto sui rilievi e nelle zone maggiormente interessate dalle correnti umide di origine oceanica.

L'area del faggio si estende dalla Spagna alla Grecia e dalla Sicilia alla Scandinavia (Fig. 9). Questa specie è strettamente legata a particolari condizioni ecologiche e per questo essa costituisce un indicatore ambientale della massima importanza. Le foreste di faggio sono per lo più monospecifiche, quindi il faggio è dominante, oppure esso si associa con abete bianco (*Abies alba*) ed abete rosso (*Picea abies*). Le faggete sono presenti su tutto il nostro territorio, con la sola eccezione della Sardegna. La faggeta è un bosco di caducifoglie a condizioni di clima fresco ed umido, che insieme al querceto misto entra nel grande complesso dei boschi temperati caducifogli (Pignatti 1998).

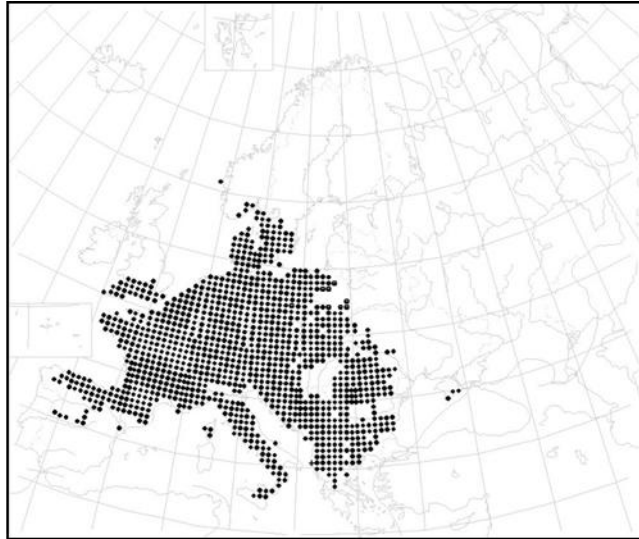


Figura 9: Areale Fagus sylvatica da AFE (Atlas Florae Europaeae – Finnish Museum of Natural History, University of Helsinki).

Essa è in grado di svilupparsi in aree con temperatura media annua di 9-11°C. La vegetazione della faggeta si sviluppa in un ambiente temperato-freddo e con larga disponibilità d'acqua.

- ❖ *Quercus cerris*: il suo areale (Fig. 10) si estende su tutta Italia (manca in Sardegna) e l'Europa sudorientale della penisola balcanica e fino ai Carpazi. Le cerrete nella nostra penisola sono molto estese. Il cerro è una specie relativamente resistente al freddo: il suo areale infatti si estende fino all'Austria, e sull'Appennino spesso risale fino ad entrare negli aspetti più temperati della faggeta. Dal punto di vista idrico è una specie abbastanza esigente, che in genere richiede suoli profondi, con una abbondante provvista d'acqua, ed è per questo che spesso si incontra su suoli alluvionali.

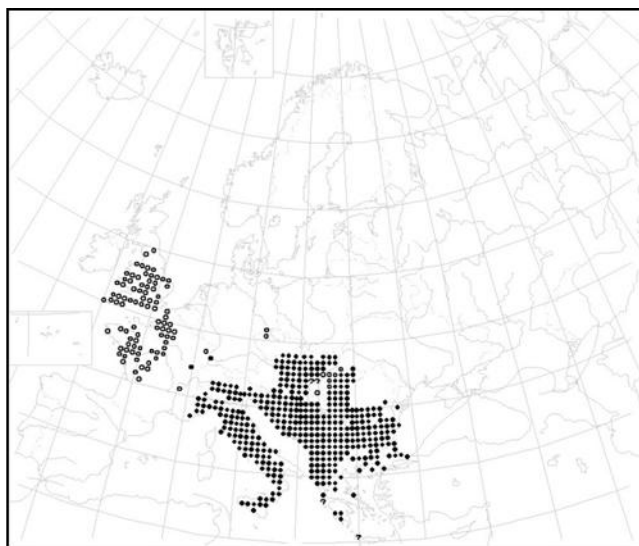


Figura 10: Areale *Quercus cerris* da AFE (Atlas Florae Europaeae – Finnish Museum of Natural History, University of Helsinki).

- ❖ *Quercus ilex*: quercia sempreverde che caratterizza la flora mediterranea, diffusissima in Liguria, nella penisola e nelle isole, mentre nelle regioni settentrionali è limitata alle aree più favorite al piede delle Alpi e lungo la costa adriatica, dove viene interpretata come relitto di un periodo caldo post-glaciale. L'area del leccio (Fig. 11) è quella dove si è avuto il primo sviluppo delle attività umane, e la vegetazione naturale vi è stata profondamente modificata in epoca preistorica e durante il grande ciclo della civiltà romana. La vegetazione mediterranea di latifoglie sempreverdi può avere struttura arborecente oppure arbustiva. Principale caratteristica di specie componenti la macchia mediterranea è il tipo di foglia sclerofilla: foglie ricche di tessuto sclerentimatico, di consistenza coriacea, rigide e molto persistenti. Questa vegetazione sempreverde, realizza una copertura del suolo molto densa, però rimane su valori di biomassa nettamente inferiori a quelli della vegetazione caducifolia, il che dimostra che la carenza di acqua nei mesi caldi, funziona da severo fattore limitante. L'ambiente di lecceta è caratterizzato da una spiccata stagionalità del clima, tale da imporre due pause vegetative: la pausa invernale dovuta alle basse temperature e quella estiva dovuta alla siccità. La lecceta è il tipo di vegetazione, tra i nostri climi, che realizza il massimo di assorbimento dell'energia radiante, che può arrivare fino al 95-97%; ciò si realizza attraverso una complicata stratificazione della vegetazione in uno o più strati arborei (Pignatti, 1998).

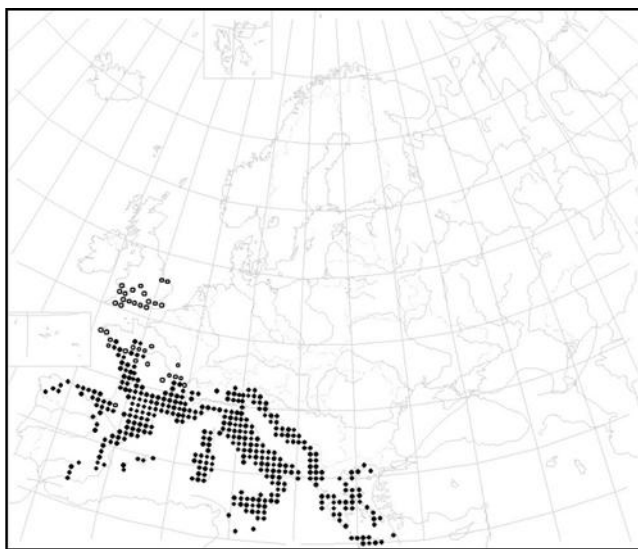


Figura 11: Areale Quercus ilex da AFE (Atlas Florae Europaeae – Finnish Museum of Natural History, University of Helsinki).

3.3 - Il dato forestale

L'informazione forestale utilizzata proviene dall'indagine IN.DE.FO. (Indagine Deperimento Foreste) che è parte di due programmi europei per la protezione delle foreste contro l'inquinamento atmosferico: *International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP-Forests)*, stabilito nel 1985 sotto la *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)*, e *European Union Scheme on the Protection of Forests Against Atmospheric Pollution* stabilito dal Consiglio Europeo nel 1986. L'indagine viene effettuata ogni anno in Europa su una rete transnazionale di 16x16 Km. Il *network* italiano è disposto su una rete di 15x18 Km affinché coincidesse con il precedente programma, basato su una maglia di 3 Km di lato e i rilievi vengono effettuati annualmente da personale del Corpo Forestale dello Stato nel corso dell'estate.

Complessivamente vengono estratti da questo database i dati relativi alle specie considerate in questo lavoro: *Fagus sylvatica*, *Quercus cerris*, *Quercus ilex*.

Con le informazioni ritenute più utili agli scopi prefissati contenute in questo materiale cartaceo è stato realizzato un database che riporta: il numero degli alberi per ciascuna specie presente in ogni plot, i singoli diametri, il codice individuale del plot, la Località ed il Comune d'appartenenza. Attraverso la formula riportata di seguito è stato elaborato un Indice di Abbondanza (IV) per ciascuna specie (x) all'interno di ciascun plot.

La formula è la seguente:

$$IV(x) = [(\sum \text{diametri } (x) / \sum \text{diametri (totali)})100 + (\sum \text{fusti } (x) / \sum \text{fusti (totali)})100].$$

In un plot mono-specifico il valore di IV della specie x è di 200, mentre in tutti gli altri casi, dove sono state osservate più specie, la somma di tutti i singoli valori dei rispettivi IV deve dare 200 (Smith and Smith, 2000).

In ArcGIS 9.2 è stato costruito un Sistema Informativo Territoriale (SIT), adottando come sistema di coordinate di riferimento l'European Datum 1950 (ED50), e come proiezione cartesiana l'UTM 33N. All'interno di questo SIT è stato dapprima georiferito il database forestale utilizzando l'informazione delle coordinate metriche x e y contenute nel materiale cartaceo del Progetto IN.DE.FO, ottenendo così un vettore a geometria puntiforme e a maglia regolare di 3x3 km che è stato successivamente completato spazialmente in modo così da coprire tutto il territorio nazionale e non solo i boschi monitorati. Alla fine di queste operazioni si disponeva all'interno del SIT un layer puntiforme di 30840 plot di cui 3547 contenenti

l'informazione forestale (reali indefo dalle mie tabelle), e dei rimanenti 27293 non monitorati nei quali l'informazione forestale era da stimare.

Per cercare di definire la nicchia ecologica realizzata di una data specie per lo più si deve fare ricorso a variabili ambientali indirette (Austin, 1980, 1985, 1987, 2002, Austin & Smith, 1989; Mackey, 1993), le cui correlazioni con la vegetazione sono state messe in evidenza da precisi studi ecofisiologici (Box, 1981; 1996; Woodward, 1987; Mackey & Sims, 1993). Nella costruzione dei nostri modelli abbiamo utilizzato come predittori le variabili climatiche e gli indici bioclimatici, le variabili topografiche, le variabili geografiche, e la carta geologica 1:50.000 d'Italia. Sappiamo che i fattori climatici agiscono maggiormente sulle distribuzioni zonali a livello di grande scala territoriale (Woodward, 1987; Ellenberg, 1988), e sono comunemente utilizzati in modelli di Distribuzione Potenziale Attuale (Heikkinen et al., 1996; Burke, 2001; Frescino et al., 2001) e Futura in risposta ad ipotetici cambiamenti climatici (Huntley et al., 1995; Guisan et al., 1998; Duckworth et al., 2000; Sykes, 2001; Iverson & Prasad, 1998, 2002; Iverson et al., 1999).

I fattori topografici e pedologici, invece, sono più importanti nel determinare le presenze locali extrazonali e azonali (Woodward, 1987; Heikkinen et al., 1996) e sono impiegati per la creazione di modelli di Distribuzione Potenziale Attuale a scala locale a più alta risoluzione (Huston, 1994).

Nei modelli di distribuzione delle specie sono stati utilizzati 12 predittori ambientali così suddivisi: 6 variabili climatiche, riferite al trentennio 1961-90, facenti parte di una serie cartografica più ampia elaborata per tutta Italia sulla base di un modello climatico (Attorre et al., 2007a, 2008a, 2008b), selezionate attraverso una procedura statistica e da considerazioni ecofisiologiche individuate dalla letteratura scientifica del settore, che sono: Precipitazioni annue (Ptot), Precipitazioni del trimestre estivo (Ps), Precipitazioni del trimestre invernale (Pw), Temperatura media annua (Tm), media delle Temperature minime di Gennaio (Tmin1), media delle Temperature massime di Luglio (Tmax7). Inoltre, 3 variabili topografiche derivate dal DEM a 200 m di risoluzione: Altitudine, Pendenza e Orientamento. Altre 2, relative alla posizione geografica: le coordinate x e y. Infine, in mancanza di una carta pedologica dettagliata e completa dell'area di studio, è stata utilizzata la carta geologica al 1:50.000 d'Italia opportunamente riclassificata.

In seguito sono state standardizzate e convertite in formato GRID tutte le carte ambientali sopra citate. In ambiente GIS, la maglia vettoriale 3 km x 3 km puntiforme è stata combinata con ciascuna di queste carte ambientali in formato GRID, ottenendo una nuova matrice vettoriale, definita matrice ecologica. Alla fine di questa procedura, all'interno di questa matrice abbiamo

unito l'informazione forestale dei 3547 plot monitorati, espressa come valore IV, con l'informazione ambientale disponibile per tutti i 30840 plot.

Allo scopo di individuare la migliore correlazione tra i fattori ambientali e gli areali di distribuzione delle specie arboree sono stati confrontati diversi metodi statistici. I dati sono stati strutturati in una matrice di 3547 record, che riportano i valori osservati dell'IV per le specie e i valori esistenti delle covariate ambientali. La distribuzione potenziale attuale per ciascuna specie è stata stimata sulla matrice di dimensione 27293 plot, che presenta per ciascuna unità da predire il valore delle sole variabili esplicative. In questo contesto, per fornire un indice di bontà di predizione, è stato calcolato per ciascuno dei metodi statistici utilizzati e sotto esposti, il valore dell'indice RMSE (Tab. 2) – Root Mean Square Error - (non relativo perché alcuni valori da predire sono nulli). Il risultato è la media su 100 campioni di test di dimensione pari al 30% (quindi il training è del 70%) delle 3547 unità con valori di IV osservati.

I metodi presi in considerazione sono:

- ❖ **Regression Tree Analysis:** sono indicate per analisi di dati che presentano caratteristiche non lineari, non additive e con gerarchie di importanza (Franklin, 1998; Vayssières et al., 2000; Iverson & Prasad, 1998; Rouget et al., 2001; Clark & Pregibon, 1992). Per esempio la relazione esistente fra l'abbondanza di una specie e l'esposizione nei terreni montagnosi, molto probabilmente non è lineare; infatti, la risposta varia molto in considerazione perlomeno di un'altra variabile ambientale: la quota. Inoltre l'effetto dell'una e dell'altra non è sempre nella stessa direzione, così come differenti gruppi di variabili possono influire diversamente sulla risposta specifica in differenti parti del suo areale di distribuzione. Inoltre, le Tree Analysis restituiscono in forma grafica e gerarchica queste relazioni, permettendo di identificare immediatamente quali sono i fattori ambientali che influenzano maggiormente la presenza, o l'abbondanza, della specie. Le Tree Analysis catturano queste interazioni, dividendo il dataset in due subset, basandosi su un primo e principale predittore.

Il Tree (il dendrogramma) è costruito da successivi e ripetuti tagli dei subset che si originano progressivamente, ognuno dei quali è differenziato dagli altri sulla base di una singola variabile esplicativa, che minimizza il più possibile la devianza all'interno di ciascun subset generato. In questa maniera si creano dei nodi, o gruppi di dati, con caratteristiche più simili tra loro e con varianza relativamente più piccola. L'output grafico delle Tree Analysis è definito “struttura ad albero” poiché inizia da un unico

punto, il dataset completo, e termina con una serie di nodi terminali attraverso vari ordini di “branche” dicotomiche.

E’ possibile stimare la relativa importanza di ciascun taglio dalla lunghezza della linea che lo separa dalla coppia di nodi generati. Il valore medio alla fine di ciascun nodo terminale viene individuato come la variabile risposta cercata. Le variabili che operano a scala regionale vengono decifrate per prime ed appaiono nella parte superiore dell’albero, mentre quelle che operano localmente appaiono in prossimità dei nodi terminali.

❖ **Random Forest:** estensione dei Regression Tree introdotta da Breiman e Catler, (Breiman, 2001). Il metodo consiste nel separare un test set di circa 1/3 di dimensione, e costruire vari alberi a partire da vari test set, campionando con ripetizione dal dataset dei dati osservati.

I vari alberi, di solito in numero elevato tra 500 e 2000, vengono poi “pesati” in base alla quota di devianza spiegata, producendo alla conclusione un albero “medio” con ottime capacità di classificazione. I limiti degli alberi di regressione/classificazione sono in questo caso accentuati dalla complessità computazionale e dal fatto che, almeno in certi casi, il metodo può apparire come una scatola nera, senza un vero e proprio albero di output che il ricercatore può considerare e calibrare. In particolare, questa tecnica di previsione funziona correttamente quando il training ed il test set contengono l’intero intervallo di variazione della variabile risposta. Funziona meno bene quando il dataset osservato contiene solo un sottoinsieme dei possibili valori della variabile risposta. A questo scopo può essere interessante analizzare il comportamento della specie *Fagus sylvatica* (Fig. 12).

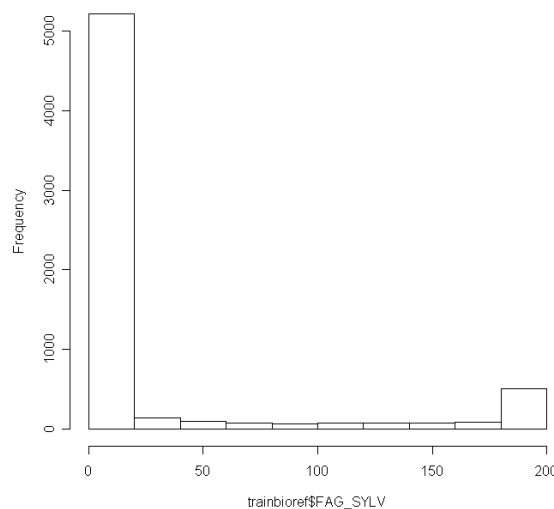


Figura 12: Istogramma di distribuzione degli IV osservati per la specie *Fagus sylvatica*.

Come si può facilmente notare, l'albero, a prescindere dal set di verifica e di addestramento, sarà verosimilmente più capace di discriminare valori elevati o ridotti di IV, ma non avrà sufficiente capacità per discriminare valori intermedi. Questo non si riflette in alcun modo sulla capacità di predire la distribuzione potenziale attuale (che è verosimilmente conforme a quella osservata sul dataset utilizzato per stimare gli alberi di regressione), ma si ripercuoterà sulla incapacità dell'albero di essere estrapolato a situazione in cui le variabili esplicative assumono valori molto differenti dagli attuali (quelle presenti nel set di apprendimento) ed i relativi valori di IV possono essere verosimilmente inferiori al valore massimo. Per questo motivo, si è proceduto a costruire alberi di regressione utilizzando alcune potenze ($1/2$, $2/3$, etc.) dell'IV osservato, così come suggerito, tra gli altri, anche da Prasad et al. (2006). In questo modo, si evita che gli alberi che si adattano bene a valori elevati (intorno al massimo, pari a 200) abbiano un peso troppo consistente poiché spiegano una parte significativa della devianza, mentre alberi che spiegano bene valori ridotti (intorno al minimo, pari a 0) abbiano peso non significativo perché la devianza spiegata è bassa. La performance per quest'ultimo approccio delle proiezioni sui dati al 2030 ed al 2100 sono nettamente migliori, ma ancora troppo "sbilanciate" quando la specie è molto concentrata su valori prossimi allo 0 o prossimi al 200 (*Fagus sylvatica*, *Quercus cerris*).

Inoltre, la distribuzione potenziale per specie non polarizzate risente di uno smussamento molto significativo dei valori predetti, e questo rende l'approccio basato su tali trasformazioni e su queste specie piuttosto opinabile. Per questo motivo, si è deciso, dopo varie prove basate su trasformazioni biunivoche dei dati osservati, di non utilizzare l'albero "medio", che potrebbe risentire troppo dell'influenza di alberi anomali (ossia con una elevata capacità di discriminare valori elevati, ma una bassa capacità di discriminare valori nulli), bensì l'albero "mediano", citato in letteratura scientifica come Robust Random Forest (RFm), che risulta notevolmente più robusto rispetto alla presenza di alberi anomali.

- ❖ **Modelli di regressione lineare:** la formulazione più semplice di un legame tra variabile risposta (IV) e covariate geo-climatiche. Questo metodo, molto veloce dal punto di vista della stima del vettore dei parametri e della predizione dei valori attuali e futuri della distribuzione potenziale, ha il difetto di non prendere in considerazione il fatto che la variabile risposta è limitata. Può, quindi, fornire valori predetti inferiori allo 0 o superiori al 200, che sono incoerenti con la definizione della variabile e che vanno "corretti"

manualmente utilizzando, però, un approccio soggettivo difficilmente giustificabile. Tra l'altro, il modello di regressione lineare prevede che il cambiamento subito dalla variabile risposta sia lo stesso per variazioni della stessa entità di una variabile esplicativa, il che è contraddetto da molte applicazioni empiriche in cui si nota una sorta di asintoto per quanto riguarda tale effetto, e sottoinsiemi di valori dei coefficienti per quanto riguarda sottoinsiemi diversi dell'intervallo di variazione delle variabili esplicative.

- ❖ **Universal kriging:** che corrisponde ad un modello di regressione lineare standard, in cui cade l'ipotesi di correlazione dei residui, che viene sostituita da una matrice di covarianza di forma nota specificata in base ad un modello (di solito parametrico) di variogramma. Anche in questo caso, così come nel modello di regressione lineare standard, i valori predetti sono potenzialmente illimitati.
- ❖ **IDW (Inverse Distance Weighting):** ossia un metodo di interpolazione deterministica dove il valore X_s in un punto geografico s è interpolato utilizzando una funzione del tipo:

$$\hat{x}_s = \frac{\sum_{j \in S} w_j(x_s) x_j}{\sum_{j \in S} w_j(x_s)}, \quad \text{dove: } w_j(x_s) = \frac{1}{d(x_s, x_j)^p}$$

x_j è un punto di osservazione noto, e p è l'ordine utilizzato per “smorzare” l'effetto all'aumentare della distanza.

Sulla base di quanto emerge dalla tabella 2, relativa al calcolo degli RMSE, si evidenzia che il RFm sia il modello migliore per studiare le specie indagate.

Le matrici così elaborate sono state successivamente utilizzate in ambiente GIS, in funzione di *Spatial Analyst*, per realizzare il set completo delle Carte di Distribuzione Potenziale Attuale di tutte le specie arboree studiate. Per elaborare i modelli statistici relativi ai diversi scenari climatici sono state sostituite nella matrice di input per le 6 variabili climatiche riferite al periodo 1961-1990: Precipitazioni annue (Ptot), Precipitazioni del trimestre estivo (Ps), Precipitazioni del trimestre invernale (Pw), Temperatura media annua (Tm), media delle Temperature minime di Gennaio (Tmin1), media delle Temperature massime di Luglio (Tmax7), con quelle riferite di volta in volta allo scenario B1 periodo 2031-2060, B1 periodo 2071- 2100, A1Fi periodo 2031-2060 e infine allo scenario A1Fi periodo 2071-2100.

Attraverso questa procedura sono state costruite quattro nuove matrici dove sulla base dei 3547 plot forestali monitorati con condizioni di clima attuale utilizzati come set di apprendimento, abbiamo stimato per i restanti 27293 plot l'informazione forestale con i nuovi valori climatici così come previsti dallo scenario IPCC. Queste matrici sono state successivamente elaborate per prendere in considerazione la frammentazione del territorio, e, infine, utilizzate per stimare la produttività dei popolamenti forestali.

Tabella 2: RMSE assoluto (100 replicazioni, training 70%, test 30%).

	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus cerris</i>	<i>Quercus ilex</i>
Random Forest (RF)	41,74	46,80	29,30
Robust RF (RFm)	36,25	39,21	27,93
RTA	45,06	50,25	29,47
Regressione	51,69	50,39	32,73
Kriging	49,98	49,38	27,97
IDW	51,37	46,79	29,25

3.4 - La matrice di frammentazione

Lo studio delle risposte delle comunità vegetali naturali del passato, in conseguenza di cambiamenti climatici simili, può aiutarci a capire come le specie attuali potrebbero reagire agli stress fisiologici e competitivi imposti loro dai cambiamenti del clima.

Le specie tendono a seguire il loro range climatico ottimale, restringendo il loro areale là dove le condizioni diventano inadatte e nel contempo espandendosi dove invece le condizioni migliorano (Ford, 1982; Peters and Darling, 1985).

Le potenziali “rotte” migratorie sono poi spesso bloccate dalla frammentazione del territorio, legata alla presenza delle attività umane e non sempre sono adatte ad una colonizzazione intermedia, a causa di differenti caratteristiche climatiche ed edafiche (Pitelka, 1997).

Le reali possibilità di “spostamento” degli ecosistemi forestali sono comunque al di sotto delle necessità; la rapidità del cambiamento climatico in atto è infatti di gran lunga maggiore della velocità di colonizzazione di nuovi spazi della quale sono capaci le specie arboree. Inoltre le specie vegetali ed animali ad esse associate posseggono ognuna una diversa capacità e velocità di dispersione e colonizzazione, è quindi da attendersi la progressiva disgregazione degli ecosistemi forestali, che non saranno in grado di fronteggiare i cambiamenti climatici come unità intatte (Hansen, 2001).

Durante i passati riscaldamenti globali del clima, questo ha significato che le specie si siano spostate sia verso latitudini maggiori sia verso altitudini più elevate (Baker, 1983).

Questa risposta è di tipo specie-specifica (Fig.13), per cui le associazioni vegetali, ed in particolare gli ecosistemi forestali, così come li conosciamo oggi, potrebbero andare incontro a dei cambiamenti (IPCC, 1995, 2001).

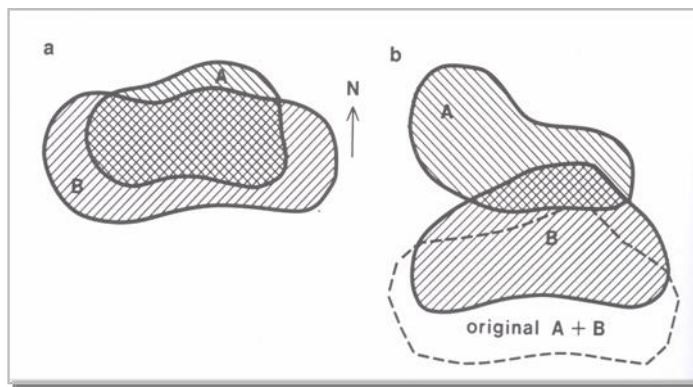


Fig. 13: La risposta delle specie è specie specifica.

Inoltre, in base ai dati paleoclimatici, la velocità di riscaldamento della Terra sembrerebbe molto più accentuata di quella di migrazione delle comunità naturali, stimata quest'ultima in 10-100 Km per secolo (Huntley, 1988, 1990). Questo grave squilibrio tra vegetazione e clima (Dyer, 1994) potrebbe produrre un ulteriore e progressivo deterioramento delle biocenosi attuali, non più adatte al clima mutato, senza che altre più competitive possano arrivare nel nuovo habitat per sostituirle, in quanto non in grado di migrare così velocemente e, a volte, anche perché

impossibilitate a superare quelle barriere ecologiche prodotte dalle trasformazioni antropiche del paesaggio (IPCC, 1990; Dyer, 1994): la frammentazione del territorio.

E' stata costruita una matrice di "idoneità ambientale" derivata dal Corine Land Cover 2000 (CLC) a celle di 3x3 km perfettamente sovrapponibile da un punto di vista spaziale alla maglia di informazione forestale e a tutte le altre matrici di distribuzione potenziale. L'informazione contenuta in questa matrice è rappresentata dal grado di idoneità dell'uso del suolo riportato ad ogni singola cella ed espresso in un valore compreso tra 0 e 1, dove il valore 1 sta ad indicare la massima idoneità. Questo valore massimo si raggiunge quando tutta l'area compresa nella singola cella (9 km²) è classificata come idonea ad ospitare i boschi secondo quanto esplicitato dalle categorie del CLC.

3.5 - La modellistica della Produttività Primaria Netta

Nel 2008 Chiang presenta nel suo lavoro (Chiang et al., 2008), come obiettivo della sua ricerca la modellizzazione dell'effetto del cambiamento climatico sulla composizione e sulla migrazione potenziale delle specie forestali e sulla Produzione Primaria Netta associata a tali cambiamenti, utilizzando il modello PnET-II.

Esistono diversi modelli che vengono utilizzati per stimare la produttività degli ecosistemi (PnET, PnETII, C-Fix, 3-PG, ...), ma tutti necessitano spesso di una notevole quantità di variabili che spesso non sono disponibili.

La direzione e la forza degli effetti del cambiamento del clima sulla NPP (Produzione Primaria Netta) dipendono in gran parte dal grado di riscaldamento e di equilibrio idrico. Quindi, quanto il cambiamento del clima futuro agisce sugli ecosistemi forestali, è un'azione combinata tra i processi atmosferici e quelli biotici.

Le risposte della vegetazione al cambiamento climatico possono essere di tipo eco-fisiologico riguardo al bilancio del carbonio, o possono indurre delle variazioni nette nella NPP.

L'incremento netto di NPP come risposta della vegetazione al cambiamento climatico può incrementare il sequestro di CO₂ atmosferica, creando un feedback negativo all'interno del sistema, oppure portare a una riduzione della NPP riducendo la capacità delle foreste a sequestrare carbonio, causando così un feedback positivo e accelerando i processi di cambiamento climatico.

La direzione del feedback può avere un impatto molto significativo sul bilancio del carbonio e quindi sul cambiamento climatico globale (Woodwell et al., 1998; Norby et al., 2005).

Gli effetti di cambiamenti strutturali, fisiologici, dello spostamento delle specie o della loro composizione nella successione, in conseguenza dell'alterazione climatica sono processi che non sono ancora ben conosciuti (Norby et al., 2001).

Le specie vegetali possiedono un'ampia varietà di caratteristiche specie-specifiche che sono rilevanti per l'NPP quali: l'architettura dell'albero, l'allocazione del carbonio, la fenologia delle foglie, la tolleranza alle temperature estreme e alla siccità, le caratteristiche delle foglie.

A scala regionale e globale, *Dynamic Global Vegetation Models* (DGVMs) hanno incorporato il cambiamento della distribuzione delle specie secondo *Plant Functional Types* (PFTs – metodo di classificazione, per raggruppare le specie vegetali secondo gruppi semplici in base alla loro funzione nell'ecosistema) o al loro uso come risorse (Smith et al., 1997), come risultato delle proiezioni di clima futuro (Bachelet et al., 2001; Cramer et al., 2001), ma il cambiamento nelle PFTs non riflette la dinamica delle comunità prese in esame.

L'effetto netto della ridistribuzione delle specie su NPP, dipenderà dalla composizione futura di tali specie e dalla loro interazione con il clima futuro.

Ciò è stato possibile grazie all'impiego di un modello meno complesso, che utilizza variabili chiave per generalizzare le stime, ed in grado di elaborare delle proiezioni per studiare e comprendere la direzione e la forza di questi effetti sulla NPP; inoltre è stato possibile analizzare come questa si distribuisce per le specie indagate, secondo un range latitudinale che comprende tutto il territorio italiano.

Mo.C.A. (*Modelling of Carbon Assessment*) è costruito all'interno di STELLA (isee systems, inc. Stella 9.0.3 Research) software object-oriented che usa gli oggetti e le loro interazioni per disegnare le applicazioni del programma, utilizzando icone-oggetto, ognuna delle quali rappresenta una variabile di stato, un parametro, un processo, che viene messo in relazione con gli altri parametri. Tali relazioni sono stabilite dalla struttura funzionale-causale del modello.

Ci sono diversi modelli che simulano l'attività assimilativa del carbonio, ma spesso non sono facilmente usufruibili perché necessitano di una grande quantità di variabili, che spesso non sono disponibili. Mo.C.A. è stato scelto per le sue caratteristiche strutturali e per i dati che avevamo a disposizione.

Attraverso la stima giornaliera della Produzione Primaria Netta, Mo.C.A. (Vitale et al. 2003, 2005a, 2005b, 2007), ha restituito dati della NPP con i quali è stato possibile realizzare carte della distribuzione dei valori di NPP attuali e previsti secondo gli effetti di scenari futuri di cambiamento climatico.

Infine, le stime ottenute dalla modellizzazione sono state validate con i valori misurati dalle Torri *Eddy Covariance*, della rete CarboItaly – Fluxnet, presenti nei popolamenti forestali studiati.

3.5.1 - Mo.C.A. (*Modelling of Carbon Assessment*)

Mo.C.A. (*Modelling of Carbon Assessment*) è un modello semi-empirico che simula la Produzione Primaria Netta (NPP), la traspirazione della chioma (E) e l'efficienza di utilizzo dell'acqua (*Water Use Efficiency* - WUE), con dati in input che provengono da campagne di misura dei parametri specie specifici e da mappe in ambiente GIS.

Il modello è stato applicato ai dati disponibili per le faggete, le cerrete e le leccete d'Italia, secondo il dato forestale spazializzato proveniente dal monitoraggio IN.DE.FO. del 1995, che investe differenti regioni climatiche e biogeografiche del territorio nazionale.

In funzione delle informazioni che si evincono dalle simulazioni e dalla loro integrazione nel GIS, si possono implementare politiche di gestione forestale per le tre tipologie di soprassuolo che sono state analizzate.

Il modello Mo.C.A. simula i parametri fisiologici in funzione delle variabili climatiche come la media delle temperature e l'intensità della luce ed un delta, calcolato come la differenza tra la temperatura media e la temperatura minima di gennaio. Nonostante nelle nostre simulazioni climatiche i parametri che variano sono sia le temperature che le precipitazioni, in un'ottica di cambiamento climatico globale, Mo.C.A. assume che il regime delle acque è sufficiente e non lo considera come un fattore limitante (Manes et al., 1998; Vitale et al. 2005b).

La metodologia utilizzata è stata validata con dati provenienti da siti, per le diverse tipologie forestali, nei quali sono presenti delle Torri *Eddy Covariance*, con i quali si sono messi in relazione i risultati delle simulazioni.

Mo.C.A. è stato applicato usando i dati meteorologici disponibili dal database climatico d'Italia secondo il trentennio di riferimento 1961 – 1990 del WMO (*World Meteorological Organization*), messo a disposizione dal Laboratorio TIVA del Dipartimento di Biologia Ambientale della “Sapienza” Università di Roma, lo stesso che è stato utilizzato per la modellizzazione della distribuzione potenziale delle specie forestali.

Inoltre tale database è stato alla base dei calcoli sugli scenari climatici futuri soggetti a un cambiamento della concentrazione di CO₂ con relativa variazione delle temperature e delle precipitazioni.

Mo.C.A. è basato sull'assunzione del “Big-Leaf”, la quale considera la struttura della chioma come se fosse una grande e unica foglia con l'indice di area fogliare (Leaf Area Index - $m^2_{leaf} m^{-2}_{ground}$) che varia nel tempo (Kull & Jarvis, 1995; Vitale et al., 2003).

Gli output del modello sono: NPP (tC ha⁻¹), traspirazione totale della chioma E (KgH₂O ha⁻¹) e il Water Use Efficiency (WUE = NPP E⁻¹).

Questo modello è precedentemente utilizzato per calcolare NPP ed E, in accordo con il cambiamento delle temperature per le foreste mediterranee sempreverdi (Vitale et al., 2003), e la resilienza dei popolamenti di macchia a *Phillyrea angustifolia* dopo il passaggio del fuoco (Vitale et al., 2007).

Mo.C.A. può essere utilizzato per differenti specie e per diversi tipi di vegetazione, poiché dati input di base sono divisi in due compartimenti:

1. un modulo che riguarda parametri fisiologici e strutturali delle specie;
2. un modulo climatico che racchiude le informazioni di tipo climatico e stazionale dei punti in cui la specie è presente; la media annua della temperatura dell'aria e i range di variazione con il mese più freddo, e le coordinate geografiche di ogni sito da investigare, cosicché il sistema è in grado di calcolare l'intensità di luce giornaliera (in W m^{-2}) e la temperatura in ($^{\circ}\text{C}$);

Altri parametri addizionali possono essere ottenuti da un set di variabili che possono essere acquisite in laboratorio, in bibliografia, attraverso indagini di campo, o per mezzo di dati da satellite, con la possibilità di adattare il modello al tipo di indagine e alla specie investigata (Tab. 3).

Tabella 3: Variabili matematiche utilizzate nell'implementazione del modello.

Parameter Name	Symbol	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus cerris</i>	<i>Quercus ilex</i>	Units
Simulated Parameters					
Diurnal net production for the i^{th} day	$PNET(i)$	-	-	-	$\text{gC m}^{-2}\text{day}^{-1}$
Leaf net CO_2 assimilation rate	$A(i)$	-	-	-	$\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Leaf Area Index	$LAI(t)$	Initial value: 0	Initial value: 0	Initial value: 2.2	$\text{m}^2_{\text{leaf}} \text{ m}^{-2}_{\text{ground}}$
Input Parameters					
Rate of respiration in the dark	R_d	1.03	1.03	0.30	$\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Maximum rate of net photosynthesis at light saturation	A_{max}	20	21	15	$\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Repartition coefficient to the leaves	α	0.301	0.280	0.230	-
Quantum yield efficiency	$QY(T)$	0.055	0.036	0.044	$\mu\text{molCO}_2 \mu\text{mol photons}^{-1}$
Light extinction coefficient	k	0.71	0.60	0.69	Dimensionless

Nello schema di seguito (Fig. 14) vengono mostrati i parametri di input e output possibili del modello.

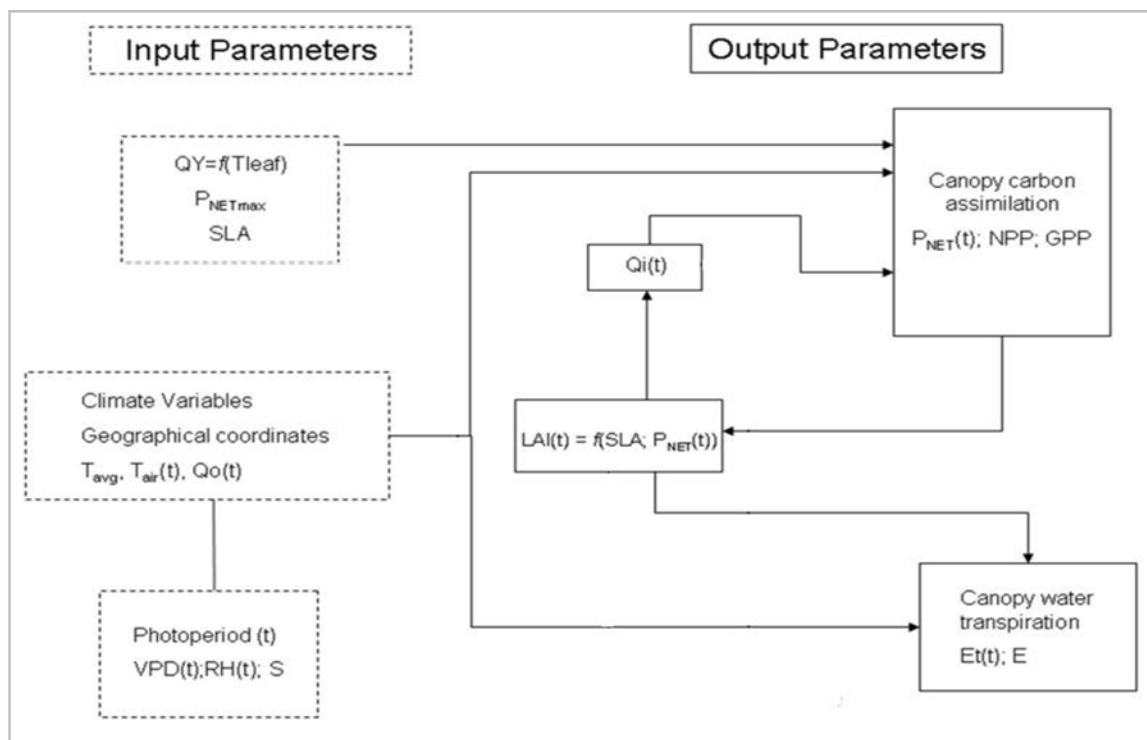


Figura 14: schema generale di funzionamento del modello (Vitale et al., 2003b) modificato.

Per questo lavoro l'informazione geografica della latitudine è stata calcolata suddividendo l'Italia in 43 fasce di ampiezza $0,25^\circ$ (Tab. 4) all'interno delle quali si sono determinate le informazioni climatiche dal database; parte delle variabili sono state acquisite da bibliografia.

Tabella 4: fasce di latitudine per le distribuzioni potenziali attuali.

Specie	n° Fasce di Latitudine	Estensione Latitudinale (European Datum 50 fuso33 N – UTM)	
		SUD	NORD
<i>Fagus sylvatica</i>	43	36,89125	47,39125
<i>Quercus cerris</i>	43	35,5154	47,0154
<i>Quercus ilex</i>	43	35, 5154	47,0154

Attraverso l'approccio modellistico è stato possibile stimare la quantità di CO_2 sequestrata dallo stesso tipo di vegetazione nelle differenti aree climatiche d'Italia e determinare il cambiamento delle condizioni dei *sink* di carbonio a livello della loro distribuzione spaziale.

La metodologia è articolata in tre fasi:

1. Sviluppo e applicazione del modello in corrispondenza dei dati climatici delle stazioni meteorologiche che forniscono il dato;
2. Calcolo della similarità tra tutti i siti, sulla base di parametri ecologici che il modello simula separatamente, in modo da tenere presente l'eterogeneità dell'area di studio per le caratteristiche di produttività;
3. Trasferimento dei risultati ottenuti dalle simulazioni di Mo.C.A. in un GIS, per effettuare quelle analisi che hanno permesso di mettere in evidenza le differenze tra le diverse aree del territorio nazionale da un punto di vista geografico, individuando dove le specie mantengono una capacità produttiva e dove invece tendono a scomparire sotto l'effetto del cambiamento climatico.

Il tasso netto di fotosintesi ($A(i)$, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) è calcolato come la media della radiazione luminosa all'interno della chioma all' i -esimo giorno dell'anno ($Q_i(i)$, $\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), in accordo con la relazione definita da De Wit et al. del 1978:

$$A(i) = (A_{\max} - R_d) \left[1 - e^{-\left(\frac{QY Q_i(i)}{A_{\max}}\right)} \right] + R_d \quad (1)$$

dove $A_{\max}$ è il massimo tasso di fotosintesi netta con la saturazione della luce ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), R_d è il tasso di respirazione oscura (assunto costante a $1.03 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e QY è l'efficienza quantica della fotosintesi ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol fotoni}^{-1}$).

L'attenuazione della luce attraverso la chioma $Q_i(i)$ ($\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) è assunto dipendente dal LAI (i) in accordo con la legge di Beer-Lambert, secondo cui:

$$Q_i(i) = Q_0(i) \cdot e^{-(K \cdot LAI(i))} \quad (2)$$

dove $Q_0(i)$ è l'irradianza sopra la chioma ($\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) per l' i -esimo giorno dell'anno e K è il coefficiente d'estinzione della luce attraverso la chioma.

Il LAI giornaliero ($\text{m}^2_{\text{leaf}} \text{ m}^{-2}_{\text{ground}}$) ed è modellato dalla seguente equazione:

$$LAI(i) = SLA(i) \cdot \beta \cdot A(i-1) \quad (3)$$

dove $A(i - 1)$ è il tasso di produttività netta dell' i -esimo giorno dell'anno (equazione 1), β è il coefficiente di ripartizione di accumulo di biomassa nelle foglie e $SLA(i)$ lo Specific Leaf Area all' i -esimo giorno dell'anno ($m^2 g^{-1}_{Dry Weight}$), definita in base all'equazione di crescita ricavata da dati empirici presi per le faggete del Matese (Appennino Centrale), mentre per le altre due specie è stata ricavata da bibliografia:

$$SLA(i) = \left(\frac{(c \cdot time)}{(d + time)} \right) \quad (4)$$

La produzione Primaria Netta ($gC m^{-2}$) è calcolata integrandola nel tempo (dal 100° giorno al 281° dell'Anno Giuliano) di $A(i)$ come:

$$NPP = \sum_i [A(i) - Kc(i)] \cdot \left(\frac{12}{10^6} \right) \cdot L_{fall}(i) \quad (5)$$

dove Kc è la respirazione delle radici calcolata come funzione della temperature delle foglie e Q_{10} :

$$Kc(i) = R_{10} \cdot Q_{10}^{\left[\left(\frac{T_{leaf}(i) - 10}{10} \right) \right]} \quad (6)$$

dove R_{10} è il tasso di respirazione a 10°C (uguale a $1.5 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$) e Q_{10} è 1.7, che è il range riportato da Granier (Granier et al., 2000), che per il faggio oscilla tra i valori $1.6 \leq Q_{10} \leq 1$, lo stesso è stato realizzato per *Quercus cerris*. Per *Quercus ilex* è stato utilizzato un Q_{10} di 2 valido per le specie della macchia mediterranea.

$L_{fall}(i)$ è il parametro che da l'informazione per la caduta delle foglie, quindi la fine della stagione vegetativa (equazione 16).

La conduttanza stomatica del vapor d'acqua (gs , $mol m^{-2} s^{-1}$), è calcolata in funzione di $A(i)$, Ca (concentrazione in aria di $CO_2 = 360 \mu mol mol^{-1}$) e RH (umidità relativa, come un rapporto), secondo Ball (Ball et al, 1987) per ogni i -esimo giorno dell'anno:

$$gs(i) = gs_0 + m \cdot \left[\frac{(A(i) \cdot RH(i))}{Ca} \right] \quad (7)$$

dove gs_0 ($= 0.042 mol m^{-2} s^{-1}$) è il minimo della conduttanza stomatica del vapore acqueo quando $A(i) = 0$ e m ($= 16.19 mol m^{-2} s^{-1}$) è un coefficiente empirico che rappresenta la sensibilità composita della conduttanza con A , Ca , e RH .

La traspirazione della canopy ($E(i)$, $\text{gH}_2\text{O m}^{-2}$) era calcolata come funzione della media diurna della temperatura delle foglie, con la ridotta differenza di pressione di vapore (tra l'interno e l'esterno della chioma, $\text{VPD}_{\text{red}} - \text{mbar}$), con il fotoperiodo (ph , numero di ore del giorno), e con valori di LAI da integrare nel tempo i (dal 100° al 281° Giorno Giuliano (JD)):

$$E(i) = \sum_i \left\{ gc(i) \cdot \left(\frac{cp \cdot \rho(i)}{\lambda(i) \cdot \gamma(i)} \right) \cdot \text{VPD}_{\text{Red}}(i) \cdot (3600 \cdot ph(i)) \right\} \quad (8)$$

dove $gc(i)$ è la media diurna della conduttanza stomatica della chioma (m s^{-1}), cp è il calore specifico dell'aria a pressione costante ($1.012 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), $\rho(i, T_{\text{aria}})$ è la densità dell'aria (g m^{-3}), $\lambda(i, T_{\text{aria}})$ è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua (J g^{-1}), e $\gamma(i, \lambda, cp)$ è la costante fisiometrica ($\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$). Le variabili $\rho(i, T_{\text{aria}})$ e $\lambda(i, T_{\text{aria}})$ sono calcolate come funzioni empiriche della temperatura dell'aria (Friend & Woodward, 1990):

$$\rho(i, T_{\text{aria}}) = 1288.4 - 4.103 \cdot T_{\text{aria}}(i) \quad (9)$$

$$\lambda(i, T_{\text{aria}}) = 2500 - 2.36 \cdot T_{\text{aria}}(i) \quad (10)$$

mentre γ è funzione di cp e di λ (Friend & Woodward, 1990):

$$\gamma(cp, \lambda) = \frac{(P \cdot cp)}{(0.622 \cdot \lambda(i, T_{\text{air}}(i)))} \quad (11)$$

dove P è la pressione atmosferica (mbar) e 0.622 è il rapporto tra la densità di aria secca e vapor d'acqua (adimensionale). La conduttanza di vapore acqueo della canopy, $gc(i)$, è calcolata come funzione di conduttanza stomatica, $gs(i)$, e il LAI, per ogni i -esimo giorno dell'anno:

$$gc(i) = \frac{(gs(i) \cdot \text{LAI}(i))}{(10^3 \cdot fc(i))} \quad (12)$$

dove la funzione $fc(i)$ trasforma la conduttanza stomatica espressa in unità molare ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in unità non molarie (mm s^{-1}) come una funzione della temperatura delle foglie:

$$fc(i) = -0.0001 \cdot T_{\text{leaf}}(i) + 0.045 \quad (13)$$

Il tasso di respirazione mitocondriale (Rd, dark respiration) nell'equazione 1 è assunto essere costante ($1.03 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e integrato nella fase oscura per il faggio, poiché il dato è stato preso dai calcoli delle curve di risposta alla luce estrapolate nella campagna di campionamento nelle foreste di faggio del Matese, mentre per le altre due specie da dati misurati nel corso di campagne di misura su popolamenti di leccio e cerro condotti nella provincia di Isernia e Campobasso (1999-2001).

Il QY per il faggio è stato calcolato seguendo il 3° grado dell'equazione polinomiale:

$$QY(i) = (2 \cdot 10^{-6} T_{leaf}^3) + (4.4 \cdot 10^{-5} T_{leaf}^2) + (0.0019 \cdot T_{leaf}) \quad (14)$$

fittando i dati empirici ottenuti a differenti temperature delle foglie (T_{leaf} , 18, 22, 25, 30, 35, 50°C, con sei repliche per ogni T_{leaf}) e intensità della luce (da 0 a 200 $\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Il parametro k nell'equazione 2, è tenuto costante a 0,72. Il parametro β nell'equazione 3 è il coefficiente di ripartizione della biomassa per le foglie, che è assunto essere uguale a 0.25.

Il deficit della pressione di vapore $VPD_{Red}(i)$, nell'assunzione del “*Big Leaf*” è ottenuto da una funzione esponenziale negativa, come similmente l'attenuazione della luce è governata dalla legge di Beer-Lambert:

$$VPD_{Red}(i) = VPD(i) \cdot e^{(-k_2(i) \cdot LAI(i-1))} \quad (15)$$

dove $k_2(i)$ è un parametro empirico come funzione del LAI (i-1):

$$k_2(i) = \frac{(0.15 \cdot LAI(i-1))}{(0.10 + LAI(i-1))} \quad (16)$$

I coefficienti 0.15 e 0.10 dell'equazione 16 sono stati scelti dopo la calibrazione del modello da comparare con i valori simulati di E con la traspirazione della canopy direttamente misurati per le foreste di faggio italiane (Borghetti & Magnani, 1996) e per le foreste del centro Europa (Aussenac & Boulangeat, 1980); il cerro presenta valori analoghi mentre per il leccio si ha 0.08 e 0.05 derivati da misure condotte all'interno della lecceta di Castelporziano.

Per la simulazione della caduta delle foglie alla fine della stagione vegetativa è descritta dalla seguente equazione, dove il coefficiente angolare negativo $-a$, il decremento del tasso di LAI:

$$LAI_{fall}(i) = -a \cdot LAI(i) \quad (17)$$

Il parametro α per il faggio, per il cerro e per il leccio, è stato ottenuto fittando i dati di LAI determinati da immagini satellitari MODIS (MODIS 15, composite 8 giorni, con una risoluzione spaziale di 1 Km), con l'equazione di Richard prese al termine dell'attività fenologica delle specie.

3.5.2 - Efficienza nell'uso della risorsa idrica

Aspetto importante considerato, è come le specie forestali si comportano lungo un gradiente latitudinale nell'utilizzo dell'acqua. L'approccio utilizzato per valutare tali variazioni è stato il calcolo dell'indice WUE, calcolato come rapporto tra la quantità di sostanza secca prodotta da una pianta per unità di acqua traspirata. L'utilizzo di tale indice permette di analizzare più in dettaglio i dati disponibili ed utilizzare un modello appropriato per simulare la crescita dell'albero e l'utilizzo dell'acqua, fornendo un intervallo di valori di WUE.

Tali valori possono costituire una base per considerare le implicazioni che derivano dalle variazioni di questo parametro e l'importanza dei fattori che lo influenzano (Landsberg, 1999). A livello dell'intero albero, il WUE dipende non solo dalle caratteristiche stomatiche delle foglie e dal deficit di pressione di vapore, ma anche da fattori quali l'area fogliare relativa al volume di suolo utilizzato dalle radici e l'ammontare dell'acqua contenuta in esso.

Un albero che cresce velocemente, producendo un'elevata area fogliare è probabile che traspiri rapidamente, sebbene il suo WUE possa essere basso, mentre nelle aree dove la precipitazione tende a limitare la crescita possono risultare alti valori di WUE (Landsberg, 1999).

Il calcolo del WUE è complicato dal fatto che è un rapporto di due quantità, tasso di crescita e tasso di traspirazione, che hanno un'incertezza associata nella stima.

3.5.3 - La validazione del modello

La validazione è stata necessaria per comprendere quanto le stime siano accurate e per conoscere l'affidabilità del modello. Per fare questo sono stati messe a confronto le stime provenienti dalle Torri *Eddy Covariance* della rete Fluxnet/Carboitaly, scegliendo le stazioni in funzione della tipologia forestale. Infatti è stata scelta la torre di Collelongo (Aq) per le foreste di faggio, la torre di Roccarespampani (VT) per le foreste di cerro e la torre di Castelporziano per i popolamenti di leccio.

Definito un periodo di 6 anni dal 2000-2005 per il quale erano disponibili le misure, sono stati presi i dati medi della produttività giornaliera per ogni anno e sono stati mediati definendo una produttività media annuale, confrontabile con l'output del modello. Tale valore di NPP è stato poi mediato per l'arco temporale dei 6 anni. Tale valore è stato messo a confronto con le stime elaborate da MO.C.A. .

Il modello è stato fatto girare con i dati di input delle stazioni delle torri: coordinate x y , clima e parametri specie specifici della tipologia forestale considerata. A seguito di 10 simulazioni del modello i valori di stima di NPP giornaliera sono stati mediati giornalmente per tutte le simulazioni eseguite.

4 - RISULTATI & DISCUSSIONE

Di seguito vengono presentati e discussi i risultati ottenuti dalle elaborazioni effettuate per stimare la produttività primaria netta delle tre specie prese in esame, rispettivamente *Fagus sylvatica*, *Quercus cerris* e *Quercus ilex*, in funzione del cambiamento climatico.

Verranno presentati nell'ordine:

1. Carte che interpolano spazialmente la produttività primaria netta delle tre specie per una condizione reale (punti misurati della rete INDEFO) e carte che la rappresentano con la distribuzione potenziale attuale delle specie, definita quest'ultima dall'*envelope* climatico riferito periodo 1961-1990.
Successivamente saranno illustrate le carte della distribuzione della produttività primaria potenziale nello scenario climatico B1 nelle due finestre temporali di riferimento 2031–2060 e 2071–2100 ed a seguire le carte della distribuzione della produttività primaria potenziale nello scenario A1Fi per gli stessi periodi temporali.
2. Analisi quantitativa delle carte e considerazioni ecologiche.
3. Carte della variazione della produttività, che mettono a confronto i punti campionati della rete INDEFO con quello che accadrebbe nelle stesse stazioni qualora si verificasse uno dei due scenari di cambiamento climatico.
4. Considerazioni ecologiche sulla dinamica e la fisiologia delle specie che subiscono l'impatto del cambiamento climatico.

4.1 - Carte della Produzione Primaria Netta:

Nelle carte “Actual” è illustrata la distribuzione “reale” della produttività primaria, cioè i plot dell’indagine IN.DE.FO. misurati dal Corpo Forestale dello Stato. Tali plot sono stati utilizzati successivamente per l’interpolazione spaziale della distribuzione della specie e sulle quali vengono condotte le proiezioni sulla produttività primaria dei diversi popolamenti forestali.

Nelle carte “Potential” è simulata una distribuzione potenziale attuale in funzione della distribuzione che la specie avrebbe se avesse a disposizione tutto il territorio idoneo disponibile, sulla base del clima potenzialmente favorevole. In queste carte non è considerata la competizione interspecifica. L’idoneità territoriale di una data specie è stata definita costruendo una matrice di frammentazione del territorio basata sul Corine Land Cover 2000 relativa a tutto il territorio italiano. Tale matrice è importante in quanto attraverso essa vengono posti dei limiti agli spostamenti territoriali delle specie.

Ogni pixel rappresenta una cella 3km x 3km pari a 900ha, per la quale viene restituito un valore di produttività in tC/ha. Ogni cella porta in sé il valore dell’indice di abbondanza/dominanza IV e dell’idoneità del territorio. Infine le carte che visualizzano il comportamento delle specie sottoposte agli scenari, sono costruite sulla base delle carte della produttività “Potential”.

I valori di produttività primaria del faggio raggiungono i valori massimi di 8tC/ha, indicando che le aree occupate dalla specie risultano boschi di faggio monospecifici altamente produttivi, dall’Appennino (da quello Siciliano fino a quello Tosco Emiliano) a tutto l’arco Alpino (figura 15 A-B).

Nella figura 15 B, viene illustrata la produttività primaria del faggio, in funzione della sua distribuzione potenziale attuale. Ben si nota, come molte aree vengono interessate da una potenziale occupazione del territorio, specialmente nell’Appennino centro-settentrionale e nelle catene montuose alpine del Piemonte, Lombardia, Trentino e Friuli Venezia Giulia. La produttività incrementa in queste aree con valori che vanno da 2 a 4 tC/ha, ed in alcune zone, particolarmente affini dal punto di vista climatico e spaziale alla specie, la produttività raggiunge anche valori di 6-8 tC/ha.

Le figure riportano la produttività primaria distribuita lungo un gradiente il latitudinale, definito dalle fasce di latitudine utilizzate per far girare il modello Mo.C.A.

Nello scenario B1 (Fig. 16 A-B), si assiste a una generale riduzione dell’areale del faggio su tutto il territorio nazionale. I popolamenti di faggio tendono a rarefarsi nel centro e nel sud dell’Italia, mentre potenzialmente si accrescono sull’arco Alpino. La produttività tende a mantenersi sui valori più bassi della scala e, nella finestra temporale 2071–2100, la produttività

primaria stimata si attesta intorno a 3 tC/ha. La riduzione della produttività primaria giustificherebbe la riduzione potenziale dell'areale, pur mantenendo una discreta produttività, nelle aree occupate dal faggio che meno risentono dell'incremento delle temperature.

Nello scenario A1Fi (Fig. 17 A-B), quello che presenta un incremento maggiore delle temperature e quindi più critico per le specie vegetali, il faggio risponde in modo negativo, subendo delle forti ripercussioni sia sulla sua distribuzione potenziale, che sulla produttività primaria.

Il comportamento di *Quercus cerris*, mostra un andamento analogo a quello del faggio. Nella carta della situazione della produttività "Potential" (Fig. 18 B), il cerro si estende su grandissima parte dell'Italia centrale con valori di produttività che vanno da 2 a 6 tC/ha.

Essendo una specie particolarmente adattabile, esso tende a diffondersi molto in tutto il territorio della penisola.

Le stazioni di produttività maggiore, sono quelle poste su tutto l'Appennino, con valori che nello scenario B1 raggiungono il loro massimo tra 3-4 tC/ha (fig. 19 A-B). Nello scenario più estremo, la produttività primaria si riduce fortemente e la distribuzione della specie subisce una netta riduzione. Tale specie avrebbe la possibilità, non del tutto verificata, di poter salire in quota, verso condizioni più fresche e più vicine alla nicchia climatica favorevole alla specie, ma a tali quote entrano in gioco forze di competizione con le specie che già occupano tali zone come ad esempio il faggio. Con la forte diminuzione della sua produttività primaria, il cerro sembra essere destinato a ritirarsi dal territorio italiano, nonostante la sua spiccata adattabilità e plasticità (fig. 20-AB).

Il leccio è una specie sclerofilla mediterranea presente sulle coste italiane fino a località di versanti calcarei esposti a sud dell'entroterra.

Nella carta della produttività attuale (Fig. 21-A) si nota come i punti campionati dal Corpo Forestale dello Stato, ricadano principalmente nella regione Toscana, Umbria, Lazio e principalmente nelle regioni meridionali. La produttività potenziale attuale (fig. 21-B) si concentra sulle regioni del centro-sud Italia, mostrando valori apprezzabili verso le coste, sia tirreniche, che adriatiche.

In Sicilia ed in Calabria c'è una forte affermazione della specie nelle condizioni climatiche attuali anche se con valori di produttività piuttosto bassi. Solo nelle regioni del Centro - Italia, tali valori si assestano per alcune celle ai valori massimi della scala, (pari a 4 tC/ha), come avviene anche in Liguria. Interessante notare come questa specie avrebbe la possibilità di espandersi ed affermarsi nelle regioni più a nord. Nuclei di leccio sono evidenti in Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Trentino, Veneto, e Friuli Venezia e Giulia, in aree nelle quali, anche

se più a nord del suo areale attuale, il leccio avrebbe la possibilità di vivere occupando probabilmente quelle più aride e calde della regione pre-alpina.

Nello scenario di cambiamento climatico B1 (Fig. 22-AB), si nota come il leccio tende a spostarsi dalle coste, verso il centro della penisola, occupando territori che corrono lungo tutto l'Appennino.

Vi è un'ampia diffusione in tutta l'Italia settentrionale, nelle valli del Piemonte, Lombardia e Trentino, mantenendo presenze anche in Liguria, Campania, Calabria e Sicilia con valori di produttività che raggiungono anche le 2 tC/ha.

Nello scenario A1Fi (Fig. 23-AB), lo spostamento sulla dorsale appenninica diventa più evidente. La produttività ha valori piuttosto bassi, mentre la diffusione nelle regioni della pianura padana, quelle che dalle analisi climatiche presentano le maggiori variazioni nell'innalzamento della temperatura, sembrerebbero favorire l'occupazione del territorio da parte del leccio. Nuclei in Campania e Calabria mantengono anche nello scenario di fine secolo una produttività pari a 2 tC/ha.

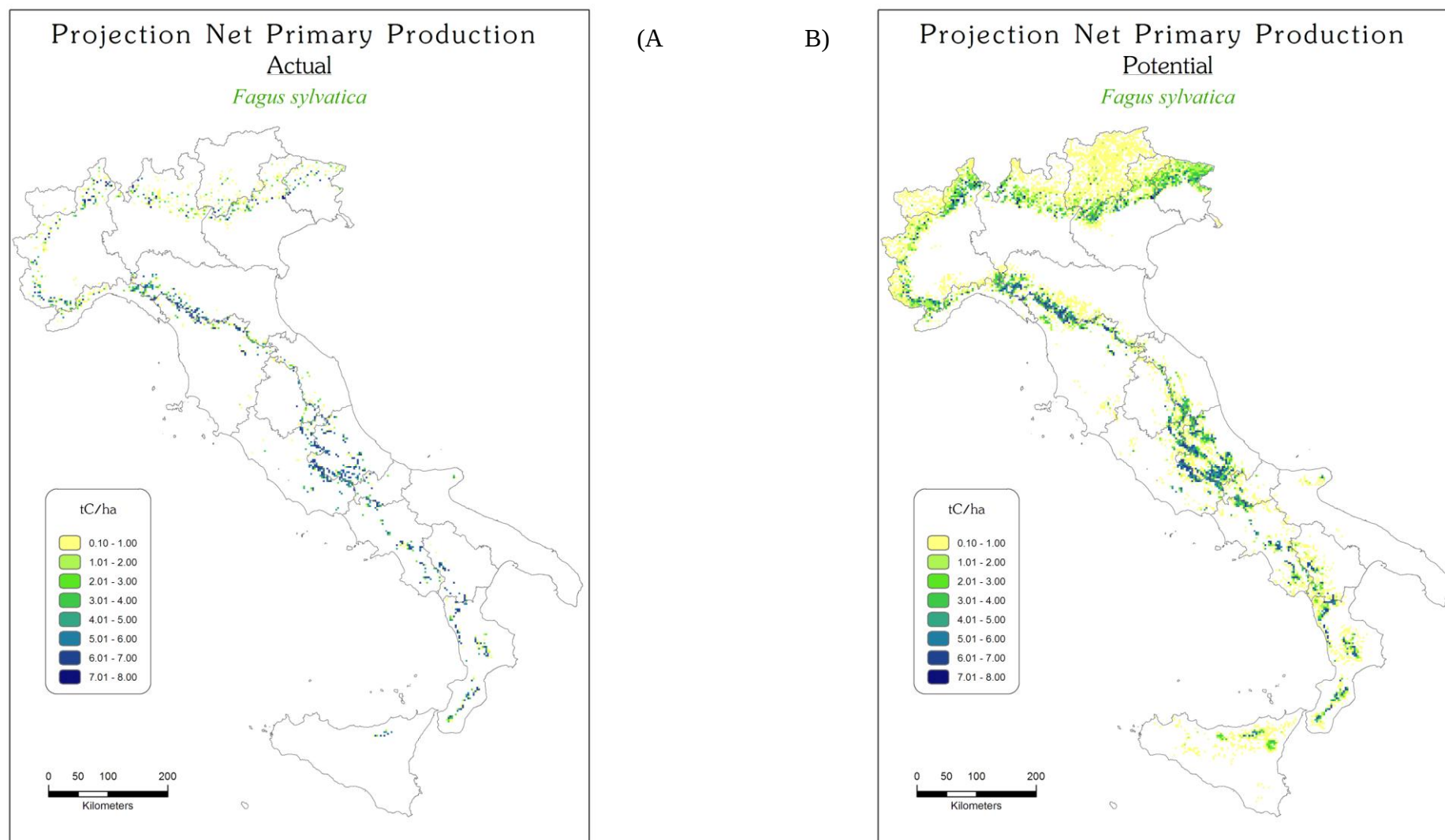
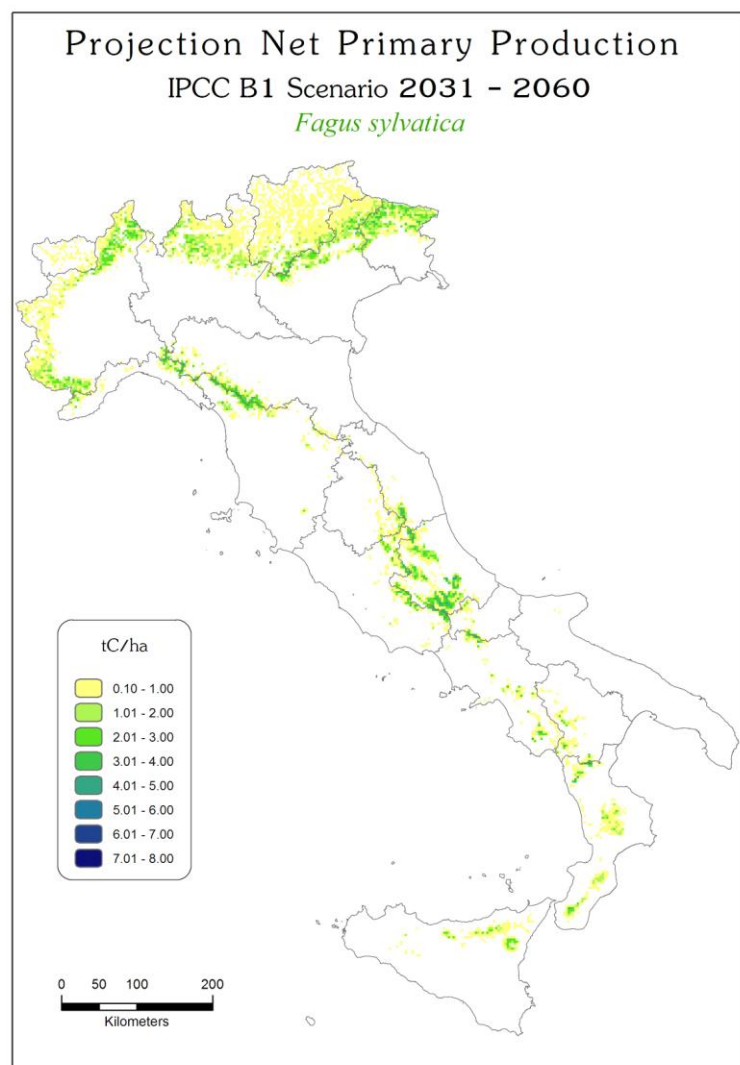


Figura 15: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta secondo i punti campionati della rete INDEFO del faggio “Actual”; B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta secondo la distribuzione potenziale attuale “Potential” (trentennio di riferimento WMO, 1961 – 1990).



(A)

B)

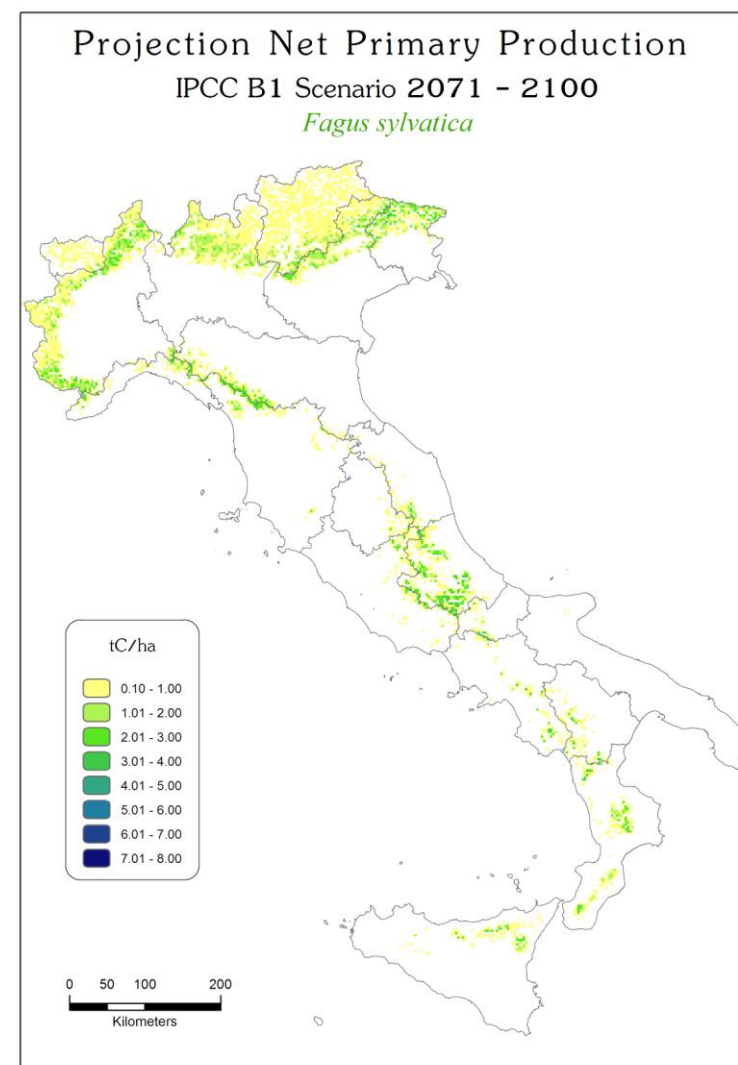
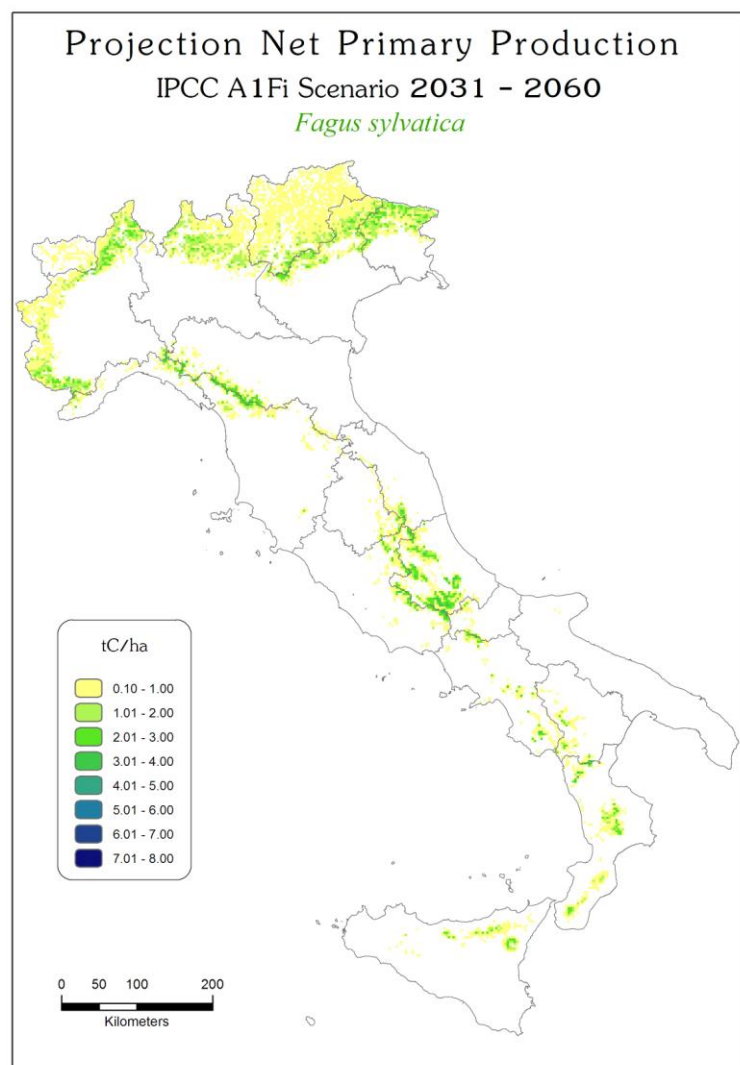


Figura 16: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del faggio secondo lo scenario B1 per l'anno medio 2050;
B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del faggio secondo lo scenario B1 per l'anno medio 2080.



(A)

B)

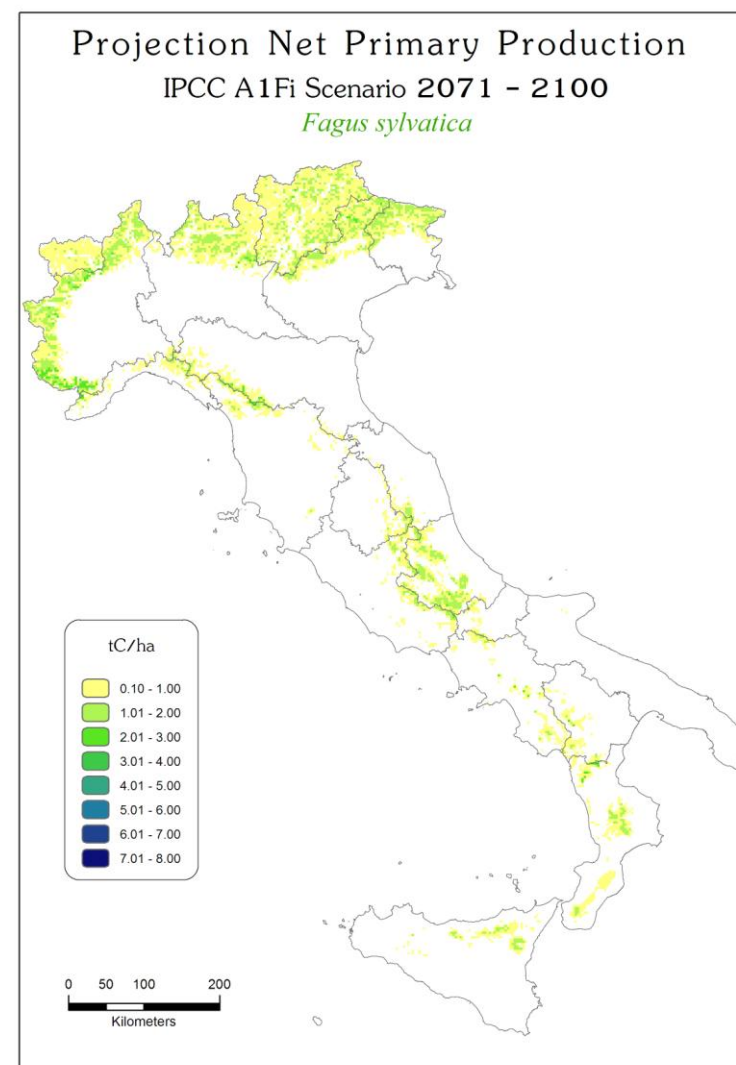


Figura 17: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del faggio secondo lo scenario A1Fi per l'anno medio 2050;

B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del faggio secondo lo scenario A1Fi per l'anno medio 2080.

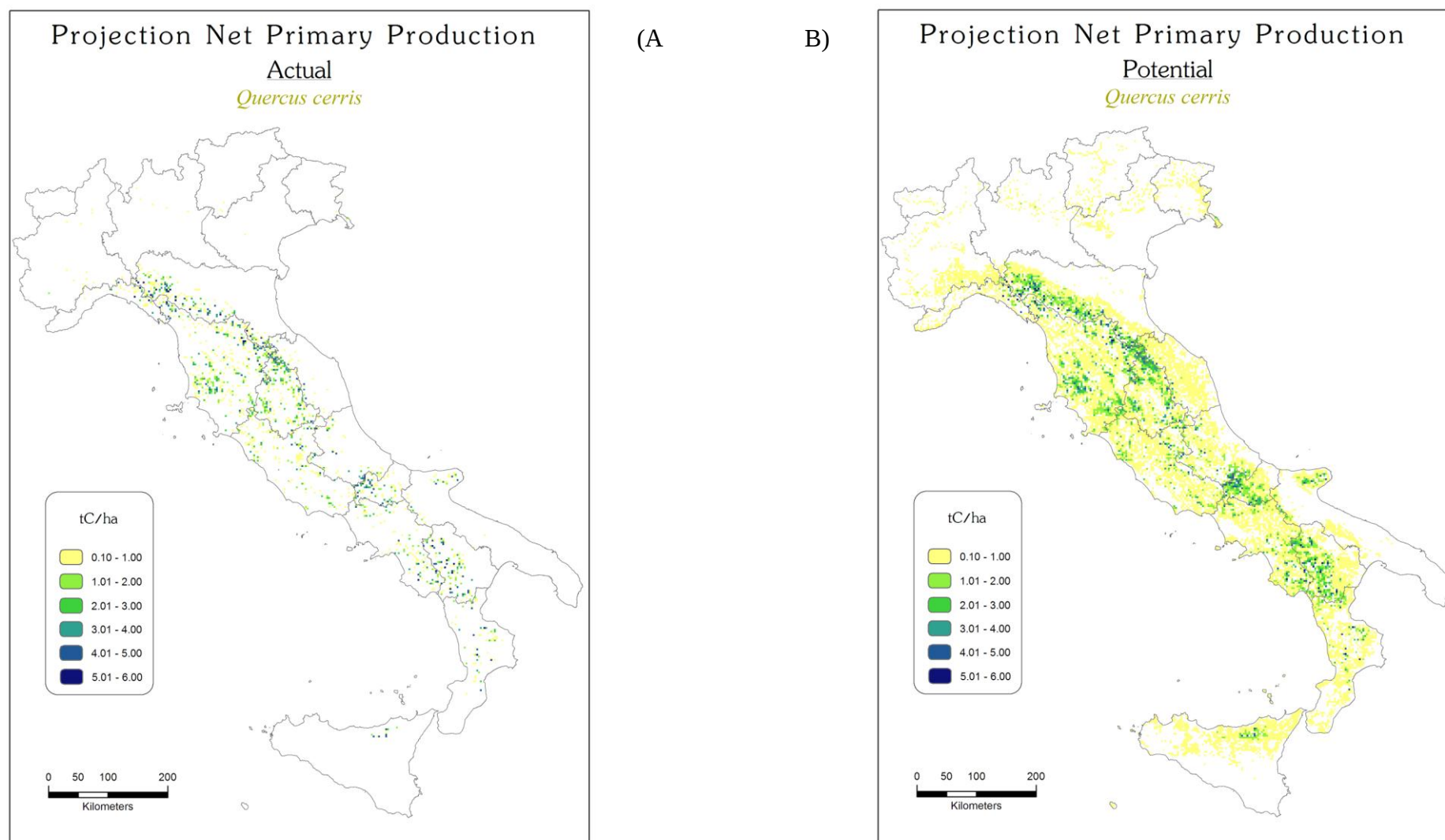
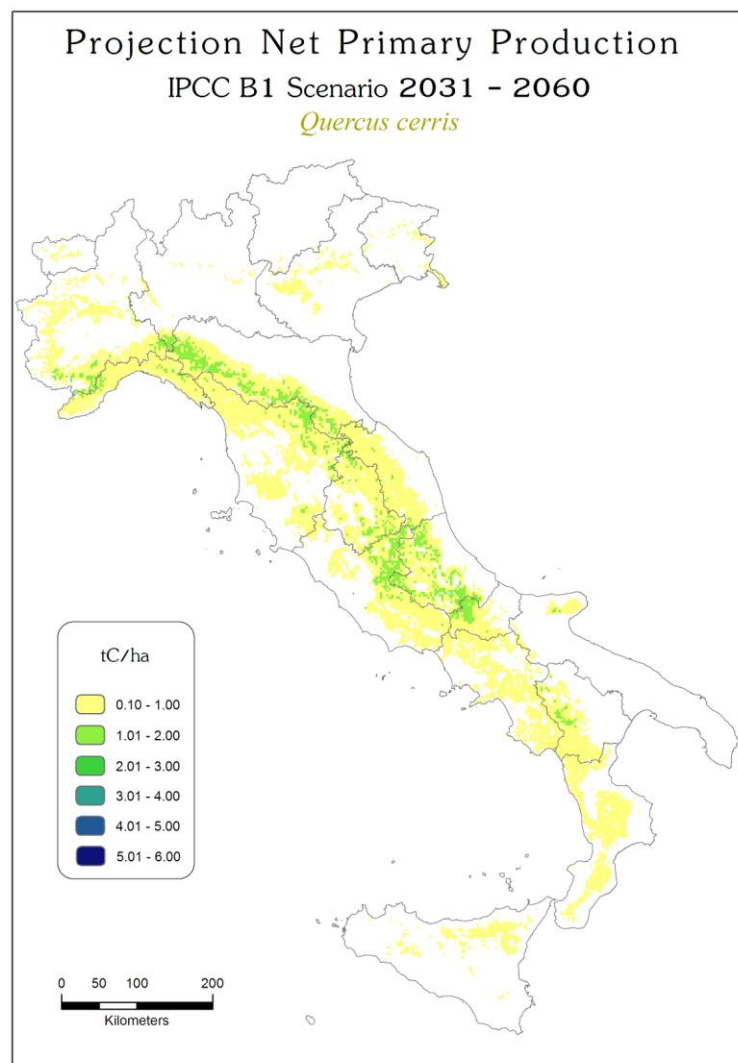


Figura 18: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta secondo i punti campionati della rete INDEFO del cerro “Actual”; B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta secondo la distribuzione potenziale attuale “Potential” (trentennio di riferimento WMO, 1961 – 1990).



(A)

B)

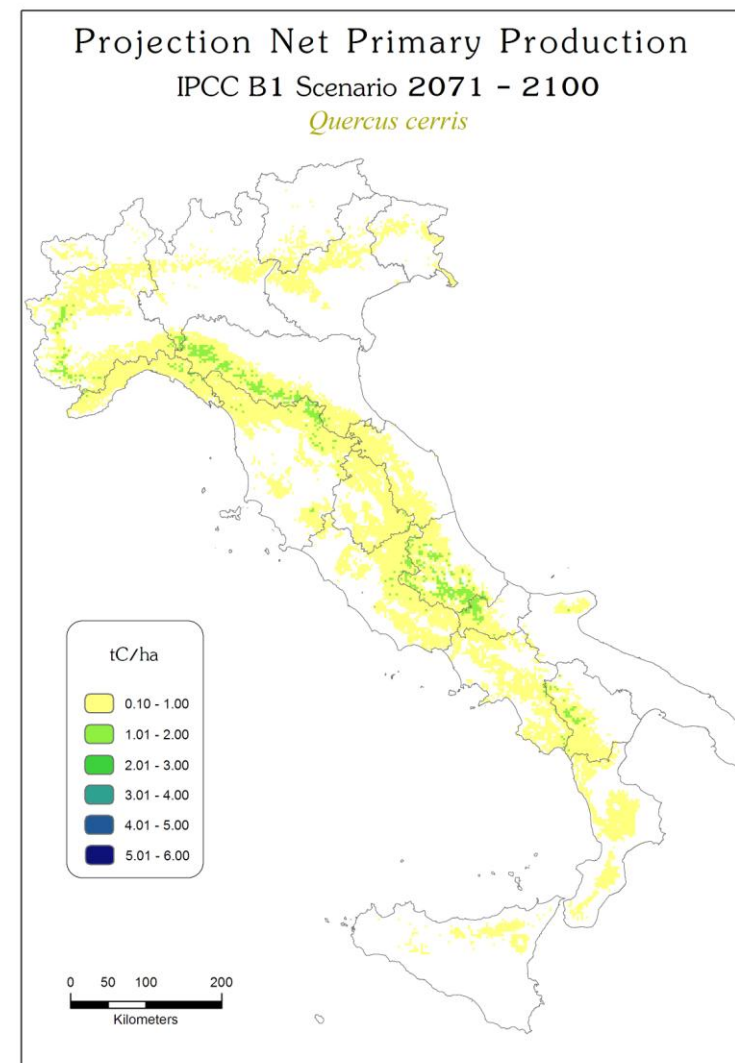
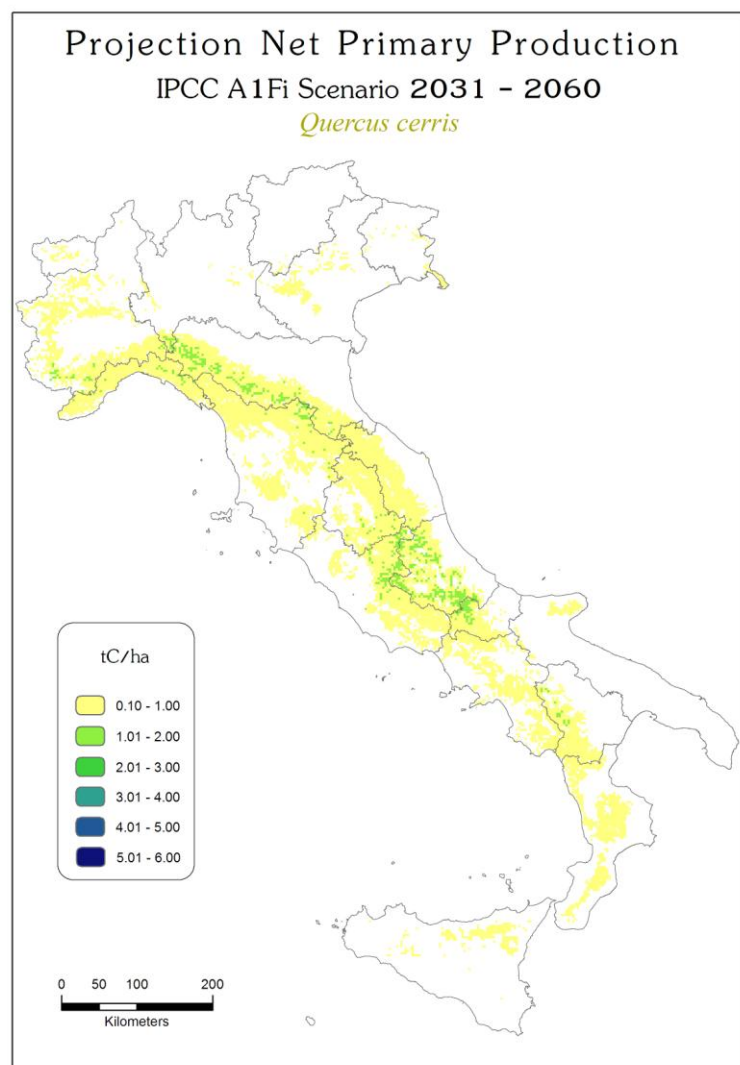


Figura 19: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del cerro secondo lo scenario B1 per l'anno medio 2050;

B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del cerro secondo lo scenario B1 per l'anno medio 2080.



(A)

B)

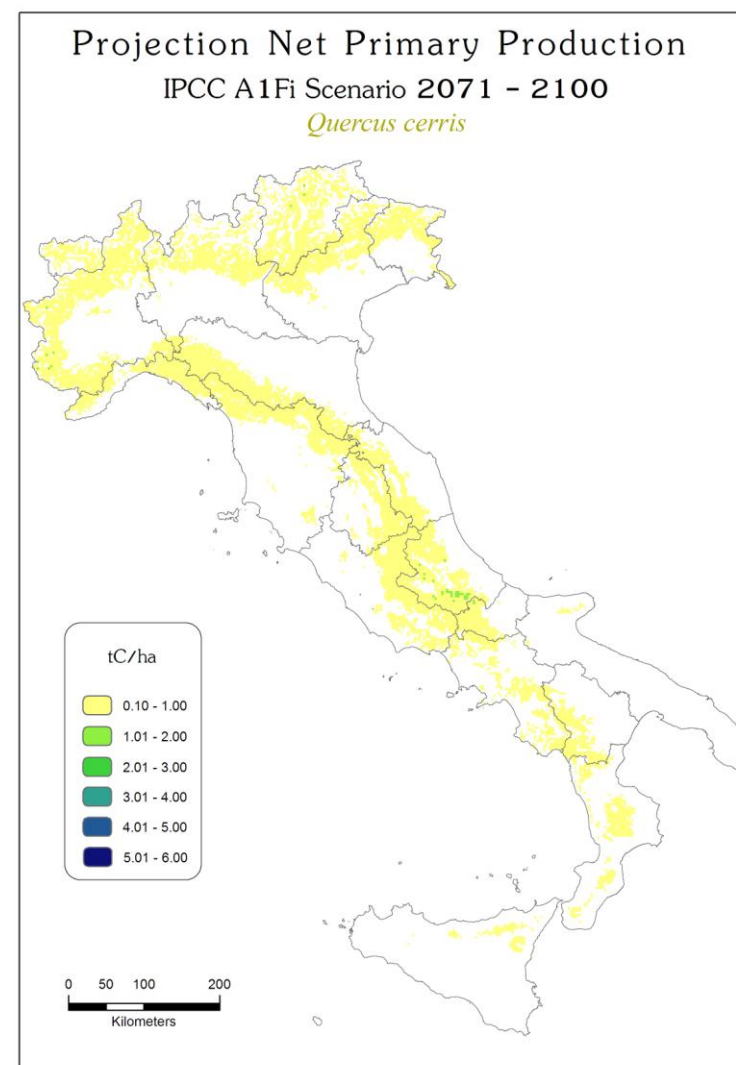


Figura 20: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del cerro secondo lo scenario A1Fi per l'anno medio 2050;

B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del cerro secondo lo scenario A1Fi per l'anno medio 2080.

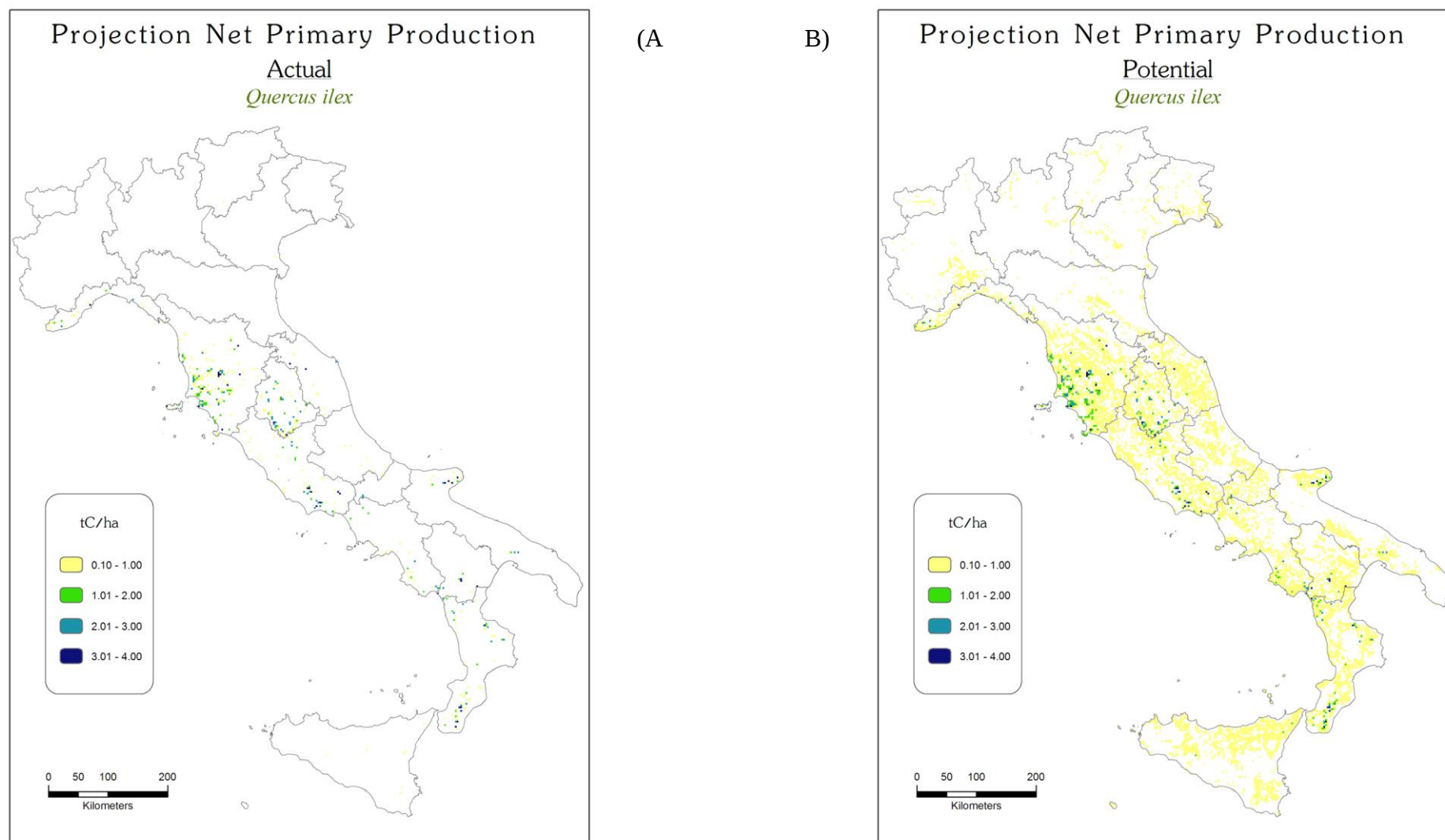
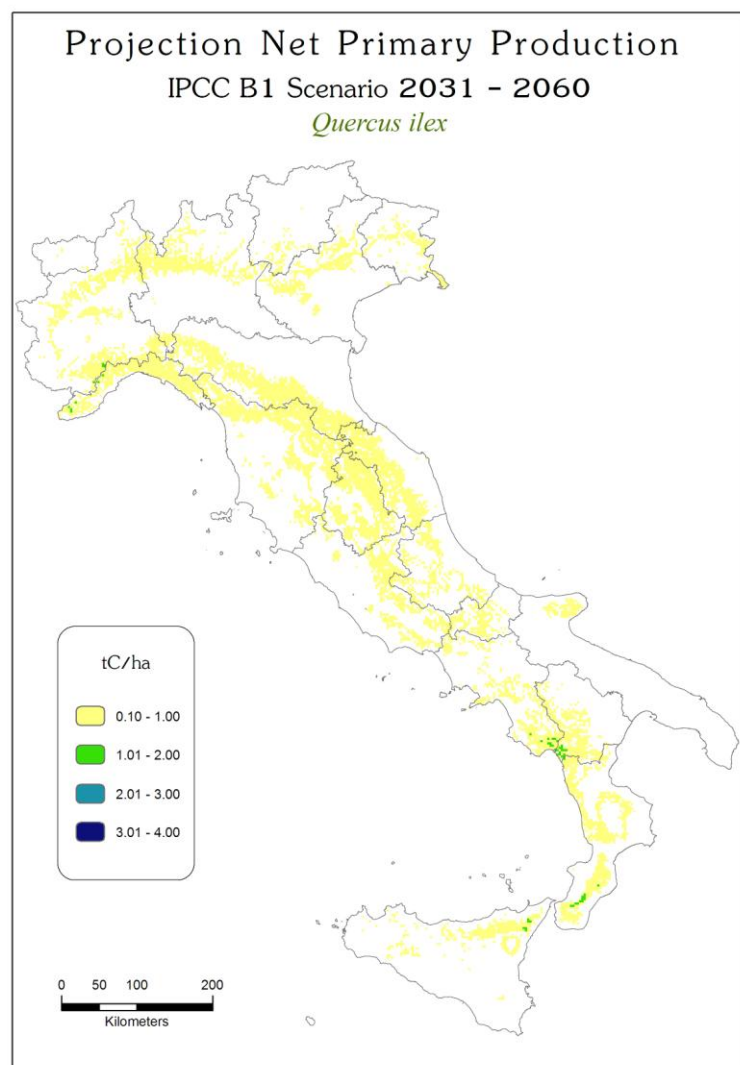


Figura 21: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta secondo i punti campionati della rete INDEFO del leccio “Actual”; B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta secondo la distribuzione potenziale attuale “Potential” (trentennio di riferimento WMO, 1961 – 1990).



(A)

B)

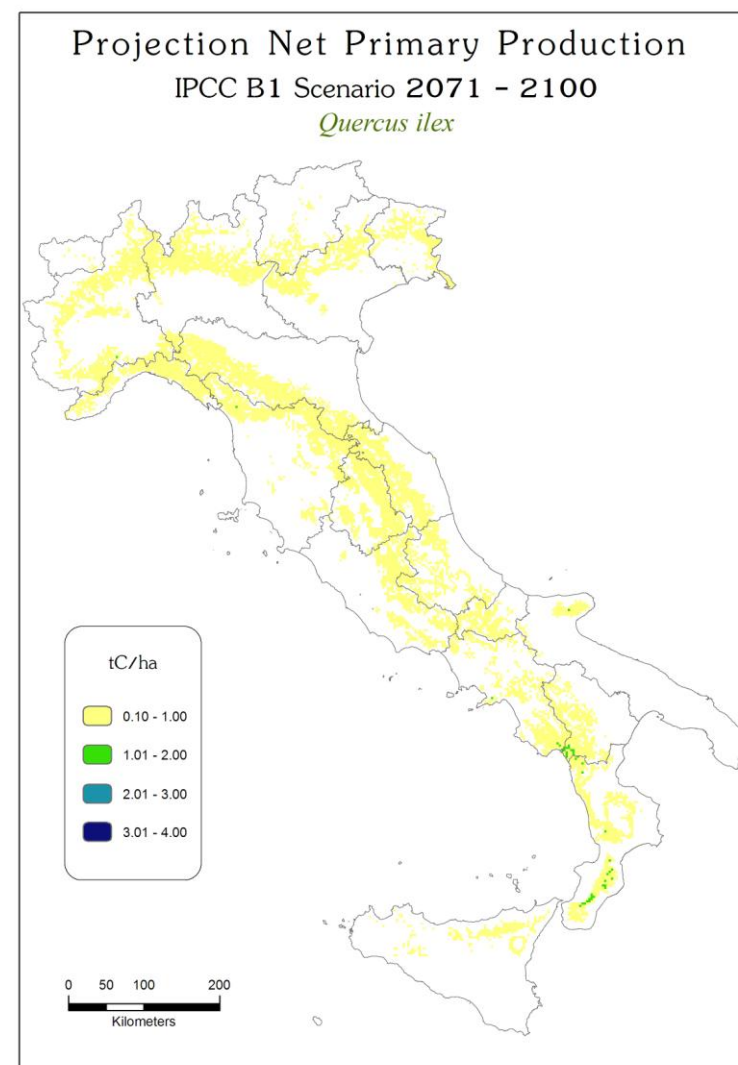
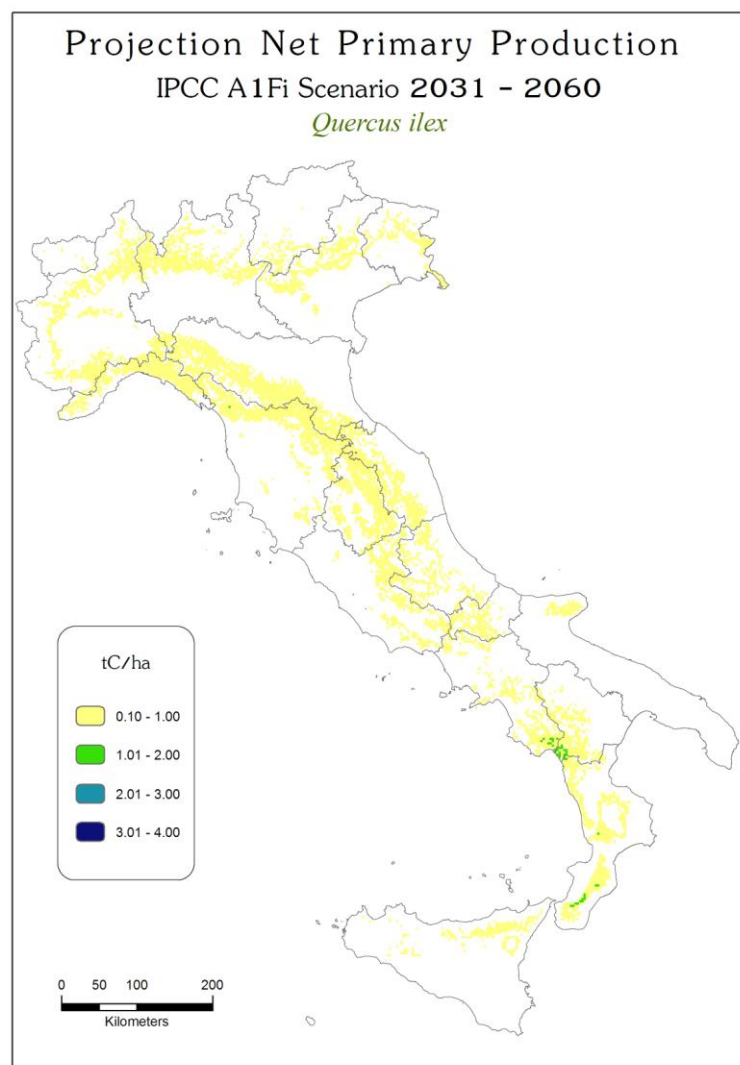


Figura 22: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del leccio secondo lo scenario B1 per l'anno medio 2050;
B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del leccio secondo lo scenario B1 per l'anno medio 2080.



(A)

B)

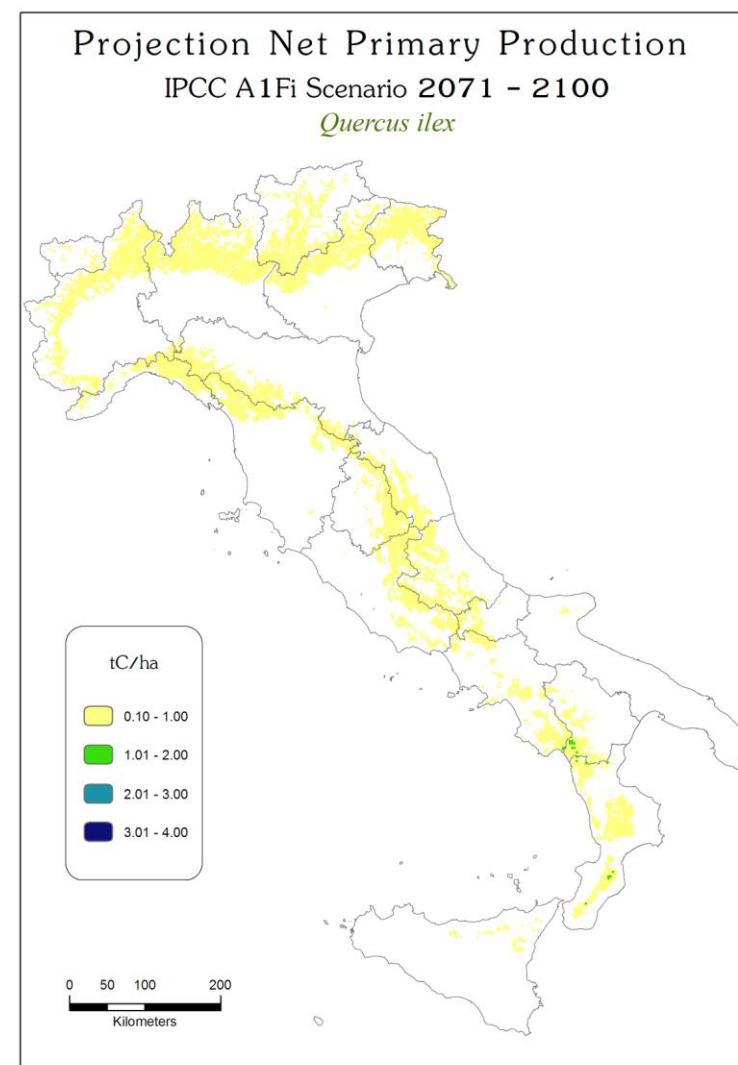


Figura 23: A – Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del leccio secondo lo scenario A1Fi per l'anno medio 2050;

B - Carta della Proiezione della Produzione Primaria Netta potenziale del leccio secondo lo scenario A1Fi per l'anno medio 2080.

4.2 - Analisi quantitativa delle carte e considerazioni ecologiche:

Analizzando i dati sulla distribuzione delle specie e sulla loro produttività primaria possono essere fatte diverse considerazioni da un punto di vista quantitativo.

Verranno presentati grafici che descrivono la copertura e la produttività delle specie prese in esame. Inoltre una tabella riassuntiva, illustrerà in modo sintetico, con valori numerici, come queste due variabili si modifichino dalla situazione attuale potenziale e successivamente a quelle potenziali future.

❖ *Fagus sylvatica*

Nella figura 24 viene messa in evidenza la variazione della copertura (ha) delle faggete sul territorio nazionale, secondo le 5 condizioni climatiche di proiezione.

È evidente come l'attuale distribuzione potenziale del faggio sia favorevole occupando più di 6mln di ha del territorio nazionale.

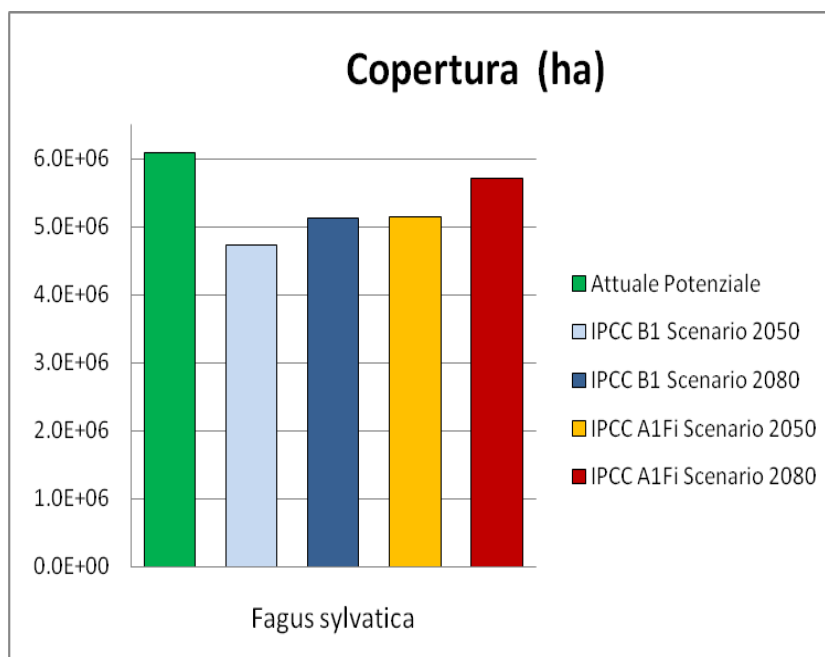


Figura 24 : Grafico della variazione della copertura delle faggete nella condizione climatica potenziale attuale e secondo gli scenari di cambiamento climatico.

Negli scenari viene osservato in generale un decremento della copertura territoriale dei popolamenti di faggio italiani, rispetto alla loro condizione potenziale attuale. Nell'ambito degli scenari climatici si osserva un incremento della copertura della specie tra le due finestre temporali, in entrambi gli scenari B1 e A1Fi, con una acquisizione di quei territori potenzialmente favorevoli o che, nel futuro, al variare delle condizioni climatiche, potranno essere territori rifugio per la specie.

Il figura successiva (Fig. 25), pone in risalto la produttività primaria che mostra una forte riduzione dei valori per entrambi gli scenari climatici futuri (tra 56% e il 58%, Tab. 5).

Infatti la produttività si attesta intorno a un valore medio totale per tutte le faggete d'Italia intorno ai 4 milioni di tonnellate di carbonio.

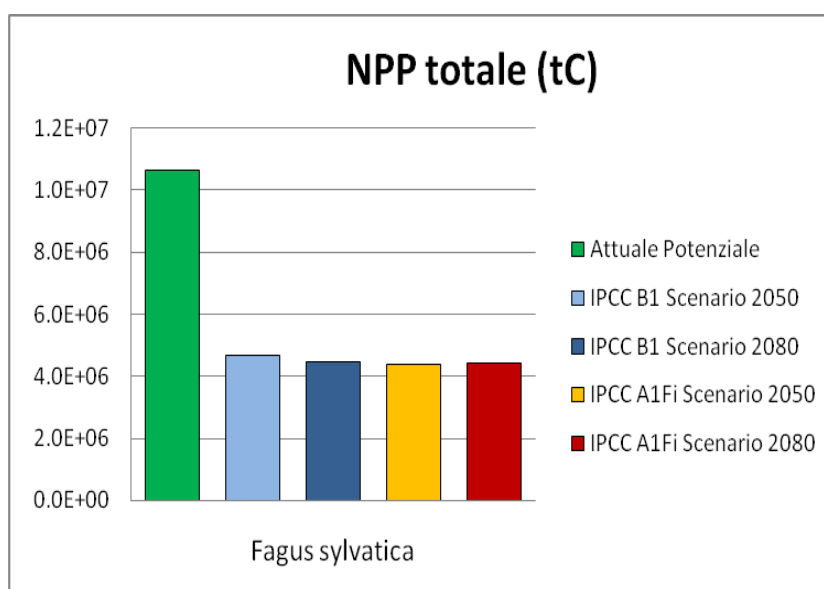


Figura 25: Grafico della variazione della produttività totale delle faggete italiane, nella condizione climatica attuale potenziale e secondo i due scenari di cambiamento climatico.

Quindi, mentre le variazioni della copertura sono comunque in crescita all'interno dello scenario, con percentuali che scendono a valori più bassi rispetto alla condizione potenziale attuale, la produttività si uniforma su tutto il territorio della penisola, mantenendo alcune aree per le quali si osserva una produttività maggiore, mentre per altre si va verso una progressiva riduzione di produttività o verso una scomparsa della specie.

Tabella 5: Tabella riassuntiva dei valori di variazione della copertura e della produttività dei popolamenti di faggio nella condizione potenziale attuale e nei due scenari di cambiamento climatico.

IN.DE.FO.	Reale				
	n° celle	ha		NPP tot (tC)	
	1410	1,269E+06		5,337E+06	
Simulazioni	Attuale Potenziale				
	n° celle	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	6967	6,270E+06	394	1,064E+07	99,38
	IPCC B1 Scenario 2050				
	n° celle 2031 - 2060	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	5246	4,721E+06	-24,70	4,669E+06	-56,12
	IPCC B1 Scenario 2080				
	n° celle 2071 - 2100	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	5691	5,122E+06	-18,31	4,447E+06	-58,21
	IPCC A1Fi Scenario 2050				
	n° celle 2031 - 2060	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	5367	4,830E+06	-22,97	4,393E+06	-58,72
	IPCC A1Fi Scenario 2080				
n° celle 2071 - 2100	ha	var %	NPP tot (tC)	var %	
6131	5,518E+06	-12,00	4,417E+06	-58,49	

Tale specie contrasta il cambiamento climatico mediante un'espansione in aree che potenzialmente divengono favorevoli.

❖ *Quercus cerris*

Nella figura (Fig. 26) viene messo in risalto quale sarà la variazione della copertura delle potenziali foreste di cerro sul territorio nazionale, in funzione del clima attuale e della previsione di quello che accadrebbe in funzione dei due scenari IPCC.

Risulta evidente come, rispetto alla situazione potenziale attuale, la copertura dei boschi di cerro diminuisca da 10 milioni di ha a circa 8 milioni di ha.

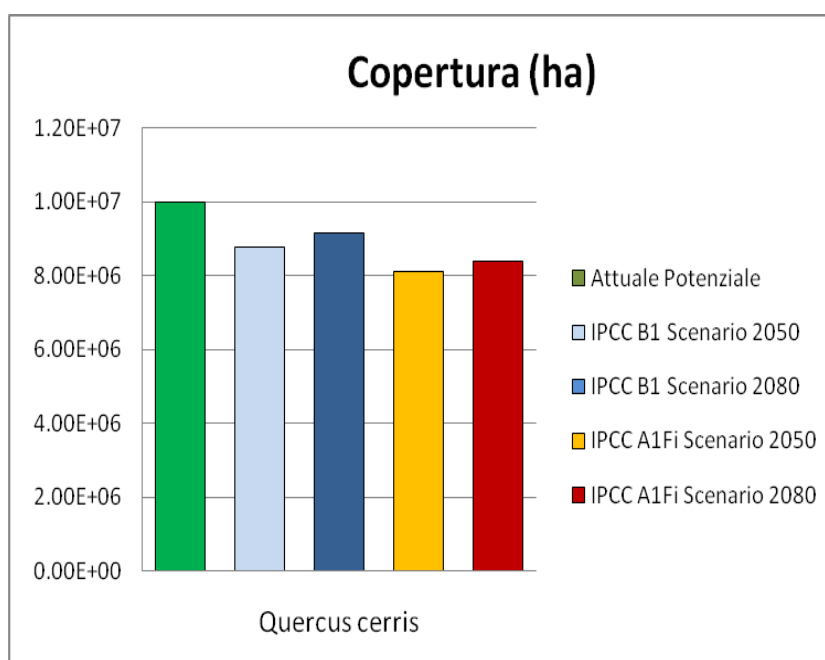


Figura 26: Grafico della variazione della copertura delle cerrete nella condizione climatica potenziale attuale e secondo gli scenari di cambiamento climatico.

Rispetto alle faggete appena descritte, la copertura nazionale tende a incrementare nel tempo all'interno degli scenari, mostrando quindi un adattamento delle cerrete alle nuove condizioni climatiche. Tale adattamento risulta meno evidente per lo scenario A1Fi, per il quale l'innalzamento delle temperature è piuttosto elevato, inducendo verso condizioni di maggiore stress per una specie che è stata caratterizzata dal punto di vista eco-fisiologico come una *water spender* (Salleo, 1990).

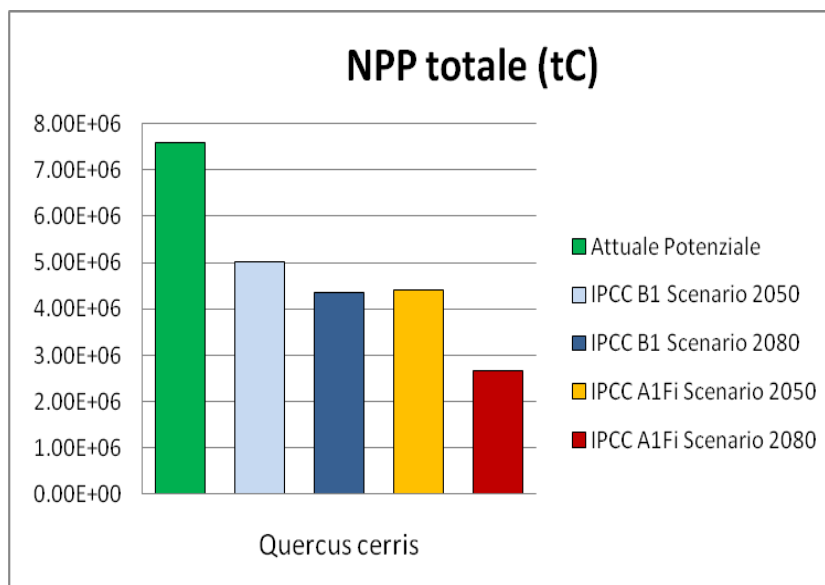


Figura 26 :Grafico della variazione della produttività totale delle cerrete italiane, nella condizione climatica attuale potenziale e secondo i due scenari di cambiamento climatico.

I dati della produttività primaria di *Q. cerris* (Fig. 27 e Tab 6) denotano la tendenza a ridursi all'interno degli scenari climatici. Infatti, alla fine del secolo per lo scenario A1Fi la produttività si riduce a valori prossimi a 2 milioni di tonnellate di C rispetto a una potenzialità attuale di 7 milioni di tonnellate di C. Tale risultato mette in evidenza l'apparente contraddizione tra l'aumento della superficie coperta dalla specie e la sua ridotta capacità assimilativa. Questo aspetto può essere ben interpretato considerando gli aspetti fisiologici relativi alla sua capacità di utilizzo della risorsa idrica, come verrà successivamente messo in risalto (vedi paragrafo 4.4).

Tabella 6 : Tabella riassuntiva dei valori di variazione della copertura e della produttività del cerro nella condizione potenziale attuale e nei due scenari di cambiamento climatico.

IN.DE.FO.	Reale				
	n° celle	ha		NPP tot (tC)	
	1627	1,46E+06		3,13E+06	
Simulazioni	Attuale Potenziale				
	n° celle	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	11651	9,98E+06	581	7,58E+06	142,24
	IPCC B1 Scenario 2050				
	n° celle 2031 - 2060	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	9736	8,76E+06	-12	5,03E+06	-33,67
	IPCC B1 Scenario 2080				
	n° celle 2071 - 2100	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	10175	9,16E+06	-8	4,35E+06	-42,57
	IPCC A1Fi Scenario 2050				
	n° celle 2031 - 2060	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	9013	8,11E+06	-19	4,42E+06	-41,72
	IPCC A1Fi Scenario 2080				
n° celle 2071 - 2100	ha	var %	NPP tot (tC)	var %	
9314	8,38E+06	-16	2,66E+06	-64,87	

❖ *Quercus ilex*

Il comportamento delle leccete italiane sottoposte a cambiamento climatico sembra essere differente rispetto alle altre due specie. Le caratteristiche eco-fisiologiche della specie, le permettono di essere in parte avvantaggiata da un clima che diventa più caldo.

Infatti, come si può osservare dalla figura 28, rispetto a una copertura potenziale sul territorio nazionale di quasi 7 milioni di ettari, il leccio presenta due differenti comportamenti nei due scenari.

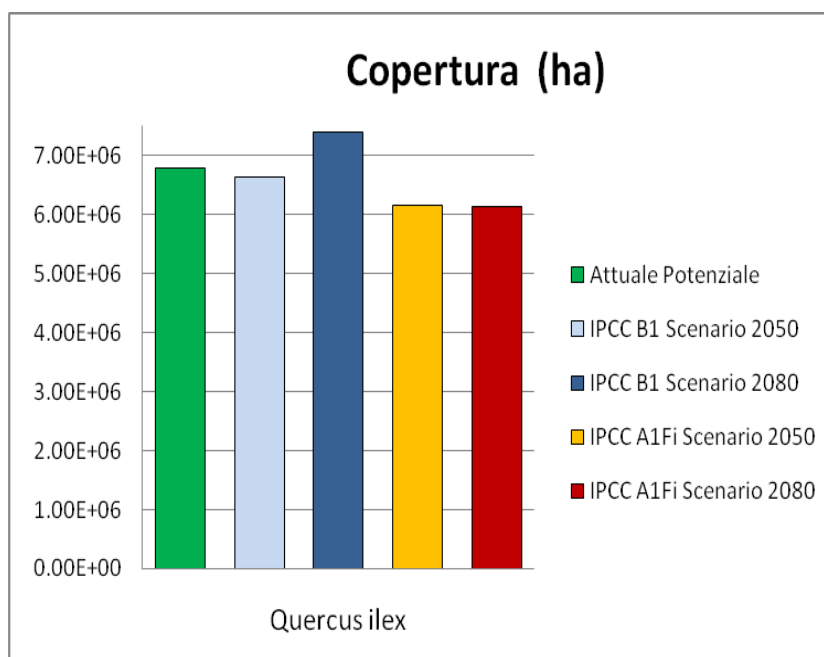


Figura 28: Grafico della variazione della copertura delle leccete nella condizione climatica potenziale attuale e secondo gli scenari di cambiamento climatico.

Nello scenario B1, nel quale il riscaldamento previsto è lieve anche se persistente, le leccete italiane tenderebbero al 2080 ad espandersi fino ad occupare oltre i 7 milioni di ettari attuali potenziali. Nello scenario A1Fi, nel quale il riscaldamento è assai più elevato, è indotta una riduzione della copertura potenziale, anche se la specie permane nelle aree più interne rispetto alla fascia costiera.

Nell'analizzare i risultati che riguardano la produttività totale delle leccete italiane, si può osservare come, rispetto alla condizione attuale potenziale, il cambiamento climatico abbia un feedback positivo. Infatti la produttività totale non è elevata neanche nella situazione attuale potenziale, con un massimo medio di poco più di 1,5 milioni di tonnellate di carbonio l'anno.

Le leccete raggiungono anche i 2,3 milioni di tonnellate di C di produttività nello scenario B1 a fine secolo, nel quale l'espansione territoriale è maggiore rispetto alla distribuzione potenziale attuale e, probabilmente, l'incremento della temperatura ancora contenuto, favorisce la specie sul territorio. Nell'altro scenario, la produttività primaria rimane comunque al di sopra di quella attuale potenziale, ma presenta valori più vicini a quelli previsti con l'assenza di cambiamento climatico (Fig. 29).

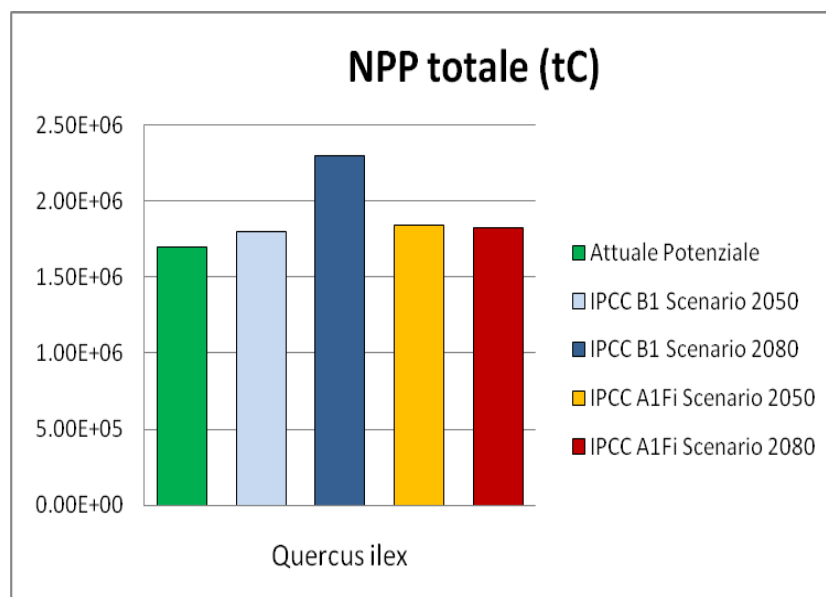


Figura 29: Grafico della variazione della produttività totale delle leccete italiane, nella condizione climatica attuale potenziale e secondo i due scenari di cambiamento climatico.

Come si può osservare dalla tabella 7, le variazioni percentuali di cambiamento della produttività primaria, rispetto all'attuale potenziale, sono tutte positive, indicando una potenziale affermazione di questo popolamento forestale, nonostante una parziale riduzione della copertura territoriale (Tab. 7). Quest'ultimo aspetto ben si inquadra nell'ambito delle attuali ricerche sulla dinamica delle specie mediterranee in risposta ai cambiamenti climatici. In Di Traglia et al. (2011) l'applicazione di algoritmi basati sugli automi cellulari ha evidenziato l'aumento della presenza di popolamenti di *Quercus suber*, sotto gli stessi scenari climatici da noi adottati, nelle aree attualmente coperte dalle leccete. Questo, quindi, favorirà tutte quelle specie che sono avvantaggiate da condizioni più aride e secche, inducendo una sostanziale modifica del panorama forestale mediterraneo della nostra penisola.

Tabella 7: Tabella riassuntiva dei valori di variazione della copertura e della produttività del leccio nella condizione potenziale attuale e nei due scenari di cambiamento climatico.

IN.DE.FO.	Reale				
	n° celle	ha		NPP tot (tC)	
	510	459,000		650,511	
Simulazioni	Attuale Potenziale				
	n° celle	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	8028	7,23E+06	1474	1,70E+06	161,38
	IPCC B1 Scenario 2050				
	n° celle 2031 - 2060	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	7378	6,64E+06	-8,10	1,80E+06	5,69
	IPCC B1 Scenario 2080				
	n° celle 2071 - 2100	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	8217	7,40E+06	2,35	2,30E+06	35,27
	IPCC A1Fi Scenario 2050				
	n° celle 2031 - 2060	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	6845	6,16E+06	-14,74	1,84E+06	8,36
	IPCC A1Fi Scenario 2080				
	n° celle 2071 - 2100	ha	var %	NPP tot (tC)	var %
	6811	6,13E+06	-15,16	1,82E+06	7,06

Sembrano quindi delinearsi dai risultati qui presentati dei nuovi paesaggi forestali. Le variazioni della produttività primaria e della distribuzione dei popolamenti di faggio, di cerro e di leccio, in quelle aree che oggi potenzialmente potrebbero ospitare questi popolamenti forestali, portano a ridisegnare paesaggi che da sempre caratterizzano la nostra penisola.

Le leccete potenzialmente potrebbero sostituirsi là dove ora vi sono le cerrete e quest'ultime si troverebbero comprese tra le faggete, che non possono salire ulteriormente in quota e quindi a rarefarsi, ed i boschi più termofili.

La metodologia adottata in questo studio non permette di osservare il dinamismo dei popolamenti analizzati nel tempo, ma consente di aprire delle finestre temporali (2050 e 2080) nelle quali stimare il comportamento fisiologico e produttivo in due differenti scenari climatici.

I risultati provenienti dalle simulazioni evidenziano l'affermarsi o il rarefarsi della specie indagata, rispondendo in base alle sue caratteristiche di plasticità, resistenza e/o resilienza al cambiamento climatico predetto.

4.3 - Cambiamento della Produzione Primaria Netta:

Analizzata la situazione potenziale dei popolamenti forestali di faggio, cerro e leccio, si è indagato come le variazioni del cambiamento climatico possano influenzare le aree direttamente campionate dal Corpo Forestale dello Stato nel corso dell'indagine INDEFO del 1995.

In particolare si è cercato di comprendere come si possa modificare la produttività primaria delle specie in funzione degli scenari, sulla base quattro categorie percentuali: due che presentano una riduzione rispettivamente tra -99/-51% e tra -50/0%, due che presentano un incremento della produttività con le due classi rispettivamente tra 0/+50% e dal +51/+100%.

La quinta categoria della legenda mette in evidenza quelle aree che non vedranno la specie esaminata su di esse collocata in relazione all'influenza del cambiamento climatico (completa perdita della produttività -100%).

Queste indicazioni possono essere utili per individuare le aree prioritarie di intervento da gestire in modo preventivo tale da preservare la risorsa forestale attualmente presente e mitigare o minimizzare gli effetti del cambiamento climatico.

Nelle figure seguenti vengono presentate le carte di produttività primaria per quelle aree che attualmente sono caratterizzate dalla presenza di faggete, cerrete o leccete più o meno dense e monospecifiche, rispetto ai due scenari climatici.

Nello scenario B1 a metà secolo, si nota una riduzione della produttività diffusa su tutti i plot, ma il numero dei popolamenti di faggio (Fig. 30-A) rimangono invariati. Tutt'altro per lo stesso scenario ma a fine secolo, infatti si nota una generale perdita di plot forestali nelle aree appenniniche delle regioni Marche, Toscana, EmiliaRomagna e Liguria (Fig. 30-B).

Nello scenario A1Fi (Fig. 31-AB), si può osservare un comportamento simile, con molti plot che rientrano nella classe di forte perdita della produttività tra compresa tra il -99e il -51% in meno rispetto all'attuale produttività primaria.

Nell'Italia centro meridionale e nell'arco alpino, alcuni plot riescono a sostenere una maggiore produttività primaria, specialmente in Lombardia, Trentino, Veneto e Friuli Venezia Giulia in entrambi gli scenari. Si nota però come nella finestra temporale 2071–2100 dello scenario climatico A1Fi (Fig. 31-B), vi sia una maggiore perdita della produttività primaria proprio in quei plot che nella finestra temporale 2031–2060 hanno una produttività già in forte riduzione.

Le attuali foreste di cerro, già a metà secolo nello scenario B1 (Fig. 32-AB) presentano perdite nella produttività primaria. Nonostante un'elevata diffusione della specie nel centro-nord Italia, la regione più colpita sembra essere la Toscana, con la scomparsa di gran parte dei suoi popolamenti di cerro. Quello che accade per lo scenario A1Fi (Fig. 33-AB) è analogo. Infatti si può notare come nell'Appennino Tosco-Emiliano, anche se alcuni plot presentano un incremento

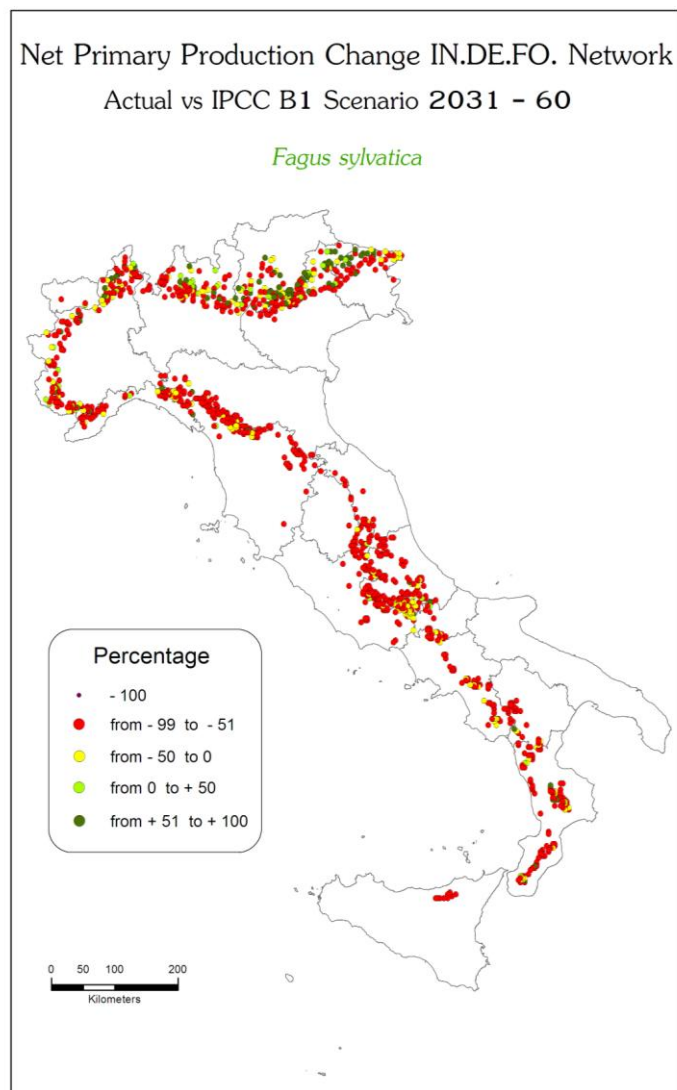
della produttività primaria alla metà del secolo di riferimento, nello scenario a fine secolo gli stessi plot forestali risultano avere una bassa produttività indicando la scomparsa e la modifica delle cerrete del centro Italia.

Il comportamento del leccio è in linea con le altre due specie, mostrando una generale perdita di produttività nelle stazioni reali attuali (Fig. 34-AB e 35-AB). Drastico il cambiamento che avviene nello scenario A1Fi (Fig. 35-AB), nel quale molti plot presentano una produttività pari a zero.

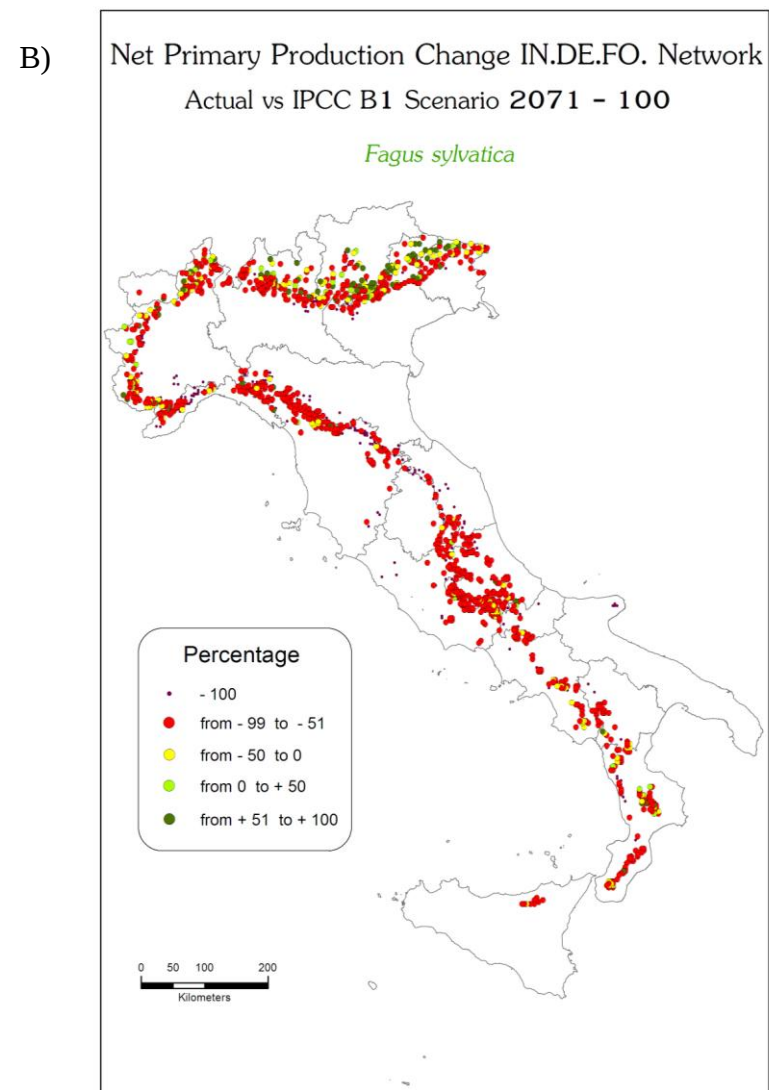
I risultati sulla produttività primaria dei plot forestali INDEFO qui ottenuti sembrerebbero concordare con quanto detto riguardo alle distribuzioni attuali potenziali e alla produttività, poiché anche le carte della produttività evidenziano una netta riduzione delle classi di NPP.

In generale si riscontra una diminuzione della produttività, con incrementi in alcune aree della penisola.

La riduzione della produttività dei plot forestali potrebbe essere affrontato mediante l'approfondimento di questo tipo di ricerca, con l'utilizzo di dati di base più aggiornati e meglio distribuiti sul territorio nazionale, come ad esempio quelli dell'ultimo Inventario Nazionale e delle Foreste riserve di Carbonio (INFC), realizzato dal Corpo Forestale dello Stato.

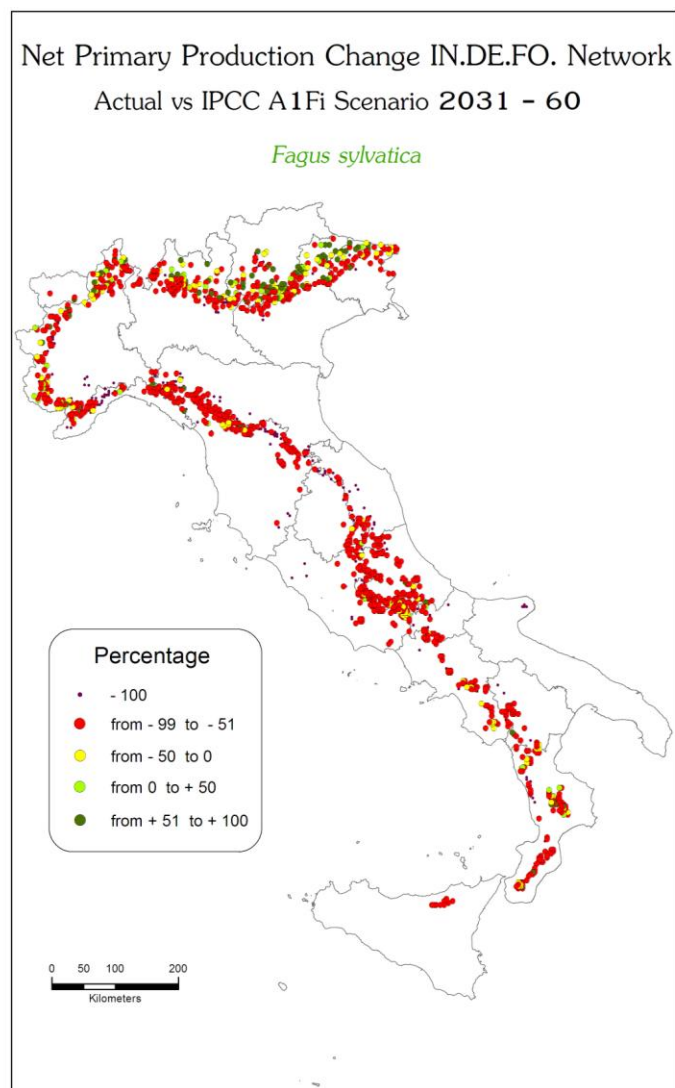


(A)

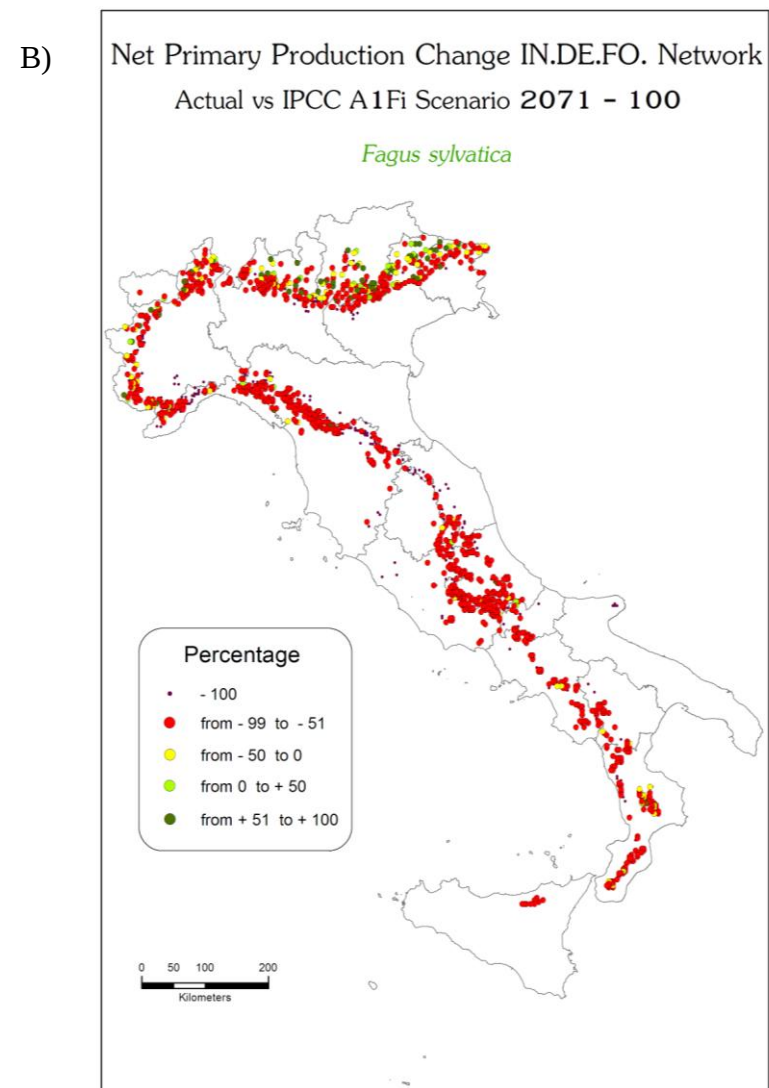


B)

Figura 30: Carte del cambiamento della produttività (NPP) dei punti campionati della rete INDEF0 del faggio, nelle due finestre temporali di riferimento dello scenario B1.

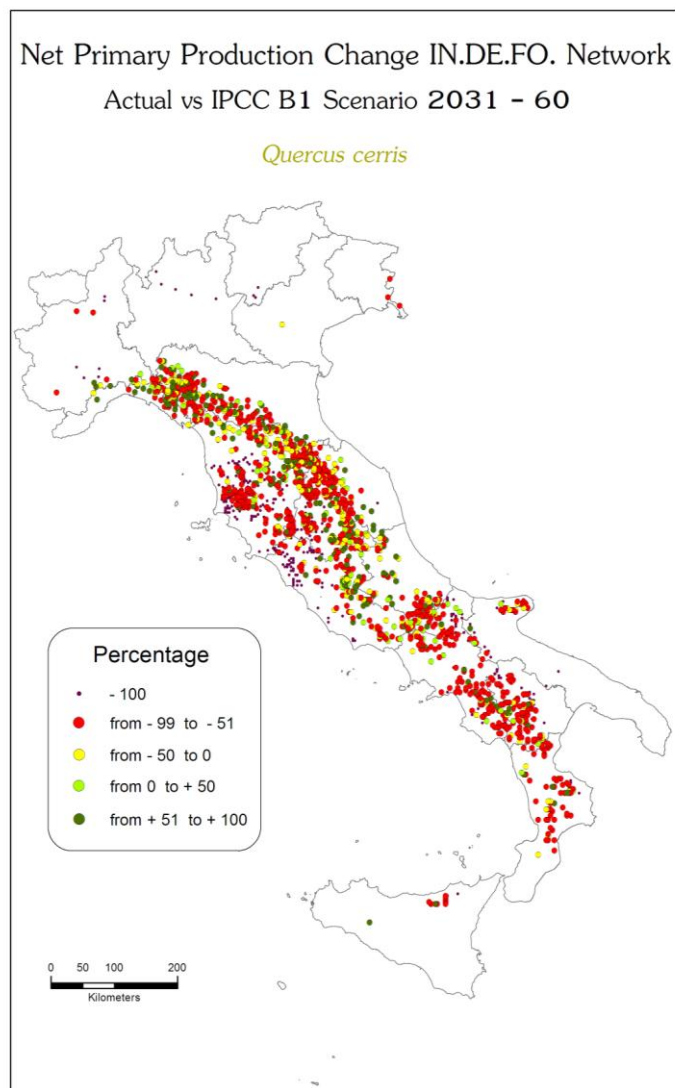


(A)

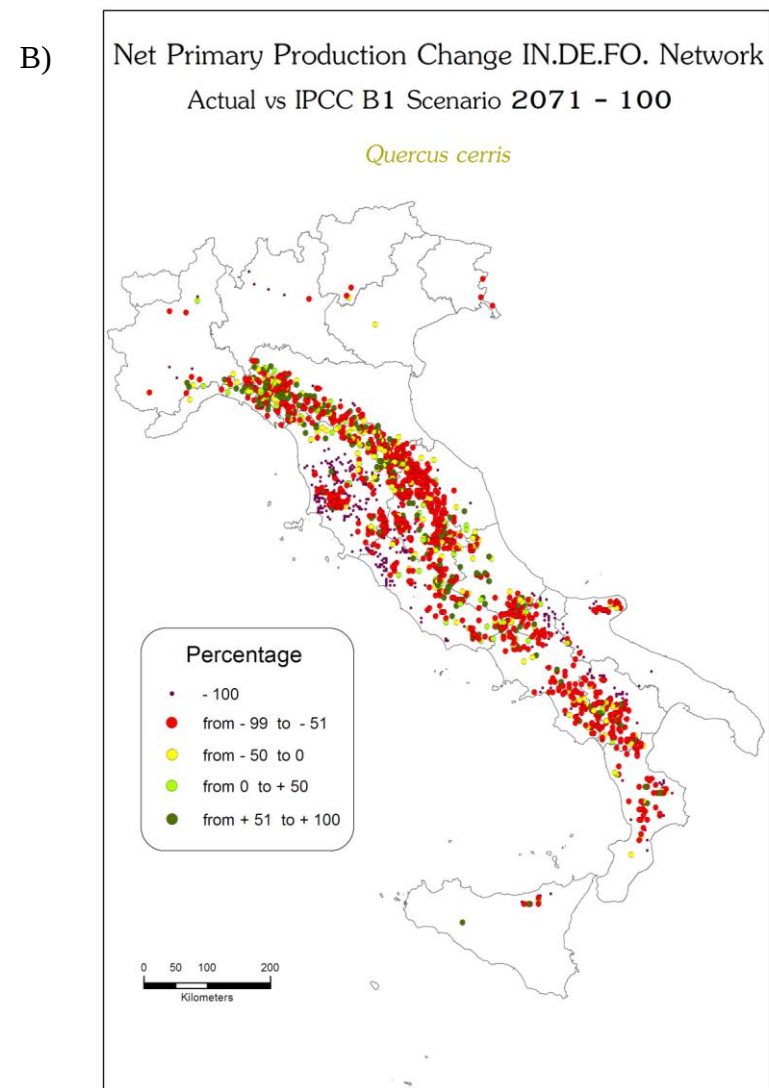


B)

Figura 31 Carte del cambiamento della produttività (NPP) dei punti campionati della rete INDEFO del faggio, nelle due finestre temporali di riferimento dello scenario A1Fi.

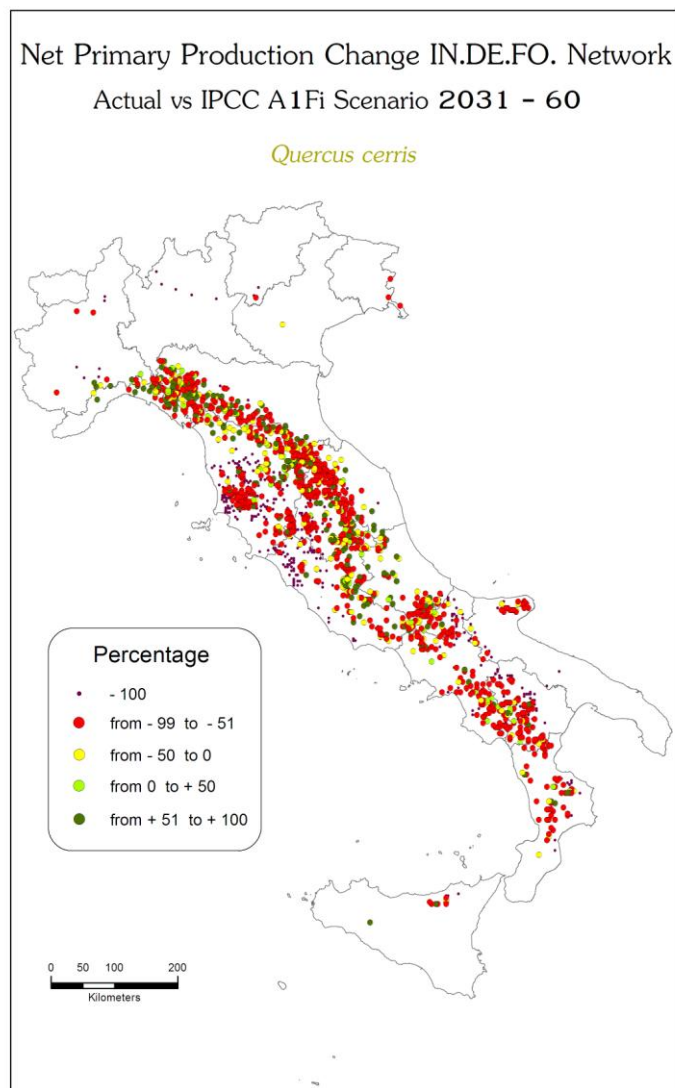


(A)

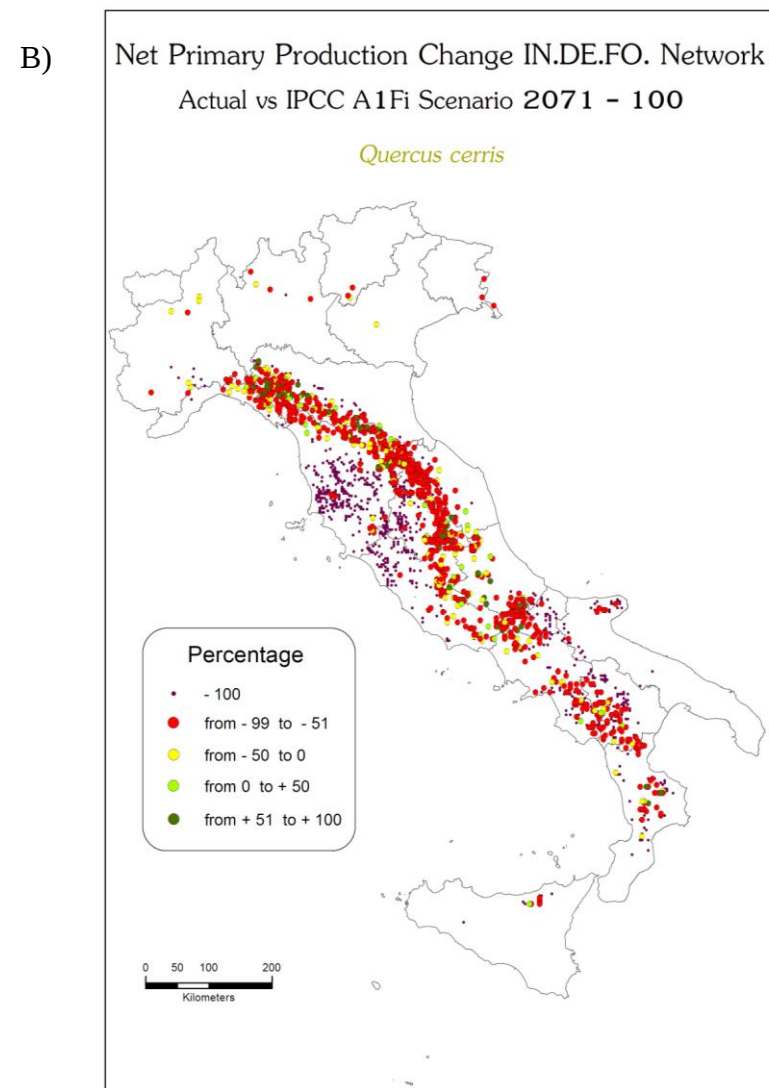


B)

Figura 32: Carte del cambiamento della produttività (NPP) dei punti campionati della rete INDEFO del cerro, nelle due finestre temporali di riferimento dello scenario B1.



(A)



B)

Figura 33 : Carte del cambiamento della produttività (NPP) dei punti campionati della rete INDEFO del cerro, nelle due finestre temporali di riferimento dello scenario A1Fi.

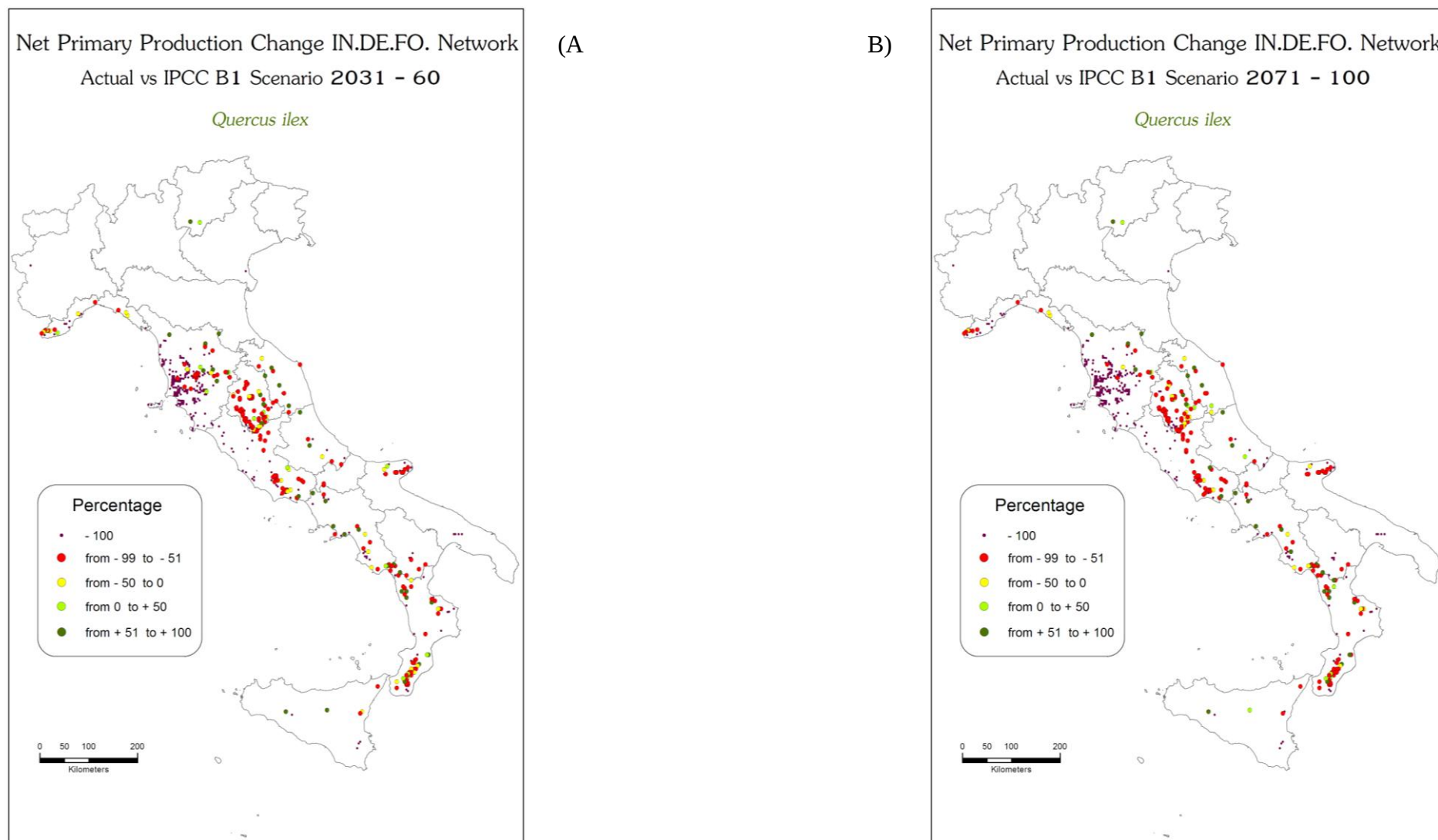
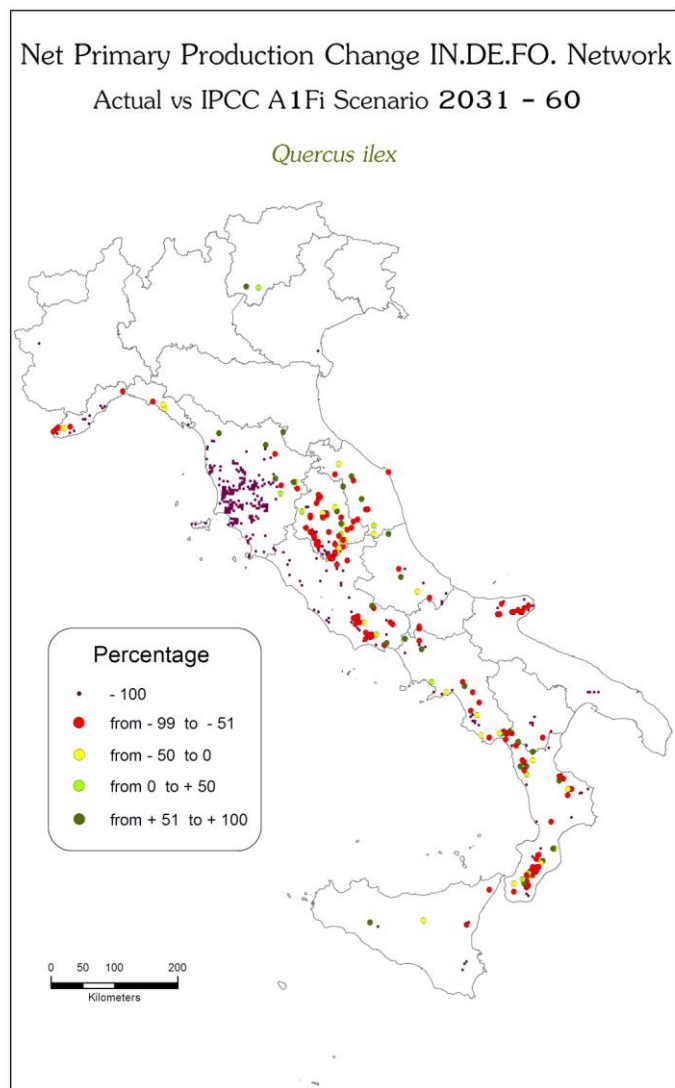
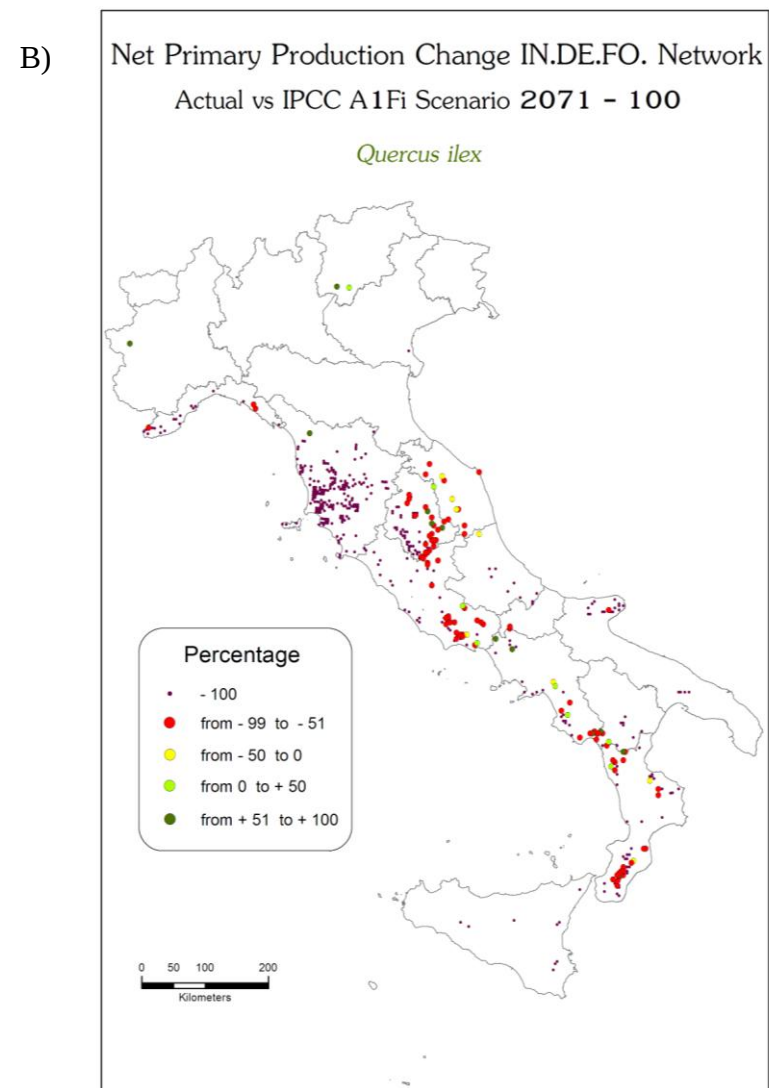


Figura 34 : Carte del cambiamento della produttività (NPP) dei punti campionati della rete INDEFO del leccio, nelle due finestre temporali di riferimento dello scenario B1.



(A)



B)

Figura 35 : Carte del cambiamento della produttività (NPP) dei punti campionati della rete INDEFO del leccio, nelle due finestre temporali di riferimento dello scenario A1Fi.

Negli istogrammi (Fig. 36, 37, 38) si può osservare quello che accade alla produttività espressa come diminuzione % delle tC assorbite dalle foreste nella situazione attuale, quando vengono sottoposte alle simulazioni dei due scenari climatici.

La specie che ne risente di più sembra essere il leccio, seguito dal cerro e poi dal faggio.

I *range* temporali considerati sono molto ampi, ma permettono di avere una previsione su quello che potrebbe accadere alle foreste italiane, quindi adoperarci in pratiche di gestione per favorire la conservazione dei nostri boschi.

IN.DE.FO. Network		<i>Fagus sylvatica</i>	
Copertura	NPP tot Italia		
<i>tot ha</i>	<i>tC allocate</i>		
1,269,000	5,336,829	tC allocate in meno	% in meno
B1 - 2050			
1,026,000	1,439,297.91	3,897,531.09	73.03
B1 - 2080			
1,036,800	1,251,239.49	4,085,589.51	76.55
A1Fi - 2050			
1,044,900	1,266,705	4,070,124	76.26
A1Fi - 2080			
1,044,000	862,335	4,474,494	83.84

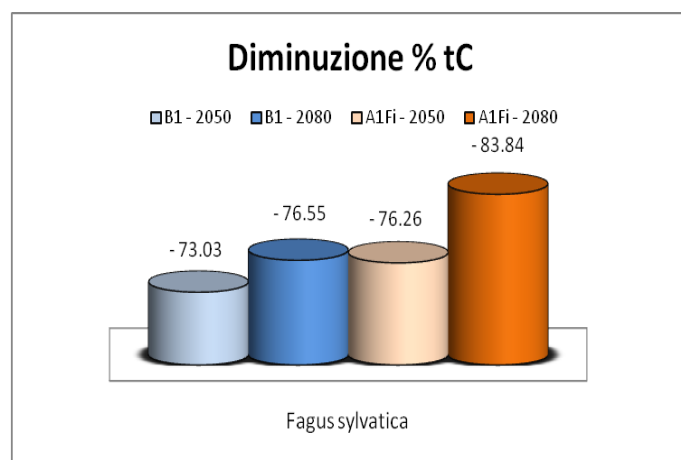


Figura 36: Istogramma e tabella delle variazioni percentuali delle tC non prodotte dalle foreste di faggio italiane rispetto agli scenari B1 e A1Fi nelle due finestre temporali considerate.

IN.DE.FO. Network		<i>Quercus cerris</i>	
Copertura	NPP tot Italia		
<i>tot ha</i>	<i>tC allocate</i>		
1,464,300	3,130,200	tC allocate in meno	% in meno
B1 - 2050			
1,232,100	925,027.11	2,205,172.89	70.45
B1 - 2080			
1,150,200	707,596.65	2,422,603.35	77.39
A1Fi - 2050			
1,159,200	784,177	2,346,023	74.95
A1Fi - 2080			
857,700	290,450.34	2,839,749.66	90.72

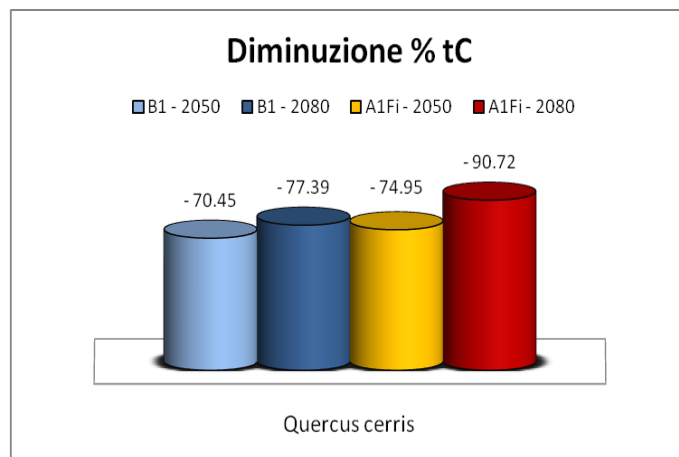


Figura 37: Istogramma e tabella delle variazioni percentuali delle tC non prodotte dalle foreste di cerro italiane rispetto agli scenari B1 e A1Fi nelle due finestre temporali considerate.

IN.DE.FO. Network		<i>Quercus ilex</i>	
Copertura	NPP tot Italia		
<i>tot ha</i>	<i>tC allocate</i>		
459,000	650,511	tC allocate in meno	% in meno
B1 - 2050			
213,300	84,897.72	565,613.28	86.95
B1 - 2080			
194,400	79,317.99	571,193.01	87.81
A1Fi - 2050			
174,600	73,109.25	577,401.75	88.76
A1Fi - 2080			
106,200	27,240.39	623,270.61	95.81

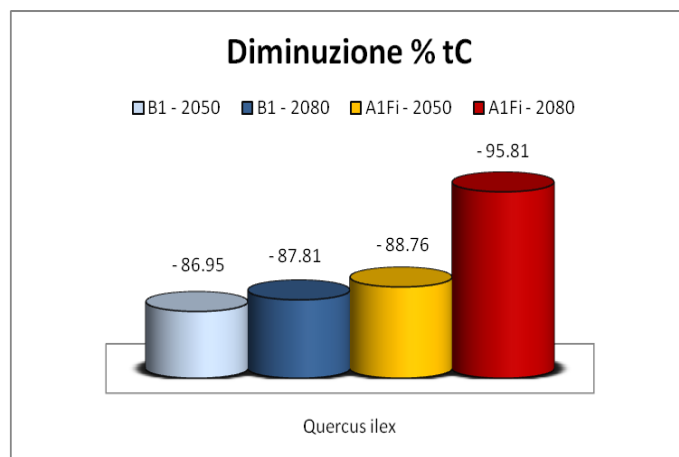


Figura 38: Istogramma e tabella delle variazioni percentuali delle tC non prodotte dalle foreste di leccio italiane rispetto agli scenari B1 e A1Fi nelle due finestre temporali considerate.

4.4 - Considerazioni ecologiche sulla dinamica e la fisiologia delle specie

Un'analisi complessiva degli scambi gassosi associati a ciascuna specie può essere effettuata sulla base dei dati simulati dal modello Mo.C.A. Come si può osservare dalla figura 39, la variazione percentuale della produttività primaria dei popolamenti di faggio e di cerro tende a ridursi nei due scenari considerati raggiungendo -47% e -24% nello scenario A1Fi. Il leccio mostra una invariabilità della produttività primaria fino allo scenario A1Fi della finestra temporale del 2050 dalla quale esso si riduce fino a raggiungere un modesto -10% (Fig. 39)

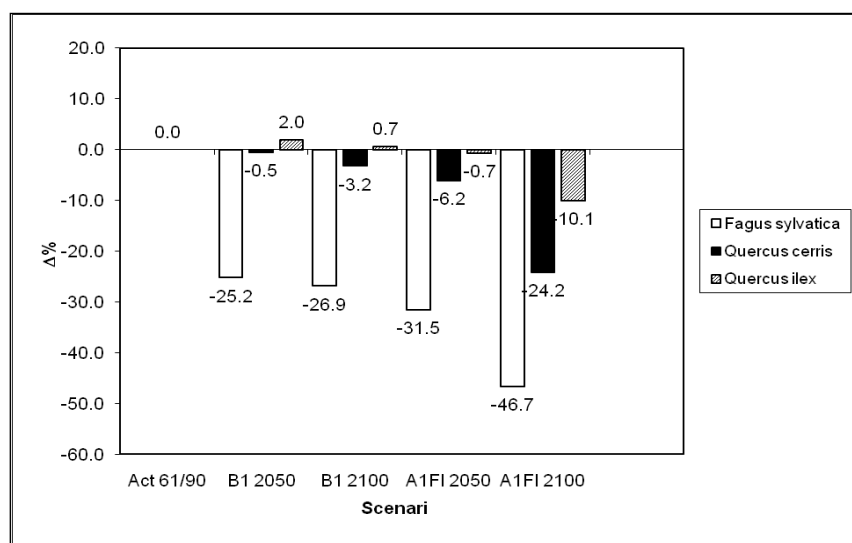


Figura 39: Variazione percentuale della Produttività Primaria Netta delle specie studiate, tra la situazione attuale e gli scenari di cambiamento climatico.

Diverso risulta essere l'andamento complessivo della quantità di acqua traspirata dalle tre specie (Fig. 40). È evidente che il faggio mostra un incremento della traspirazione negli scenari B1 e A1Fi (inizio del secolo) e solo nello scenario A1Fi 2100 raggiunge una riduzione pari al 20%. Il carattere di *water spender* del cerro è invece palesemente evidente dal fatto che la riduzione della traspirazione risulta essere già attuata sin dallo scenario B1 2050, raggiungendo il valore minimo di -33% a fine secolo dello scenario A1Fi. Così come risulta evidente la caratteristica di *water saver* del leccio per quale la riduzione più marcata della traspirazione avviene alla fine del secolo dello scenario A1Fi (Fig. 40).

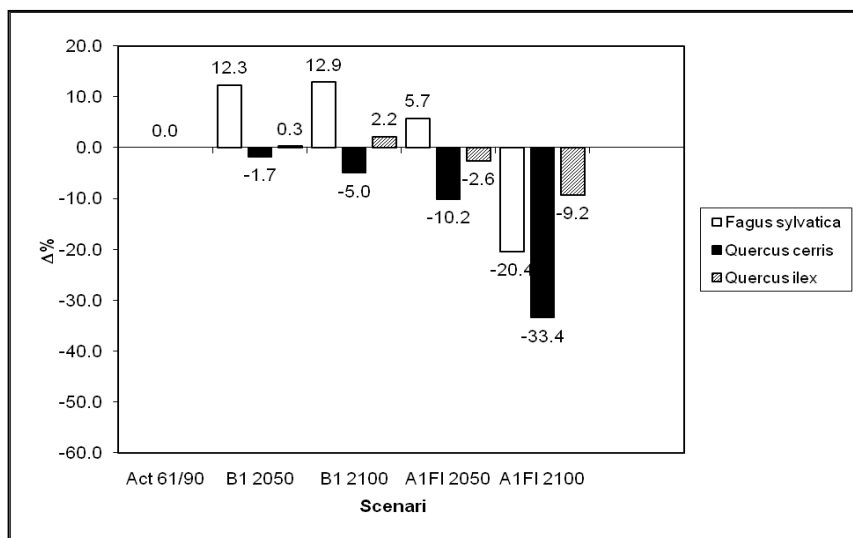


Figura 40: Variazione della quantità di acqua traspirata dalle specie studiate, tra la situazione attuale e gli scenari di cambiamento climatico.

Un ulteriore approfondimento per comprendere quali saranno le potenziali modifiche del panorama forestale per le tre tipologie di popolamenti, è stato realizzato analizzando il comportamento delle specie lungo il loro *range* latitudinale della produttività e dell'evapotraspirazione, e mettendo anche in relazione l'NPP con il WUE (*Water Use Efficiency*). È noto che vi sono molte differenze nella capacità delle specie arboree di resistere alla siccità (Rambal, et al., 2003), o di rispondere a regimi d'acqua favorevoli, perciò è altamente probabile che ci siano reali differenze inter-specifiche nei valori dell'indice WUE (Landsberg, 1999). Questo indice può essere definito come la quantità di sostanza secca prodotta da una pianta per unità di acqua traspirata; inoltre può essere considerato alla scala della singola foglia, o al livello di bosco (Landsberg, 1999). Tale indice descrive una serie di processi che vanno dallo scambio gassoso delle singole foglie, all'accumulo di materia secca durante una stagione di crescita (Sala et al., 2000).

L'uso dell'acqua è governato dalle condizioni ambientali che agiscono sulla superficie fogliare, ed esso è controllato dagli stomi, ma non ci sono prove significative ed evidenti differenze nel comportamento stomatico tra le specie (Valentini et al, 1992). Infatti l'uso dell'acqua nella produzione di materia secca deriva da diversi fattori: l'evapotraspirazione dipendente dall'energia disponibile, che proviene dalla radiazione netta, dall'avvezione e dalla fotosintesi. Tra i fattori che frequentemente riducono il tasso di fotosintesi ci sono: la bassa intensità della luce, la mancanza di O₂ o della CO₂, la temperatura dell'ambiente molto alta, la mancanza o lo squilibrio dei nutrienti al suolo (Bertrand, 1965).

4.5 - Il comportamento eco-fisiologico delle tre specie lungo il gradiente latitudinale della penisola italiana

Il comportamento eco-fisiologico del faggio nel clima attuale (Fig. 41), su tutto il territorio nazionale, tende a mantenersi costante sia nella produttività, sia nella quantità di acqua traspirata.

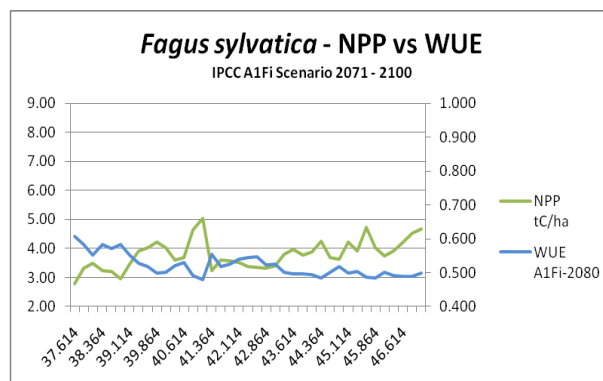
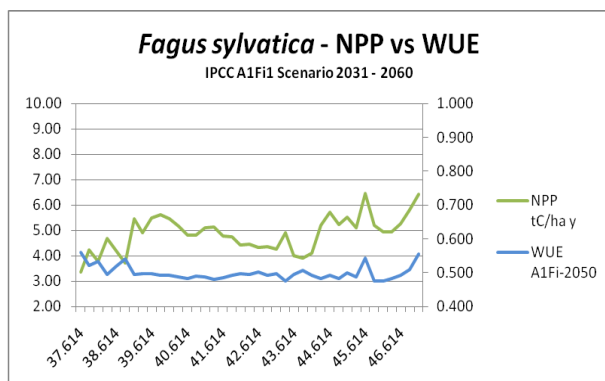
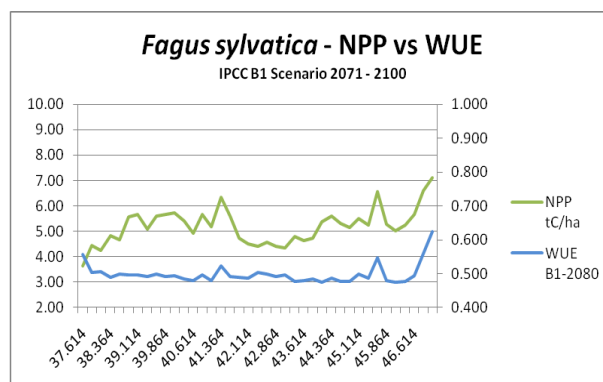
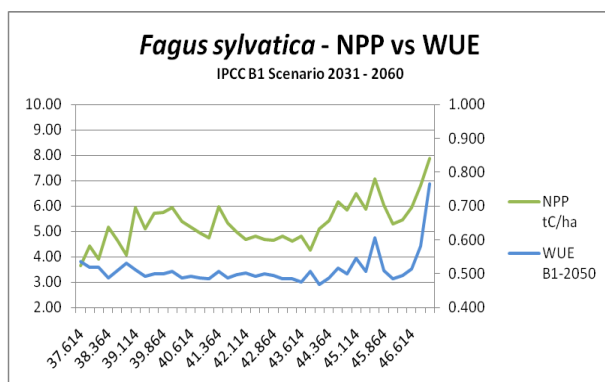
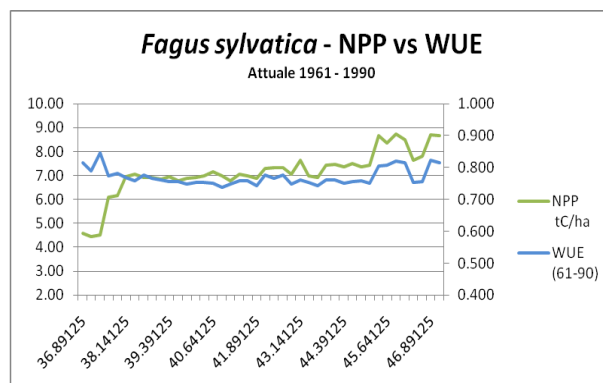
Alle basse latitudini, data la scarsa disponibilità di acqua, esso ha una produzione di circa 5tC/ha, che aumenta fino a rimanere costante alle latitudini più settentrionali, nelle quali non risente della mancanza di acqua, quindi la produttività raggiunge i suoi massimi a circa 8 tC/ha.

Il WUE rimane costante intorno a valori dello 0.8 kgC/tH₂O. Nelle simulazioni la produttività lungo il gradiente latitudinale mantiene lo stesso andamento e con una costante diminuzione per i due scenari.

Il WUE per i popolamenti di faggio italiani varia in un *range* compreso tra un massimo di 0.9 kgC/tH₂O nelle latitudini più meridionali, nella situazione attuale, fino a un minimo di 0.5 kgC/tH₂O nelle simulazioni degli scenari. Dai grafici (Fig. 41) si nota come ad un trend di aumento generale della produttività primaria lungo il gradiente latitudinale italiano, corrisponde un analogo andamento del WUE.

Infatti negli scenari B1 e A1Fi, nonostante il faggio occupi aree mesofile, rimanendo localizzato nelle aree più in quota, dove l'acqua non è un fattore limitante, viene messo in risalto come la curva del WUE si attesti intorno ai valori più bassi della scala. Quindi con il progressivo riscaldamento del clima, il consumo e il controllo dell'acqua risulta essere maggiore, per contrastare l'aumento della temperatura a favore della fotosintesi.

Figura 41: Andamento dell'NPP rispetto al WUE delle faggete italiane lungo il loro range latitudinale, nella proiezione attuale e il comportamento di essa per gli scenari B1 e A1Fi nelle due finestre temporali. L'NPP è misurata come tC/ha, mentre il WUE in kgC/H₂O ha.

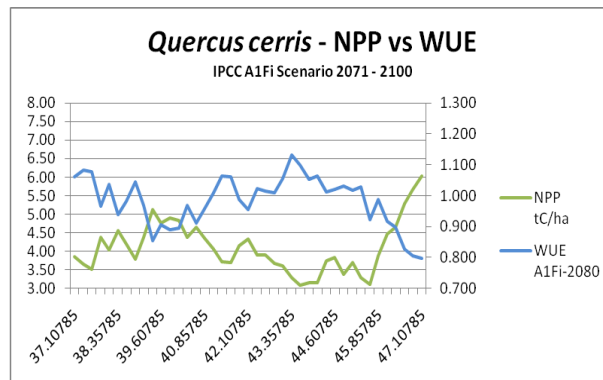
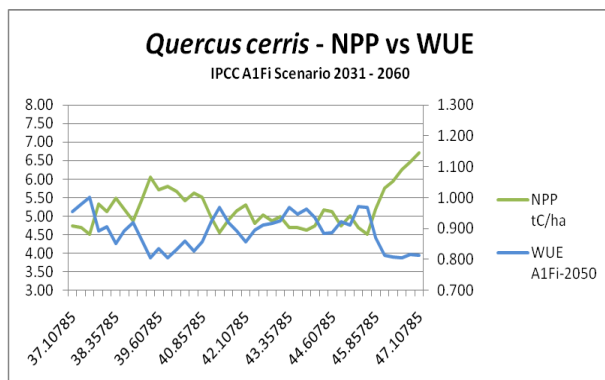
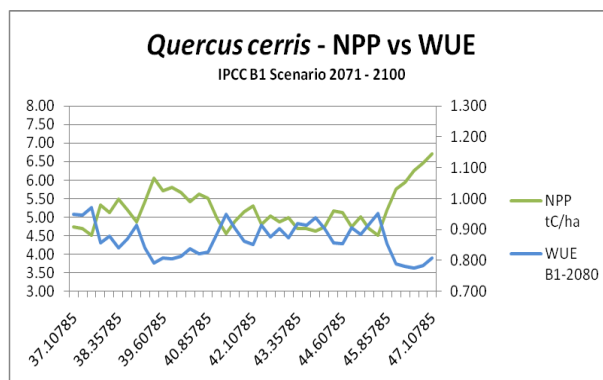
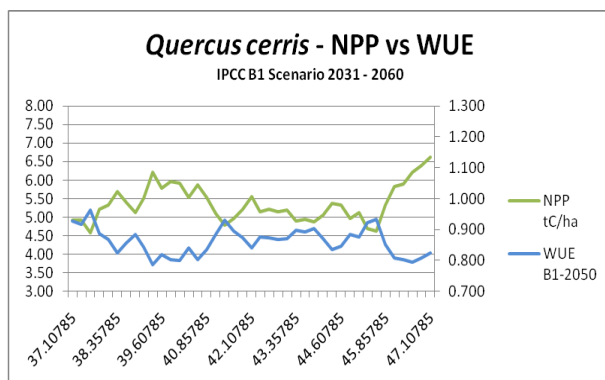
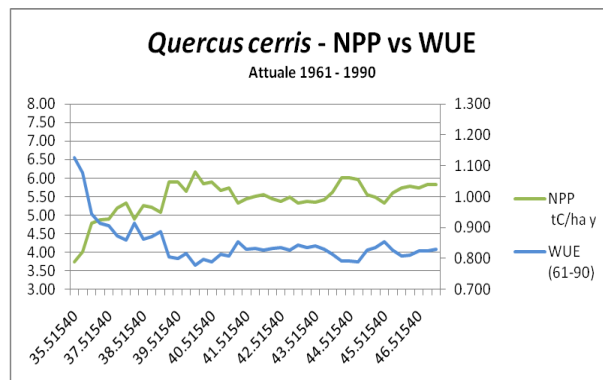


Nella situazione climatica attuale nell'Italia meridionale il cerro non è in grado di controllare le variazioni di disponibilità idrica presentando, in effetti, valori di WUE piuttosto bassi (0.8–0.9 kgC/tH₂O/ha) e valori di NPP costanti (circa 5-6 tC/ha) (Fig. 42).

Nella finestra temporale 2031–2060 nelle simulazioni degli scenari B1 e A1Fi, il comportamento del cerro sembra analogo a quello della condizione attuale, mantenendo la produttività su valori costanti di 5 tC/ha, e bassi valori di WUE. Nelle condizioni di scenario del range temporale 2071–2100 i valori di WUE tendono ad aumentare, indicando una riduzione della produttività primaria e un maggior controllo della quantità d'acqua traspirata (Fig. 42).

Inoltre, nello scenario B1 di fine secolo i valori di WUE risultano essere analoghi a quelli previsti per lo scenario A1Fi 2031-2060. E' importante sottolineare che lungo il gradiente latitudinale i valori di efficienza nell'uso dell'acqua rimangono bassi nelle aree meridionali della penisola italiana mentre vanno ad aumentare in quelle centro-settentrionali. Questo risultato può essere interpretato alla luce del comportamento fisiologico attuato dal cerro in condizioni di forte stress idrico e termico. Come riportato in Manes et al. (2006) il cerro ha come ultima risorsa per evitare una eccessiva disidratazione la perdita progressiva delle foglie. Infatti, il cerro è considerata una specie “*Water-spenders*”, tende quindi a non esercitare un controllo attivo di tipo stomatico sulla traspirazione fogliare (Valentini et al., 1995) in quanto la specie risiede in consorzi forestali tendenzialmente umidi e freschi.

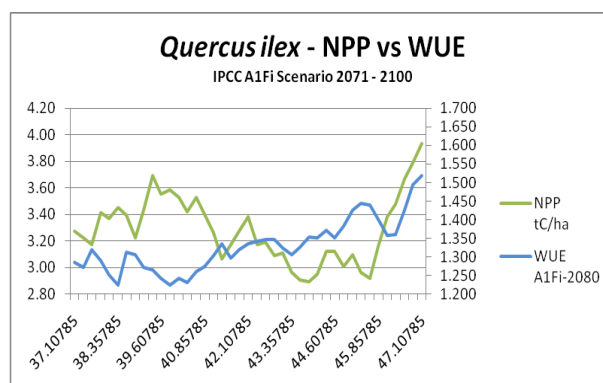
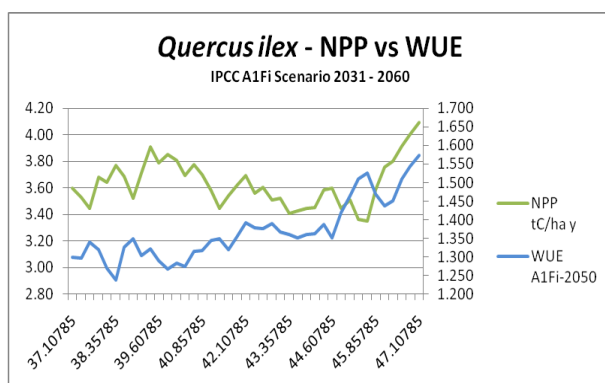
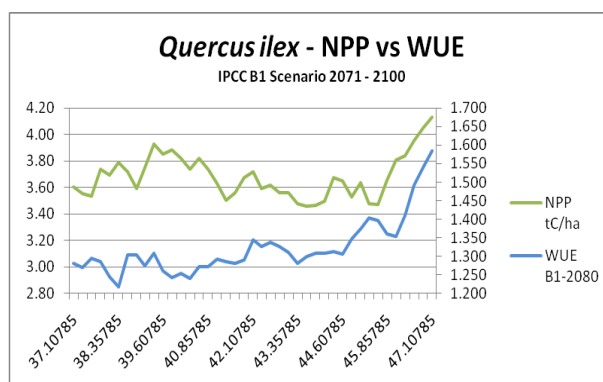
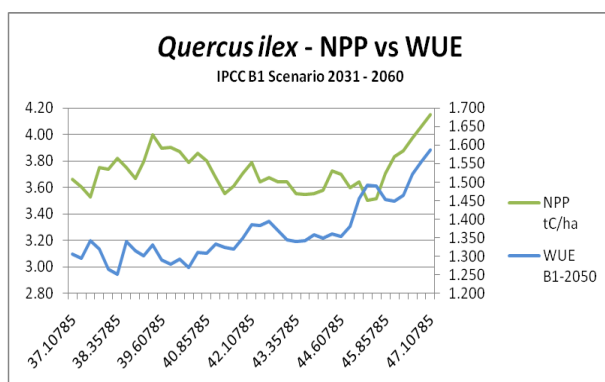
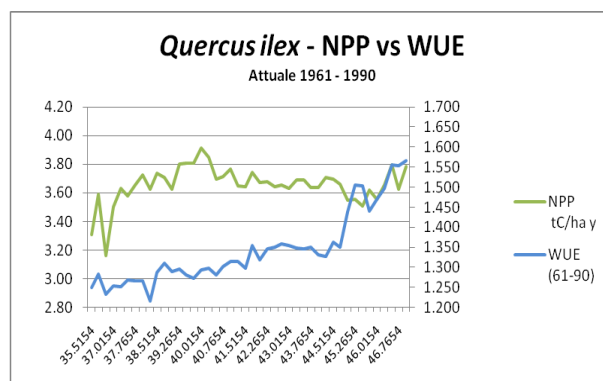
Figura 42: Andamento dell'NPP rispetto al WUE delle cerrete italiane lungo il loro range latitudinale, nella proiezione attuale e il comportamento di essa per gli scenari B1 e A1Fi nelle due finestre temporali. L'NPP è misurata come tC/ha, mentre il WUE in kgC/H₂O ha.



La produttività negli scenari del leccio, rispetto alla condizione attuale, tende a diminuire nel range latitudinale italiano, mantenendosi sempre alta per alcune regioni d'Italia (centro-meridionali), ma con variazioni più evidenti nello scenario A1Fi nel periodo 2071–2100 (Fig. 43). Infatti, il leccio, al contrario delle altre due specie, tollera la siccità ed è ampiamente diffusa nel bacino del Mediterraneo (Ogaya et al., 2003). La produttività ha un andamento crescente per l'Italia centro meridionale e in parte decrescente nell'Italia centro settentrionale. In generale i valori di produttività si collocano tra le 3 e 4 tC/ha. Il WUE tende ad aumentare con valori sempre superiori a 1 fino a 1.50 in kgC/H₂O ha, ad indicare che la traspirazione è fortemente controllata dagli stomi. E' interessante notare che laddove la disponibilità d'acqua è alta il sistema radicale esteso e profondo del leccio, nelle piante adulte, sembrerebbe sostenere una conduttanza stomatica superiore e poco prudente nell'utilizzo di questa (Thomas e Davis, 1989). Il pericolo di embolia idraulica rappresenta, quindi, un pericolo che il leccio riesce a minimizzare grazie all'azione combinata stress idrico al suolo → chiusura stomatica → riciclo del C, all'interno del mesofillo fogliare. Tale adattamento fisiologico permette anche di spiegare l'aumento del WUE in condizioni di cambiamento climatico; infatti, alla chiusura pressoché totale degli stomi si ottiene una relativa differenza di riduzione dei tassi di scambio gassoso (fotosintesi netta – traspirazione) che, rapportati tra loro, tendono a far aumentare i valori di WUE, cioè tendono ad un aumento dell'efficienza nell'uso dell'acqua (*water saver strategy*). Tale caratteristica fisiologica è tuttavia propria anche di altre specie mediterranee.

Come riportato da Penuelas et al. (1998) si potrebbe ipotizzare un cambiamento di posizione nella dominanza da parte della *Phillyrea* rispetto al Leccio, in un clima più secco e caldo previsto per la regione mediterranea dai modelli di circolazione globale (Houghton et al., 1995*), o sotto i cambiamenti climatici già presenti nella regione mediterranea, dove sono in corso già periodi più secchi e più caldi nella prima parte del secolo. Questa ipotesi si inserisce anche in quella già specifica sulla competizione del *Quercus suber* nei riguardi del leccio (Di Traglia et al., 2011).

Figura 43: Andamento dell'NPP rispetto al WUE delle leccete italiane lungo il loro range latitudinale, nella proiezione attuale e il comportamento di essa per gli scenari B1 e A1Fi nelle due finestre temporali. L'NPP è misurata come tC/ha, mentre il WUE in kgC/H₂O ha.



4.6 - Validazione delle stime di Mo.C.A.

Nelle figure di seguito (Fig. 44, 45, 46) viene evidenziato nei grafici come il modello semi-empirico Mo.C.A. risponda con buona approssimazione a determinare i valori di produttività primaria spazializzata su tutto il territorio nazionale. Questo ci spinge comunque a continue verifiche e nuove validazioni (con dati di bibliografia, con il nuovo inventario forestale nazionale, con indagini da satellite, con campagne di rilevamento ad hoc) che dovranno essere messe in campo per rendere il modello sempre più preciso e versatile.

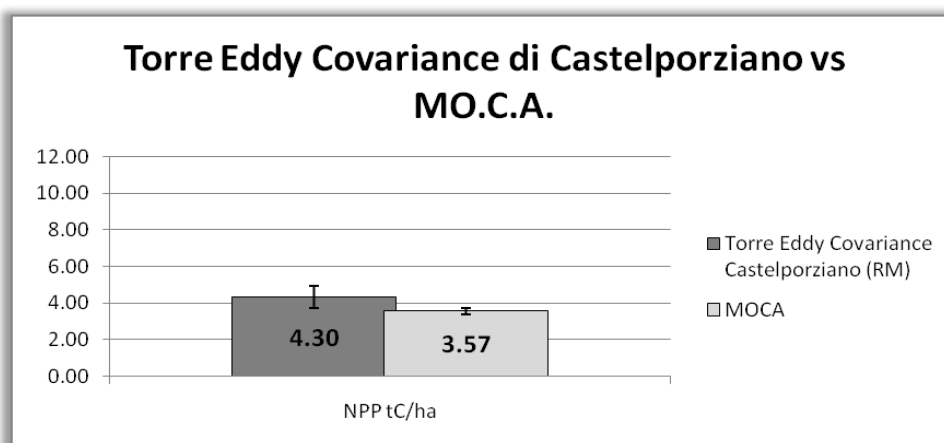


Figura 44: Confronto Torre Eddy Covariance di Castelporziano con le stime del modello per la media degli anni 2000-2005 per i popolamenti di *Quercus ilex*.

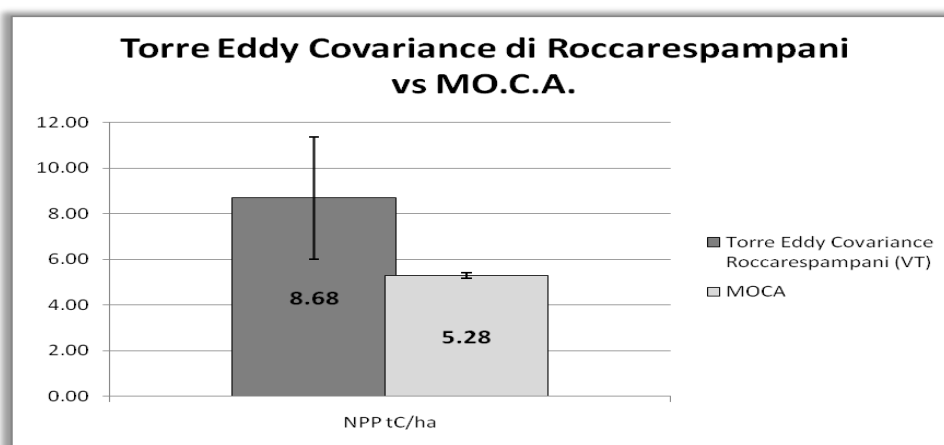


Figura 45: Confronto Torre Eddy Covariance di Roccarespampani con le stime del modello per la media degli anni 2000-2005, per i popolamenti di *Quercus cerris*.

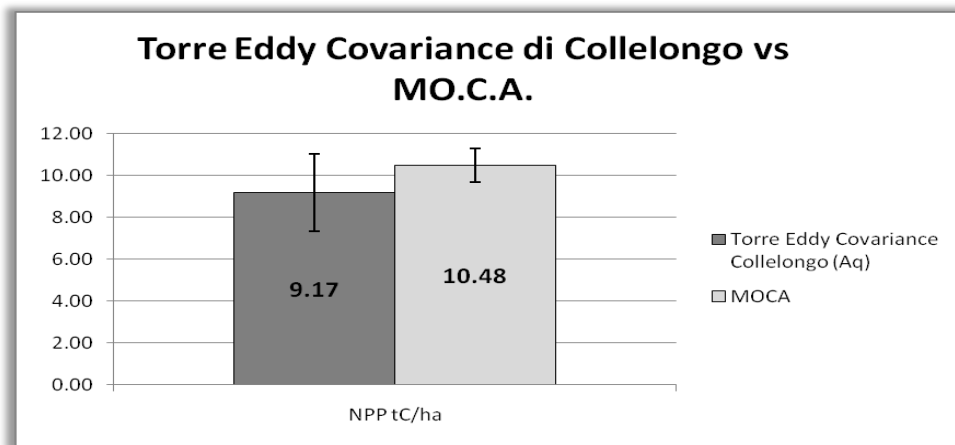


Figura 46: Confronto Torre Eddy Covariance di Collelongo con le stime del modello per la media degli anni 2000-2005 per i popolamenti di *Fagus sylvatica*.

5 – CONCLUSIONI

Le foreste sono responsabili del 60-70% della produttività primaria di tutti gli ecosistemi terrestri e, negli ultimi 30 anni hanno assorbito tra il 20 ed il 30% delle emissioni di gas serra causate dalle attività umane. Questo conferma l'importanza del ruolo delle foreste nel ciclo biogeochimico globale del carbonio anche nel quadro delle crescenti emissioni di carbonio nell'atmosfera e dei cambiamenti climatici in atto (Matteucci & Scarascia Mugnozza, 2008).

Il cambiamento climatico è oggi riconosciuto come una delle sfide più serie che il mondo deve affrontare. È atteso un declino della produzione di legno come effetto negativo dell'incremento delle temperature, che probabilmente non sarà compensato dagli effetti positivi dell'aumentata concentrazione della CO₂ atmosferica. Anche la produzione dei prodotti non legnosi, particolarmente importanti nella regione Mediterranea, sarà influenzata negativamente dal cambiamento climatico. (Lindner et al., 2010).

L'area mediterranea è particolarmente sensibile a qualsiasi cambiamento climatico, poiché rappresenta una zona di transizione tra le regioni arida e umida del mondo. Gli aspetti degli impatti del cambiamento globale includono: un'alta sensibilità della produttività ecosistemica alla disponibilità d'acqua; un'elevata suscettibilità degli ecosistemi naturali all'esaurimento dell'azoto a causa di un ciclo dei nutrienti più lento; un'alta incidenza dei danni del fuoco e dell'intensa erosione del suolo; un alto rischio di maggiori cambiamenti dell'uso del suolo, che influenzano l'albedo superficiale, i flussi di carbonio e il bilancio dell'energia (Moreno and Fellous, 1997, Palahi et al., 2008).

Le foreste non sono solo importanti a causa del loro alto valore ecologico, ma anche per il loro contributo al benessere umano. In tale regione la natura multifunzionale di queste foreste è riconosciuta da tempo; infatti già nel XV secolo, in alcune parti della regione mediterranea, le foreste erano gestite principalmente per la conservazione del suolo e dell'acqua e solo secondariamente per la produzione di legno (Palahi et al., 2008). Anche nel presente tali foreste sono apprezzate non solo per i prodotti legnosi, ma anche per quelli non legnosi e per i servizi.

Un altro aspetto importante, è anche il loro ruolo nella protezione del suolo, nella qualità dell'acqua, nell'arricchimento della biodiversità e nella mitigazione del cambiamento climatico, attraverso il sequestro del carbonio e il miglioramento del microclima. Sebbene questi effetti non possano essere valutati attraverso un prezzo di mercato, essi senza dubbio contribuiscono al benessere delle popolazioni che ne beneficiano (Palahi et al., 2008).

Le piante forniscono prodotti quali: cibo, legname da opera, legna da ardere, e altri numerosi beni; tale *bioproductività* può essere influenzata dal cambiamento climatico, come si desume da questo studio, con effetti benefici o dannosi che non possono essere del tutto predetti.

Uno degli aspetti importanti da considerare è il microclima, cioè il complesso delle variabili ambientali quali la temperatura, la radiazione, l'umidità e il vento, a cui è esposta la vegetazione.

Le specie vegetali sono strettamente legate al loro microclima, poiché il cambiamento di uno dei parametri comporta la variazione degli altri. Questo è il risultato di uno scambio di forze, d'energia o di massa tra la pianta e il suo ambiente.

La produttività delle piante dipende infine dall'influenza del microclima sui processi fisiologici quali la fotosintesi, la respirazione, la traspirazione e la traslocazione.

Nella cornice del cambiamento climatico, l'aumento di temperature è associato a importanti variazioni nell'andamento delle precipitazioni. Tutti i modelli climatici e gli scenari socioeconomici concorrono all'incremento delle precipitazioni sulla maggior parte dell'Europa settentrionale (tra il 10 e il 40% in più di pioggia) e alla loro diminuzione nel sud dell'Europa (più del 20% più secco), particolarmente in estate. Questa riduzione predetta per il sud-Europa, può avere effetti quali ad esempio: l'aumento della frequenza e dell'intensità dei periodi siccitosi, i quali a loro volta influenzeranno le risorse d'acqua, la gestione forestale e l'agricoltura (Palahi et al., 2008).

Le piante assorbono la CO₂ per la fotosintesi esponendo superfici umide, le foglie, ad un'atmosfera secca, con la conseguente perdita di acqua per evaporazione. L'epidermide di cui sono composte ha una cuticola relativamente impermeabile con delle valvole, gli stomi, che ne controllano il turgore; essa non solo riduce il tasso di CO₂ e il vapor d'acqua scambiato, ma attraverso la dimensione di questi pori provvede al controllo dell'assimilazione e ai processi traspirativi. Inoltre gli stomi giocano un ruolo centrale nel controllo del bilancio tra la perdita d'acqua e il guadagno di carbonio, per la produzione di biomassa.

Per la stima della produttività primaria delle specie sono richieste frequenti misure della biomassa attraverso prelievi a carattere distruttivo. Tali tecniche hanno due principali svantaggi: sono dispendiose da un punto di vista temporale ed hanno il limite di non poter essere ripetitive nel campionamento. Inoltre, di solito, non possono essere estese a coprire aree vegetate molto vaste, a causa di motivi logistici e perché, l'elevato numero di campioni, richiederebbe una maggiore variazione dei campioni stessi.

Per spiegare e predire le risposte delle comunità vegetali, risulta comunque necessario integrare i risultati che vengono ottenuti dalla sperimentazione e dalla ricerca nello spazio e nel tempo.

I modelli possono essere uno strumento utile per tali scopi.

Ultimamente, infatti, è nata l'esigenza di modellizzare la produttività totale delle piante, usando approcci meccanicistici per meglio predire le influenze ambientali sulla produttività delle specie vegetali, sia a breve che a lungo termine, e sia nel caso in cui vengano considerate come singola pianta che inserite all'interno di un ecosistema. In questo modo potremo prevedere come campi agricoli, foreste e altri ecosistemi, rispondono all'incremento delle concentrazioni di CO₂ atmosferica, all'aumento delle temperature, alla mancanza d'acqua o, infine, alla mancanza di nutrienti.

L'approccio "*modelli produttività primaria/modelli di distribuzione delle specie*" rappresenta un'efficace metodologia che può essere applicata in quei contesti forestali per i quali sono disponibili dati (climatici e forestali) e scenari previsionali di cambiamento climatico.

Il modello semi-empirico Mo.C.A. è stato applicato nel contesto nazionale, ai popolamenti forestali con differenti caratteristiche climatiche, morfologiche e funzionali quali quelli delle faggete, cerrete e leccete.

L'attenta calibrazione dei principali parametri di Mo.C.A., dedotti su basi di dati sperimentali e bibliografici, ha avuto il suo maggior risultato sia nella rappresentazione spaziale delle variabili fisiologiche studiate, sia nella validazione degli output relativi alle attuali condizioni climatiche con dati misurati direttamente in campo attraverso tecniche micro - meteorologiche come *l'eddy covariance*.

È importante riconoscere che la dinamica spaziale della produttività primaria in funzione del tempo non è rappresentata, in quanto non vi sono algoritmi di "movimento" che sono essenziali per tale rappresentazione. Comunque, Mo.C.A. è stato applicato a due finestre temporali differenti quali quella del 2031-2060 e quella del 2071-2100, appartenenti a due scenari climatici realizzati dall'Hadley Centre come il B1 e l'A1FI e validati dall'IPCC. I due scenari sono stati scelti al fine di comprendere la risposta funzionale delle specie studiate in diverse condizioni climatiche di temperatura e di precipitazioni, confrontandola con l'attuale condizione climatica riferita al trentennio 1961-1990 definito dal World Meteorological Organization.

La conseguente rappresentazione spaziale della produttività primaria netta dei due scenari è risultata essere coerente con quanto noto sulla risposta eco-fisiologica delle specie studiate agli stress ambientali (alte temperature, aridità). Importante è stato l'utilizzo dei modelli statistici multivariati (Attorre et al., 2011, Benito-Garzon et al., 2009) che hanno permesso di simulare le diverse distribuzioni areali delle specie in Italia sotto diverse condizioni climatiche. Su tale base è stato possibile poi spazializzare l'output di Mo.C.A..

Tale approccio ha permesso quindi di rappresentare, mediante carte geo-riferite, le simulazioni della produttività primaria (cioè la capacità di assimilazione del carbonio) dei tre principali popolamenti forestali italiani, faggete, cerrete e leccete. Inoltre, tale approccio ha consentito di dedurre alcuni aspetti relativi all'efficienza nell'utilizzo della risorsa idrica in relazione ad un gradiente latitudinale Sud-Nord e a due diversi scenari climatici. Entrambi questi aspetti saranno utili per la definizione di protocolli e linee guida atti al mantenimento degli attuali popolamenti forestali e alla mitigazione/minimizzazione degli effetti del cambiamento climatico.

L'aumentato rischio e l'incertezza coinvolti nella gestione forestale dei popolamenti mediterranei, sono tra le maggiori sfide nella pianificazione forestale. Da una parte, il cambiamento climatico continuerà ad essere una fonte di incertezza in relazione alle dinamiche forestali, incrementando il rischio degli incendi, di siccità, così come la diffusione di nuove malattie. Dall'altra parte, in un contesto di un'economia globalizzata, la futura richiesta e il valore dei diversi beni e servizi forestali sarà influenzata da un alto grado di incertezza (Palahi et al., 2008).

La biosfera può, infatti, risentire dell'impatto dei cambiamenti climatici innescati dall'aumento dell'effetto serra ma, parallelamente, viene anche influenzata direttamente dall'aumento della concentrazione di CO₂, che è il substrato dell'assimilazione fotosintetica. Il ciclo di vita delle foreste, tipicamente medio-lungo, le rende particolarmente suscettibili ai cambiamenti climatici ma, allo stesso tempo, consente di utilizzare questi ecosistemi per studiare quali effetti dei cambiamenti siano già in atto. Le principali strategie che si possono mettere in campo per aumentare la mitigazione dei cambiamenti climatici da parte delle foreste sono principalmente le seguenti (Scarascia Mugnozza, 2007):

- conservazione;
- gestione;
- espansione;
- sostituzione.

La ricerca dovrà valutare se gli attuali sistemi di gestione siano adatti per le mutate condizioni ambientali nel futuro, stabilendo, anche sperimentalmente, possibili opzioni alternative (*gestione adattativa*), anche in relazione alla stabilità della produttività, ed alla permanenza del carbonio nei suoli (Matteucci & Scarascia Mugnozza, 2008). In una pianificazione adattativa, i decisori politici possono adattare i loro piani secondo le diverse situazioni, poiché essa fornisce informazioni su come reagire ai differenti cambiamenti nelle previsioni della crescita, negli obiettivi di gestione, nei danni forestali causati dal fuoco, ecc... (Palahi et al., 2008). Le strategie di gestione adattativa, per ridurre l'uso dell'acqua o assicurare la preservazione del suolo a lungo termine, richiedono un'ulteriore comprensione dei meccanismi fisiologici così come l'interazione tra gli attori sociali e l'ambiente.

Le ricerche sulle risposte e la vulnerabilità degli ecosistemi alla variabilità e agli estremi climatici dovranno essere potenziate, sia per comprendere gli aspetti funzionali e fisiologici, che per il possibile impatto sulla biodiversità. Inoltre la perdita nella produttività primaria delle specie vegetali, come evidenziato da questo studio, può favorire specie che risultano più competitive nelle nuove condizioni climatiche portate dal cambiamento in atto, rivoluzionando anche l'economia del territorio. In questa cornice, la distribuzione di un numero di specie tipiche di alberi probabilmente è in diminuzione nell'attuale regione Mediterranea (Sabaté et al. 2002, Schröter et al. 2005), ad esempio *Quercus suber*, *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, e *Pinus pinaster*, ma potrebbe espandersi in nuove aree dove ci saranno condizioni climatiche simili a quelle mediterranee (Palahi et al., 2008).

Queste indicazioni possono essere utili per individuare le aree prioritarie di intervento da gestire in modo preventivo, tale da preservare la risorsa forestale attualmente presente e mitigare o minimizzare gli effetti del cambiamento climatico. Ciò può consentire di pianificare gli interventi prioritari di conservazione del territorio in modo più rigoroso, indirizzando gli investimenti di risorse prioritariamente nelle aree destinate a preservare i principali ecosistemi forestali.

Per affrontare i molteplici aspetti della realtà forestale mediterranea, devono essere perseguiti quattro obiettivi principali (Fabbio et al, 2003): 1 – raggiungere una maggiore comprensione delle dinamiche e dei processi funzionali negli ecosistemi forestali, vista l'impossibilità di gestire intere aree in assenza di ritorni economici diretti; 2 – concentrare le risorse finanziarie e l'attenzione gestionale soltanto dove gli interventi ben orientati possono ripristinare, mantenere o migliorare l'efficienza ecologica e il complesso della biodiversità degli ecosistemi forestali; 3 – gestire attraverso regole operative flessibili, il profitto economico delle foreste, tenendo in considerazione i principi già raggiunti di sostenibilità e di gestione adattiva; 4 – trovare modi efficienti di comunicazione per fornire un più ampio e consapevole consenso sulle scelte tecniche attuate.

In altre parole, le pratiche di gestione forestale necessitano di essere maggiormente comprese e di simulare processi e dinamiche naturali di disturbo (Bengtsson et al., 2000; Scarascia-Mugnozza et al., 2000).

Sia per gli aspetti legati ad una migliore comprensione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste e delle loro risposte, che per quelli relativi alle strategie di mitigazione risulta necessario procedere con approcci integrati e di lungo termine che mettano insieme misure sperimentali degli stock e dei flussi tra biosfera e atmosfera, studio e comprensione dei processi, analisi modellistiche e dati da reti di monitoraggio e da inventari su vasta scala.

Quindi comprendere come gli ecosistemi funzionano è essenziale per la loro gestione, ma è altresì importante che tale comprensione sia organizzata e sistematica.

BIBLIOGRAFIA

- AchutaRao K., Sperber KR., CMIP Modelling Groups, 2002. *Simulation of the El Nino Souther Oscillation: Results from the Coupled Model Intercomparison Project*. Climate Dynamics, 19, 191-209.
- Ahas R., Aasa A., 2006. *The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations*. International Journal of Biometeorology, 51, 17–26.
- Ainsworth EA., Long SP., 2005. *What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂*. New Phytologist 165 351-372.
- Alcamo J., Bouwman A., Edmonds J., Grübler A., Morita T., and Sugandhy A., 1995. *An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. In *Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 233- 304.
- Assmann E., 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon Press. Oxford.
- Attorre F., Alfò M., De Sanctis M., Francesconi F., Bruno F., 2007a. *Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale*. International Journal of Climatology, 27, 13: 1825-1843.
- Attorre F., Francesconi F., Taleb N., Scholte P., Saed A., Alfò M., Bruno F., 2007b. *Will dragonblood survive the next period of climate change? Current and future potential distribution of Dracaena cinnabari (Socotra, Yemen)*. Biological Conservation, 138, 430 – 439.
- Attorre F., Francesconi F., Scarnati L., De Sanctis M., Alfò M., Bruno F., 2008a. *Predicting the effect of climate change on tree species abundance and distribution at a regional scale*. iForest, 1, 132-139.
- Attorre F., Francesconi F., Valenti R., Collalti A., Bruno F., 2008b. *Produzione di mappe climatiche e bioclimatiche mediante Universal Kriging con deriva esterna: teoria ed esempi per l'Italia*. Forest@, 5, 8-19.
- Attorre F., Alfò M., De Sanctis M., Francesconi F., Valenti R., Vitale M., Bruno F., 2011. *Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula*. Applied Vegetation Science, 1 - 14.
- Aubinet M. et al., 2000. *Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology*. Adv. Ecol. Res., 30, 113 – 175.
- Aussenac G., Boulangeat C., 1980. *Interception des précipitations et évapotranspiration réelle danspeuplements de feuillus (Fagus sylvatica L.) et de resineux (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco)*. Ann. Sci. For., 37, 91-107.
- Austin MP., 1980. *Searching for a model for use in vegetation analysis*. Vegetatio, 42: 11-21.
- Austin MP., 1985. *Continuum concept, ordination methods, and niche theory*. Annu.Rev. Ecol. Systematics, 16: 39-61.
- Austin MP.,1987. *Models for the analysis of species response to environmental gradients*. Vegetatio, 69: 35-45.
- Austin MP. & Smith TM., 1989. *A new model for the continuum concept*. Vegetatio, 8: 35-47.

- Austin MP., 2002. *Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling*. Ecological Modelling, 157, 101-118.
- Bachelet D., Neilson RP., Lenihan JM., Drapek RJ., 2001. *Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States*. Ecosystems, 4, 164–185.
- Bachelet D., Neilson RP., Hickler T. et al., 2003. *Simulating past and future dynamics of natural ecosystems in the United States*. Global Biogeochemical Cycles, 17, 1045.
- Baker RG. 1983. *Holocene vegetational history of the western United States*. Pp. 109-125 in H. E. Wright, Jr., ed. Late-Quaternary Environments of the United States. Volume 2. University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Bakkenes M., Alkemade JRM., Ihle F., Leemans R., Latour JB., 2002. *Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050*. Global Change Biology, 8, 390–407.
- Baldocchi D.D., Hicks B.B., Meyers T.P., 1988. *Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods*. Ecology, 69, 1331 – 1340.
- Baldocchi D.D., Valentini, R., Running S., Oechel W. C., Dahlman R., 1996. *Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems*. Glob. Change Biol., 2, 159 - 167.
- Ball JT., Woodrow IE., Berry JA., 1987. *A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions*, in: J. Biggins, (Ed.), Progress in Photosynthesis Research, vol. IV. Martinus Nijhof Publishers, Dordrecht, pp. 221-234.
- Bengtsson J., Nilsson S.G., Franc A., Menozzi P., 2000. *Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests*. Forest Ecology and Management, 132, 39–50.
- Beniston M., Fox DG., Adhikary S., et al. 1996. *Impacts of climate change on mountain regions*. In: Intergovernmental Panel on Climate Change. Second Assessment Report (ed. IPCC). pp. 191– 213. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Beniston M., 2006. *Mountain weather and climate: a general overview and a focus on climatic change in the Alps*. Hydrobiologia, 562, 3–16.
- Benito-Garzon M., Sánchez de Dios R., Sainz Ollero H., 2008. *Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species*. Applied Vegetation Science, 11, 169 – 178.
- Bertrand A.R., 1965. *Water conservation through improbe practices*. In Plant Environment and Efficient Water Use, Pierre W.H., Kirkham D., Pesek J., Shaw R., Department of Agronomy Iowa State University Ames, pp. 207 – 235.
- Borghetti M., Magnani F., 1996. *Controllo microclimatico della traspirazione in una faggeta appenninica*. Monti e Boschi, 6, 49-53.
- Borghetti M., Magnani F., Scarascia Mugnozza G., Valentini R., 2001. *Valutazione del ruolo delle foreste italiane nell'assorbimento dell'anidride carbonica*. ISAF Comunicazioni di Ricerca, 2, 85-91.
- Bossel H., 1994. *Modeling and simulation*. Peters-Vieweg, Wiesbaden.
- Box E.O., 1981. *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modelling in Phytogeography*. Junk, The Hague, NL.

- Box E.O., 1996. *Plant functional types and climate change at global scale*. Journal of Vegetation Science, 7: 309-320.
- Breiman L., 2001. *Random Forests*. Machine Learning, 45, 5 – 32.
- Brown S., Schroeder P., Kern J.S., 1999. *Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA*. Forest Ecology and Management, 123, 81-90.
- Brzeziecki B., Kienast F., Wildi O., 1993. *A simulated map of the potential natural forest vegetation in Switzerland*. Journal of Vegetation Science, 4, 499-508.
- Burke A., 2001. *Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountain, Namibia*. Journal of Vegetation Science, 12, 53-60.
- Cao MK., Woodward FI., 1998. *Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their response to climatic change*. Global Change Biology, 4, 185–198.
- Cess RD., et al., 1993. *Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general circulation models*. Science, 262, 1252-1255.
- Chiang J-M., Iverson LR., Prasad A., Brown KJ., 2008. *Effects of Climate Change and Shifts in Forest Composition on Forest Net Primary Production*. Journal of Integrative Plant Biology, 50, 11, 1426–1439.
- Churkina G. & Running SW., 1998. *Contrasting Climatic Controls on the Estimated Productivity of Global Terrestrial Biomes*. Ecosystems, 1, 206 – 215.
- Chmielewski FM., Rötzer T., 2001. *Response of tree phenology to climate change across Europe*. Agricultural and Forest Meteorology, 108, 101–112.
- Ciais P., Tans P.P., Troler M., White J.W.C., Francey R.J., 1995. *A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by 13C/12C ratio of atmospheric CO₂*. Science, 269, 1098 - 1102.
- Ciais P., Viovy N., Reichstein M., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A., Grnwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival JM., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana JF., Sanz MJ., Schulze ED., Vesala T., Valentini R., 2005. *An unprecedented reduction in the primary productivity of Europe during 2003 caused by heat and drought*. Nature, in stampa.
- Ciais P., Schelhaas MJ., Zaehle S., et al., 2008. *Carbon accumulation in European forests*. Nature Geoscience, 1, 425-429.
- Ciccarese L., Pettenella D., 2002. *Il Protocollo di Kyoto dopo Marrakesh*. Sherwood, 108, 5-9.
- CIPE, 2002. *Revisione delle linee guida per le politiche e misure nazionali di riduzione delle emissioni dei gas serra (Legge 120/2002)*. Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica, Deliberazione n. 123 del 19 dicembre 2002.
- Clark LA. & Pregibon D., 1992. *Tree-based models*. In: Chambers, J. & Hastie, T.J. (eds.). *Statistical models in S*, pp. 377-419. Wadsworth and Brooks/Cole Advanced Books and Software, Pacific Grove, CA.
- Conference of the Parties, 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Report of the Conference of the Parties, Third Session Kyoto*. United Nations, Bonn, Germany.
- Costa G., La Mantia T., 2005. *Il ruolo della macchia mediterranea nel sequestro del carbonio*. Forest@, 2, 4: 378- 387.

Corpo Forestale dello Stato, 2007. *Il programma nazionale per il controllo degli ecosistemi forestali (Conecofor)*. [www2.Corpoforestale.it/Web/Guest/Servizi attivita /Controllo ecosistemi forestali](http://www2.Corpoforestale.it/Web/Guest/Servizi%20attivita/Controllo%20ecosistemi%20forestali).

Cramer W., Bondeau A., Woodward FI., Prentice IC., Betts RA., Brovkin V., et al., 2001. *Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models*. Glob. Change Biol., 7, 357–373.

Curtis PS., Wang XZ., 1998. *A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology*. Oecologia, 113, 299 – 313.

Cutini A., Hajny M.T., Gugliotta O.I., Manetti M.C., Amorini E., 2009. *Effetti della struttura del popolamento sui modelli di stima del volume e della biomassa epigea (Pineta di Castelfusano - Roma)*. Forest@, 6, 75-84.

Davis MB., Zabinski C., 1992. *Changes in geographical range resulting from greenhouse warming: effects on biodiversity in forests*. In: Peters RL, Lovejoy TE, eds. *Global Warming and Biological Diversity*. Yale University Press, New Haven. pp. 297–308.

De Wit CT., Goudriaan J., van Laar HH., Penning de Vries FWT., Rabbinge R., van Keulen H., Louwerse W., Sibma L., de Jonge C., 1978. *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Wageningen, The Netherlands.

Dezi S., Magnani F., 2007. *Effetto del suolo su funzionalità e accrescimento dei soprassuoli forestali: un'analisi di sensitività del modello 3-PG*. Forest@, 4, 3, 298-309.

Diaz HF., Grosjean M., Graumlich L., 2003. *Climate variability and change in high elevation regions: past, present and future*. Climatic Change, 59, 1–4.

Di Traglia M., Attorre F., Francesconi F., Valenti R., Vitale M., 2011. *Is cellular automata algorithm able to predict the future dynamical shifts of tree species in Italy under climate change scenarios? A methodological approach*. Ecological Modelling, 222, 925–934

Dixon, R. K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C., Wisniewski J. 1994. *Carbon pools and flux of global forest ecosystems*. Science, 263, 185 – 190.

Doi H., Katano I., 2008. *Phenological timings of leaf budburst with climate change in Japan*. Agricultural and Forest Meteorology, 148, 512–516.

Dupouey J.L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhote J.F., Nepveu G., Berges L., Augusto L., Belkacem S., Nys C., 1999. *Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises*. C.R. Acad. Agric. Fr., 85, 293-310.

Duckworth JC., Bunce RGH. & Malloch AJC., 2000. *Modelling the potential effects of climate change on calcareous grasslands in Atlantic Europe*. Journal of Biogeography, 27, 347-358.

Dyer JM., 1994. *Land use pattern. Forest migration and global Warming*. Landscape and Urban Planning, 29, 77-83.

Dyer JM., 1995. *Assessment of climatic warming using a model of forest species migration*. Ecol. Model., 79, 199–219.

EEA, 2005. *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*. European Environmental Agency, Technical Report 7/2005. 79 p.

EFI, 2007. *Feasibility Study on means of combating forest dieback in the European Union*. Technical Report, BFH.

- Ellenberg H., 1988. *Vegetation ecology of Central Europe*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Estrella N., Menzel A., 2006. *Responses of leaf colouring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany*. Climate Research, 32, 253–267.
- Estrella N., Sparks TH., Menzel A., 2007. *Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany*. Global Change Biology, 13, 1737–1747.
- Fabbio G., Merlo M., Tosi V., 2003. *Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe-the Mediterranean region*. Journal of Environmental Management, 67, 67–76.
- FAO, 2005. *Global forest resources assessment 2005*. FAO Forestry Paper, 147.
- Ferretti M., Petriccione B., Fabbio G., Bussotti F. (a cura di), 2006. *Aspects of Biodiversity in Selected Forest Ecosystems in Italy: Status and Changes Over the Period 1996-2003*. Third Report of the Task Force on Integrated and Combined (I&C) Evaluation of the Conecofo Programme. Annali Istituto Sperimentale per la Selvicoltura, Special Issue (Arezzo), 30, Suppl. 2: 116 Pagg.
- Field CB., Behrenfeld MJ., Randerson JT., Falkowski P., 1998. *Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components*. Science 281, 237–240.
- Fitter AH., Fitter RSR., Harris ITB., Williamson MH., 1995. *Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England*. Functional Ecology, 9, 55–60.
- Fitter AH., Fitter RSR., 2002. *Rapid changes in flowering time in British plants*. Science, 296, 1689–1691.
- Flato GM., Participating CMIP Modelling Groups 2004. *Sea-ice and its response to CO₂ forcing as simulated by global climate models*. Climate Dynamics, 23, 229–241.
- Ford M J., 1982. *The Changing Climate: Responses of the Natural Fauna and Flora*. George Allen and Unwin, London. 190pp.
- Fowler HJ., Kilsby CG., O’Connell PE., 2003. *Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience and vulnerability of a water resource system*. Water Resources Research, 39, 1222.
- Franklin J., 1998. *Predicting the distribution of shrub species in southern California from climate and terrain-derivate variables*. Journal of Vegetation Science, 9, 733–748.
- Frescino TS., Edwards TC. Jr & Moisen GG., 2001. *Modelling spatially explicit forest structural attributes using Generalized Additive Models*. Journal of Vegetation Science, 12, 15–26.
- Friend AD., Woodward FI., 1990. *Evolutionary and ecophysiological responses of mountain plants to the growing season environment*. Adv. Ecol. Res., 20, 59–124.
- Gehrig-Fasel J., 2007. *Treeline and climate change: analyzing and modeling patterns and shifts in the Swiss Alps*. PhD thesis, Université de Lausanne, Lausanne, 132 pp.
- Gold S., 2003. *The Development of the European Forest Resources, 1950 to 2000. A Better Information Base*. Geneva Timber and Forest Discussion Paper 31. UNECE - FAO, Geneva.
- Gordo O., Sanz JJ., 2005. *Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality*. Oecologia, 146, 484–495.

- Gordo O., Sanz JJ., 2009. *Long-term temporal changes of plant phenology in the Western Mediterranean*. Global Change Biology, 15, 1930 – 1948.
- Gordo O., Sanz JJ., 2010. *Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems*. Global Change Biology, 16, 1082–1106.
- Goulden, M.L. et al., 1998. *Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw*. Science, 279, 214 – 217.
- Grabherr G., Gottfried M., Pauli H., 1994. *Climate effects on mountain plants*. Nature, 369, 448.
- Granier A., Ceschia E., Damesin C., Dufrêne E., Epron D. , Gross P., Lebaube S., Le Dantec V., Le Goff N., Lemoine D., Lucot E., Ottorini JM., Pontailler JY., Saugier B., 2000. *The carbon balance of a young 24 beech forest*. Funct. Ecol., 14, 312-325.
- Grassi G., 2005. Quanto ancora le foreste riusciranno a mitigare l'aumento di CO₂ atmosferica? Forest@, 2, 3: 268-269.
- Gualdi S., Navarra A., 2005. *Scenari climatici nel Bacino del Mediterraneo*. Forest@, 2, 1: 19-30.
- Guisan A., Holten JJ., Spichiger R. et al., (eds) 1995. *Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains*. Conservatoire et Jardin Botaniques, Geneva, Switzerland.
- Guisan A., Theurillat J.P. & Kienast F., 1998. *Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environmental*. Journal of Vegetation Scienze, 9, 65-74.
- Guisan A., Theurillat J-P., 2000. *Assessing alpine plant vulnerability to climate change: a modeling perspective*. Integrated Assessment, 1, 307–320.
- Guisan A., Zimmermann NE., 2000. *Predictive habitat distribution models in ecology*. Ecological Modelling, 135, 147–186.
- Guisan A., Thuiller W., 2005. *Predicting species distribution: offering more than simple habitat models*. Ecology Letters, 8, 993–1009.
- Hansen J. A., Neilson R.P., Dale V.H., Flather C.H., Iverson L.R., Currie D.J., Shafer S., Cook R., Bartlein P.J., 2001. *Global Change in Forests: Responses of Species, Communities and Biomes*. Bioscience, 51, 9, 765-779.
- Harvey L D D., 1994. *Transient temperature and sea level response of a two-dimensional ocean-climate model to greenhouse gas increases*. Journal Geophys. Res., 99, 18447-18466.
- Heikkinen RK. & Birks HJB., 1996. *Spatial and environmental componens of variation in the distribution patterns of subartic plant species at Kevo, N Finland-a case stuy at mesoscale level*. Ecography, 19, 341-351.
- Hicke JA., Asner GP., Randerson JT., Tucker C., Los S., Birdsey R., Jenkins JC., Field C., Holland E., 2002. *Satellite derived increases in net primary productivity across North America, 1982 – 1998*. Geophys.Res.Lett., 29, 10.
- Houghton JT., Jenkins GJ., and Ephraums JJ., (Ed) 1990. *Climate Change :The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press.
- Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephramus J.J. (eds), 1995*. *Climate change. The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press.

- Houghton RA., Davidson EA., Woodwell GM., 1998. *Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance*. Global Biogeochemistry and Cycles, 12, 25–34.
- Houghton RA., 1999. *The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990*. Tellus B Chem. Phys. Meteorol. 51, 298–313.
- Houghton RA., Hackler JL., Lawrence KT., 1999*. *The U.S. carbon budget: contributions from land-use change*. Science, 285, 5427, 574 – 578.
- Houghton JT., Ding Y., Griggs DJ., Noguer M., van der Linden PJ., Xiaosu D., eds. 2001. *Climate Change 2001. The Scientific basis*. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Humboldt A. von, 1807. *Ideen zu einer Geographie der Pflanzen nebst einem Naturgemälde der Tropenländer*. Tübingen.
- Huntley B., 1988. *Glacial and Holocene vegetation history-Europe*. In B. Huntley & Webb III (eds) *Vegetation History*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp. 341-383.
- Huntley B., Bartlein PJ., Prentice IC., 1989. *Climatic control of the distribution and abundance of beech (Fagus L.) in Europe and North America*. Journal Biogeogr. 16, 551–560.
- Huntley B., 1990. *Pollen-climate response surface and study of climate change*. Applied Quaternary research. Proceedings of the Quaternary Research Association Discussion Meeting.
- Huntley B., Berry PM., Cramer W. & McDonald AP., 1995. *Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response*. Journal of Biogeography, 22, 967-1001.
- IGBP Terrestrial carbon working group, 1998. *The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto protocol*. Science, 280, pp. 1393 - 1394.
- INFC, 2005. *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, Ispettorato Generale - Corpo Forestale dello Stato. CRA - Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura.
- IPCC, 1990. *IPCC 1° Assessment Report. Scientific Assessment of Climate Change*. Report of Working Group I. Cambridge Univ. Press, UK.
- IPCC, 1995. *IPCC 2° Assessment Report. Climate Change 1995: Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis*. Cambridge Univ. Press, UK.
- IPCC, 1997. *An Introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*. Cambridge Univ. Press, UK.
- IPCC, 2001*. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2001. *IPCC 3° Assessment Report. Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge Univ. Press, UK.
- IPCC, Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change Synthesis Report, 2007a. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104.
- IPCC, 2007b. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policy makers*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, France.

- Iverson, L.R., Prasad, A., 1998. *Predicting Abundance for 80 Tree Species Following Climate change in the Eastern United States*. Ecological Monographs, 68, 465 - 485.
- Iverson L.R., Prasad A., Schwartz M.W., 1999. *Modeling potential future individual tree-species distributions in the eastern United States under a climate change scenario: a case study with Pinus virginiana*. Ecological Modelling, 115: 77-93.
- Iverson, L.R., Prasad, A., 2001. *Potential Changes in Tree Species Richness and Forest Community Types Following Climate Change*. Ecosystems, 4, 186 - 199.
- Iverson, L.R., Prasad, A., 2002. *Potential Redistribution of Tree Species Habitat Under Five Climate Change Scenarios in the Eastern Us*. Forest Ecology And Management, 155, 205 - 222.
- Iverson L.R., Schwartz M.W., Prasad A.M. 2004. *Potential colonization of newly available tree-species habitat under climate change: an analysis for five eastern US species*. Landsc. Ecol., 19, 787 – 799.
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.J., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E-D., Valentini R., Dolman A.J., 2003. *Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of european anthropogenic CO₂ emissions*. Science, 300, 1538 - 1542.
- Jump A.S., Hunt J.M., Martínez-Izquierdo J.A., Peñuelas J., 2006a. *Natural selection and climate change: temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency Fagus sylvatica*. Molecular Ecology, 15, 3469 – 3480.
- Jump A.S., Hunt J.M., Peñuelas J., 2006b. *Rapid climate change related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica*. Global Change Biology, 12, 2163 – 2174.
- Keeling C.D. & Whorf T.P., 2005. *Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. Trends: a compendium of data on global change (on-line)*. <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>.
- Kelly P M., and Wigley T.M.L., 1992. *Solar cycle length, greenhouse forcing and global climate*. Nature, 360, 328-330.
- Kimmins J.P., 1997. *Forest ecology: a foundation for sustainable management* (2nd edn). Prentice-Hall, New Jersey.
- Kington J.A., 1974. *An application of phenology data to historical climatology*. Weather, 29, 320–328.
- Körner C., 2006. *Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply*. New Phytol., 172, 393–411.
- Kull O., Jarvis P.G., 1995. *The role of nitrogen in a simple scheme to scale up photosynthesis from leaf to canopy*. Plant Cell Environ., 18, 1174-1182.
- Kumar K.K., Rajagopalan B., Cane M.A., 1999. *On the Weakening relationship between the indian monsoon and ENSO*. Science, 284, 5423, 2156 – 2159.
- Landsberg J., 1999. *Relationships between water use efficiency and tree production*. In The Ways Trees Use Water, 99/37, pp. 45 – 54.
- Lavergne S., Molina J., Debussche M., 2006. *Fingerprints of enviromental change on the rare Mediterranean flora: a 115-year study*. Global Change Biology, 12, 1466 – 1478.
- Leggett J., Pepper W.J., Swart R.J., 1992. *Emissions Scenarios for the IPCC: an Update*. In: *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* [Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 71-95.

- Leith M., 1974. *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer, New York.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Koltröm M., Lexer M.J., Marchetti M., 2010. *Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems*. *Forest Ecology and Management*, 259, 698–709.
- Lindroth A., Grelle A., MoreÅn A.-S., 1998. *Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity*. *Glob. Change Biol.*, 4, 443 – 450.
- Lu PL., Yu Q., Liu JD., He QT., 2006. *Effects of changes in spring temperature on flowering dates of woody plants across China*. *Botanical Studies*, 47, 153–161.
- Mackey BG., 1993. *Predicting the potential distribution of rain-forest structural characteristics*. *Journal of Vegetation Scienze*, 4, 43-54.
- Mackey GB. & Sims RR., 1993. *A climate analysis of selected boreal tree species, and potential responses to global climate change*. *World Resource Rev.*, 5, 469-487.
- Magnani F., Borghetti M., 1998. *Foreste europee e cambiamenti climatici: obiettivi per la ricerca dopo Kyoto*. *Monti e Boschi XLIX*, 5: 5-8.
- Magnani F., Matteucci G., 2009. *Selvicoltura e cambiamenti climatici*. Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura. Taormina (ME), 16-19 ottobre 2008. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 532-535.
- Manes F., Vitale M., Feoli E., Scimone M., Canfora E., 1998. *Gas exchange measurements and indirect estimate of primary production in a holm-oak ecosystem*. *Fresen. Environ. Bull.*, 7, 71-78.
- Manes F., Vitale M., Donato E., Giannini M., and Puppi G., 2006. *Different ability of tree Mediterranean oak specie sto tolerate progressive water stress*. *PHOTOSYNTHETICA*, 44, 3: 387-393.
- Margary ID., 1926. *The Marsham phenological record in Norfolk, 1736 – 1925, and some others*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 52, 27–52.
- Masera OR., Garza-Caligaris JF., Kanninen M. et al., 2003. *Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach*. *Ecological Modelling*, 164, 177–199.
- Matthews HD., 2006. *Emissions targets for CO2 stabilization as modified by carbon cycle feedbacks*. *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.*, 58, 591–602.
- Matteucci G. & Scarascia Mugnozza G., 2008 . *Le foreste difendono il pianeta dai gas serra: ma l'uomo deve aiutarle*. *SILVÆ*, Anno III, 9, 49 - 65
- Mearns LO., Giorgi F., McDaniel L. et al., 2003. *Climate scenarios for the Southeastern U.S. based on GCM and regional model simulations*. *Climatic Change*, 60, 7–35.
- Meehl GA., Washington WM., Arblaster JM., Hu A., 2004. *Factors affecting the Climate Sensitivity in Coupled General Circulation Models*. *Journal of Climate*, 17, 1584- 1596.
- Menzel A., 2003. *Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO*. *Climatic Change*, 57, 243–263.
- Menzel A., Sparks TH., Estrella N., Eckhardt S., 2005. *'SSW to NNE' – North Atlantic Oscillation affects the progress of seasons across Europe*. *Global Change Biology*, 11, 909–918.
- Menzel A., Sparks TH., Estrella N. et al., 2006. *European phenological response to climate change matches the warming pattern*. *Global Change Biology*, 12, 1969–1976.

- Mitchell TD., Carter TR., Jones PD., Hulme M., New M., 2003. *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100)*. Journal of Climate, submitted.
- Morales P., Hickler T., Rowell DP., Smith B., Sykes MT., 2007. *Changes in European ecosystem productivity and carbon balance driven by regional climate model output*. Global Change Biology, 13, 108 – 122.
- Moreno, J.M., Fellous, J.L. (Eds.), 1997. *Global change and the Mediterranean region*. Comité IGBP España, Informe n. 2, Madrid, 78 pp.
- Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R., 1997. *Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991*. Nature, 386, 698 – 702.
- Myneni RB., Dong J., Tucker CJ., et al., 2001. *A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 98 14784-14789.
- Nabuurs G. J., Pavinen, R., Sikkema R., Mohren, G.M.J., 1997. *The role of European forests in the global carbon cycle - a review*. Biomass Bioenergy, 13, 345 – 358.
- Nabuurs GJ., Masera O., Andrasko K., Benitez-Ponce P., Boer R., Dutschke M., Elsiddig E., Ford-Robertson J., Frumhoff P., Karjalainen T., Krankina O., Kurz WA., Matsumoto M., Oyhantcaba W., Ravindranath NH., Sanz Sanchez MJ., Zhang X., 2007. *Forestry*. In: *Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA), Cambridge University Press, Cambridge.
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G. et al., 2000. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J., Myneni R.B., Running S.W., 2003. *Climate driven increase in global terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999*. Science, 300, 1560 - 1563.
- Norby RJ., Ogle K., Curtis PS., Badeck FW., Huth A., Hurtt GC. et al., 2001. *Aboveground growth and competition in forest gap models: an analysis for studies of climatic change*. Clim. Change 51, 415 – 447.
- Norby RJ., DeLucia EH., Gielen B., Calfapietra C., Giardina CP., King JS., et al. 2005. *Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 102, 18052–18056.
- Nordli Ø., Wielgolaski FE., Bakken AK., Hjeltne SH., Ma'ge F., Sivle A., Skre O., 2008. *Regional trends for bud burst and flowering of woody plants in Norway as related to climate change*. International Journal of Biometeorology, 52, 625–639.
- Oechel W.C., et al., 1993. *Recent change of arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source*. Nature, 361, 520 – 523.
- Ogaya R., Peñuelas J., Martínez Vialta J., Mangirón M., 2003. *Effect of drought on diameter increment of Quercus ilex, Phyllyrea latifolia, and Arbutus unedo in a holm oak forest of NE Spain*. Forest Ecology and Management, 180, 175 – 184.
- Osborn T J. and Wigley TML., 1994. *A simple model for estimating methane concentrations and lifetime variations*. Climate Dynamics, 9, 181-193.
- Paffen K.H., Pillewizer W., Schneider H-J., 1956. *Forschungen im Hunza Karakorum*. Erdkunde, pg. 10.

- Palahi M., Mavsar R., Gracia C. and Birot Y., 2008. *Mediterranean forests under focus*. International Forestry Review, 10, 4
- Parmesan C., Yohe G., 2003. *A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems*. Nature, 421, 37–42.
- Parry M., 2000. *Assessment of Potential Effects and Adaptation for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA project*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Pauli H., Gottfried M., Grabherr G., 1996. *Effects of climate change on mountain ecosystems. Upward shifting of alpine plants*. World Resource Review, 8, 382–390.
- Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C., Grabherr G., 2007. *Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLROIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria*. Global Change Biology, 13, 147–156.
- Peñuelas J., Filella I., Lluisià J., Siscart D., and Piñol J., 1998. *Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees Quercus ilex and Phillyrea latifolia*. Journal of Experimental Botany, 49, 319, 229–238.
- Peñuelas J., Filella I., Comas P., 2002. *Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region*. Global Change Biology, 8, 531–544.
- Peñuelas J., Boada M., 2003. *A global change-induced shift in the Montseny mountains (NE-Spain)*. Global Change Biology, 9, 131 – 140.
- Peñuelas J., Hunt JM., Ogaya R., Jump AS., 2008. *Twentieth century changes of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ at the southern range edge of Fagus sylvatica: increasing water-use efficiency does not avoid the growth decline induced by warming at low altitudes*. Global Change Biology 14 1-13.
- Pepper WJ., Leggett J., Swart R., Wasson J., Edmonds J., and Mintzer I., 1992. *Emissions Scenarios for the IPCC. An Update: Assumptions, Methodology, and Results. Support Document for Chapter A3*. In Climate Change 1992: Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. J.T. Houghton, B.A. Callandar and S.K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge.
- Peters RL., II, and JDS. Darling, 1985. *The greenhouse effect and nature reserves: Global warming would diminish biological diversity by causing extinctions among reserve species*. BioScience, 35, 11, 707-717.
- Petriccione B., 2005. *Reti di monitoraggio coordinate dal Corpo forestale dello stato*. In: Blasi C., Boitani L., La Posta S., Manes F. & Marchetti M. (a cura di). Stato della biodiversità in Italia. Palombi Editori: 445 - 449.
- Philips OL., Malhi Y., Higuchi N., Laurence WF., Núñez V., Vásquez RM., Laurance SG., Ferreira LV., Stern M., Brown S., Grace J., 1998. *Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plot*. Science, 282, 5388, 439 – 442.
- Pignatti S., 1995. *Biodiversità della vegetazione mediterranea*. In “la vegetazione italiana”, Atti Conv. Lincei, 115, 7 – 31, Accad. Lincei, Roma.
- Pignatti S., 1998. *I Boschi d'Italia, sinecologia e biodiversità*. UTET, Roma.
- Piovesan G., Biondi F., Di Filippo A., Alessandrini A., Maugeri M., 2008. *Drought-driven growth reduction in old beech (Fagus sylvatica L.) forests of the central Apennines, Italy*. Global Change Biology 14 1-17.
- Pitelka L.F., 1997. *Plant Migration and Climate Change*. Am. Sci., 85: 464-473.

- Poncet BN., Garat P., Manel S., et al., 2009. *The effect of climate on masting in the European larch and on its specific seed predators*. *Oecologia* 159 527-537.
- Post E., Stenseth NC., 1999. *Climatic variability, plant phenology, and northern ungulates*. *Ecology*, 80, 1322–1339.
- Post E., Forchhammer MC., Stenseth NC., Callaghan TV., 2001. *The timing of life-history events in a changing climate*. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 268, 15–23.
- Prasad A.M., Iverson L.R. & Liaw A. 2006. *Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction*. *Ecosystems*, 9, 181–199.
- Ramaswamy V., Schwarzkopf and MD., Shine KP., 1992. *Radiative forcing of climate from halocarbon-induced global stratospheric ozone loss*. *Nature*, 355, 810-812.
- Rambal S., Ourcival J.M., Joffre R., Mouillot F., Nouvellon Y., Reichstein M and Rocheteau A., 2003. *Drought controls over conductance and assimilation of a Mediterranean evergreen ecosystem scaling from leaf to canopy*. *Global Change Biology*, 9, 1813 – 1824.
- Rosenzweig C., Karoly D., Vicarelli M. et al., 2008. *Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change*. *Nature*, 435, 353–357.
- Rouget M., Richardson DM., Lavorel S., Vayreda J., Gracia C. & Milton SJ., 2001. *Determinants of distribution of six Pinus species in Catalonia, Spain*. *Journal of Vegetation Science*, 12, 491-502.
- Rowell DP., 2005. *A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability*. *Climate Dynamics*, 25, 837 – 849.
- Running S., 1998. *A blueprint for improved global change monitoring of the terrestrial biosphere*. *Earth Obs.* 10, 8 – 12.
- Sabaté S., Gracia C and Sánchez A., 2002. *Likely effects of Climate Change on growth of Quercus ilex, Pinus halepensis, Pinus pinaster, Pinus sylvestris and Fagus sylvatica forests in the Mediterranean Region*. *Forest Ecology and Management*, 5906, 1-15.
- Sala O.E., Stuart Chapin III F., Armesto J.J., Berlow R., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L.F., Jackson R.B., Kizing A., Leemans R., Lodge D.M., Mooney H.A., Oesterheld M., Poff L.N., Sykes M.T., Walker B.H., Walker M. and Wall D., 2000. *Global biodiversity scenarios for the year 2100*. *Science*, 287, 5459, 1770 – 1774.
- Salleo S., Lo Gullo M.A., 1990. *Sclerophylly and Plant Water Relations in Three Mediterranean Quercus Species*. *Annals of Botany*, 65, 259-270.
- Samantha TA., 2005. *Using spatial models to establish climatic limiters of plant species' distributions*. *Ecological Modelling*, 182, 159–181.
- Sánchez E., Gallardo C., Gaertener MA., Arribas A., Castro M., 2004. *Future climate extreme events in Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach*. *Global and Planetary Change*, 44, 163 – 180.
- Sanz-Elorza M., Dana ED., Gonzáles A., Sobrino E., 2003. *Changes in the high mountain vegetation of the Central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming*. *Annals of Botany*, 92, 273 – 280.
- Sarris D., Christodoulakis D., Körner C., 2007. *Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean*. *Global Change Biology*, 13, 1187 – 1200.

- Scarascia-Mugnozza G., Oswald H., Piussi P., Radoglou K., 2000. *Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs*. Forest Ecology and Management, 132, 97–109.
- Scarascia Mugnozza G., 2007. *Quale ruolo per alberi e foreste in uno scenario di cambiamenti ambientali*. Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali, in stampa
- Schaphoff S., Lucht W., Gerten D. et al., 2006. *Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections*. Climatic Change, 74, 97–122.
- Scheifinger H., Menzel A., Koch E., Peter C., Ahas R., 2002. *Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological phases in central Europe*. International Journal of Climatology, 22, 1739–1755.
- Schiermeier Q., 2005. *That sinking feeling*. Nature, 435, 732–733.
- Schlesinger WH., 2006. *Global change ecology*. Trends Ecol. Evol., 21, 348–351.
- Schröter D., Cramer W., Leemans R., Prentice I.C., Araújo M.B., Arnell N.W., Bondeau A., Bugmann H., Carter T.R., Gracia C.A., De La Vega-Leinert A.C., Erhard M., Ewert F., Glendining M., House J.I., Kankaanpää S., Klein R.J.T., Lavorel S., Lindner M., Metzger M.J., Meyer J., Mitchell T.D., Reginster I., Rounsevell M., Sabaté S., Sitch S., Smith B., Smith J., Smith P., Sykes M.T., Thonicke K., Thuiller W., Tuck G., Zaehle S., and Zierl B., 2005. *Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe*. Science 310, 5752, 1333–1337
- Smith T.M., Shugart H.H., Woodward F.I., (eds.), 1997. *Plant functional types, their relevance to ecosystem properties and global change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Smith RL. and Smith T., 2000. Ecology and Field Biology -6th edition. Ed. Smith.
- Sparks TH., Jeffree EP., Jeffree CE., 2000. *An examination of the relationship between flowering times and temperatures at the national scale using long-term phenological records from the UK*. International Journal of Biometeorology, 44, 82–87.
- Stöckli R., Vidale PL., 2004. *European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset*. International Journal of Remote Sensing, 25, 3303–3330.
- Sykes MT., 2001. *Modelling the potential distribution and community dynamics of lodgepole pine (Pinus contorta Dougl. ex. Loud.) in Scandinavia*. Forest Ecology and Management, 141, 69–84.
- Thomas C.M., Davis S.D., 1989. *Recovery patterns of three chaparral shrub species after wildfire*. Oecologia, 80, 309–20.
- Thomas C.D., Cameron A., Green R.E. et al. 2004. *Extinction risk from climate change*. Nature, 427, 145–147.
- Thuiller W., Lavorel S., Araujo M.B., Sykes M.T., Prentice I.C., 2005. *Climate change threats to plant diversity in Europe*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102, 8245–8250.
- Townsend A.R., Braswell B.H., Holland E.A., and Penner J.E., 1996. *Spatial and Temporal Patterns in Terrestrial Carbon Storage Due to Deposition of Fossil Fuel Nitrogen*. Ecological Applications, 6, 806–814.
- Trigo R.M., Palutikof JP., 2001. *Precipitation scenario over Iberia: a comparison between direct GCM output and different downscaling techniques*. Journal of Climate 14, 4422 - 4446.

- Troll C., 1939. *Das Pflanzenkleid des Nanga Parbat*. Wissenschaftliche Veröffentlichung des Deutschen Museums für Länderkunde z. Leipzig, 7, 1–16.
- Valentini R., Scarascia Mugnozza G.E. and Ehleringer J.R., 1992. *Hydrogen and Carbon isotope ratios of selected species of a Mediterranean Macchia*. Ecosyste, Functional Ecology, 6, 6, 627 – 631.
- Valentini R., Epron D., De Angelis P., Matteucci G. & Dreyer E., 1995. *In situ estimation of net CO₂ assimilation, photosynthetic electron flow and photorespiration in Turkey oak (Q. cerris L.) leaves: diurnal cycles under different levels of water supply*. Plant, Cell and Environment 18, 631–640.
- Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E-D., Rebmann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindroth A., Grelle A., Bernhofer C., Grünwald T., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A.S., Vesala T., Rannik Ü., Berbigier P., Loustau D., Guðmundsson J., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgenstern K., Clement R., Moncrieff J., Montagnani L., Minerbi S., Jarvis P.G., 2000. *Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests*. Nature, 404, 861 - 865.
- Vayssières MP., Plant RE. & Allen-Diaz BH., 2000. *Classification trees: an alternative non-parametric approach for predicting species distributions*. Journal of Vegetation Science, 11, 679-694.
- Vinnikov YK., Grody NC., 2003. *Global warming trend of mean tropospheric temperature observed by satellite*. Science 302, 269-272.
- Vitale M., Scimone M., Feoli E., Manes F., 2003a. *Modelling leaf gas exchanges as a function of temperature 15 increase to predict trends of functional processes in Mediterranean Quercus ilex forest under climatic changes*. Ecol. Model., 166, 123-134.
- Vitale M., Scimone M., Feoli E., Manes F., 2003b. *Modelling leaf gas exchanges to predict functional trends in Mediterranean Quercus ilex forest under climatic changes in temperature*. Ecological Modelling 166, 123 - 134. Elsevier.
- Vitale M., Gerosa G., Ballarin-Denti A., Manes F., 2005. *Ozone uptake by an evergreen Mediterranean forest (Quercus ilex L.) in Italy. Part II: Flux modelling. Up scaling leaf to canopy ozone uptake by a process11based model*. Atmos. Environ., 39, 3267-3278.
- Vitale M., Capogna F., Manes F., 2007. *Resilience assessment on Phillyrea angustifolia L. maquis undergone to experimental fire*. Ecol. Model., 203, 387-394.
- Walther G-R., 2003. *Plants in a warmer world*. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 6, 169–185.
- Walther G-R., Beißner S., Burga CA., 2005. *Trends in the upward shift of alpine plants*. Journal of Vegetation Science, 16, 541–548.
- Waring RH., Running SW., 1998. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. Academic Press, San Diego, CA.
- Wielickli BA., Wong T., Allan RP., Slingo A., Kiehl JT., Soden BJ., Gordon CT., Miller AJ., Yang S-K., Randall DA., Robertson F., Susskind J., Jacobowitz H., 2002. *Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget*. Science, 295, 5556, 841 – 844.
- Wigley T M L. and Raper SCB., 1990. *Natural variability of the climate system and detection of the greenhouse effect*. Nature, 344, 324-327.
- Woodward FI., 1987. *Climate and plant distribution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Woodwell GM., Mackenzie FT., Houghton RA., Apps M., Gorham E., Davidson E., 1998. *Biotic feedbacks in the warming of the earth*. Clim. Change 40, 495–518.