

IACOPO BERNETTI (\*) - CHRISTIAN CIAMPI (\*) - CLAUDIO FAGARAZZI (\*)  
SANDRO SACCHELLI (\*)

## L'IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL SETTORE PRODUTTIVO FORESTALE TOSCANO: STIMA DEI DANNI ECONOMICI NEL PERIODO 2007-2099

*Il cambiamento climatico evidenziatosi negli ultimi decenni ed in particolare negli ultimi anni, comporta numerosi impatti dal punto di vista ambientale e socio-economico, sia a scala globale che locale. In quest'ottica la definizione di tecniche che permettano una quantificazione economica dei danni da cambiamento climatico diviene fondamentale per l'applicazione di adeguate forme di gestione dei sistemi a rischio.*

*In base alla definizione di vulnerabilità e resilienza fornita dall'Intergovernmental Panel on Climate Change, è stata definita una serie di indicatori utili per la valutazione delle due precedenti caratteristiche per l'ambito forestale.*

*La quantificazione del danno economico sul settore forestale potenzialmente derivante dal cambiamento climatico, è stata implementata attraverso l'utilizzo della teoria dell'evidenza di Dempster-Shafer e della tecnica della logica sfocata.*

*Il risultato derivante dalla quantificazione di rischio e resilienza, è stato utilizzato per la stima dei danni economici grazie ad una procedura di analisi spaziale su mappe raster. Infine, il modello di calcolo elaborato, è stato testato sul territorio della regione Toscana.*

*Parole chiave:* cambiamento climatico; teoria dell'evidenza Dempster-Shafer; logica sfocata; danno economico forestale; incertezza.

*Key words:* climate change; Dempster-Shafer theory of evidence; fuzzy sets; forest economic damage; uncertainty.

### 1. INTRODUZIONE

Le capacità di adattamento delle foreste ai cambiamenti climatici ed i possibili danni che questi ultimi possono portare ai soprassuoli boscati sono argomenti ampiamente dibattuti negli ultimi decenni (vedi p.e. SEPPÄLÄ *et al.*, 2009).

---

(\*) Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali (DEISTAF), Sezione Economia Agraria e Forestale ed Estimo, Università degli Studi di Firenze. P.le delle Casci-  
ne 18 - 50144 Firenze.

In letteratura sono stati proposti molti approcci metodologici per l'identificazione e la valutazione dei danni economici derivanti dal cambiamento climatico (p.e. FORD e SMIT, 2004; ACKERMAN e STANTON, 2004), allo scopo di proporre e sviluppare strategie e politiche di adattamento e mitigazione. È possibile pertanto individuare una serie di possibili impatti sul sistema economico, strettamente connessi alla scala di analisi territoriale (dal livello locale a quello internazionale), all'arco temporale considerato (danni a breve, medio o lungo termine) ed al settore considerato (agricoltura, selvicoltura, turismo ecc.). In particolare, nel caso di analisi sul settore forestale, dobbiamo inevitabilmente tenere in considerazione due aspetti: da un lato il carattere di multifunzionalità dei soprassuoli e quindi la necessità di definire a priori l'ambito funzionale da studiare e dall'altro la tipologia di danno economico da valutare, quantificabile ad esempio come perdite monetarie da alterazioni climatiche ed eventi estremi o derivanti da spese di mitigazione del rischio.

In questo caso, seguendo l'impostazione proposta dal libro bianco della Commissione Europea *L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo* (COMMISSIONE EUROPEA, 2009), il rischio di danni da cambiamenti climatici è stato considerato come conseguenza dell'azione di due fattori: la vulnerabilità del sistema in esame e la sua resilienza. Per vulnerabilità (IPCC, 1997) s'intende 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. La vulnerabilità dipende dalla natura, dall'entità e dalla velocità dei cambiamenti climatici e delle variazioni cui è esposto un determinato sistema, dalla sua sensibilità e dalla sua capacità di adattamento. Al contrario, per resilienza (IPCC, 1997) s'intende la capacità dello stesso sistema di assorbire le perturbazioni mantenendo la stessa struttura e le stesse modalità di funzionamento di base.

Vulnerabilità e resilienza dei sistemi agroforestali antropizzati dipendono, in sintesi, da due ordini di fattori: le caratteristiche ambientali, definite da variabili ecologiche, morfologiche e geologiche e la possibilità del sistema socio-economico locale di intervenire attivamente e autonomamente per mitigare il danno. Entrambe le categorie di variabili agiscono a livello strettamente locale e debbono quindi essere stimate e georeferenziate per poter definire politiche di intervento efficaci. Nel presente lavoro è stato quindi adottato un approccio geografico basato su un sistema informativo ambientale e socio-economico per i settori della selvicoltura e delle utilizzazioni forestali.

## 2. METODOLOGIA IMPIEGATA

La valutazione dei danni da cambiamento climatico è evidentemente caratterizzata da una forte incertezza per *a*) la definizione degli effetti futuri sia in termini quantitativi sia nella loro distribuzione spaziale, *b*) la significatività dell'influenza dei diversi fattori ambientali e socio-economici che concorrono a definire i fenomeni di vulnerabilità e di resilienza e *c*) le sinergie esistenti fra le due dimensioni di vulnerabilità e resilienza adottate.

Nell'ultimo trentennio sono state sviluppate numerose metodologie per la trattazione di dati intrinsecamente caratterizzati da imprecisione ed incertezza, metodi che sono stati validamente applicati anche alla valutazione degli effetti e degli impatti dei cambiamenti climatici. Seguendo la letteratura esistente, la definizione degli effetti quantitativi dei singoli fattori (punto *a*) è stata affrontata con tecniche di logica sfocata, mentre la valutazione dei singoli fattori, delle sinergie fra vulnerabilità e resilienza e della conseguente incertezza legata all'analisi (punti *b* e *c*) è stata valutata tramite la cosiddetta teoria di Dempster-Shafer (SHAFER, 1976). Scopo della valutazione è stato quello di ottenere indici quanto più possibile affidabili ai quali applicare procedimenti di valutazione del danno propri dell'estimo forestale.

### 2.1. Il concetto di danno economico adottato

A livello metodologico le diverse tipologie di danno precedentemente accennate hanno metodi di valutazione che si rifanno ad approcci estimativi molto diversificati (DOWNING e WATKISS, 2003). Nel nostro caso di studio la metodologia di analisi è stata applicata alla stima del danno economico (o meglio finanziario) derivante dalla perdita di produzione di assortimenti forestali tradizionali causata da cambiamenti nella media dei parametri climatici e dalla possibilità di aumento di eventi meteorici estremi.

### 2.2. Le valutazioni sfocate

Le variabili ( $a_i$ ) che concorrono all'identificazione di una determinata ipotesi di valutazione (nel nostro caso la vulnerabilità e la resilienza dei soprassuoli forestali), hanno tra loro caratteristiche diverse, come ad esempio la natura quantitativa o qualitativa. Al fine di poter aggregare e confrontare tali indicatori è necessaria un'iniziale normalizzazione in un *range* compreso tra 0 e 1; questa operazione è stata effettuata con la tecnica della logica sfocata (o *fuzzy logic*). L'identificazione dei parametri che ha portato allo sviluppo della suddetta normalizzazione è derivata da dati bibliografici, da indicazioni fornite dagli operatori del settore produttivo di riferimento e da valutazioni empiriche.

Il contributo totale di tutti gli elementi ( $a_i$ ) a supporto di una determinata ipotesi (linea di evidenza secondo la teoria Dempster-Shafer descritta

di seguito) è dato dal concetto di credenza (*belief*) quantificato tramite operatori linguistici sfocati. Gli operatori linguistici sfocati (CHEN e HWANG, 1992) sono strettamente correlati alle funzioni di logica *fuzzy* e permettono di arrivare ad una quantificazione numerica di giudizi verbali qualitativi (es. alta influenza di una variabile sulla linea di evidenza «vulnerabilità»), mantenendo il grado di incertezza intrinseco alla stima dell'esperto.

### 2.3. La teoria dell'evidenza di Dempster-Shafer

La teoria dell'evidenza di Dempster-Shafer (DS) ha come obiettivo esplicito il superamento dei limiti della concezione probabilistica (bayesiana). Essa vanta un ampio spettro di applicazioni pratiche nei domini più diversi per la trattazione del ragionamento sotto condizioni di incertezza. La concezione bayesiana rappresenta il punto di partenza della trattazione della nozione di plausibilità della teoria DS: con essa condivide infatti l'idea che il ragionamento plausibile sia una forma di ragionamento incerto in quanto condotto a partire da fonti che forniscono informazioni dotate di attendibilità, ma non di certezza. Al contrario delle probabilità bayesiane la teoria DS non richiede un'informazione completa nello spazio degli eventi; essa ammette dunque la possibilità di fare ricorso a due distinti valori per esprimere sia la credenza in una certa proposizione, sia la credenza nella sua negazione, ad esempio: ipotesi  $A_1$  = vulnerabilità della localizzazione geografica e ipotesi  $A_2$  = resilienza della localizzazione. L'ipotesi «non singolare»  $[A_1, A_2]$  rappresenta perciò l'ipotesi di localizzazioni allo stesso tempo vulnerabili e resilienti. La valutazione delle ipotesi si basa su tre concetti chiave: assegnazione di probabilità di base (BPA, *Basic Probability Assignment*), credenza (*Belief*) e plausibilità (*Plausibility*).

L'assegnazione di probabilità di base (BPA) rappresenta il contributo che un certo fattore ( $a_i$ ) dà a supporto di una determinata ipotesi (ad es. vulnerabilità di un soprassuolo). La stima di tale probabilità si è basata sulla combinazione di funzioni sfocate di variabili ambientali e socio-economiche e quantificatori linguistici per poter impiegare nel modello valutazioni (esprese come grado di credenza o *belief*) date da esperti in termini verbali (BENTABET *et al.*, 2000), secondo la seguente formula:

$$m(a_i, x) = \mu_{linguistic}(a_i) \cdot \mu_{a_i}(x_{a_i})$$

con  $\mu_{linguistic}(a_i)$  valutazione tramite quantificatore linguistico sfocato della credenza dell'effetto della variabile  $a_i$  e  $\mu_{a_i}(x_{a_i})$  valutazione tramite funzione di appartenenza dell'effetto della variabile ambientale  $a_i$  sulla localizzazione  $x$ .

Il concetto di probabilità di base differisce dal concetto di probabilità bayesiana in quanto per due ipotesi  $A_1$  e  $A_2$  nella teoria DS

$m(A_1)+m(A_2)+m(A_1,A_2)=1$  e quindi  $m(A_1)+m(A_2)<1$  mentre in Bayes  $m(A_1)+m(A_2)=1$ ; il residuo  $m(A_1,A_2)$  rappresenta il contributo all'incertezza.

Una volta che le singole BPA sono state quantificate, la tecnica DS ci permette, grazie alla regola della somma ortogonale, di calcolare la massa di probabilità totale  $m$  derivante dalle masse di probabilità dei singoli fattori. Infine l'aggregazione delle due evidenze conflittuali tra loro (vulnerabilità e resilienza) avviene normalizzando le rispettive probabilità congiunte non in conflitto; in questo modo è stata determinata anche l'incertezza intrinseca alla valutazione.

#### *2.4. Il modello di valutazione di vulnerabilità e resilienza*

Il modello di valutazione del rischio e della resistenza elaborato per il settore forestale, ha previsto la definizione dei livelli di vulnerabilità, resilienza ed incertezza per il settore esaminato, secondo la metodologia Dempster-Shafer precedentemente descritta.

Dal punto di vista metodologico, le variabili di ingresso al modello sono state aggregate con una procedura di analisi spaziale su SIT raster a livello di singolo pixel con risoluzione 75 m x 75 m.

Gli indicatori considerati maggiormente influenti sul grado di vulnerabilità sono quelli collegati alla possibilità di variazioni climatiche; per questo motivo il calcolo del danno economico è riferito a tre scenari futuri con i valori attuali di velocità del vento, precipitazioni, temperature ecc. (ARSIA, 2006) proiettati agli anni 2036, 2067 e 2099 secondo lo scenario A2 per il modello Hadcm3 (IPCC, 2000).

I dati utilizzati per l'implementazione della valutazione possono essere ricondotti a caratteristiche delle aree forestali regionali riguardanti sia aspetti gestionali influenzati direttamente dall'attività umana, che variabili indipendenti da forme di intervento diretto, come ad esempio le variazioni climatiche e le peculiarità morfologiche.

Il database è stato sviluppato attraverso un'indagine, effettuata con l'ausilio di otto esperti del settore forestale. Si tratta di dirigenti di Comunità Montana, di dirigenti del Corpo Forestale dello Stato e di docenti di discipline forestali a cui sono stati sottoposti dei questionari con i quali è stata definita una serie di variabili che influenzano il grado di vulnerabilità dei soprassuoli forestali regionali e la resilienza degli stessi, in funzione dei cambiamenti climatici in corso.

Applicando il concetto di resilienza ai boschi, possiamo interpretarlo 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 della fase di accrescimento dello stesso.

La gestione di popolamenti forestali permette di garantirne la salvaguardia delle diverse funzioni, in modo integrato e bilanciato per i vari aspetti socio-economici ed ambientali. I boschi di origine artificiale, quelli con problemi fitosanitari e le aree con emergenze di particolare rilievo naturalistico, rappresentano degli esempi in cui adeguati interventi selvicolturali e di utilizzazione, nonché la presenza di strumenti normativi ed economici di protezione e miglioramento, possono permettere l'aumento della resistenza del popolamento. In termini di diversità invece, l'incremento delle variabili ecologiche e strutturali legate ai diversi usi del suolo forestale e la diversificazione delle tessere del mosaico paesaggistico (i cosiddetti *patches*), possono incrementare il numero di situazioni ecotonali e, di conseguenza, la resistenza degli elementi biotici, anche in presenza di alterazioni delle caratteristiche ambientali dell'habitat di riferimento.

La linea di evidenza legata alla vulnerabilità comprende, invece, variabili che possono essere ricondotte sia alla specie forestale prevalente presente su un particolare soprassuolo, sia all'ubicazione dello stesso, considerando dunque da un lato le caratteristiche ecologiche e dall'altro quelle morfologiche dell'area in esame. Questi ultimi fattori possono comportare infatti un aumento dell'instabilità dei soprassuoli boscati, sia in termini di danni a livello meccanico, ad esempio con l'aumento del numero di eventi meteorici estremi (vento, precipitazioni intense ecc.), sia a livello fitosanitario, con, da una parte potenziali stress idrici e dall'altra problemi di ordine patologico. In particolare la stabilità degli alberi può essere connessa alla pendenza della superficie su cui ricade; su pendenze maggiori, ad esempio, si manifestano in modo più frequente situazioni di dissesto idrogeologico, con possibili frane e smottamenti, in particolare nel caso di precipitazioni intense. L'esposizione invece influenza la vulnerabilità delle specie forestali in termini di diverse condizioni microclimatiche che possono ripercuotersi sull'entrata in vegetazione degli alberi (e quindi sul rischio legato a gelate tardive) e sulle condizioni ambientali favorevoli o meno ad insetti fitofagi (è stato riscontrato infatti, dagli esperti del settore, che le esposizioni Sud sono quelle più vulnerabili per quanto riguarda i due aspetti precedenti). Ulteriori parametri di rischio direttamente riconducibili ad un aumento delle temperature medie annue e ad una diminuzione delle precipitazioni sono riconducibili ad un incremento delle condizioni di siccità ed al cambiamento di fascia fitoclimatica in cui possono incorrere alcuni boschi. Questa evenienza è particolarmente pericolosa in considerazione delle scarse capacità di adattamento dei soprassuoli forestali, in particolare se consideriamo archi temporali ristretti (nell'ordine di anni o pochi decenni).

La prima parte del lavoro ha previsto dunque l'identificazione di una serie di indicatori per ciascuna linea di evidenza (Tabella 1), aggregati secondo quanto esemplificato in Figura 1.

Tabella 1 – Evidenze relative al settore forestale.  
– *Evidences of forest sector*

<i>Linea di evidenza</i>	<i>Evidenza</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Fonte dati</i>
Resilienza	Interventi di gestione sui soprassuoli forestali	Percentuale di boschi comunali con interventi di manutenzione e/o ripulitura e/o taglio periodico e/o miglioramento.	– V° Censimento Agricoltura ISTAT (2000)
	Accessibilità delle aree forestali per gli interventi di gestione	Deriva dall'aggregazione della densità di viabilità nel soprassuolo forestale con il dislivello tra questo e la più prossima strada camionabile o pista di esbosco	– Carta della viabilità principale e secondaria regionale – Modello Digitale del Terreno (DTM) – Corine Land Cover IV° livello
	Boschi ricadenti in aree naturali protette	Aree forestali comprese in aree protette: parco o riserva (nazionale, regionale, provinciale), ANPIL, SIC/ZPS.	– Carta del sistema delle aree protette della Toscana – Corine Land Cover IV° livello
	Variabilità forestale interspecifica	Esprime la variazione di uso del suolo forestale.	– Corine Land Cover IV° livello
	Diversità paesaggistica	Definisce la presenza di zone ecotonali e di margine.	– Corine Land Cover II° livello aggregato in 9 classi di uso del suolo
Vulnerabilità	Vento	Numero di eventi estremi annui, cioè con velocità massima del vento maggiore di 22 m/sec (classificati come «burrasca forte» secondo la scala di Beaufort).	– Carta regionale della velocità media annua dei venti al 2036, 2067 e 2099
	Aridità	Indice di aridità (Ia) calcolato secondo la procedura proposta da De Martonne.	– Carta regionale della precipitazione cumulata annua proiettata al 2036, 2067 e 2099 – Carta regionale della temperatura media annua proiettata al 2036, 2067 e 2099
	Cambiamento di fascia fitoclimatica	Variazione di fascia fitoclimatica definita in base alla classificazione di Pavari ( <i>Lauretum, Castanetum, Fagetum, Picetum</i> ).	– Carta regionale della temperatura media annua attuale e proiettata al 2036, 2067 e 2099 – Carta regionale della temperatura media del mese più freddo attuale e proiettata al 2036, 2067 e 2099
	Pendenza	Pendenza media (%).	– Modello Digitale del Terreno (DTM)
	Esposizione	Esposizione.	– Modello Digitale del Terreno (DTM)

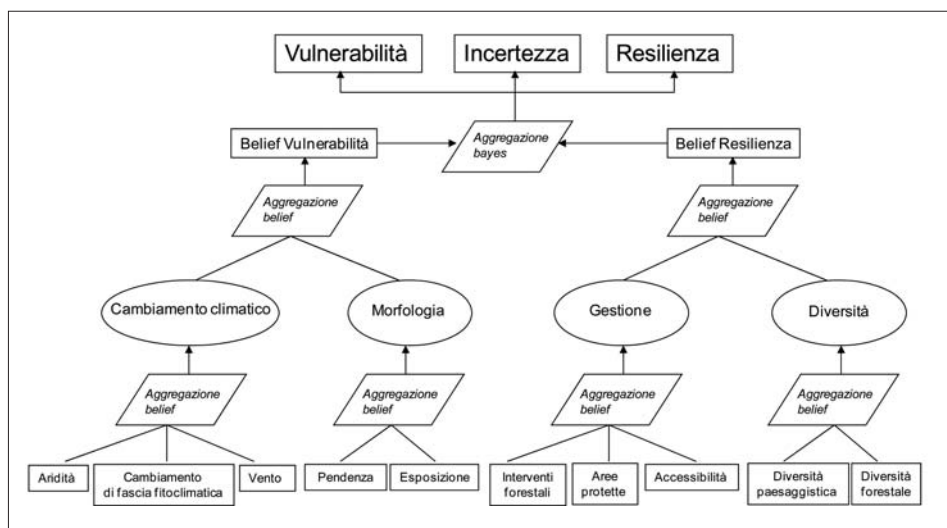


Figura 1 – Schematizzazione relativa alla definizione delle linee di evidenza per il settore forestale.  
– Lines of evidence of forest sector.

Successivamente, in base alle valutazioni fornite dagli esperti del settore forestale ed in funzione delle regole specificate al paragrafo precedente, le suddette variabili sono state normalizzate con la tecnica della *fuzzy logic*. Inoltre, per ogni evidenza, sono stati attribuiti i seguenti gradi di credenza: *i*) interventi di gestione: medio-basso; *ii*) accessibilità: medio; *iii*) aree protette: medio-basso; *iv*) diversità forestale interspecifica: medio; *v*) diversità paesaggistica: medio; *vi*) vento: medio-alto; *vii*) aridità: medio-alto; *viii*) cambiamento di fascia fitoclimatica: alto; *ix*) pendenza: medio; *x*) esposizione: medio-basso. Infine i risultati ottenuti sono stati aggregati con la regola di Dempster-Shafer ottenendo una quantificazione dei livelli di rischio, resilienza ed incertezza per ogni pixel relativo ai soprassuoli forestali toscani.

### 3. STIMA DEL DANNO ECONOMICO

Il danno economico per gli scenari futuri, è stato calcolato in funzione del valore di macchiatico attuale, opportunamente pesato in base al grado di vulnerabilità, e valutato per ciascuna unità territoriale considerata (pixel).

Nello specifico, una volta applicata la metodologia Dempster-Shafer per determinare i livelli di vulnerabilità e resilienza dei soprassuoli forestali regionali, si è proceduto alla quantificazione del danno economico conseguente a variazioni climatiche, rispetto agli anni 2036, 2067 e 2099. In questo caso il danno economico alla componente forestale, è da intendersi

come un mancato reddito conseguente a danni subiti dai soprassuoli; pertanto il dato di partenza necessario per questo tipo di valutazione è rappresentato dal valore di macchiatico ( $Vm$ ).

Il valore di macchiatico è stato definito sulla base degli assortimenti legnosi ritraibili dai boschi dell'area di riferimento, in funzione dei processi produttivi e degli interventi selvicolturali e di utilizzazione consolidati sul territorio, oltre che sulla base dei prezzi di vendita rilevati sul mercato interno. A tal fine sono state considerate non solo le caratteristiche ecologiche (incrementi, tipologia di specie legnosa ecc.), ma anche variabili di ordine tecnico (tipologia di macchinari utilizzati, ecc.), logistico (organizzazione del cantiere produttivo, distanza dai centri di vendita del materiale legnoso, ecc.) ed economico (produttività orarie, costi macchina, ecc.) (AA.VV., 2009).

Il calcolo del valore di macchiatico per gli scenari futuri si basa sulla correlazione di quello attuale con i livelli di vulnerabilità al 2036, 2067 e 2099. In particolare, per ciascuna delle tre proiezioni ipotizzate il valore di macchiatico è stato definito in funzione del complemento della vulnerabilità:

$$\begin{aligned}Vm_{2036} &= Vm_{2007} \cdot (1 - \text{vulnerabilità}_{2036}) \\Vm_{2067} &= Vm_{2007} \cdot (1 - \text{vulnerabilità}_{2067}) \\Vm_{2099} &= Vm_{2007} \cdot (1 - \text{vulnerabilità}_{2099})\end{aligned}$$

Il  $Vm$  deriva da una gestione del bosco nella quale i costi ed i ricavi si verificano con cicli pluriennali di lunghezza pari al turno  $t$ ; per questo motivo il  $Vm$  può essere considerato, dal punto di vista finanziario, come una periodicità posticipata illimitata e pertanto possiamo calcolarne il rispettivo valore attuale ( $VA^*$ ) degli scenari futuri come attualizzazione di cicli infiniti. Dal prodotto tra il Valore Attuale ( $VA^*$ ) dei singoli  $Vm$  al 2036, 2067 e 2099 ed il tasso di interesse ( $r$ ) utilizzato per l'analisi finanziaria (3,5%), deriva l'annualità ( $a^*$ ) relativa ad ogni periodo di riferimento:

$$\begin{aligned}a^*_{2007} &= VA^*_{2007} \cdot r = \frac{Vm_{2007}}{q^t - 1} \cdot r \\a^*_{2036} &= VA^*_{2036} \cdot r = \frac{Vm_{2036}}{q^t - 1} \cdot r \\a^*_{2067} &= VA^*_{2067} \cdot r = \frac{Vm_{2067}}{q^t - 1} \cdot r \\a^*_{2099} &= VA^*_{2099} \cdot r = \frac{Vm_{2099}}{q^t - 1} \cdot r\end{aligned}$$

con  $q = 1+r$ .

È stato poi stimato il Valore Attuale, come accumulazione iniziale delle annualità medie di ogni periodo di riferimento (2007-2036, 2036-2067, 2067-2099). La somma dei Valori Attuali dei tre periodi di riferimento ( $VA_{2007-2099}$ ), rappresenta i ricavi del settore forestale toscano (attualizzato al 2007) al netto delle riduzioni di reddito dovute alle variazioni climatiche:

$$VA_{2007-2099} = \left( \sum_{i=1}^{29} \left( a_{2007} + \left( \frac{a_{2007} - a_{2036}}{29} \right) \cdot i \right) \cdot q^{-i} \right) \cdot q^{-1} +$$

$$\left( \sum_{i=1}^{31} \left( a_{2036} + \left( \frac{a_{2036} - a_{2067}}{31} \right) \cdot i \right) \cdot q^{-i} \right) \cdot q^{-29} +$$

$$\left( \sum_{i=1}^{32} \left( a_{2067} + \left( \frac{a_{2067} - a_{2099}}{32} \right) \cdot i \right) \cdot q^{-i} \right) \cdot q^{-60}$$

Il danno economico forestale totale (o danno patrimoniale – DP) deriverà, in definitiva, dalla differenza tra il Valore Attuale ( $VA_{2007-2099}^*$ ) della serie di annualità che si verificherebbero nel periodo 2007-2099 senza alterazione della produzione ( $a_{2007}^*$ ), ed il Valore Attuale delle annualità stimate per il periodo 2007-2099 con le alterazioni della produzione ( $VA_{2007-2099}$ ).

$$DP = VA_{2007-2099}^* - VA_{2007-2099} = a_{2007}^* \cdot \frac{q^{2099-2007} - 1}{r \cdot q^{2099-2007}} - VA_{2007-2099}$$

#### 4. RISULTATI

I livelli di vulnerabilità, resilienza ed incertezza sono stati calcolati per l'intero settore forestale toscano e per i tre scenari futuri; un esempio dei risultati ottenuti relativi allo scenario intermedio (2067) è evidenziato in Figura 2.

Dall'analisi delle mappe elaborate emerge che le aree forestali potenzialmente soggette a danni di tipo economico, sono diffuse sull'intero territorio regionale. Andando ad effettuare una valutazione di maggior dettaglio possiamo considerare anche il grado di influenza delle situazioni di rischio e resistenza su questo parametro. In generale, infatti, i soprassuoli che rientrano in aree naturali protette o che sono sottoposti ad una forma di gestione da parte di privati, presentano una quantificazione del danno monetario decisamente più bassa rispetto a quelli in cui non vengono praticate forme di mitigazione della vulnerabilità. Il rischio di perdita di assortimenti legnosi legato

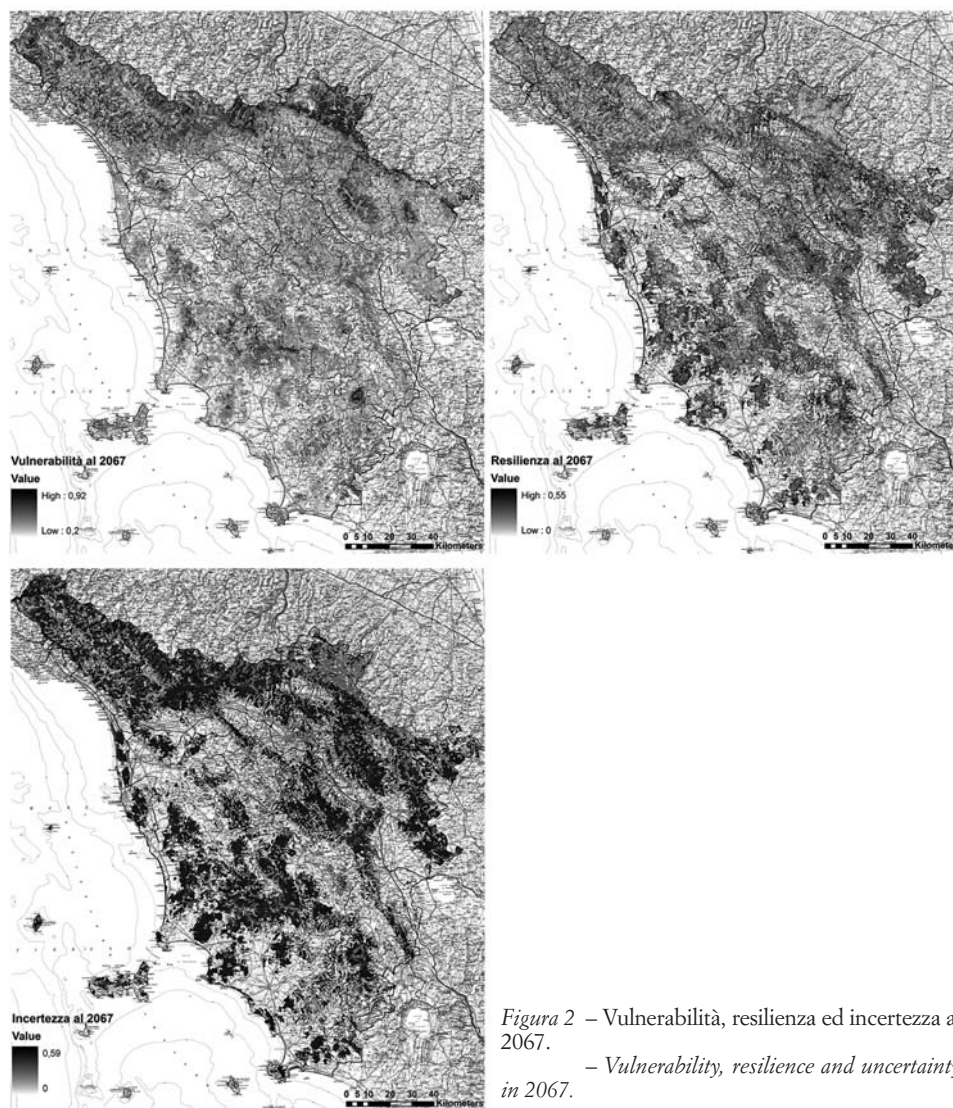


Figura 2 – Vulnerabilità, resilienza ed incertezza al 2067.  
– Vulnerability, resilience and uncertainty in 2067.

al cambiamento climatico, denota come le specie più esposte a danni siano quelle con spiccati caratteri di mesofilia ed igrofilia o comunque quelle collocate in ambiente montano; queste, sono spesso situate in zone con peculiarità morfologiche ed infrastrutturali che non ne permettono un'adeguata accessibilità e, di conseguenza, delle idonee forme di gestione.

In questo caso, non è stato considerato il possibile aumento del rischio di incendio, poiché a livello regionale è prevalentemente riconduc-

bile a fattori di origine antropica, mentre, nel modello, il potenziale cambiamento di fascia fitoclimatica va ad influire in maniera meno evidente sulle specie più adattate ad ambienti caldi, come ad esempio la macchia mediterranea e le formazioni di sclerofille a prevalenza di leccio e sughera. Altre formazioni forestali costiere, in particolare le pinete di pini mediterranei, possono risultare maggiormente soggette ad alterazioni climatiche, anche in funzione del carattere di artificialità che le denota (ROBERTS, 2008); questi boschi però ricadono prevalentemente in aree gestite da Enti pubblici, in particolare parchi e riserve statali o regionali, e pertanto possono essere sottoposte a forme selvicolturali di miglioramento e manutenzione che vanno ad aumentarne i caratteri di stabilità.

Il cambiamento di scenario conseguente alla variazione climatica ed il corrispondente aumento del rischio forestale, che si evince nel passaggio dalle peculiarità pluvio-termiche del 2007 a quelle del 2036, 2067 e 2099, evidenzia che il maggior grado di vulnerabilità dei boschi toscani sia prevalentemente riconducibile ad aree situate in ambienti appenninici e montani. Dal punto di vista specifico, le formazioni a prevalenza di castagno e faggio sembrano essere quelle più soggette a potenziali danni nel futuro.

Considerando la quantificazione della vulnerabilità sulla componente forestale regionale, è stato inoltre possibile definire la superficie che presenta un alto grado di rischio<sup>1</sup> in relazione alle variazioni climatiche stimate (Grafico 1).

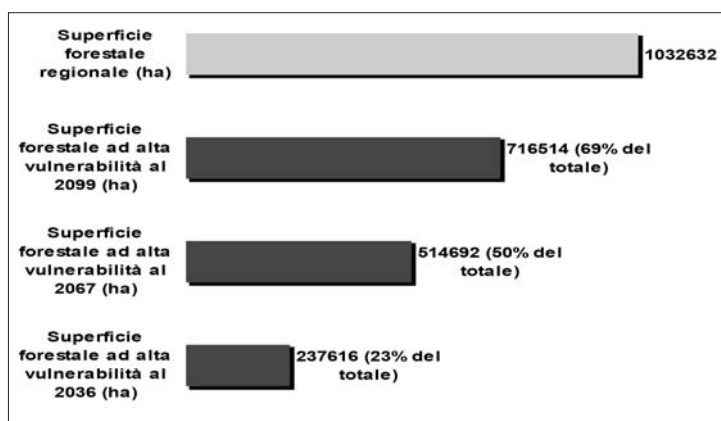


Grafico 1 – Quantificazione delle superfici forestali ad alta vulnerabilità per gli scenari al 2036, 2067 e 2099.

– *High vulnerability forest areas in 2036, 2067 and 2099.*

<sup>1</sup> Per superfici forestali ad «alto rischio» si intendono quei boschi in cui il grado di vulnerabilità è superiore a 0,5. Tale soglia è stata stabilita come valore medio nella scala di normalizzazione tra 0 e 1 implementata con logica *fuzzy*.

Il risultato complessivo regionale, evidenzia, per il periodo 2007-2009, un danno patrimoniale attualizzato pari a 117.873.104 €. Se osserviamo l'entità del danno per unità di superficie (Grafico 2), notiamo che oltre la metà dei boschi della Toscana presenta un danno inferiore ai 100 €/ha. Correlando questo risultato con il grado di vulnerabilità, possiamo notare che nonostante la presenza di un'alta percentuale di boschi ad elevato rischio di stabilità, la maggior parte degli stessi presenta un danno patrimoniale decisamente al di sotto della media regionale (pari a circa 250 €/ha).

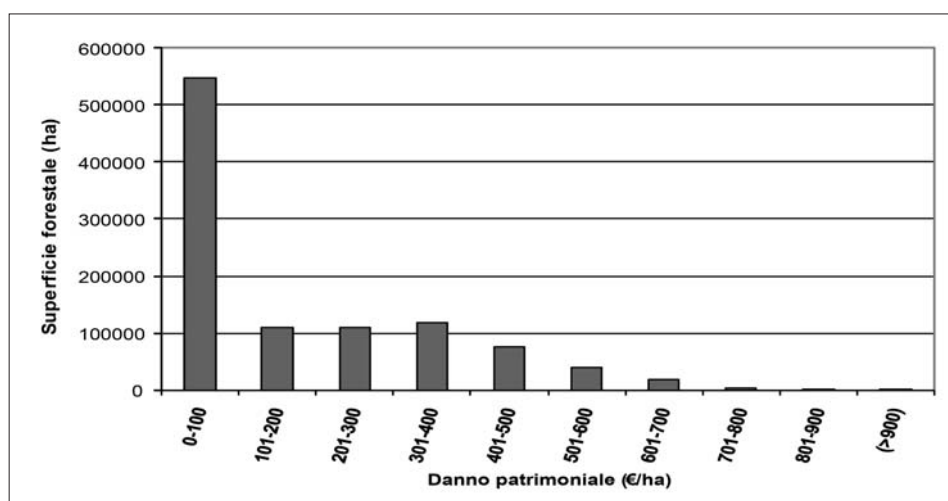


Grafico 2 – Danno economico forestale regionale ripartito in classi di frequenza.  
– Regional forest economic damage.

## 5. CONCLUSIONI

L'impiego di metodologie legate all'uso della logica *fuzzy* e della teoria Dempster-Shafer ha dimostrato che l'approccio impiegato è stato in grado di valorizzare le informazioni disponibili, anche provenienti da fonti non omogenee e qualitativamente diverse, conservando il margine di incertezza insito nella loro origine. Inoltre la metodologia proposta consente di ottenere più livelli di informazione: il rischio di danno, la resilienza dei sistemi forestali ed il danno economico quantificato come mancati redditi futuri. L'impiego di analisi spaziali georeferenziate derivanti dall'implementazione di un Sistema Informativo Territoriale, infine, ha permesso la quantificazione numerica di rischio, resilienza e danno economico per ogni singola area.

In accordo con quanto ipotizzato da ROBERTS (2008), l'analisi del Grafico 1 definisce come gli eventi estremi possano verosimilmente essere più dannosi (in termini di superficie forestale colpita) nel breve-medio periodo rispetto al lungo periodo (fine secolo), con un incremento delle superfici danneggiate prevalentemente concentrato nei primi due scenari (rispettivamente 23% e 27% per gli scenari al 2036 ed al 2067).

Per contro la stima del danno economico è condotta attraverso il valore di macchiatico che deriva da una gestione del bosco nella quale costi e ricavi si verificano con cicli pluriennali di lunghezza pari al turno, vale a dire sulla base del modello classico del bosco coetaneo. In molti casi, però, nella gestione forestale della Toscana, il reddito derivante dalla vendita di assortimenti legnosi è legato all'implementazione di regimi selvicolturali più legati al bosco disetaneo e comunque a interventi spesso non regolarmente eseguiti, perché dipendenti dalle condizioni del mercato del legno.

Inoltre è possibile evidenziare una generale sottostima del reale danno a causa della sola definizione dei mancati redditi finanziari.

La metodologia Dempster-Shafer permette comunque anche la quantificazione monetaria di impatti legati alle esternalità ambientali, potenzialmente implementabili nell'analisi.

In conclusione il dettaglio informativo ottenuto può rappresentare una base di partenza per l'impostazione di politiche efficienti di monitoraggio e di mitigazione del danno economico da cambiamento climatico. Saranno però necessari ulteriori sviluppi teorici e metodologici della ricerca nelle seguenti direzioni: *i*) definizione del ruolo giocato dalle condizioni iniziali del sistema, soprattutto le caratteristiche strutturali del popolamento forestale, per la stima dei gradi di vulnerabilità e resilienza (in aggiunta alla valutazione delle condizioni ambientali ed alla possibilità del sistema socio-economico di intervenire per mitigare il danno); *ii*) valutazione monetaria dei danni sociali e ambientali, *iii*) valutazione dell'impatto ambientale e sociale anche in termini non economici per le diverse funzioni del sistema agroforestale (paesaggio, mosaico ecologico, occupazione, ecc.).

## SUMMARY

### **The impact of climate change on Tuscany forest sector: evaluation of economic damage in the period 2007-2099**

The climate change occurred in the last few decades, and in particular in more recent years, involves several impacts at global and local scale from an environmental and socio-economic point of view. Thus, the definition of techniques for quantification of economic damage resulting from climate change is very important for the management of vulnerable systems.

According to the definition of vulnerability and resilience supported by the Intergovernmental Panel on Climate Change, a set of criteria for evaluation of both features in woodland have been developed.

Concerning climate change risk on the forestry sector, Dempster-Shafer theory of evidence and fuzzy logic were applied to develop a framework for the assessment of economic damage. In order to quantify the damage, the results of the hazard and resilience assessment were used to develop an economic framework based on spatial analysis procedure applied to raster maps, which was then tested on Tuscany's territory.

## BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2009 – *Stima della potenzialità produttiva delle agrienergie in Toscana*. Manuale ARSIA, Press Service srl, Sesto Fiorentino, Firenze.
- ACKERMAN F., STANTON E., 2004 – *Impacts of Europe's changing climate: an indicator-based assessment*. EEA Report No 2/2004, Climate Change - the Costs of Inaction.
- ARSIA, 2006 – *Servizio agrometeorologico*. Disponibile su: <http://agrometeo.arsia.toscana.it>
- BENTABET L., ZHU Y.M., KAFTDANDJIAN V., BABOT D., MASSAND ROMBAUT D.M., 2000 – *Use of fuzzy clustering for determining functions in Dempster-Shafer theory*. Signal Processing Proceedings, WCCCSICSP 2000.
- BLENNOW K., SALLNÄS O., 2005 – *Decision support for active risk management in sustainable forestry*. Journal of Sustainable Forestry, 21 (2-3): 199-210.
- BORCHERS J.G., 2005 – *Accepting uncertainty, assessing risk: decision quality in managing wildfire, forest resource values, and new technology*. Forestry Ecology and Management, 211 (1-2): 36-46.
- BRACKER H., 1996 – *Utilisation de la theorie de Dempster-Shafer pour la classification d'images satellitaires: l'aide de donnees multi-sources et multi-temporelles*. Rennes I., 178.
- BROOKS N., ADGER W.N., KELLY P.M., 2005 – *The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation*. Global Environment Change, 15 (2): 151-163.
- CHEN SHU-JEN, HWANG CHIN-LAI, 1992 – *Fuzzy multiple attribute decision making*. Springer Verlag.
- CHING-HSUE CHENG., 1999 – *A simple fuzzy group decision making method*. Fuzzy Systems Conference Proceedings, FUZZ-IEEE, Volume 2, p. 910-915.
- COMMISSIONE EUROPEA, 2009 – *Libro bianco - L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo*. COM(2009) 147 definitivo, Bruxelles.
- DESSAI S., HULME M., 2003 – *Does climate policy need probabilities?* Tyndall Centre Working paper, 34.
- DOWNING T., WATKISS P., 2003 – *Overview: The Marginal Social Cost of Carbon in Policy Making: Applications, Uncertainty, and a Possible Risk Based Approach*. DEFRA International Seminar on the Social Costs of Carbon.

- FORD J.D., SMIT B., 2004 – *A framework for assessing the vulnerability of communities in the Canadian Arctic to risks associated with climate change*. *Arctic*, 57 (4): 389-400.
- H'EGARAT-MASCLE S., RICHARD D., OTTLÈ C., 2003 – *Multi-scale data fusion using Dempster-Shafer evidence theory*. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 10: 9-22.
- HALL F., FU G., LAWRY J., 2007 – *Imprecise probabilities of climate change: aggregation of fuzzy scenarios*. *Climatic Change*, 81: 265-281.
- HOLLENSTEIN K., 2001 – *Risk analysis as a tool for policy evaluation: a multi-level comparison example*. *Risk Analysis in Forest Management*, Kluwer Academic Press, The Netherlands, p. 75-112.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 1997 – *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, New York.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000 – *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, New York.
- ISTAT, 2000 – *V Censimento dell'Agricoltura*. Disponibile su: [www.istat.it](http://www.istat.it)
- LEE T., RICHARDS J.A., SWAIN P.H., 1987 – *Probabilistic and Evidential Approaches for Multisource data Analysis*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 25: 283-293.
- LOU W.B., CASELTON W., 1997 – *Using Dempster-Shafer theory to represent climate change uncertainties*. *Journal of Environmental Management*, 49 (1): 73-93.
- LUERS A.L., 2005 – *The surface of vulnerability: an analytical framework for examining environmental change*. *Global Environmental Change*, 15 (3): 214-223.
- O'LAUGHLIN J., 2005 – *Conceptual model for comparative ecological risk assessment of wildfire effects on fish, with and without hazardous fuel treatment*. *Forest Ecology and Management*, 211 (1-2): 59-72.
- OHLSON D.W., MCKINNON G.A., HIRSCH K.G., 2005 – *A structured decision-making approach to climate change adaptation in the forest sector*. *Forestry Chronicle*, 81 (1): 97-103.
- REGIONE TOSCANA, ARSIA, COMPAGNIA DELLE FORESTE, 2008 – *Rapporto sullo stato delle foreste in Toscana 2007*. Litograf editor, Perugia.
- ROBERTS G., 2008 – *Policies and instruments for the adaptation of forests and the forest sector to impacts of climate change as indicated in United Nations framework convention on climate change national reports*. IUFRO Occasional paper n° 22, Vienna.
- SEPPÄLÄ R., BUCK A., KTIILA P. (eds.), 2009 – *Adaptation of forest and people to climate change. A global assessment report*. IUFRO World Series Volume 22. Helsinki, 224 p.
- SHAFFER G., 1976 – *A mathematical theory of evidence*. Princeton University, Princeton.
- TURNER B.L., KASPERSON R.E., MATSON P.A., MCCARTHY J.J., CORELL R.W., CHRISTENSEN L., ECKLEY N., KASPERSON J.X., LUERS A., MARTELLO M.L.,

- POLSKY C., PULSIPHER A., SCHILLER A., 2003 – *A framework for vulnerability analysis in sustainable science*. Proceedings of National Academic Sciences, 100 (14): 8074-8079.
- VERIKAS A., MALMQVIST K., BACAUSKIENE M., 2000 – *Combining Neural Networks, Fuzzy Sets, and Evidence Theory Based Approaches for Analysing Colour Images*. Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Network.
- VON GADOW K., 2001 – *Risk Analysis in Forest Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- WEISS G., 2001 – *Administrating risk: a social science perspective on natural hazard prevention based on an Austrian case study*. Risk Analysis in Forest Management, Kluwer Academic Press, The Netherlands, p. 171-200.
- ZADEH L.A., 1987 – *Fuzzy Sets*. In: «Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers by L. A. Zadeh» (a cura di Yager R. R., Ovchinnikov S., Tong R.M., Nguyen H.T.). New York, John Wiley and Sons, p. 29-44.