

## I CAMBIAMENTI CLIMATICI E LA FUNZIONE SINK DEI BOSCHI

Severino Romano<sup>1</sup>, Luigi Fanelli<sup>1</sup>, Mauro Viccaro<sup>1</sup>, Francesco di Napoli<sup>1</sup>, Mario Cozzi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi della Basilicata, Potenza; severino.romano@unibas.it

La ricerca sul possibile impatto del cambiamento climatico sulle foreste d'Europa e lo sviluppo di strategie di adattamento e mitigazione è iniziato fin dagli anni '90, con l'individuazione di modelli di valutazione del rischio e, conseguentemente, di articolazione di strumenti di gestione delle superfici forestali.

La previsione degli effetti dei cambiamenti climatici sulle foreste è stata effettuata utilizzando la teoria dell'evidenza di *Dempster-Shafer* (DS) opportunamente spazializzata. Le linee di evidenza implementate fanno riferimento al concetto di Vulnerabilità e di Resilienza. I risultati del modello DS, applicati alla regione Basilicata, sono stati impiegati per valutare la perdita della capacità di assimilazione della CO<sub>2</sub> da parte delle diverse tipologie forestali in funzione dei livelli di vulnerabilità raggiunti al 2050 e 2100. La perdita di assimilazione di CO<sub>2</sub> stimata, mostra una riduzione della funzione *sink* nel tempo, tendenzialmente maggiore al 2050 rispetto al 2100.

L'approccio metodologico utilizzato ha dimostrato come l'elevato grado di dettaglio spaziale e informativo ottenuto, può rappresentare una buona base di partenza per le politiche ambientali sul monitoraggio e mitigazione dei danni da cambiamento climatico, al fine di assicurare la capacità degli ecosistemi di produrre externalità positive, compresa la capacità di sequestro di carbonio atmosferico.

*Parole chiave:* teoria dell'evidenza, cambiamenti climatici, vulnerabilità, resilienza, sequestro di CO<sub>2</sub>.

*Keywords:* theory of evidence, climate change, vulnerability, resilience, absorption capacity.

<http://dx.doi.org/10.4129/cis-sr-cam>

### 1. Introduzione

Evidenze scientifiche dimostrano come l'aumento dei gas serra in atmosfera contribuisca in modo importante all'incremento della frequenza e persistenza delle alte temperature a livello globale. Giorgi *et al.* (2008) e Rayas *et al.* (2013) hanno infatti simulato lo scenario SRES A1B dell'IPCC (2007) nel bacino del Mediterraneo, prevedendo un incremento della temperatura tra i 2 e i 4°C nel corso del XXI secolo e una diminuzione delle precipitazioni dal 10% al 20%. L'irregolare distribuzione delle precipitazioni durante l'anno, il manifestarsi di eventi estremi e la modificazione dei cicli stagionali che sta interessando in particolar modo le zone semiaride ed aride del Mediterraneo sono i principali responsabili dei processi di degradazione del territorio (Casaioli e Sciortino, 1997). Tale variabilità può influenzare notevolmente gli equilibri delle popolazioni (Pederson, 2011). Questo è particolarmente vero per le superfici forestali mediterranee, caratterizzate da crescenti livelli di vulnerabilità, proporzionali allo stress idrico e ai sistemi gestionali che, molto spesso, facilitano i processi di degradazione (Vincente-Serrano *et al.*, 2012; Vettrano *et al.*, 2005), con ripercussioni sull'attività fotosintetica e sulla produttività dei soprassuoli forestali. È da tener presente come gli studi condotti sui cambiamenti climatici utilizzino dati intrinsecamente caratterizzati da imprecisione ed incertezza. Uno dei modelli in grado di distinguere i livelli di conoscenza e gestire i

livelli di incertezza è la teoria dell'evidenza di Dempster e Shafer (Shafer, 1976).

La teoria dell'evidenza di Dempster-Shafer (DS) ha come obiettivo esplicito il superamento dei limiti della concezione probabilistica bayesiana (Ippoliti, 2008). Diversi sono gli autori che hanno applicato la teoria dell'evidenza al settore forestale (Ducey, 2001; Yousefpour *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2011; Bernetti *et al.*, 2011). Nel presente lavoro è stata sviluppata una metodologia basata sulla teoria dell'evidenza di DS al fine di valutare lo stato medio del clima e le possibili variazioni a livello locale al 2050 e 2100 sulla base dello *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) A1B, la vulnerabilità dei boschi e le ripercussioni sull'attività di *sink* delle superfici forestali della regione Basilicata fornendo una stima economica del probabile "danno".

### 2. Materiali e metodi

Fattori esterni ad un sistema complesso possono, in alcuni casi, incidere sulla funzionalità del sistema stesso. Un tipico esempio può essere la cementificazione di estese aree urbane che, riducendo la capacità del suolo di assorbire acqua, provoca allagamenti, frane e smottamenti dei corsi idrici, eventi sempre più frequenti in ambiente mediterraneo.

Le foreste e più in generale i sistemi naturali assolvono ad una funzione di ribilanciamento, di assorbimento degli effetti prodotti da perturbazioni esterne, a condizione che la loro resilienza rimanga inalterata.

Purtroppo, l'essenza multifunzionale delle foreste non è costante nel tempo, anche a causa del cambiamento climatico. Gli effetti sono rinvenibili nella riduzione dei tassi di crescita e di produttività, nei cambiamenti nella composizione delle specie presenti e *shift* altitudinali e latitudinali, con conseguente perdita di biodiversità e della funzione di assorbimento della CO<sub>2</sub>. Essere in grado di anticipare gli eventi, attraverso l'impiego di modelli di simulazione del clima, che permettono di predire i futuri andamenti climatici e di conseguenza valutare le possibili risposte dei sistemi forestali, può risultare di grande utilità al fine di individuare strategie di intervento e tecniche di gestione volte a migliorare la capacità di adattamento al cambiamento climatico. Il quadro metodologico adottato, riassunto nella Figura 1, analizza principalmente il concetto di vulnerabilità e resilienza dei soprassuoli forestali attraverso la teoria di DS. La vulnerabilità è definita come *il grado di suscettibilità di un sistema agli effetti negativi dei cambiamenti climatici e la sua incapacità a farvi fronte; sono inclusi la variabilità del clima e gli eventi meteorologici estremi* (IPCC, 1997) sebbene per il settore forestale concorrano soprattutto le caratteristiche ecologiche delle specie e morfologiche dell'area (Bernetti *et al.*, 2011). La resilienza invece è intesa come *la capacità dei sistemi di reagire a variazioni ambientali esterne, mantenendo la stessa struttura e le stesse modalità di funzionamento di base* (IPCC, 1997).

Applicando il concetto di resilienza ai boschi, questo può essere definito come la capacità degli stessi di reagire a variazioni ambientali esterne, conservando un certo grado di stabilità ecologica, sia dal punto di vista della composizione specifica, sia per quanto riguarda il mantenimento della struttura, in funzione dello stadio di accrescimento del bosco stesso (Bernetti *et al.*, 2011).

Nella prima fase del lavoro è stata effettuata una normalizzazione delle variabili che concorrono a determinare la resilienza e la resistenza delle superfici forestali attraverso l'impiego della *Fuzzy Logic* (Zadeh, 1965). Le variabili prese in considerazione per la resilienza e la vulnerabilità sono riportate in tabella 1.

Individuate e normalizzate le variabili che concorrono a definire la vulnerabilità e la resilienza dei sistemi forestali, attraverso la teoria di DS è stato possibile aggregare i criteri in tre indicatori di probabilità:

- 1) *Belief* della vulnerabilità (*Bel h*)
- 2) *Belief* della resilienza (*Bel s*)
- 3) Incertezza (*U; h, s*)

La teoria di DS permette di rafforzare la conoscenza, integrando diversi tipi di informazioni, distinguendo l'incertezza, al fine di comprendere eventuali rischi connessi al processo decisionale. La valutazione degli indicatori ha permesso di stimare la perdita attesa della funzione *sink* dei soprassuoli, causata dal cambiamento climatico, relazionando la vulnerabilità dei soprassuoli con la perdita di incremento di biomassa legnosa. Infine, si è proceduto alla quantificazione della riduzione di biomassa legnosa, espressa in termini di mancata fissazione di CO<sub>2</sub> al 2050 e al 2100, prendendo il 2012 come riferimento.

### 2.1 Previsione del clima a scala locale con MMD

Gran parte dei modelli di previsione del clima prendono in considerazione aree molto vaste; tali analisi risultano essere caratterizzate da un certo grado di incertezza per la carenza e la variabilità delle informazioni. In particolare è stato individuato un modello di simulazione del clima a scala locale, capace di esprimere i cambiamenti climatici in atto nella regione Basilicata in riferimento allo scenario SRES A1B dell'IPCC (AR4 - 2007). Il modello utilizzato è il *Mathematical Model Downscaling* (MMD) implementato sia sulla base delle serie storiche rilevate dalle stazioni meteo installate sul territorio regionale, sia sulle predizioni dei modelli *Multi Global Model Ensemble* (MGME - modelli di simulazione di circolazione atmosferica). Allo scopo, partendo dalle osservazioni delle stazioni di monitoraggio, è stato creato un *dataset* trentennale dal 1961 al 1990 così come proposto dal *World Meteorological Organization* (Plummer *et al.*, 2003). Nello specifico si è deciso di interpolare i dati a disposizione (temperatura media annua, temperatura media del mese più freddo e precipitazioni cumulate annue) dei modelli MGME tramite funzioni polinomiali. Successivamente si è passati ad aggregare i coefficienti angolari  $ax_i$  delle interpolazioni dei dati stazionali con quelli scaturiti dai modelli MGME  $dx_i$ , allo scopo di correlare i dati stazionali con quelli previsionali dei modelli MGME. Il risultato è un coefficiente angolare "compensato" della curva di simulazione al 2100. Ripetuta l'operazione per ciascuna stazione di osservazione, è stato possibile predire i valori di temperatura e precipitazione dello scenario considerato attraverso il metodo del *kriging*. Il *kriging* rappresenta un metodo di tipo stocastico (Hutchinson *et al.*, 1994; Laslett, 1994) per la stima degli andamenti delle temperature e delle precipitazioni particolarmente adatto in climatologia (Attorre *et al.*, 2007).

### 2.2 La concezione della plausibilità secondo la teoria dell'evidenza di Dempster-Shafer

La "*plausibilità*" è un concetto che ricorre in molte situazioni, dal mondo scientifico alla vita quotidiana; risponde all'esigenza di gestire e limitare l'incertezza. La plausibilità può esplicitare e formalizzare precisi modelli di comportamento e ragionamento razionale attraverso l'aiuto di altri modelli concettuali come ad esempio la teoria dell'evidenza di Dempster Shafer (DS). Poiché la trattazione dell'incertezza è il principale obiettivo della plausibilità, la teoria DS ha come obiettivo esplicito il superamento dei limiti della concezione Bayesiana: infatti, credere alla localizzazione *h*, non implica necessariamente credere alla sua negazione *s* nella misura della credenza rimanente. La teoria DS ammette dunque la possibilità teorica di fare ricorso a due distinti valori contrapposti per esprimere sia la credenza *h* sia la credenza *s*. Quindi tenendo conto del concetto di plausibilità secondo DS, possiamo dire che, mentre la *Bel (h)* rappresenta il grado di prove concrete a sostegno di un'ipotesi *h*, la plausibilità indica il grado in cui le condizioni sembrano essere giuste per questa ipotesi, anche se manca o è di difficile

attribuzione, una linea di evidenza a sostegno della stessa. Per ogni ipotesi, quindi, la *Bel(h)* rappresenta il limite inferiore del nostro impegno e la plausibilità *PLS(h)* rappresenta il limite superiore. L'intervallo tra i due rappresenta il grado di incertezza, per stabilire la presenza o l'assenza di tale ipotesi. La valutazione delle ipotesi si basa su tre concetti chiave: assegnazione di probabilità di base (*Basic Probability Assignment*, BPA), funzione di credenza (*Belief*) e plausibilità (*Plausibility*). Mediante l'assegnazione di BPA, la teoria DS non solo permette di distinguere chiaramente tra la nozione di credenza e la nozione di plausibilità, ma ne offre una rappresentazione esplicita in termini di funzioni probabilistiche. Il BPA rappresenta il contributo di un fattore ( $a_i$ ) a supportare un'ipotesi specifica (ad esempio la resilienza). In questo caso, la valutazione del BPA è basata sulla combinazione di funzioni sfocate delle variabili ambientali e socio-economiche, ponderate con la tecnica dell'*Analytical Hierarchy Analysis* (Saaty, 1977, 1980; Malczewski, 2004):

$$BPA(a_i, x) = \mu_{AHP}(a_i) * \mu_{ai}(x_{ai})$$

dove  $\mu_{AHP}(a_i)$  è la valutazione tramite AHP della credenza dell'effetto riguardante i danni ai soprassuoli forestali nell'ipotetico scenario di cambiamento climatico con variabile ( $a_i$ ), e  $\mu_{ai}(x_{ai})$  è la valutazione attraverso una funzione di appartenenza degli ipotetici effetti ambientali della variabile  $a_i$  nello spazio  $x$ . L'aggregazione per l'ipotesi di vulnerabilità e resilienza ai cambiamenti climatici, può essere fatta per coppie di prove, sulla base delle loro probabilità congiunte (Shafer, 1976). Tutti i fattori sono progressivamente aggregati a coppie per calcolare la quantità di massa probabile  $m(h)$  vulnerabile e la quantità di massa  $m(s)$  resiliente. Una volta che le singole BPA sono state quantificate, la tecnica DS sancisce la modalità di combinazione dell'evidenza (Shafer, 1976), aggiornando la credenza alla luce della nuova evidenza grazie alla regola della "somma ortogonale":

$$Bel(h) = \frac{m(h) * (1 - m(s))}{1 - m(h) * m(s)} \otimes Bel(s) = \frac{m(s) * (1 - m(h))}{1 - m(h) * m(s)}$$

La fusione delle fonti, produce una previsione che rinforza la convinzione (Shafer, 1976) di *Bel(h)* e *Bel(s)*, già espressa da  $m(h)$  e  $m(s)$  con il presupposto che entrambe le fonti siano ugualmente attendibili.

Il modello permette l'aggregazione delle due evidenze *Bel(h)* e *Bel(s)*, conflittuali tra loro, normalizzando le rispettive probabilità congiunte non in conflitto, determinando l'incertezza  $U$  intrinseca alla valutazione.  $U(h, s)$  mostra la localizzazione in cui bisogna approfondire ulteriori ricerche per chiarire l'incertezza.

$$U(h, s) = Bel(s) - (1 - Bel(h)) = \frac{(1 - m(h)) * (1 - m(s))}{1 - m(h) * m(s)}$$

### 2.3 Stima dello stock di carbonio e valutazione economica della CO<sub>2</sub>

La stima del carbonio presente nei diversi comparti forestali, è stata effettuata attraverso il modello Forest (Federici *et al.*, 2007); questa si basa sulla metodologia IPCC (IPCC, 2003). Il modello permette di quantificare la crescita dello *stock* di carbonio accumulato nelle foreste. La quantificazione della massa legnosa è stata effettuata tramite le tavole di cubatura valide per il territorio lucano. A queste sono stati aggiunti gli incrementi medi annui ottenuti sia da dati bibliografici riscontrati per contesti simili a quello regionale che da osservazioni in campo (Tab. 1). Allo scopo di dare una valutazione economica della CO<sub>2</sub> stoccata dalle formazioni forestali analizzate si è resa necessaria l'analisi dei mercati finanziari inerenti la compravendita dei crediti di carbonio. La diversità dei progetti, la dimensione e localizzazione geografica nonché il mercato di contrattazione si traducono in una notevole variabilità dei prezzi che hanno mostrato un andamento abbastanza stabile e/o crescente fino al 2011 per poi decrescere notevolmente (SendeCO<sub>2</sub>; Point Carbon; INEA, 2012).

I *Certified Emission Reductions* (CER) per gli scenari futuri sono stati calcolati in funzione dei CER riferiti all'anno di base (CER<sub>2012</sub>), opportunamente pesati in base al grado di vulnerabilità.

$$Damage_{2050} = CER_{2012} \cdot [1 - Belief(h)_{2050}]$$

$$Damage_{2100} = CER_{2012} \cdot [1 - Belief(h)_{2100}]$$

Nello specifico, una volta applicata la metodologia DS per determinare i livelli di vulnerabilità e resilienza dei soprassuoli forestali regionali, si è proceduto alla quantificazione della variazione dei CER al 2050 e al 2100 indotti dal cambiamento climatico.

### 3. Risultati

Le mappe di vulnerabilità (*Belief(h)*, Fig. 2), mostrano le proiezioni ottenute per l'intero territorio forestale regionale.

L'analisi statistica ha messo in evidenza una probabilità di rischio legata al cambiamento climatico piuttosto bassa, di 0,09 al 2050 a fronte dello 0,10 del 2100, con un intervallo tra il primo e terzo quartile di 0,10 per il 2050 e 0,11 per il 2100. Nonostante la bassa probabilità di rischio, alcune aree regionali mostrano valori di vulnerabilità superiori allo 0,5. Nello specifico, le aree forestali più suscettibili alla variazione dello stato medio del clima sono localizzate nella provincia di Matera, area in cui i livelli crescenti di aridità stimata al 2050 ed al 2100 rappresentano i fattori limitanti l'accrescimento della vegetazione forestale. Altre aree suscettibili si evidenziano nella porzione nord-ovest nord-est e sud-ovest del territorio regionale. Per queste ultime le problematiche riscontrate sono essenzialmente riconducibili alla carenza di gestione del patrimonio forestale. In riferimento alle specie, maggiori probabilità di rischio si avranno nelle pinete mediterranee con valori medi di 0,20 e 0,22 rispettivamente al 2050 e 2100 seguite dalle abetine

con una probabilità media di 0,12 al 2050 e 0,18 al 2100 e dai castagneti con valori compresi tra i 0,15 del 2050 e i 0,16 del 2100. Per tutte le altre tipologie forestali si registrano valori medi al disotto dei 0,14 punti per entrambi gli anni di riferimento. Per quanto riguarda forma la forma di governo, i valori di probabilità oscillano tra un valore minimo di 0,12 al 2050 per i cedui delle latifoglie mesofile-termofile ad un massimo di 0,22 per i cedui di castagno al 2100. Per le fustaie invece, i valori oscillano tra un valore minimo al 2050 di 0,08 per le fustaie di faggio e al 2100 di 0,23 per le fustaie di leccio. Considerando i risultati di vulnerabilità per ciascuna tipologia forestale provenienti dal modello e stimati i quantitativi di CO<sub>2</sub> stoccati al 2012 dalle foreste è stata proiettata la funzione di *sink* delle foreste regionali al 2050 e 2100 (Tab. 2). La valutazione economica del danno ha tenuto conto dell'estrema volatilità dei prezzi dei CER; allo scopo è stata considerata una forbice compresa tra 7,16 €/tCO<sub>2</sub> e 2,9 €/tCO<sub>2</sub> (borsa elettronica SendeCO<sub>2</sub>. 2011; INEA, 2012) (Fig. 3). L'analisi condotta evidenzia che le perdite maggiori di capacità di assorbimento avverranno a scapito delle latifoglie e, nello specifico, dei castagneti, dei querceti mesofili e meso-termofili. Perdite consistenti avverranno inoltre nelle aree in cui mancano reali interventi di gestione forestale (Seidl *et al.*, 2014). Nei rimboschimenti di conifere e per le formazioni forestali ricadenti all'interno di aree protette, la perdita di assorbimento di CO<sub>2</sub> e, di conseguenza, la perdita economica sarà maggiormente contenuta.

#### 4. Conclusioni

L'elevato grado di variabilità e di incertezza dei cambiamenti climatici ha indotto l'Unione Europea, attraverso il Libro bianco del 2009 (Commissione Europea, 2009) a chiedere agli stati membri di mettere a punto delle strategie di mitigazione e adattamento con particolare riguardo al settore forestale e agricolo. Nello specifico per il settore forestale risulta necessario che le strategie di mitigazione tengano conto di adeguate misure di adattamento per ridurre la vulnerabilità degli ecosistemi forestali, gli impatti del

cambiamento climatico e per valorizzare il ruolo che le foreste hanno per le economie locali. La metodologia utilizzata nel presente lavoro ha dimostrato come un elevato grado di dettaglio spaziale e informativo possa rappresentare una buona base di partenza per le future politiche ambientali sul monitoraggio e la mitigazione dei danni da cambiamento climatico. Infatti, l'impiego di metodologie legate all'uso della logica *fuzzy* e della teoria dell'evidenza di DS rappresentano degli strumenti efficaci per l'integrazione di dati, la previsione di fenomeni e la valutazione degli impatti derivanti dal cambiamento climatico. L'approccio utilizzato fornisce una previsione della vulnerabilità dei boschi, nonché la quantificazione economica degli impatti derivanti da una diminuzione della produttività, e di conseguenza della funzione *sink* delle cenosi forestali.

I risultati hanno evidenziato come le aree montane e sub-montane della regione presentano i maggiori valori di vulnerabilità in particolare per le specie con spiccate caratteristiche di mesofilia (progetto BioRefugia del Corpo Forestale dello Stato e dell'Università la Sapienza di Roma), soprattutto quelle governate a ceduo come i castagneti, i querceti meso-termofili e le cerrete. Maggiore vulnerabilità è stata riscontrata anche nei boschi monospecifici di conifere mediterranee lungo i litorali ioni mentre valori incoraggianti si riscontrano per le formazioni ricadenti nelle aree protette e i rimboschimenti di conifere. Per prevenire, ridurre o almeno contrastare parzialmente le problematiche che vive e a cui va incontro il patrimonio forestale, è auspicabile un approccio preventivo che coinvolge un'azione attiva dell'uomo, volto a valorizzare e potenziare le capacità di adattamento dei sistemi ambientali minimizzando gli impatti negativi. Sui popolamenti a bassa resilienza è possibile individuare interventi selvicolturali specifici che possono contribuire al miglioramento dei livelli ecologico-funzionali delle foreste. A tal proposito è consigliabile l'adozione di forme di trattamento che aumentino la diversificazione interspecifica, un calibrato aumento delle provvigioni, da ottenersi anche con l'allungamento del turno, favorendo la conversione di impianti monospecifici alloctoni con specie autoctone in sistemi tipici delle forme di vegetazione locale.

Tabella 1. Linee di evidenza della vulnerabilità e resilienza legate al settore forestale.

Table 1. Lines of evidence of the vulnerability and resilience related to the forestry sector (Fonte: elaborazione propria).

<i>Linee di evidenza</i>			
<i>Vulnerabilità</i>		<i>Resilienza</i>	
<i>Evidenze</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Evidenze</i>	<i>Descrizione</i>
<i>Aridità</i>	(De Martonne E., 1926); un incremento della siccità aumenta il rischio di danni per alcune tipologie boscate.	<i>Boschi gestiti</i>	Permette di garantire la salvaguardia delle diverse funzioni, in modo integrato e bilanciato per i vari aspetti socio-economici e ambientali.
<i>Cambiamento di fascia fitoclimatica</i>	(Pavari A., 1959); maggiori rischi nelle zone di transizione.	<i>Accessibilità ai boschi</i>	La densità stradale migliora notevolmente le operazioni di gestione e sorveglianza.

(Segue tabella 1)

<i>Vigore dei boschi</i>	Indicatore che esprime la capacità a resistere ad una variazione dello stato medio del clima.	<i>Boschi in aree protette</i>	Migliore conservazione, gestione, sorveglianza e tutela dei processi ecosistemici.
<i>Pendenza</i>	La stabilità del soprassuolo è connessa alla pendenza su cui esso staziona.	<i>Forma di governo</i>	Indica il grado evolutivo delle specie, sia singole che consociate.
<i>Esposizione</i>	Influenza le diverse condizioni microclimatiche.	<i>Indice di varietà</i>	Esprime il grado di complessità territoriale determinato essenzialmente dalla numerosità interspecifica.

Tabella 2. Incremento medio per tipologia forestale.

Table 2. Average increase for forest type - Augmentation moyenne pour le type de forêt (Fonte: vari autori).

<i>Tipologie forestali</i>	<i>Incremento medio (m<sup>3</sup>/anno)</i>						<i>Reference source</i>
	<i>Fustaie</i>			<i>Cedui</i>			
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	
<i>Boschi di faggio</i>			3,4			3,5	De Philippis e Bernetti (1990); Ciancio (1990)
<i>Boschi di castagno</i>	3	4	3,5	9	20	14,5	De Philippis e Bernetti (1990); La Marca, (1981)
<i>Querceti mesofili</i>			2,53	2-4	7-10	6	Castellani (1966); Antoniotti (1950); Pierangeli e Famiglietti <i>et al.</i> (1998)
<i>Altri boschi di latifoglie mesofile</i>			4,44			4,2	Castellani (1966); Leccese (2000)
<i>Boschi di leccio</i>	2	3	2,5			2,2	De Philippis e Bernetti (1990); SAF (1985)
<i>Pinete montane</i>			5,54				Castellani (1966); Castellani (1970)
<i>Pinete mediterranee</i>			6,5				Castellani <i>et al.</i> (1980)
<i>Formazioni igrofile</i>			5			3,6	
<i>Piantagioni da legno e rimboschimenti</i>			2				

Tabella 3. Quantitativi di CO<sub>2</sub> (t) distinti per tipologia forestale.

Table 3. Quantities of CO<sub>2</sub> for different forest types (Fonte: elaborazione propria).

<i>Forest model (Basilicata)</i>		<i>DS Theory</i>		
		<i>2012</i>	<i>2050</i>	<i>2100</i>
<i>Tipologie forestali</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Sink [t CO<sub>2</sub>y<sup>-1</sup>]/ha</i>	<i>Damage [t CO<sub>2</sub>y<sup>-1</sup>]/ha</i>	<i>Damage [t CO<sub>2</sub>y<sup>-1</sup>]/ha</i>
<i>(A) Faggete</i>	29463,64	13,24	2,91	3,71
<i>(B) Cerrete</i>	99866,64	19,28	4,04	4,65
<i>(C) Querceti meso-termofili</i>	80774,72	22,63	4,66	5,30
<i>(D) Castagneti</i>	8530,80	45,52	10,53	11,38
<i>(E) Leccete</i>	12406,92	14,68	3,30	3,59
<i>(F) Latifoglie mesofile e meso-termofile</i>	19342,12	15,87	3,13	3,42
<i>(G) Pinete oro-mediterranee e sub-montane</i>	5444,64	13,54	1,26	1,71
<i>(H) Pinete mediterranee</i>	18932,48	26,21	5,41	6,00
<i>(I) Formazioni igrofile</i>	12653,52	15,62	2,08	2,33
<i>(L) Piantagioni da legno</i>	2114,24	7,34	1,12	1,27
<i>(M) Abetine</i>	182,20	13,95	1,72	2,53

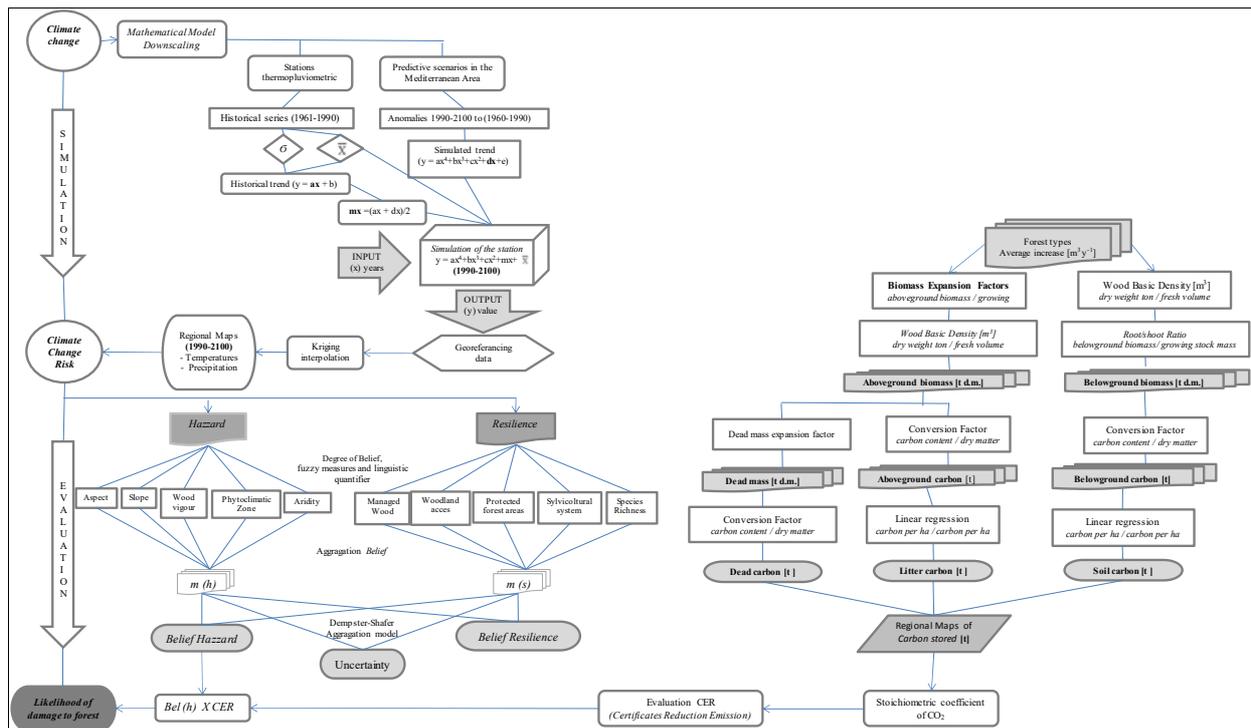


Figura 1. Modello di valutazione economica del danno al settore forestale derivato dal cambiamento climatico.

Figure 1. Model of economic assessment of the damage to the forestry sector derived from climate change (Fonte: elaborazione propria).

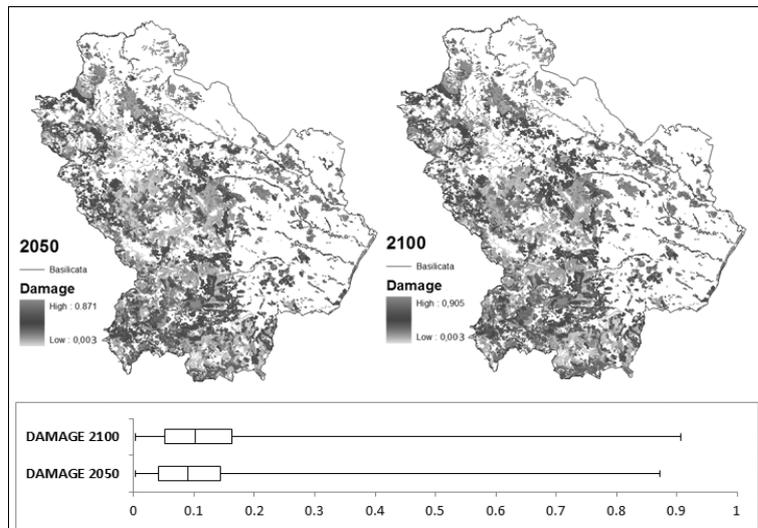
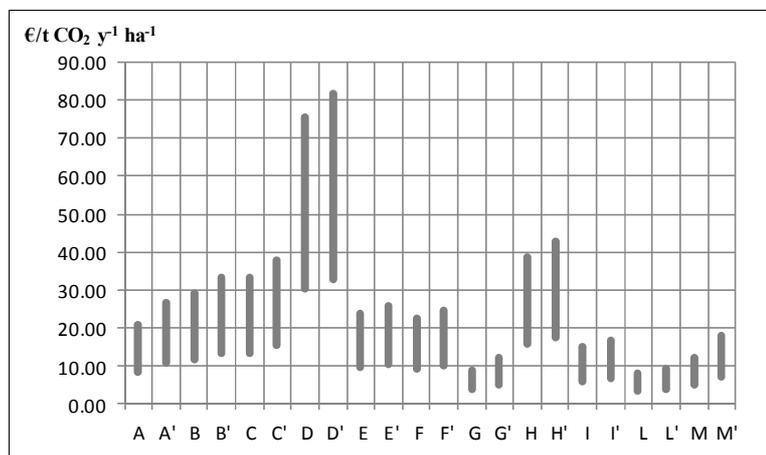


Figura 2. Mappe regionali e Box-Plot della credenza sulla vulnerabilità dei soprassuoli forestali al 2050 e 2100 secondo la teoria DS.

Figure 2. Regional maps and Box-Plot of the belief about the vulnerability of forest stands in 2050 to 2100 in accordance with the DS theory. Des cartes régionales et Box (Fonte: elaborazione propria).

Figura 3. Valutazione del danno in CER alle tipologie forestali al 2050 e 2100.

Figure 3. Assessment of damage in the CER forest types in 2050 and 2100 (Fonte: elaborazione propria).



## SUMMARY

### Climate change and the sink function of forest

The research on the probable impact of climate change on forests in Europe and the development of strategies for forest adaptation and damage mitigation are started since the 90s, with the identification of risk assessment models and, consequently, management tools of forestry land. The prediction of climate change effects on forests was carried out using the evidence theory of Dempster-Shafer (DS) properly spatialized. The lines of evidence implemented refer to the concept of vulnerability and resilience. The results of the DS model, applied to the Basilicata region, were used to assess the loss of capacity for CO<sub>2</sub> assimilation by the various forest types on the basis of vulnerability levels achieved in 2050 and 2100. The loss of CO<sub>2</sub> assimilation estimated, showing a reduction of the sink function over time, tend to be greater in 2050 than in 2100. The methodological approach showed that the high degree of spatial detail and information obtained can be a good starting point for environmental policy on monitoring and mitigation of climate change damages, in order to ensure the ability of ecosystems to produce positive externalities, including the ability to sequestration of atmospheric carbon.

## BIBLIOGRAFIA

- Antoniotti G.B., 1950 – *Tavola auxometrica del cerro del Molise*. Ricerche sperimentali di dendrometria e auxometria, Firenze, Italy; 1: 44.
- Attore F, Alfò M., De Sactis M., Francesconi F., Bruno F., 2007 – *Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale*. Int. J. Climatol. 27: 1825-1843.  
<http://dx.doi.org/10.1002/joc.1495>
- Bernetti I., Ciampi C., Fagarazzi C., Sacchelli S., 2011 – *The evaluation of forest crop damages due to climate change. An application of Dempster-Shafer method*. Journal of Forest Economics.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2011.04.005>
- Casaioli M., Sciortino M., 1997 – *Scenari di cambiamento climatico sul bacino del Mediterraneo*. Rapporto Enea, RT/AMB/98/28.
- Castellani C., 1966 – *Il saggio di accrescimento e di utilizzazione delle fustaie sottoposte ad assestamento*. Ital. For. e Mont, (5): 197-205.
- Castellani C., 1970 – *Tavole stereometriche e alsometriche costruite per i boschi Italiani; Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e l'Alpicoltura*: Trento, Italy; 1: 1-431.
- Castellani C., Ghidini G., Tosi V., 1980 – *Tavole dendrometriche e alsometriche per il pino d'Aleppo*. Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e l'Alpicoltura: Trento, Italy, 1980-1982, 8: 3-44.
- Ciancio O., Maetzke F., Portoghesi L., 1990 – *I cedui di faggio e misti del comune di Borgo Velino*. In: Valorizzazione energetica di materiali legnosi nel Lazio, ENEA, Università della Tuscia, Viterbo, Italy, pp. 201-220.
- Commissione europea, Libro bianco 2009 – *L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo* COM, p. 147.
- De Martonne E., 1926 – *Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité*. La Météorologie, n.s. 19.
- De Philippis A., Bernetti G., 1990 – *Lezioni di selvicoltura speciale*. CUSL: Firenze, Italy.
- Famiglietti A., Fusco G., Pierangeli D., 1998 – *I quereti in Basilicata: Aspetti selvicolturali ed economici*. Reg. Basil. Not., 3: 51-58.
- Deng Y., Sadiq R., Jiang W., Tesfamariam S., 2011 – *Risk analysis in a linguistic environment: A fuzzy evidential reasoning-based approach*. Expert Systems with Applications.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.06.018>
- Ducey M.J., 2001 – *Representing uncertainty in silvicultural decisions: An application of the Dempster-Shafer theory of evidence*. Forest Ecology and Management.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00565-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00565-X)
- Giorgi F., Lionello P., 2008 – *Estimated from high resolution simulations with a regional climate model*. Global and Planetary Change, 62: 195-209.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.02.002>
- Federici S., Vitullo M., Tulipano S., DeLaurentis R., Seufert G., 2007 – *A tool for estimate of forest carbon stocks under UNFCCC: the Italian case*, submitted.
- Hutchinson M.F., Gessler P.E., 1994 – *Splines-more than just a smooth interpolator*. Geoderma, 62: 45-67. doi: 10.1111/1467-9671.0101.
- INEA, 2012 – *Stato del mercato forestale del carbonio in Italia 2012*.
- IPCC, 1997 – *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, New York.
- IPCC, 2003 – *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Ed. Penman.
- IPCC, 2006 – *Agriculture, Forestry and Other Land Use Volume 4*. Paustian K., Ravindranath N.H. e van Amstel A. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Preparato dal National Greenhouse Gas Inventories Programme (H.S. Eggleston *et al.*, editori). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.
- IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit, Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-032-4.
- IPCC, 2007 – *Climate Change 2007*. The AR4 Synthesis report.
- Ippoliti E., 2008 – *Inferenze ampliative. Visualizzazione, analogia e rappresentazioni multiple*. Lulu Press, North Carolina.
- La Marca O., 1981 – *Ricerche dendrometriche ed auxometriche sui cedui di Castagno (Castanea sativa Mill.) della Valle dell'Irno (AV e SA)*. Accad. Ital. Sci. For., 30: 3-44.
- Laslett G.M., 1994 – *Kriging and splines: an empirical comparison of their predictive performance in some applications*. Journal of the American Statistical associa-

- tion, 89: 391-400.  
<http://dx.doi.org/10.2307/2290837>
- Leccese A., 2000 – *Prodromi di tipologia forestale per le fasce montana e submontana del Lazio*. Ph.D. Thesis, Università degli Studi della Tuscia.
- Malczewski J., 2004 – *GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview*. *Progr. Plann.*, 62 (1): 3-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- Pavari A., 1959 – *Scritti di ecologia, selvicoltura e botanica forestale*. Pubblicazioni dell'Acc. It. Sc. For. Tip. B, Coppini e C., Firenze.
- Pederson N., Cook E., Jacoby G., Hopton M., 2011 – *The influence of Age and Geography on the Climatic Sensitivity and Growth rates of Southern Temperate Tree Species*. EGU General Assembly 2011, Geophysical Reserch, Vol. 13, EGU2011 - 218.
- Plummer N., Allsopp T., Lopez J.A., 2003 – *Guidelines on Climate Observation Networks and Systems*. WMO/TD N.1185.
- Point Carbon, 2012 – *Carry - over of aaus from cp1 to cp2 – future implications for the climate regime*. A briefing by point carbon, September 2012.
- Rajas M., Li L.Z., Kanakidou M., Hatzianastassiou N., Seze G., Le Treut H., 2013 – *Winter weather regimes over the Mediterranean region: Their role for the regional climate and projected changes in the twenty-first century*. *Climate Dynamics*, Volume 41: 551-571. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1823-8>
- Saaty T.L., 1988 – *Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process*. Planning, priority setting, resource allocation , RWS Publishing, Pittsburgh.
- Seidl R., Schelhaas M.J., Rammer W., Verkerk P.J., 2014 – *Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage*. *Nature Climate Change*, 4: 806-810. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2318>  
<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2393>
- Shafer G., 1976 – *A mathematical theory of evidence*. Princeton University, Princeton.
- Vettrano A.M., Morel O., Perlerou C., Robin C., Diamandis S, Vannini A., 2005 – *Occurrence and distribution of Phytophthora species in European chestnut stands and their association with Ink Disease and crow decline*. *European Journal of Plant Pathology*, 111: 169 - 180.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10658-004-1882-0>
- Vicente-Serrano S.M., Zouber A., Lasanta T., Pueyo Y., 2012 – *Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid mediterranean environments*. *Ecological Monographs*.  
<http://dx.doi.org/10.1890/11-2164.1>
- Yousefpour R., Temperli C., Bugmann H., Elkin C., Hanewinkel M., Meilby H., Jacobsen J.B., Thorsen B.J., 2013 – *Updating beliefs and combining evidence in adaptive forest management under climate change: A case study of Norway spruce (Picea abies L. Karst) in the Black Forest, Germany*. *Journal of Environmental Management*.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.004>
- Zadeh L.A., 1965 – *Fuzzy sets*. *Information and Control*, 8 (3), 338-353.