



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

# FLORE

## Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

### **Modelli di analisi per la definizione dell'offerta sostenibile di agrienergie in Toscana**

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

*Original Citation:*

Modelli di analisi per la definizione dell'offerta sostenibile di agrienergie in Toscana / C. Fagarazzi; S. Sacchelli; C. Ciampi. - STAMPA. - (2012), pp. 181-206.

*Availability:*

This version is available at: 2158/780790 since:

*Publisher:*

Firenze University Press

*Terms of use:*

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

*Publisher copyright claim:*

(Article begins on next page)

TERRITORI



# Territori ad alta energia

Governo del territorio e pianificazione energetica  
sostenibile: metodi ed esperienze

a cura di

**Claudio Fagarazzi**

**David Fanfani**





DIRETTRICE

Daniela Poli

COMITATO SCIENTIFICO

---

Alberto Magnaghi ( <i>Università di Firenze, presidente</i> )	Carlo Alberto Garzonio ( <i>Università di Firenze</i> )
Paolo Baldeschi ( <i>Università di Firenze</i> )	Giancarlo Paba ( <i>Università di Firenze</i> )
Iacopo Bernetti ( <i>Università di Firenze</i> )	Rossano Pazzagli ( <i>Università del Molise</i> )
Luisa Bonesio ( <i>Università di Pavia</i> )	Daniela Poli ( <i>Università di Firenze</i> )
Lucia Carle ( <i>EHESS</i> )	Massimo Quaini ( <i>Università di Genova</i> )
Luigi Cervellati ( <i>Università di Venezia</i> )	Bernardino Romano ( <i>Università dell'Aquila</i> )
Giuseppe Dematteis ( <i>Politecnico e Università di Torino</i> )	Leonardo Rombai ( <i>Università di Firenze</i> )
Pierre Donadieu ( <i>ENSP</i> )	Bernardo Rossi-Doria ( <i>Università di Palermo</i> )
André Fleury ( <i>ENSP</i> )	Wolfgang Sachs ( <i>Wuppertal institute</i> )
Giorgio Ferraresi ( <i>Politecnico di Milano</i> )	Bruno Vecchio ( <i>Università di Firenze</i> )
Roberto Gambino ( <i>Politecnico di Torino</i> )	Sophie Watson ( <i>Università di Milton Keynes</i> )

COMITATO DI REDAZIONE

---

Daniela Poli ( <i>Università di Firenze, responsabile</i> )	Alberto Magnaghi ( <i>Università di Firenze</i> )
Iacopo Bernetti ( <i>Università di Firenze</i> )	Giancarlo Paba ( <i>Università di Firenze</i> )
Leonardo Chiesi ( <i>Università di Firenze</i> )	Gabriele Paolinelli ( <i>Università di Firenze</i> )
Claudio Fagarazzi ( <i>Università di Firenze</i> )	Camilla Perrone ( <i>Università di Firenze</i> )
David Fanfani ( <i>Università di Firenze</i> )	Claudio Saragosa ( <i>Università di Firenze</i> )
Fabio Lucchesi ( <i>Università di Firenze</i> )	

La collana *Territori* nasce per iniziativa di ricercatori e docenti dei corsi di laurea interfacoltà – Architettura e Agraria – dell'Università di Firenze con sede ad Empoli. Il corso di laurea triennale (Pianificazione della città e del territorio e del paesaggio) e quello magistrale (Pianificazione e progettazione della città e del territorio), svolti in collaborazione con la Facoltà di Ingegneria, sviluppano in senso multidisciplinare i temi del governo e del progetto del territorio messi a punto dalla "scuola territorialista italiana". L'approccio della "scuola di Empoli" assegna alla didattica un ruolo centrale nella formazione di figure professionali qualificate nella redazione e nella gestione di strumenti ordinativi del territorio, in cui i temi dell'identità, dell'ambiente, del paesaggio, dell'*empowerment* sociale, dello sviluppo locale rappresentano le componenti più rilevanti. La collana *Territori* promuove documenti di varia natura (saggi, ricerche, progetti, seminari, convegni, tesi di laurea, didattica) che sviluppano questi temi, accogliendo proposte provenienti da settori nazionali e internazionali della ricerca.

Firenze)

e)

a)

quila)

ze)

Palermo)

Ceynes)

ze)

ze)

)

e)

# Territori ad alta energia

Governo del territorio e pianificazione  
energetica sostenibile: metodi ed esperienze

*a cura di*

Claudio Fagarazzi, David Fanfani

Firenze University Press  
2012

Facoltà di  
laurea  
Piani-  
oltà di  
l terri-  
npoli”  
ificate  
entità,  
ntano  
(saggi,  
temi,



Territori ad alta energia . governo del territorio e pianificazione energetica sostenibile : metodi ed esperienze / a cura di David Fanfani, Claudio Fagarazzi, – Firenze : Firenze University Press, 2012.  
(Territori ; 11)

<http://digital.casalini.it/9788884539601>

ISBN 978-88-8453-959-5 (print)  
ISBN 978-88-8453-960-1 (online)

Progetto grafico di Alberto Pizarro Fernández  
Immagine di copertina: mulino a vento, Riserva Regionale Saline di Trapani e Paceco (foto Francesco Berni).

Volume realizzato con il contributo di ASEV – Agenzia per lo Sviluppo Empolese Valdelsa



#### Certificazione scientifica delle Opere

Tutti i volumi pubblicati sono soggetti ad un processo di referaggio esterno di cui sono responsabili il Consiglio editoriale della FUP e i Consigli scientifici delle singole collane. Le opere pubblicate nel catalogo della FUP sono valutate e approvate dal Consiglio editoriale della casa editrice. Per una descrizione più analitica del processo di referaggio si rimanda ai documenti ufficiali pubblicati sul sito-catalogo della casa editrice (<http://www.fupress.com>).

#### Consiglio editoriale Firenze University Press

G. Nigro (Coordinatore), M.T. Bartoli, M. Boddi, F. Cambi, R. Casalbuoni, C. Ciappei, R. Del Punta, A. Dolfi, V. Fargion, S. Ferrone, M. Garzaniti, P. Guarnieri, G. Mari, M. Marini, M. Verga, A. Zorzi.

© 2012 Firenze University Press  
Università degli Studi di Firenze  
Firenze University Press  
Borgo Albizi, 28, 50122 Firenze, Italy  
<http://www.fupress.com/>  
*Printed in Italy*

# Sommario

Introduzione <i>Claudio Fagarazzi, David Fanfani</i>	1
Forma insediativa e «regime energetico locale», una nuova sfida per la pianificazione e per il progetto di territorio. Alcuni appunti <i>David Fanfani</i>	5
Parte prima Temi territoriali e urbani per la sostenibilità energetica	
La produzione di energia rinnovabile in aziende agro-zootecniche. Il caso della filiera del biogas: opportunità e criticità imprenditoriali <i>Alessandra Castellini, Alessandro Ragazzoni</i>	25
La città e i trasporti: analisi e politiche per limitare i consumi e migliorare la qualità degli insediamenti <i>Francesco Alberti</i>	51
Strumenti per scenari di sviluppo energeticamente sostenibili <i>Gianni Scudo, Matteo Clementi</i>	77
Le procedure autorizzative per la realizzazione di impianti energetici e Fonti Energetiche Rinnovabili – FER – in Toscana e le problematiche territoriali per la loro realizzazione riscontrate <i>Fabio Zita, Claudio Fagarazzi</i>	93
Parte seconda Esperienze e strumenti per la pianificazione energetica	
Energia e progettazione degli insediamenti <i>Francesca Sartogo</i>	115

onsabili  
ate nel  
Per una  
cati sul

nta, A.

Friburgo città green. Da dove nasce la sostenibilità energetica e ambientale <i>Alessandra Tambara</i>	137
Normative per la qualità energetica e ambientale in Toscana: il sistema di certificazione CasaClima <i>Tiziano Bucciardini</i>	145
La regolamentazione edilizia in funzione del nuovo paradigma energetico e del binomio ambiente/salute. Il caso studio dei comuni dell'ASL 11 di Empoli <i>Maria Grazia Petronio, Simone Pagni</i>	157
Promuovere la sostenibilità energetica a livello locale. Lo Sportello ERRE nel Circondario Empolese Valdelsa <i>Alessandra Tambara</i>	173
Modelli di analisi per la definizione dell'offerta sostenibile di agrienergie in Toscana <i>Claudio Fagarazzi, Sandro Sacchelli, Christian Ciampi</i>	181
Aspetti e tecnologie impiantistiche per il risparmio energetico degli insediamenti <i>Martino Fanfani</i>	207
Parte terza La costruzione del piano energetico locale	
Il quadro dei livelli di governo e della legislazione in materia energetica <i>Massimo Pepe</i>	221
La costruzione del piano energetico. Metodi ed esperienze <i>Antonio Siciliano</i>	251
Un modello territorializzato per la costruzione del piano energetico locale. L'esperienza dei Laboratori sperimentali/didattici del Corso di Laurea in Pianificazione di Empoli <i>Lorenzo Bartoletti, Alberto Detti, Alessandro Tirinnanzi</i>	269
Profili autori	289
Profili curatori	293



## Introduzione

Claudio Fagarazzi, David Fanfani

Il tema della pianificazione energetica, e più in generale della dimensione e gestione energetica nei diversi ambiti della nostra esperienza di 'viventi', solleva questioni e problematiche che, con l'acuirsi delle contraddizioni del modello di sviluppo prevalente nei paesi occidentali e in quelli emergenti, diventa sempre più difficile eludere ma che, paradossalmente, trovano una non adeguata collocazione nell'ambito della pianificazione del territorio e in relazione alle scelte di sviluppo locale.

In Italia i temi della pianificazione energetica e del risparmio energetico, almeno per quello che attiene la loro introduzione come 'adempimento normativo', datano ormai oltre 20 anni, periodo nel quale, tuttavia, ben poco è stato fatto in termini di applicazione 'ordinaria' dello strumento di pianificazione energetica ai diversi livelli territoriali, lasciando campo ad esperienze prevalentemente sporadiche, esito molto spesso di contingenze normative sempre più frequenti, ondivaghe e, sovente, schizofreniche.

Del resto il generale quadro di 'abbandono' del metodo della pianificazione che ha interessato e interessa il nostro paese, sostituito invece dall'inattaccabile sistema della contrattazione opaca fra attori scarsamente orientati o legittimati verso il pubblico interesse, non poteva non riflettersi nel campo della gestione energetica ove, interessi economici di non poca portata, molto spesso di livello globale, si confrontano e tentano di prevalere l'uno sull'altro, a prescindere da ogni legittimazione legata al perseguimento del bene comune di comunità e territori sui quali, in definitiva, le diverse scelte si ripercuotono.

Negli ultimi anni questo non edificante affresco si è però arricchito di alcuni elementi, legati in particolare alle possibilità di generazione energetica da fonti rinnovabili, che, almeno teoricamente, appaiono in grado di rafforzare, almeno seguendo alcuni criteri di ragionevolezza ed efficacia, un legame maggiormente virtuoso e co-evolutivo fra produzione di energia, effetti ambientali e territori locali, potenziando, al contempo, le possibilità di 'sovranità energetica' – sia in termini di scelte che di generazione – dei diversi livelli territoriali.

Si creano quindi le condizioni per cui a un modello di piano energetico difficilmente definibile, operabile e gestibile a livello locale – date le poco controllabili dinamiche e forze di livello globale che si ponevano in campo – si sostituisce la possibilità di configurare a livello locale un mix energetico di flussi *input/output* maggiormente coerente con le caratteristiche del contesto territoriale e, almeno teoricamente, mag-

giormente adeguato a perseguire obiettivi di misura e sostenibilità in questo decisivo ambito. Questo naturalmente non consente di per sé di ovviare al richiamato gap di cultura del planning appena ricordato, ma certamente permette di ricondurre su un terreno più prossimo alla dimensione, alle esigenze e alla possibilità di incidenza locali, le possibilità di opzione in materia di consumi ed approvvigionamento energetico.

Il testo che presentiamo si colloca in questo quadro, cercando di esplorare e definire almeno alcuni dei punti chiave che portano a cogliere il tema della pianificazione energetica nel quadro della pianificazione del territorio non come una ulteriore 'pianificazione separata' ma, in relazione alla sua stretta relazione con l'uso delle risorse locali, come una pratica che deve pienamente integrarsi con gli strumenti di governo del territorio sia in termini di sostenibilità di usi che come opportunità per il perseguimento di una prospettiva di sviluppo locale e di 'messa in valore' del patrimonio territoriale.

Le diverse parti in cui si articola il libro riflettono la multidimensionalità del tema cercando di sviluppare la riflessione intorno ad alcuni ambiti problematici che vanno dalle questioni di carattere metodologico/disciplinare a quelle più di carattere tecnico/operativo e procedurale.

In apertura, il contributo di Fanfani cerca di collocare il tema della pianificazione energetica nel più vasto quadro del governo degli assetti e delle trasformazioni insediative e territoriali, cercando di enucleare in primo luogo quelli che sono i principali 'nodi' che le «disposizioni morfologico/spaziali» del territorio e i connessi aspetti funzionali propongono in relazione alle *performances* energetiche dell'insediamento e alla loro maggiore o minore sostenibilità. A partire da questo genere di considerazioni il contributo cerca di cogliere alcuni principi guida per una efficace considerazione ed integrazione della dimensione energetica all'interno dei processi e degli strumenti per il governo ed il progetto di territorio.

In coerenza con l'iniziale tentativo di collegamento concettuale fra dominio multisettoriale della pianificazione e governo energetico su base territoriale, la prima sezione affronta in maniera diretta alcuni aspetti che, più di altri, portano a sperimentare quanto diverse modalità di organizzare l'attività umana e di utilizzare in termini energetici alcune fonti anche di tipo rinnovabile possono dipendere dalle modalità di assetto del territorio ma, in parallelo, possono fortemente condizionare le stesse caratteristiche e qualità del territorio stesso. Pur affrontando tematiche diverse e specifiche, l'obiettivo di questa sezione è quello di fare emergere come affrontare il tema della pianificazione energetica implichi un approccio di carattere olistico ed integrato ove ogni aspetto dell'insediamento umano e delle sue attività – ambientale, economico, morfologico/insediativo, funzionale – va guardato in relazione agli altri, in relazione alla maggiore o minore domanda di energia che è in grado di indurre e in relazione ai possibili *trade-off* negativi che si possono generare fra produzioni da fonti rinnovabili ed obiettivi di sostenibilità nel loro insieme. Da un lato quindi il contributo di Alberti affronta il complesso e dibattuto nodo della relazione fra forma urbana-mobilità e consumi energetici, mentre Scudo e Clementi propongono le linee generali di una metodologia per affrontare e apprezzare in maniera integrata e sostenibile, su base bioregionale, il ruolo delle diverse fonti rinnovabili. I saggi di Fàgarazzi e Zita e di Castellini e Ragazzoni affrontano a diverso livello, il nodo di come si ponga la questione della valutazione della coerenza territoriale dell'impiego di fonti rinnovabili sia in termini di integrazione con la attività primaria – mantenendo



la sostenibilità ed autonomia di quest'ultima (Castellini e Ragazzoni) – sia dei *wicked problems* che si pongono quando il possibile impatto di alcuni impianti per FER come quelli eolici, sollevi dei problemi di collocazione in paesaggi 'minuti' e di alto valore estetico ed identitario come quelli toscani (Fagarazzi e Zita).

La seconda parte sviluppa alcuni dei temi di carattere generale già emersi nella prima sezione attraverso la proposizione di alcune esperienze e metodologie analitiche, regolativo/progettuali e gestionali che si presentano come strettamente complementari e orientate verso un approccio integrato alla pianificazione energetica. Si tratta di contributi che evidenziano nel loro insieme come le pratiche e gli strumenti normativi, soprattutto sul versante urbano del problema energetico, siano ormai sufficientemente maturi. Questo si osserva sia attraverso il contributo di Tambara riferito all'ampiamente noto caso di Friburgo e alle modalità integrate di progettazione che fanno del risparmio energetico e dell'impiego di FER uno dei principali fattori di successo di quella esperienza, ma anche attraverso i casi del modello di certificazione Casa Clima, presentato nel contributo di Bucciardini, e del Regolamento per l'edilizia-sostenibile del Circondario Empolese Valdelsa, illustrato nel contributo di Petronio. Quest'ultimo si pone come esperienza innovativa sia per l'approccio olistico alla relazione ambiente di vita/regime energetico sia per il livello di coordinamento intercomunale al quale è stato definito, e successivamente applicato, il regolamento stesso. Uno strumento poi di *governance* della innovazione energetica orientata alla sostenibilità e che bene si integra con il Regolamento appena ricordato, è successivamente illustrato sempre da Tambara in un altro contributo che illustra le modalità ed i criteri operativi di uno sportello di servizio e consulenza per lo sviluppo dell'impiego di tecnologie per fonti rinnovabili, promosso dalla Agenzia per lo Sviluppo del Circondario Empolese Valdelsa. In questo quadro di esperienze concrete i contributi di Sartogo e di Fagarazzi, Ciampi e Sacchelli propongono due modelli operativi applicati, per lo sviluppo di un approccio integrato alla analisi e al progetto energetico territoriale, riferiti rispettivamente all'ambiente urbano e a quello rurale. Nel caso del contributo di Sartogo è illustrata in termini operativi una metodologia di progetto tesa al recupero delle specificità bioclimatiche locali per una adeguata *performance* dell'insediamento ed una conseguente maggiore efficienza energetica e salubrità dell'ambiente di vita. Per quanto riguarda invece il contributo di Fagarazzi, è illustrato un modello integrato di analisi dell'offerta territoriale di agrienergie che muove dal criterio di sviluppare appieno le potenzialità e complementarità fra le diverse fonti rinnovabili locali ricercando però una 'misura' di sostenibilità fondata sulle caratteristiche di riproducibilità dell'insieme delle risorse stesse e sulla qualità del territorio. Per quanto applicati su domini diversi, entrambi gli approcci propongono una lettura del potenziale energetico territoriale che rifugge ogni determinismo tecnologico cercando invece di sviluppare primariamente delle buone regole di utilizzo integrato di quelle che sono le potenzialità del territorio e dei principi di base di scambio energetico locale, legati a fattori climatici, geomorfologici, ecologici, funzionali e produttivi.

Sempre in una prospettiva operativo/strumentale caratterizzata però da maggior dettaglio tecnico, il contributo di Fanfani restituisce un utile quadro dei principali riferimenti tecnici e tecnologici che possono costituire la base conoscitiva dalla quale partire per ulteriori approfondimenti e per affrontare con adeguata consapevolezza ed efficacia le sfide e domande poste dalle questioni energetiche.



Infine la terza sezione del lavoro, a valle delle considerazioni tematiche, metodologiche e strumentali presentate nelle prime due parti, cerca di offrire in primo luogo i principali riferimenti normativi e di carattere metodologico/procedurale per la costruzione di uno strumento di pianificazione energetica a livello locale rispetto al contesto italiano. Il contributo di Pepe, restituisce il quadro di enorme complessità – o forse sarebbe meglio dire cacofonia – normativa che – a diversi livelli operativi, istituzionali e settoriali – va più o meno direttamente ad incidere sulle scelte di carattere energetico di un determinato territorio, con obiettivi e finalità non sempre bene armonizzate e comunque spesso di carattere episodico e ‘puntuale’. In questo contesto normativo il testo di Siciliano riesce comunque ad inquadrare in maniera efficace e strutturata un percorso metodologico ed operativo per la costruzione di un piano energetico locale ‘sensibile’ sia ai diversi livelli e provvedimenti normativi che spesso si intersecano fra di loro sia anche alla necessità di mantenere ben chiaro e saldo un approccio sistemico ed integrato alla lettura della offerta e delle domanda energetica. Ciò a partire dalle caratteristiche e possibilità di generazione territoriale locale e dal perseguimento di obiettivi di efficienza e riduzione dei consumi. La sezione si chiude infine con la proposta di un modello operativo integrato di analisi della offerta di FER su base territoriale, sviluppato nell’ambito dei Laboratori Didattici del corso di Laurea in Pianificazione e Progettazione del Territorio della Facoltà di Architettura di Firenze, sede di Empoli. Il modello, esito di una stretta interazione fra le attività di ricerca dei docenti e le pratiche di didattica sperimentale sviluppate dagli studenti, propone una metodologia per la costruzione del quadro della offerta energetica territoriale che ha come criterio di riferimento la definizione di un mix energetico localmente appropriato in relazione alle caratteristiche del territorio e alla sinergia e non conflittualità fra produzione energetiche e caratteristiche, riproduzione e tutela delle principali dotazioni patrimoniali (sistemi e produzioni agro ambientali e biocenosi forestali, ambiti e profili di biodiversità, stabilità geomorfologica, clivometria, qualità e funzionalità dei corpi idrici, patrimonio storico/architettonico, ecc.).

Il principio perseguito tramite questa metodologia è che non vi possa essere un sostenibile sviluppo di una generazione locale da FER quando questo tipo di sviluppo avvenga a detrimento di altre risorse patrimoniali che, sovente, non sono rinnovabili e sono invece fondamentali per la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni del sistema locale (si pensi per esempio all’impiego di pannelli fotovoltaici a pieno campo in aree agricole o sensibili sul piano paesaggistico). Il modello proposto impiega fra l’altro tecniche GIS di costruzione e analisi dei dati che forniscono grande flessibilità, operabilità e trasparenza al modello rendendolo di significativo interesse nei diversi contesti di pianificazione, non ultimi in quelli di tipo multi attore e partecipativo, finalizzati alla costruzione di scelte condivise fra attori istituzionali, *stakeholders* e soggetti sociali in genere. Il modello proposto trova collocazione in questa sezione del testo in considerazione del suo carattere integrato e sufficientemente comprensivo dei diversi aspetti e potenzialità energetiche territoriali, tale da renderlo un potenziale strumento di supporto alla costruzione di un piano energetico locale a misura del potenziale patrimoniale territoriale e della sua riproducibilità.

# Modelli di analisi per la definizione dell'offerta sostenibile di agrienergie in Toscana<sup>(\*)</sup>

*Claudio Fagarazzi, Sandro Sacchelli, Christian Ciampi*

## Introduzione

Uno dei principali problemi legati alla promozione delle energie rinnovabili, con specifico riferimento alle biomasse di origine forestale, è connesso all'esigenza di individuare e definire idonei modelli di stima delle risorse disponibili. Tale problema appare determinante soprattutto nei contesti mediterranei dove la carenza di viabilità forestale, l'elevata acclività dei terreni e la remota dislocazione dei soprassuoli forestali, rendono spesso impossibile la gestione produttiva di porzioni di superfici forestali.

Per questo, sia la Regione Toscana, che successivamente la Provincia di Lucca, attraverso il progetto transfrontaliero BIOMASS, hanno recentemente promosso lo sviluppo di uno studio diretto a valutare le potenzialità del settore agrienergetico nel territorio regionale e definire in modo organico dati e informazioni ritenute indispensabili per l'attuazione di strumenti di finanziamento del settore e per una corretta pianificazione delle agrienergie.

Le opportunità offerte dai nuovi impianti di riscaldamento e di elettrogenazione unita alla possibilità, per le imprese del settore legno, di passare dalla mera commercializzazione del prodotto ligneo, alla gestione dell'intera filiera energetica, offrono infatti nuove opportunità sia per la commercializzazione dei prodotti forestali sia per la rivitalizzazione dell'intera filiera legno. L'elevata convenienza economica che, al momento, è conseguibile con l'introduzione di impianti termici e di cogenerazione, spinge, talvolta, a valutazioni frettolose sulla reale consistenza delle risorse locali potenzialmente destinabili a tali impianti, che non valutano in modo adeguato i costi di produzione della risorsa 'biomassa'. Per questo, sia la Regione Toscana prima, sia la Provincia di Lucca poi, hanno promosso e successivamente approfondito uno studio finalizzato alla determinazione delle risorse potenzialmente disponibili in ciascuna area, in relazione sia a criteri ecologici legati alle caratteristiche intrinseche delle formazioni naturali presenti nei diversi contesti, sia alle caratteristiche economiche della c.d. produzione localizzata di 'biomassa'. Il presente contributo vuole quindi esporre la metodologia sviluppata nei due progetti e finalizzata a definire le potenzialità pro-

<sup>(\*)</sup> Nonostante il lavoro debba considerarsi frutto della collaborazione dei tre autori, è possibile riconoscere il contributo del dott. Fagarazzi nell'impostazione generale del lavoro e nella stesura dell'introduzione e dei capp. 1.2.1, 1.3, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 3; mentre è possibile indicare il contributo del dott. Sacchelli nella stesura dei capp. 1.2.2, 1.3.1 e del dott. Ciampi nei capp. 1, 1.1, 1.3.2, 1.3.3, e 2.1.



duttive 'annue' di biomasse forestali del territorio regionale. Nel caso specifico, è stato appositamente strutturato un modello econometrico, su piattaforma GIS (Sistemi Informativi Geografici), denominato *Green Energy Model (GEM): A GIS oriented model for the farm and the territory energy planning*, in grado di valutare le risorse disponibili sia dal punto di vista ecologico, che economico. Il modello ha stimato la disponibilità di biomasse garantendo un prelievo annuo delle risorse naturali compatibile con le capacità di accrescimento dei soprassuoli forestali, e una sostenibilità economica degli interventi selvicolturali necessari al recupero di tali risorse. Il modello GEM ha preso in considerazione i modelli di crescita delle formazioni forestali, i corrispondenti turni consuetudinari<sup>1</sup>, i prezzi localmente praticati per i diversi assortimenti prodotti (legna ardere, paleria, ecc.), e altre variabili derivanti dall'Inventario Forestale della Regione Toscana del 1998 (ad es. gli assortimenti ritraibili)<sup>2</sup>. In particolare, il modello ha stimato sia le biomasse (legno cippato) derivate da residui delle attività selvicolturali, sia gli assortimenti tradizionali (legna da ardere, paleria, ecc.), stante l'ipotesi che questi ultimi hanno un proprio mercato assestato, con prezzi tali da garantire ancora buona redditività e non rendere conveniente la loro utilizzazione per la sola produzione di cippato di legno.

Sono stati quindi ipotizzati diversi scenari produttivi in funzione delle attuali tipologie di organizzazione dei cantieri forestali e delle possibilità di sviluppo degli stessi in termini di ottimizzazione delle caratteristiche logistiche e del grado di meccanizzazione.

È stata così possibile stimare le curve di offerta degli assortimenti legnosi attualmente utilizzati a fini energetici, ovvero: la legna da ardere e il cippato.

Lo studio ha quindi determinato la capacità produttiva della regione entro ben definiti limiti di sostenibilità ambientale, senza quindi trascurare la necessità di preservare risorse preziose quali la fertilità dei suoli, l'acqua, la biodiversità e il paesaggio.

### 1. Stima delle produttività dalle formazioni forestali attraverso il modello Green Energy Model (GEM)

Allo scopo di stimare la quantità di biomasse potenzialmente ritraibili dai soprassuoli forestali, il modello GEM ha implementato al suo interno delle valutazioni di carattere ecologico, tecnico ed economico che, in relazione alle caratteristiche locali, fossero in grado di definire la quantità di assortimenti tradizionali e di residui, producibili dalle diverse tipologie forestali (comprensivi della quota derivante dalle utilizzazioni finali e dai tagli intercalari). Particolare enfasi è stata data alla quantificazione delle potenzialità produttive di assortimenti legnosi ad uso energetico quali la legna da ardere ed il cippato, in relazione ai prezzi di vendita attualmente praticati sul mercato locale, ed alle variabili tecnico-economiche ed organizzazione dei cantieri produttivi.

<sup>1</sup> Il turno rappresenta, per i boschi coetanei tradizionalmente presenti in Toscana, la durata del ciclo colturale alla fine del quale può avvenire il taglio di utilizzazione con cui si raccolgono tutti gli alberi siti sulla particella. È definito consuetudinario il turno tradizionalmente adottato nelle diverse realtà socio-economiche. Esso è strettamente correlato ai prodotti forestali tradizionalmente realizzati in ogni vallata.

<sup>2</sup> Si tratta delle diverse tipologie di prodotti legnosi realizzabili a seguito del processo produttivo forestale, ovvero: paleria, travi, segati, legna da ardere, ecc.



Per procedere con l'analisi territoriale è stato necessario strutturare un Sistema Informativo Territoriale (SIT) funzionale alle elaborazioni che il GEM dovrà sviluppare per la stima delle risorse disponibili. Elementi salienti del SIT sono rappresentati da: copertura Corine Land Cover (CLC) 2000 della Toscana al IV° livello aggiornato, per le aree boscate, al 2004; Inventario Forestale della regione Toscana (IFT), implementato con gli strati informativi relativi alla classificazione in tipologie forestali; Cartografia Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:10.000.

## 1.1 Stima delle superfici boscate

Il modello GEM specificatamente strutturato per definire la produttività ecologica ed economica delle superfici forestali della regione Toscana, richiede la preliminare stima di alcuni parametri utili alla definizione della produttività specifica di ciascuna tipologia forestale. In relazione alle diverse tipologie di soprassuolo presenti, sarà infatti possibile definire le produttività medie annue per ettaro di residui forestali.

Dall'esame del CLC, è emersa una distribuzione delle superfici forestali secondo quanto illustrato in tabella 1.

Tabella 1. Superficie forestale totale e indice di boscosità provinciale e regionale.

Provincia	Superficie totale (ha)	Superficie boscata (ha)	Indice di boscosità-IS
Arezzo	323.420	167.276	52%
Firenze	351.337	168.021	48%
Grosseto	450.503	160.075	36%
Livorno	121.418	41.203	34%
Lucca	177.373	111.150	63%
Massa Carrara	115.512	77.871	67%
Pisa	244.470	79.989	33%
Pistoia	96.439	56.872	59%
Prato	36.586	20.675	57%
Siena	381.983	149.489	39%
Totale	2.299.040	1.032.619	45%

## 1.2 Produttività delle formazioni forestali

### 1.2.1 La produttività per unità di superficie di risorse forestali

Un bosco, così come qualsiasi altra risorsa rinnovabile, presenta la peculiare caratteristica di non avere una quantità (biomassa) fissa nel tempo, ma variabile in relazione alla capacità di rigenerarsi delle popolazioni arboree che lo compongono.

In particolare, le specie arboree danno origine a delle *cenosi forestali*<sup>3</sup> che presentano un diverso tasso di accrescimento in relazione alle specie, alla forma di governo ed

<sup>3</sup> Sinonimo di *comunità*, cioè insieme delle popolazioni animali, e vegetali che vivono in un determinato ambiente in un certo momento.

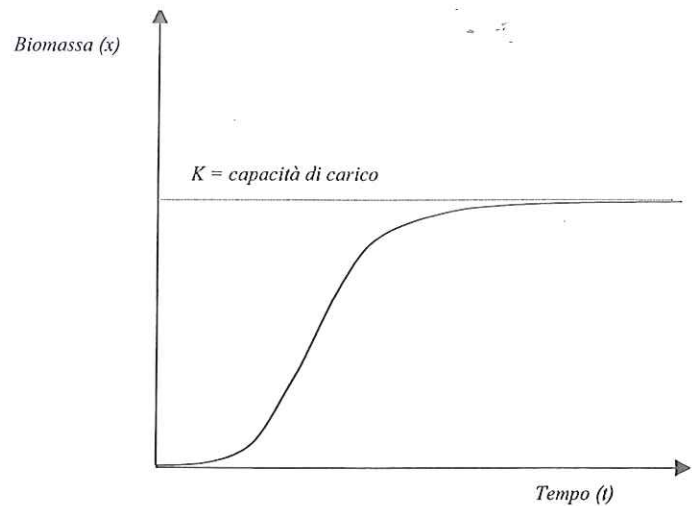


Figura 1. Curva logistica di accrescimento delle formazioni forestali.

all'età delle stesse nonché alle condizioni ecologiche dell'area su cui giacciono.

Per ciascuna popolazione che costituisce queste *cenosi*, le variazioni del tasso di accrescimento nel tempo sono rappresentate da un modello di crescita caratteristico di popolazioni situate in *biotopi*<sup>4</sup> che presentano caratteri costanti per lunghi periodi di tempo.

Le curve di crescita di queste popolazioni sono quindi contraddistinte da modelli di accrescimento, di tipo *sigmoide* o *logistico*, rappresentativi dei fenomeni di crescita esponenziali che si verificano nella prima fase di vita dei popolamenti arborei e della successiva riduzione dei tassi di crescita conseguenti alla limitata disponibilità di risorse (nutrienti, luce, ecc.) ed all'incremento di concorrenza *intra* ed *inter-specifica* causato dall'aumento di densità degli individui (Fig. 1).

La formalizzazione della funzione di accrescimento delle biomasse forestali, può quindi essere costruita sulla base di un modello di dinamica della popolazione esposto per la prima volta da Schaefer (1954). Questa curva, detta appunto di Shafer, è inoltre rappresentativa del cosiddetto *trade off* tra economia ed ambiente, che considera sia la produttività media annua dei popolamenti forestali che il valore ambientale intrinseco delle aree forestali (aumento o diminuzione della quantità di biomassa con relativa variazione di biodiversità specifica e strutturale, protezione idrogeologica, stoccaggio di carbonio, ecc.) (Fagarazzi 1999).

Le condizioni di equilibrio implicite nel modello, sono riconducibili a boschi assestati, cioè capaci di fornire un prodotto legnoso annuo e costante. In particolare, l'algoritmo impiegato nel modello GEM per valutare l'offerta ottimale di prodotto legnoso per unità di superficie, fa riferimento a boschi coetanei nei quali la produzione viene stimata considerando il turno consuetudinario praticato per le diverse specie

<sup>4</sup> Sinonimo del concetto di *habitat* che rappresenta la più piccola parte di un territorio in cui un organismo trova condizioni climatiche edafiche e biotiche favorevoli e può nutrirsi, rifornirsi d'acqua e riprodursi, ossia avere un bilancio positivo tra natalità e mortalità tale da mantenere la popolazione (Piuksi 1994).



forestali e per le diverse tipologie di governo del bosco<sup>5</sup>. Benché i modelli tradizionalmente impiegati per la definizione dell'offerta unitaria facciano riferimento a modelli di ottimizzazione del turno (Berneti 1999) si è preferito considerare i turni consuetudinari in quanto maggiormente rappresentativi delle realtà socio-economiche locali e delle relative capacità produttive delle superfici forestali. La definizione del turno e del corrispondente *stock* di risorsa (provvigione)<sup>6</sup>, ha quindi permesso la stima, per ogni tipologia di bosco, dell'offerta media annua per unità di superficie.

Una condizione del genere è ad esempio raggiungibile nel caso dei boschi particellari coetanei attraverso l'applicazione di metodi di assestamento di tipo planimetrico spartitivo. L'applicazione di tale metodo consiste nella suddivisione della superficie boschiva  $S$ , in  $T$  aree di ampiezza pari a  $S/T$ , dove  $T$  rappresenta il turno della specie arborea che costituisce il bacino di utilizzazione. Ciò significa che se il complesso forestale sarà strutturato in modo da avere un numero di particelle della medesima superficie ed età progressivamente crescente fino all'età massima  $T$ , esse saranno in grado di fornire un prodotto annuo per ettaro, dato dal rapporto fra la provvigione della  $T_q$ -esima particella che annualmente cade al taglio ed il turno  $T_q$  di ciascuna tipologia di bosco  $q$ . Avremo inoltre uno *stock* di risorse per ettaro dato dalla sommatoria degli incrementi medi delle  $(T_q-1)$ -esime particelle (Fagarazzi, 2008). Formalmente:

$$x_q(t) = \sum_{i=1}^{T_q-1} x_{i,q} \quad \text{con } t = T_q - 1 \quad (1)$$

dove:

$x_q(t)$  = *stock* di biomassa per ettaro di soprassuolo di tipo  $q$  al momento  $t$ ;

$x_{i,q}$  = incremento medio annuo per ettaro della particella di bosco di tipo  $q$  all'età  $i$ -esima

$T_q$  = turno consuetudinario del soprassuolo di tipo  $q$ .

Essendo lo *stock* di risorse  $x_q(t)$  funzione del turno applicato a ciascuna tipologia di soprassuolo  $T_q$  ed essendo la ripresa annua per ettaro  $x_q^*$  funzione dello *stock*, ne consegue che  $x_q^*$  sarà a sua volta funzione del turno  $T_q$ :

$$x_q^* = \frac{x_q(t)}{t} \quad \text{con } t = T_q \quad (2)$$

$x_q^*$  = ripresa media annua per ettaro di superficie di bosco di tipo  $q$

<sup>5</sup> Per governo del bosco, si intende la modalità di gestione del bosco. In selvicoltura vengono distinti governo a ceduo, governo ad alto fusto e governo misto. Per bosco ceduo si intende un bosco di latifoglie costituito da piante derivate da rinnovazione agamica (i fusti che si originano dalle ceppaie dopo il taglio). Per bosco d'alto fusto si intende un bosco costituito da piante di origine gamica (nate da seme). Si tratta di un tipo di bosco che caratterizza le conifere mentre nel caso delle latifoglie è abbastanza raro in quanto meglio adatte al bosco ceduo.

<sup>6</sup> Massa legnosa di un bosco



In prima istanza risulta pertanto necessario definire la quantità massima di materiale legnoso che è possibile prelevare da ciascuna tipologia forestale in funzione delle condizioni stazionali in cui ricade e delle forme di gestione alle quali è sottoposta.

Definito il tasso di accrescimento della risorsa, in relazione al proprio turno, possiamo adesso individuare il 'prelievo sostenibile' per ciascuna tipologia forestale. Basandoci su principi di sostenibilità ormai universalmente riconosciuti dalla comunità scientifica (Pearce, Turner 1989), affinché un sistema economico possa definirsi sostenibile è necessario che il tasso di prelievo di risorse naturali rinnovabili ( $t$ ) sia inferiore, o al massimo uguale, al tasso di accrescimento della risorsa ( $r$ ), ovvero  $t \leq r$ . Ne consegue che la produttività massima sostenibile di un soprassuolo forestale durante il suo ciclo di vita coincide con il suo tasso di accrescimento.

Il modello GEM, per stimare la quantità di assortimenti ritraibili da ciascuna tipologia forestale, ha quindi dovuto individuare:

- la produttività media annua, ovvero, l'incremento medio annuo, di ciascuna tipologia di bosco relativamente ai turni consuetudinari praticati nel contesto esaminato (Bernetti, Fagarazzi 2003);
- la ripartizione percentuale degli assortimenti ritraibili (Bernetti, Fagarazzi 2003) (vedi tabella 2);
- il prezzo indicativo per ciascun assortimento ritraibile (Regione Toscana *et al.* 2010).

### 1.2.2 Stima della produttività specifica di ciascuna tipologia forestale

Per valutare le produttività di ciascuna tipologia di bosco, è stato fatto riferimento all'Inventario Forestale Toscano, che contiene informazioni anche di carattere dendrometrico per ciascuna delle 88 tipologie di bosco individuate.

Poiché si tratta di un archivio ormai datato, si è quindi proceduto ad una implementazione della carta dell'uso del suolo attraverso la cartografia Corine Land Cover (CLC).

Gli strati informativi di questo database pur rappresentando una cartografia aggiornata rispetto all'Inventario Forestale della Toscana (IFT), risalente al 1998, non hanno informazioni relative alla produttività di ciascuna classe; per questo motivo, si è proceduto ad un'implementazione dei valori alfanumerici del *layer* CLC, attraverso una rielaborazione dei dati dendrometrici dell'IFT (Bernetti, Fagarazzi 2003).

Il *Green Energy Model*, attraverso la definizione di regole e di uno specifico algoritmo, ha quindi combinato i seguenti strati informativi:

- Inventario Forestale Toscano (specie legnosa principale, specie accessorie, tipo di governo e trattamento, grado di copertura, ecc.);
- carta altimetrica, carta delle pendenze e carta delle esposizioni (derivanti da DTM);
- carta geologica;
- carta dei tipi climatici;
- carta dei sistemi di paesaggio in unità di Sestini.
- Carta Corine Land Cover IV° livello aggiornata al 2004

In tal modo è stato possibile ottenere un aggiornamento rappresentativo dell'IET, con dettaglio pari a 0,5625 ettari, a fronte dei 16 ettari originari dell'IFT.

In questo caso, ogni tipologia forestale presenta una propria caratteristica produttività, in base alle esigenze ecologiche della specie e dei fattori stazionali dell'area in cui ricade. Tale produttività è espressa dalla curva di accrescimento e, attraverso di essa, e la curva di Shafer, è stato dunque possibile definire la produzione massima annua di biomassa prelevabile da un particolare popolamento forestale in modo sostenibile. La formalizzazione della funzione di accrescimento delle biomasse forestali, può quindi essere costruita sulla base di un modello di dinamica della popolazione rappresentabile attraverso una funzione logistica (Schaefer 1954) del tipo:

$$F(x) = \alpha + 1 / \left( \beta + e^{-\gamma(x-\delta)} \right) \quad (3)$$

dove:

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  sono parametri costanti specifici per ciascuna risorsa e per ciascun ambiente riscontrabile in ogni area, che nel caso delle risorse forestali assumono il seguente significato:

$$\alpha = f(v, u) \quad \beta = f(v), \quad \gamma = f(u), \quad \delta = f(u)$$

con:

$v$  = vettore caratteri ambientali;

$u$  = vettore caratteristiche biologiche della risorsa<sup>7</sup>.

Sulla base dei dati dendrometrici dell'IFT è stato quindi possibile ricostruire le funzioni di accrescimento attraverso tecnica multiregressiva diretta a definire i parametri caratterizzanti.

Per quanto riguarda la ripartizione assortimentale, essa è stata invece determinata in base alle osservazioni effettuate direttamente sui cantieri di utilizzazione; è stato pertanto possibile definire le tipologie di prodotti maggiormente diffuse sul territorio regionale (legname da opera, paleria, legna da ardere, residui, ecc.) in funzione della tipologia boscata esaminata.

La successiva attribuzione degli incrementi e delle ripartizioni assortimentali, ai layer cartografici del Corine Land Cover di IV° livello è stata effettuata considerando, a livello comunale, i valori medi, per le due variabili suddette, quindi definendo la media ponderata dei punti inventariali IFT ricadenti all'interno dei confini amministrativi ed appartenenti ad una medesima *specie prevalente* (da codice IFT); sono seguite una serie di operazioni di «downscaling territoriale», che hanno permesso di calcolare i valori di produttività media annua e la corrispondente ripartizione assorti-

<sup>7</sup> Questo vettore tiene conto della differenza fra specie, dei diversi tassi di accrescimento, delle diverse esigenze trofiche.



mentale, di ciascuna categoria di uso del suolo forestale (CLC), in relazione al comune di appartenenza ed ai parametri di accrescimento che è stato possibile correlare tra le classi di specie prevalente del CLC e le tipologie dell'IFT.

Nell'ambito del modello GEM, l'algoritmo impiegato per attribuire la produttività e le ripartizioni assortimentali alle diverse classi di uso del suolo Corine Land Cover sono formalizzate nelle equazioni 4 e 5:

$$x_{CLC(i,c,m)}^* = \frac{\sum_{k=1}^{n_{(s,m)}} x_{IFT(s,q)}^*}{n_{(s,m)}} \Leftrightarrow \exists n_{(s)} \subset m \wedge \forall s \cong c \quad (4)$$

con

$x_{CLC(i,c,m)}^*$  = produttività media annua del poligono Corine Land Cover  $i$ -esimo appartenente alla classe di uso del suolo Corine Land Cover  $c$ -esima all'interno del comune  $m$ -esimo;

$x_{IFT(s,q)}^*$  = produttività media annua per il punto inventariale IFT attribuibile alla tipologia forestale  $q$ -esima;

$n_{(s,m)}$  = punti inventariali IFT appartenenti alla specie  $s$ -esima nel comune  $m$ -esimo.

$$P_{aCLC(i,c,m)} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{(s,m)}} P_{aIFT(s,q)}}{n_{(s,m)}} \Leftrightarrow \exists n_{(s)} \subset m \wedge \forall s \cong c \quad (5)$$

con:

$P_{aCLC(i,c,m)}$  = percentuale dell'assortimento  $a$ -esimo per il poligono Corine Land Cover  $i$ -esimo appartenente alla classe di uso del suolo Corine Land Cover  $c$ -esima, nel comune  $m$ -esimo;

$P_{aIFT(s,q)}$  = percentuale dell'assortimento  $a$ -esimo per il punto inventariale IFT attribuibile alla specie  $s$ -esima appartenente alla tipologia forestale  $q$ -esima;

La schematizzazione delle relazioni tra il codice CLC e le tipologie IFT con i relativi valori di incremento e ripartizione assortimentale, sono riportate in tabella 2 (per la denominazione di ogni singola classe CLC confrontare tabella 3). Ovviamente si tratta di dati medi che non risentono della diversa collocazione topografica della risorsa (che invece è stata considerata attraverso il modello GEM).

È opportuno sottolineare che per definire l'effettiva produttività di ogni area boscata è stata considerata anche la densità di ciascun soprassuolo. Tale parametro è stato considerato attraverso un'operazione di *spatial analysis*, che ha preso in considerazione la variabile «Grado di Copertura» presente sull'Inventario Forestale Toscano.

Tabella 2. Valori medi delle «produttività medie annue» e ripartizione assortimentale per classe di uso del suolo forestale.

Codice CLC	Tipologia forestale IFT	Forma di governo o specie prevalente	Produttività media annua (mc/ha*anno)	Assortimenti ritraibili (%)					
				Tondame da sega	Palone	Imballaggio	Paleria	Legna da ardere	Residui
3111	Leccio macchia	-	1,5	0	0	0	0	77	23
	Orno-lecceta	-	2						
	Lecceta rupicola relitta	-	0						
	Lecceta a viburno	-	4,8						
	Lecceta di transizione	-	1,7						
3112	Mesotermofila (roverella)	-	3,5	0	0	0	0	77	23
	Mesofila (roverella)		4,6						
	Mesoxerofila (roverella)		4,6						
	Acidofila (roverella)		4,6						
	Termofila (roverella)		4,6						
	Eutrofica (cerro)		6,6						
	Mesofila collinare (cerro)		4,6						
	Mesoxerofila (cerro)		2,3						
	Acidofila montana (cerro)		2,3						
	Acidofila su terrazzi (cerro)		4,6						
	Acidofila submediterranea (cerro)		4,6						
	Mesofila planiziale (cerro)		6,6						
	Querceto (cerro)		6,6						
	Termoigrofila (cerro)		6,6						
3113	-	-	2,5	0	0	0	0	80	20
3114	Mesofilo (castagno)	-	7,6	32	38	0	10	0	20
	Vulcanofilo (castagno)	-	9,5	40	30	0	10	0	20
	Acidofilo (castagno)	-	5,7	0	0	0	80	0	20
	Neutrofilo (castagno)	-	4	0	0	0	80	0	20
3115	Eutrofico (faggio)	Ceduo	4,2	0	0	0	0	72	28
		Fustaia	1,44	0	0	0	0	92	8



Tabella 2. Continua.

Codice CLC	Tipologia forestale IFT	Forma di governo o specie prevalente	Produttività media annua (mc/ha*anno)	Assortimenti ritraibili (%)					
				Tondame da sega	Palone	Imballaggio	Paleria	Legna da ardere	Residui
	Mesofilo (faggio)	Ceduo	5,2	0	0	0	0	72	28
		Fustaia	1,8	0	0	0	0	92	8
	Oligotrofico (faggio)	-	0	0	0	0	0	0	0
	Oligotrofica a cerro (faggio)	-	0	0	0	0	0	0	0
	Amiatina superiore (faggio)	Ceduo	2,2	0	0	0	0	72	28
		Fustaia	0,72	0	0	0	0	92	8
	Amiatina inferiore (faggio)	Ceduo	5,2	0	0	0	0	72	28
		Fustaia	1,8	0	0	0	0	92	8
	Apuana EO (faggio)	-	0	0	0	0	0	0	0
	Apuana N (faggio)	Ceduo	3,6	0	0	0	0	72	28
		Fustaia	1,08	0	0	0	0	92	8
3117	-	-	6	0	0	0	0	74	26
3121	-	Pino d'Aleppo	4	50	0	27	0	0	23
	-	Cipresso	14						
	-	Altri pini mediterranei	6						
3122	Eutrofici (pini montani)	-	12	39	0	45	0	0	16
	Neutro acidolini (pini montani)	-	9,5	24	0	50	0	0	26
	Neutro basifili (pini montani)	-	7,3	23	0	50	0	0	27
3123	Abetina altimontana (abete bianco)	-	9,18	53	0	33	0	0	14
	Abetina montana (abete bianco)	-	13						
	Sottoquota & "dell'Amiata" (abete bianco)	-	9						
	-	Abete rosso	11						
3125	-	-	11	30	0	30	0	0	40
3231	-	-	1,5	0	0	0	0	77	23

### 1.3 Stima dell'offerta complessiva di assortimenti legnosi ad uso energetico sotto il vincolo di sostenibilità economica

Il modello GEM, attraverso la preliminare integrazione di modelli di accrescimento, ha quindi permesso una stima delle produttività annue specifiche di ciascuna formazione forestale sotto il vincolo di sostenibilità ecologica delle stesse. Questo tipo di valutazione prescinde però dalla reale opportunità di utilizzazione delle superfici in quanto non valuta la sostenibilità economica degli interventi selvicolturali necessari per produrre tali biomasse. In altre parole, non tutte le superfici forestali sono in produzione, per cui si rende necessario strutturare uno strumento in grado di distinguere le aree che lo sono, da quelle che invece non è possibile gestire a causa degli elevati costi selvicolturali.

Per tale ragione è stato quindi necessario integrare nel GEM 'forestale', un modello di offerta aggregata in grado di definire, in relazione a parametri economici (prezzi, costi di produzione, ecc.) quali sono le superfici realmente in produzione. L'algoritmo applicato nel presente studio, è rappresentato da un modello di lungo periodo in cui viene fatto riferimento allo *stock* di capitale naturale desiderato ed al tasso di prelievo sostenibile (Bernetti 1999). Il modello, nel caso specifico, si presta quale strumento di pianificazione di lungo periodo che risponde a problematiche quali la capacità di supportare determinati costi di produzione, sia marginali che medi, nonché la ricerca dell'estensione ottimale dei soprassuoli capaci di rispondere efficacemente ad un determinato livello di domanda di prodotti legnosi.

La struttura del *Green Energy Model* (GEM), ha quindi previsto, in questo caso, lo sviluppo di un modello di offerta capace di quantificare, a livello locale, i diversi assortimenti prodotti dalle aree forestali. In tal modo è stato possibile verificare le potenzialità di sviluppo di filiere agroenergetiche, sia in termini di dimensioni, che di localizzazione. Inoltre, è stato possibile anche verificare l'influenza che lo sviluppo di linee produttive nuove, legate alla produzione di cippato di legno, possono avere nei confronti dell'attuale organizzazione produttiva, soprattutto per quanto riguarda l'organizzazione dei cantieri forestali e le potenzialità, in termini di sfruttamento di nuove aree boscate attualmente inutilizzate.

A tal fine sono stati ipotizzati tre scenari produttivi ( $S_1, S_2, S_3$ ), per i quali, attraverso l'analisi del valore di macchiatico<sup>8</sup> delle singole unità territoriali<sup>9</sup>, è stato possibile verificare l'entità delle superfici a macchiatico positivo (redditizie) e quantificare la corrispondente entità di biomassa utilizzabile (i valori riferiti alle tonnellate di residui legnosi riportati di seguito, sono riconducibili a materiale con il 30% di Contenuti Idrico, che rappresenta un valore medio per gli assortimenti commerciati sul territorio toscano).

Gli scenari analizzati sono i seguenti:

- S1) produzione di assortimenti tradizionali in base alle tecniche colturali e di utilizzazione attualmente praticate;

<sup>8</sup> Ricordiamo che il valore di macchiatico rappresenta in termini finanziari, la differenza tra i ricavi ottenibili dalla vendita degli assortimenti legnosi di un particolare soprassuolo ed i costi totali di produzione degli stessi.

<sup>9</sup> Per unità territoriale, si intende l'unità minima di analisi utilizzata nei modelli raster geografici, ovvero, l'unità di superficie costituita da pixel quadrati con lato di 75 m.



- S2) produzione di assortimenti tradizionali e cippato di legno derivante dagli scarti delle utilizzazioni forestali e dai tagli intercalari;
- S3) cippatura totale dei cedui destinati alla produzione di legna da ardere e vendita del cippato.

Lo scenario 1 fa riferimento alla situazione attuale, ovvero alla sola produzione di assortimenti tradizionali, quindi: legna da ardere, paleria, segati, ecc. Non viene esaminata la possibilità di recuperare residui forestali.

Lo scenario 2, invece, considera la produzione congiunta di assortimenti tradizionali e di residui forestali, cioè ramaglia e legname di piccole dimensioni derivati da tagli boschivi e da diradamenti dei boschi.

Lo scenario 3, infine, fa riferimento alle produzioni realizzabili con la cippatura del legname prodotto a seguito dei tagli in boschi cedui che attualmente producono legna da ardere. In questo caso si ipotizza che non venga più realizzata legna da ardere, ma solo cippato di legno.

Mentre il secondo scenario descrive una realtà già in parte avviata in Toscana<sup>10</sup>, il terzo, più teorico, si basa sulla nascita di società che non solo riforniscano gli impianti a biomassa di *chips*, ma verosimilmente si occupino direttamente della vendita di energia (Cesano, Guidi 2006); in questo lavoro l'ipotesi S3 considera esclusivamente la vendita di cippato di legno derivante da boschi cedui attualmente destinati alla produzione di legna da ardere.

La struttura del GEM 'forestale' può essere sintetizzata attraverso il seguente algoritmo:

1. La superficie forestale è rappresentata attraverso una base dati geografica di tipo raster. Ad ogni pixel sono associate le variabili ecologiche (specie, fertilità, trattamento selvicolturale sostenibile, ecc.), geografiche (pendenza, presenza e densità della viabilità<sup>11</sup>, distanza dal mercato, accessibilità, ostacoli, ecc.)<sup>12</sup> e produttive (prelievo sostenibile, ripartizione assortimentale, ecc.) definite attraverso i modelli di accrescimento;
2. Assumendo che la distribuzione dell'età dei soprassuoli della  $q$ -esima tipologia di bosco sia approssimativamente uniforme tra 0 e  $T_q$ , possiamo definire la quantità totale di prodotto teoricamente utilizzabile ogni anno in corrispondenza del turno consuetudinario  $T_q$ , come la produttività  $x_{CLCj(i,c,m)}$  definita per ciascun pixel attraverso il modello di offerta per unità di superficie (eq. 4);
3. Se i costi totali di produzione  $ctu_j(q)$ , calcolati per ciascun pixel ( $j$ ), risultano minori o uguali del prezzo della biomassa ( $ctu_j(q) \leq p$ ), significa che quel pixel è utilizzabile con profitto;
4. L'offerta complessiva dell'assortimento ( $a$ ) che si ha in corrispondenza di uno specifico prezzo è quindi definita come la somma delle produzioni medie annue ottimali dell'assortimento  $a$  derivate dalle  $q$  tipologie di bosco, situate nei  $J$  pixel:

<sup>10</sup> Si vedano a tal riguardo alcuni esempi di filiera legno - energia sviluppati all'interno del progetto *Woodland energy. La filiera legno - energia come strumento di valorizzazione delle biomasse legnose agroforestali*, ARSIA (2005-2008).

<sup>11</sup> Il grafo della viabilità deriva dalla CTR della Toscana 1:10.000.

<sup>12</sup> Ostacoli naturali, o barriere, sono rappresentati da crinali ed impluvi e derivano da un'analisi di *Topographic Position Index* (TPI) effettuata sul DTM.

$$S_a^{s*}(p) = \sum_{j \in J(p)} x_{CLCj(i,c,m)}^* \cdot P_{aCLCj(i,c,m)}$$

(6)

s.a.

$$J(p) \mid ctu_j^s(q) \leq p$$

dove:

$S_a^{s*}(p)$  = offerta sostenibile complessiva dell'assortimento  $a$ -esimo per lo scenario  $s$ -esimo al prezzo  $p$ ;

$x_{CLCj(i,c,m)}^*$  = incremento medio annuo del pixel  $j$ -esimo appartenente al poligono Corine Land Cover  $i$ -esimo di classe di uso del suolo Corine Land Cover  $c$ -esima all'interno del comune  $m$ -esimo;

$P_{aCLCj(i,c,m)}$  = percentuale dell'assortimento  $a$ -esimo del pixel  $j$ -esimo appartenente al poligono Corine Land Cover  $i$ -esimo di classe di uso del suolo Corine Land Cover  $c$ -esima, nel comune  $m$ -esimo;

$J(p)$  = totale dei pixel in produzione al prezzo  $p$ ;

$ctu_j^s(q)^{13}$  = costi totali di produzione (€/t) di biomassa estratta dai soprassuoli di tipo  $q$  situati nel pixel  $j$  per lo scenario  $s$ -esimo.

$p$  = prezzo dell'assortimento  $a$ -esimo.

Maggiori saranno i prezzi e/o minori i costi di produzione e maggiori saranno le superfici dei diversi tipi di soprassuoli che risulteranno utilizzabili con profitto e che quindi andranno a sommarsi alla quantità complessiva offerta.

### 1.3.1 Analisi dei costi di produzione della biomassa

Il costo di produzione unitario  $ctu_j^s(q)$  rappresenta il parametro del modello GEM maggiormente dipendente dalle caratteristiche di tipo geografico.

Nel settore forestale i costi di produzione dipendono infatti dai seguenti fattori:

- caratteristiche *in situ* del suolo e del soprassuolo;
- localizzazione del bosco rispetto al mercato;
- costo dei fattori di produzione.

Nel caso in esame, i costi di produzione relativi a ciascun pixel del territorio esaminato, sono stati calcolati attraverso un modello di costo di tipo geografico che ha portato alla realizzazione di «mappe di costo» rappresentative dei costi *in situ* (abbattimento e allestimento) e dei costi di localizzazione (esbosco e trasporto fino ai centri di

<sup>13</sup> Il costo totale di produzione è dato da:  $ctu_j^s(q) = cu_{Aj}^s(q) + cu_{Ej}^s(q) + c_{Tj}$  con  $cu_{Aj}^s(q)$  costi di abbattimento e allestimento di biomassa estratta dai soprassuoli di tipo  $q$  situati nel pixel  $j$  per lo scenario  $s$ -esimo;  $cu_{Ej}^s(q)$  costi di esbosco di biomassa estratta dai soprassuoli di tipo  $q$  situati nel pixel  $j$  per lo scenario  $s$ -esimo e  $c_{Tj}$  costi di trasporto della biomassa estratta dai soprassuoli situati nel pixel  $j$ .



vendita del materiale, in prima analisi individuati nei centroidi dei capoluoghi comunali), nonché della eventuale cippatura all'imposto<sup>14</sup>. Il modello, relativamente all'esbosco, ha inoltre considerato la presenza di ostacoli naturali, come impluvi o crinali. L'esbosco è stato ipotizzato con trattori, *skidder* o con teleferica (in funzione della pendenza, della distanza dalla viabilità principale, della densità di strade e dello scenario produttivo). In particolare, per tutti e tre gli scenari esaminati, il modello geografico ha considerato alcune ipotesi, che formalmente sono riassumibili nell'equazione 7.

$$cu_{Ej}^s(q) = \begin{cases} cu_{Ej,skid}^s(q) & \left\{ \begin{array}{l} \text{se densità viabilità forestale} \geq 20 \text{ m/ha} \\ \text{and} \\ \text{se pendenza} \leq 30\% \end{array} \right. \\ cu_{Ej,tel}^s(q) & \left\{ \begin{array}{l} \text{se distanza viabilità} \leq 600 \text{ m} \\ \text{and} \\ \text{se } 30\% < \text{pendenza} \leq 70\% \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

dove:

$cu_{Ej}^s(q)$  = costi di esbosco per unità di misura ( $\text{€}/\text{m}^3$  e/o  $\text{€}/\text{t}$ ) di biomassa estratta dai soprassuoli di tipo  $q$  situati nel pixel  $j$  per lo scenario  $s$ -esimo.

$cu_{Ej,skid}^s(q)$  = costi di esbosco per unità di misura ( $\text{€}/\text{m}^3$  e/o  $\text{€}/\text{t}$ ) di biomassa estratta dai soprassuoli di tipo  $q$  situati nel pixel  $j$  per lo scenario  $s$ -esimo con *skidder* o trattore con verricello;

$cu_{Ej,tel}^s(q)$  = costi di esbosco per unità di misura ( $\text{€}/\text{m}^3$  e/o  $\text{€}/\text{t}$ ) di biomassa estratta dai soprassuoli di tipo  $q$  situati nel pixel  $j$  per lo scenario  $s$ -esimo con teleferica;

### 1.3.2 Analisi dei ricavi

Il modello considerato fa riferimento, per alcuni scenari, ad una impresa multi-prodotto, ovvero che produce più di un assortimento legnoso; è stato quindi necessario stimare i ricavi ottenibili dalla vendita dei diversi assortimenti per giungere alla identificazione delle superfici a macchiatico positivo. I prezzi di vendita del materiale legnoso sono stati verificati su riviste specializzate e comparate con le indicazioni fornite da imprenditori forestali e tecnici di Comunità Montane dell'area regionale.

Formalmente, il ricavo ( $R_j$ ) ottenuto dal pixel  $j$ -esimo è dunque dato da:

$$R_j = \sum_{a=1}^u (x_{CLC(i,c,m)j}^* \cdot T_q \cdot 0,56 \cdot w_a \cdot p_a) \quad (8)^{15}$$

<sup>14</sup> Rappresenta il luogo dove è possibile effettuare il carico del legname su camion. Di solito è rappresentato da spiazzati situati lungo la viabilità principale e forestale.

<sup>15</sup> Il coefficiente 0,56 è necessario per riportare le produzioni stimate per ettaro, a produzioni stimate per pixel, poiché la superficie di un pixel di  $75 \times 75 \text{ m}$  è pari a circa  $5600 \text{ m}^2$ .

$x_{CLC(i,c,m)}^*$  = incremento medio annuo del poligono Corine Land Cover  $i$ -esimo appartenente alla classe di uso del suolo Corine Land Cover  $c$ -esima all'interno del comune  $m$ -esimo e ricadente nel pixel  $j$ -esimo

$T_q$  = turno consuetudinario del soprassuolo di tipo  $q$

$w_a$  = percentuale dell'assortimento  $a$ -esimo

$p_a$  = prezzo di mercato dell'assortimento  $a$ -esimo

$u$  = numero di assortimenti ritraibili dal soprassuolo di tipo  $q$ .

### 1.3.3 Determinazione delle superfici a macchiatico positivo e analisi degli scenari

In considerazione della elevata dinamicità del mercato delle biomasse ligneo cellulosiche, è sembrato utile procedere alla costruzione delle rispettive curve di offerta. Per fare questo, è però necessario procedere a una parametrizzazione dei prezzi in modo da costruire la relativa curva rappresentata dalla sommatoria delle produttività medie annue dei pixel nei quali la differenza tra ricavi e costi è uguale o superiore a zero. Trattandosi però di una simulazione di azienda multi prodotto, è stato necessario definire delle ipotesi di costanza dei prezzi di alcuni assortimenti, in relazione ai diversi scenari produttivi ipotizzati. In particolare, sono state prese in considerazione le seguenti ipotesi:

- relativamente allo *scenario 1* sono state calcolate le curve di offerta della sola legna da ardere in riferimento a prezzi di vendita variabili tra 10 e 280 €/t s.f.;
- relativamente allo *scenario 2* è stata valutata l'offerta di biocombustibili solidi (cippato) in base alle seguenti opzioni:
  - per tutte le superfici forestali produttive è stato valutato il quantitativo di cippato derivante dai residui delle utilizzazioni forestali e dai tagli interscalari, in riferimento a prezzi di vendita compresi tra 40 e 250 €/t s.f.; ipotizzando un prezzo costante della legna da ardere pari a 100 €/t;
  - per i soli cedui destinati alla produzione di legna da ardere sono stati valutati sia il quantitativo di cippato derivante dai residui delle utilizzazioni forestali e da tagli interscalari in riferimento a prezzi di vendita compresi tra 40 e 250 €/t s.f.; sia il quantitativo di legna da ardere in riferimento a prezzi di vendita variabili tra 100 e 130 €/t;
- per lo *scenario 3* è stata valutata l'offerta di biomassa legnosa totale derivata dai soli boschi cedui in riferimento a prezzi del cippato compresi tra 10 e 280 €/t s.f.

## 2. Risultati

### 2.1 Produzione ecologicamente sostenibile

Sulla base dei modelli di accrescimento delle risorse forestali implementati nel modello GEM è stato possibile valutare la produzione massima sostenibile annualmente, dal punto di vista ecologico, di biomasse ad uso energetico (Tab. 5).

Tale stima prescinde da valutazioni di carattere economico e si basa esclusivamente sulle capacità di accrescimento della risorsa rinnovabile «bosco».



I valori riportati in tabella 5 rappresentano quindi le massime produzioni annue che sarebbe possibile ottenere, nei diversi territori provinciali, se tutte le superfici forestali fossero in produzione (fustaie, cedui per paleria, cedui per legna da ardere, ecc.). Le quantità sono espresse in termini di sostanza fresca. Ovviamente sono state considerate le sole produzioni di tipo energetico, per cui la legna da ardere generata da ceduo, al netto di quelli di castagno, e i residui forestali prodotti da tutte le superfici boschive, incluse fustaie, cedui di castagno, ecc..

**Tabella 3.** Produzione massima sostenibile annualmente, dal punto di vista ecologico, di biomasse ad uso energetico stimata con il modello GEM ecologico forestale (t s.f./anno).

Territorio di riferimento	Legna da ardere (t s.f./anno)	Residui da tutte le superf. forestali (t s.f./anno)
Arezzo	359.208	166.878
Firenze	348.328	171.293
Grosseto	358.880	129.594
Livorno	77.207	28.235
Lucca	127.587	111.308
Massa Carrara	107.544	71.316
Pisa	177.215	71.157
Pistoia	69.542	59.959
Prato	25.442	22.869
Siena	338.889	123.903
Regione Toscana	1.989.844	956.512

Comparando i risultati emersi sulla base delle sole valutazioni ecologiche, rispetto alle utilizzazioni rilevate dalle statistiche ufficiali (ISTAT 2007) (Tab. 4), osserviamo che, a livello regionale, il tasso di utilizzazione attuale delle risorse forestali è pari al 40% delle capacità di accrescimento annua della risorsa bosco (Tab. 5). Tali risultati sono perfettamente in linea con quelli emersi da altri studi, come il progetto Biosouth, secondo cui, in Toscana, a fronte di un tasso di accrescimento della risorsa forestale pari al 4%, le utilizzazioni attualmente effettuate in ambito forestale, sono pari a circa il 40% del tasso di accrescimento (AA.VV. 2007).

**Tabella 4.** Utilizzazioni boschive in Toscana nel periodo 2001-2006 sulla base dei dati ISTAT (2007).

Anni	Legname da lavoro (mc)	Legna da ardere (mc)	Totale (mc)
2001	180.272	924.334	1.104.606
2002	191.743	1.167.962	1.359.705
2003	254.162	1.093.000	1.347.162
2004	225.113	1.376.027	1.601.140
2005	232.385	1.228.670	1.461.055
2006	167.653	973.179	1.140.832
Media	208.555	1.127.195	1.335.750

Tabella 5. Tasso di utilizzazione ecologico forestale dei cedui toscani per la produzione di legna da ardere.

Risultati modello GEM dal punto di vista ecologico		Produzione media ISTAT 1999-2006 (mc/anno)	Tasso di utilizzazione ecologico forestale attuale (%)
Legna da ardere (t s.f./anno)	Legna da ardere (mc/anno)		
1.989.844	2.842.634	1.127.195	40%

2.2 Produzioni ecologicamente sostenibili ed economicamente efficienti

Introducendo parametri di natura economica, ovvero i costi di produzione, osserviamo che a fronte di una grande disponibilità di superficie boschive, quelle realmente in produzione sono molte meno. In particolare, le superfici che possiamo computare ai fini della stima della produttività di biomasse per fini energetici, sono solo quelle che presentano valori di macchiatico positivi. Questo fa sì che vengano escluse le aree molto remote e meno accessibili, così come quelle che presentano condizioni di giacitura estremamente difficili (Fig. 2).

Ovviamente, ciò non significa che non si potranno mai utilizzare, è solo una questione di costo/opportunità. In pratica, la disponibilità delle diverse superfici forestali è legata al prezzo offerto per gli assortimenti ritraibili dalle varie aree.

Se facciamo riferimento agli attuali prezzi di mercato del legname, osserviamo che le superfici in produzione sono solo una certa quantità. Se il prezzo fosse molto superiore, diventerà conveniente utilizzare (tagliare) anche aree situate molto più lontano e conseguentemente la produzione totale annua sarà molto superiore. Una dinamica di questo tipo, oltre ad avere benefici effetti sull'economia rurale locale, ha effetti estre-

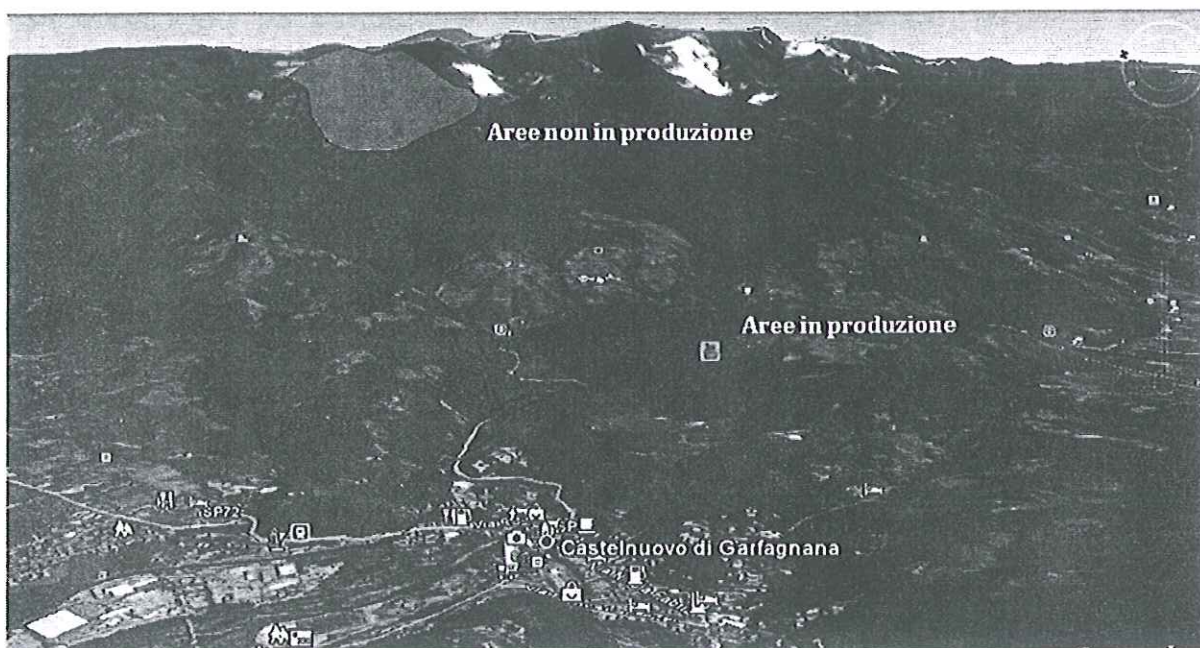


Figura 2. Esempio di boschi in produzione e non in produzione.



mamente importanti anche sugli equilibri ecologici locali: In pratica, il fatto che nuove aree entrino in produzione, significa che sarà possibile gestire e mantenere una maggiore superficie boschiva, con benefici effetti sul dissesto idrogeologico, sulla protezione dagli incendi boschivi e sui danni da patogeni. Il fatto che tali superfici possano produrre legno, non significa che verranno depauperate delle proprie risorse, ma bensì che saranno gestite secondo i criteri di sostenibilità evidenziati nel paragrafo 1.2.1.

Per tali ragioni, le valutazioni qui illustrate per i vari scenari esaminati (S1, S2 e S3), non sono di tipo statico rispetto al mercato, ma di tipo dinamico, ovvero, sono state determinate le produzioni conseguibili rispetto a specifiche variazioni dei prezzi degli assortimenti prodotti. Ciò ha portato alla realizzazione delle curve di offerta delle biomasse forestali. Nel caso del cippato di legno, trovandosi in una situazione dinamica del mercato, con una progressiva crescita della domanda, e quindi anche dei prezzi, l'uso delle curve di offerta permetterà un aggiornamento progressivo delle disponibilità energetiche *ceteris paribus*.

### 2.3 SCENARIO 1: Situazione produttiva attuale considerando l'ottimizzazione dei cantieri forestali

Lo scenario 1 fa riferimento alla situazione attuale, ovvero alla sola produzione di assortimenti tradizionali, che, nel settore energetico sono rappresentati esclusivamente dalla produzione di legna da ardere. In questo caso, l'impiego del modello GEM «economico forestale» ha permesso la definizione della curva di offerta della legna da ardere per la regione Toscana.

La costruzione dello scenario 1, che simula il mercato forestale nelle attuali condizioni di prezzi al consumo della legna da ardere e di costi di produzione, permette una attenta validazione del modello GEM forestale. Comparando i risultati dello scenario S1, rispetto alle statistiche ufficiali relative ai boschi cedui per la produzione di legna da ardere, è possibile verificare i dati empirici del GEM forestale con i dati delle statistiche ufficiali relativi ai tagli boschivi, e verificare l'attendibilità delle valutazioni proposte con gli scenari S2 e S3.

Come si può notare dall'analisi della figura 3, l'offerta regionale toscana è caratterizzata da una elevata elasticità iniziale che mantiene valori superiori a 2 fino a circa 420.000 tonnellate annue di produzione. Essa decresce poi progressivamente fino a divenire rigida per produzioni che eccedono le 720.000 tonnellate annue, allorché le aree in produzione includono boschi cedui con basso grado di fertilità, con condizioni stazionali difficili (elevate pendenze), e molto distanti rispetto al mercato. Per valori superiori a 1.000.000 tonnellate la curva di offerta diviene perfettamente rigida, allorché l'elasticità si approssima a 0 e quindi alle aree più remote e irraggiungibili rispetto al mercato.

Considerando gli attuali prezzi di mercato della legna da ardere, ovvero, 100-130 euro a tonnellata, osserviamo che il modello GEM «economico forestale», stima per il territorio regionale toscano, una *offerta potenziale di legna da ardere, sostenibile sia dal punto di vista ecologico che economico, compresa tra 695.999 e le 900.360 tonnellate annue* (Fig. 3)<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Ipotizzando l'attuale struttura dei cantieri forestali ed i prezzi correnti dei fattori produttivi.

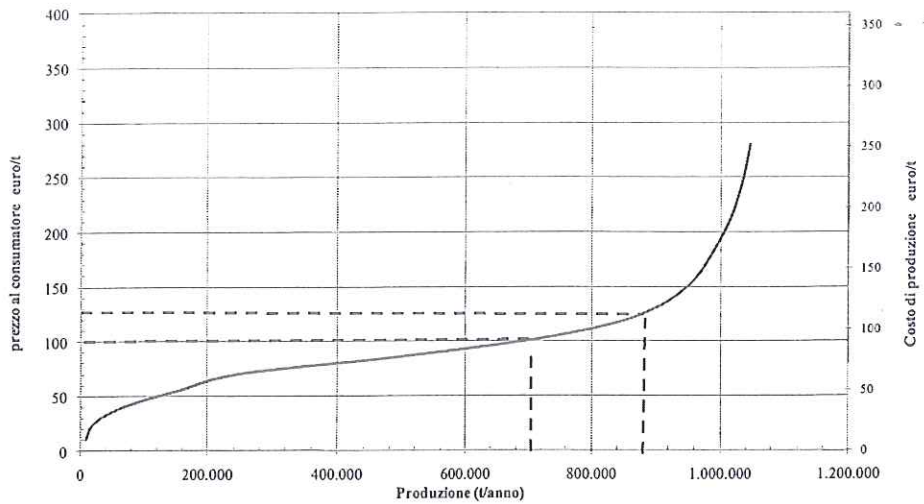


Figura 3. Curva di offerta aggregata di legna da ardere dei cedui della Regione Toscana.

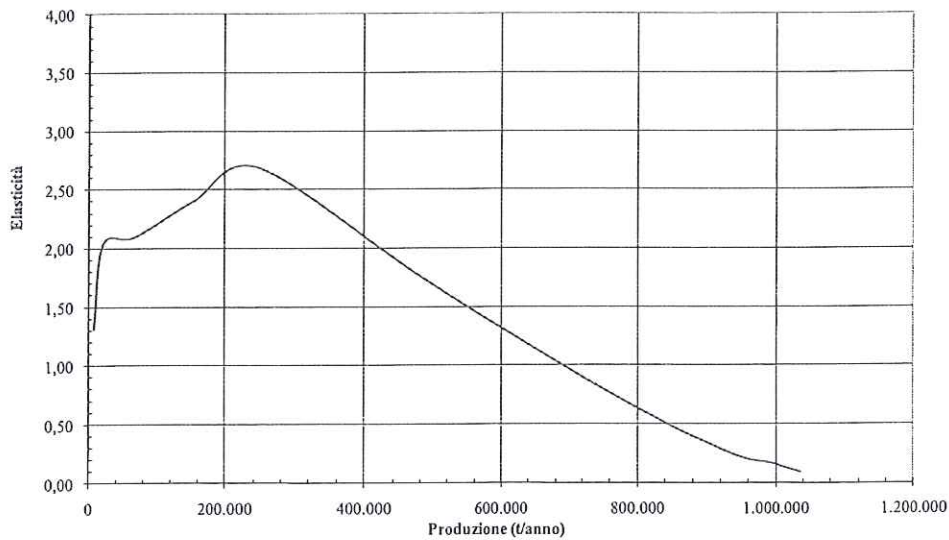


Figura 4. Elasticità della curva di offerta di legna da ardere dei cedui della Regione Toscana.

In grassetto, in tabella 6, sono evidenziati i prezzi di riferimento utilizzati per stimare le quantità di legna da ardere potenzialmente disponibili nelle attuali condizioni di mercato.

In termini volumetrici, le produzioni stimate (695.999 t s.f. e 900.360 t s.f.), corrispondono ad una produzione potenziale annua compresa tra 994.284 metri cubi e 1.286.229 metri cubi. Comparando tale risultato con la produzione media stimata dalle statistiche ISTAT per il periodo 1999-2006 (Tab. 4), osserviamo che la produzione media ISTAT del periodo 2001-2006 (1.127.195 mc) è compresa tra i due valori. Il modello GEM è quindi molto rappresentativo del fenomeno analizzato. Si tratta quindi di una stima che, relativamente al mercato della legna da ardere (97% della produzione regionale), può dirsi rappresentativa del fenomeno.



**Tabella 6.** Offerta di legna da ardere (t s.f.) in funzione del prezzo di vendita (scenario 1). In grassetto le produzioni massime sostenibili dal punto di vista economico per prezzi pari a 100 e 130 euro/t s.f.

Provincia	Prezzo legna (€/t s.f.)									
	10	40	70	100	130	160	190	220	250	280
Arezzo	50	5.199	47.603	144.183	180.927	191.037	195.601	198.745	200.730	201.812
Firenze	158	11.685	46.197	135.245	166.187	174.537	178.033	179.729	180.430	180.742
Grosseto	4.145	20.745	41.337	107.211	156.008	177.103	185.761	192.792	197.728	203.118
Livorno	1.978	3.683	7.963	30.750	36.996	39.226	40.706	41.595	41.906	42.049
Lucca	164	4.941	11.936	24.491	29.913	32.596	34.162	34.865	35.350	35.762
Pisa	1.325	6.748	21.316	51.929	65.841	70.785	74.344	77.756	80.734	82.424
Prato	10	1.515	3.900	8.652	10.851	11.384	11.532	11.667	11.700	11.736
Pistoia	30	6.225	12.268	22.766	28.919	31.131	32.225	32.861	33.295	33.487
Massa	18	2.172	11.846	28.946	33.993	36.139	37.237	38.336	39.277	39.481
Siena	123	4.635	43.600	141.827	190.725	202.089	208.253	212.996	215.201	216.118
Regione Toscana	8.001	67.548	247.966	695.999	900.360	966.027	997.856	1.021.342	1.036.352	1.046.729

#### 2.4 SCENARIO 2: Situazione produttiva con 'raccolta associata' e produzione congiunta di assortimenti principali e cippato da residui forestali

La produzione congiunta di assortimenti principali e di residui forestali (ramaglia e biomasse da tagli intercalari), si basa sull'ipotesi che i cantieri siano organizzati per effettuare la c.d. *raccolta associata* (Spinelli *et al.* 2009). Nel caso dei cantieri per diradamenti e avviamenti all'alto fusto, vengono valutati i cantieri specifici. Non sono stati presi in considerazione i cantieri e le produzioni realizzabili con tagli fitosanitari, in quanto generano una produzione estemporanea che non può essere ricondotta alla produzione annua e costante originata da soprassuoli assestati.

Gli assortimenti presi in considerazione per finalità energetiche sono quindi stati i seguenti:

- residui forestali derivate dalla attuazione della *raccolta associata* su tutte le superfici forestali provinciali;
- la legna da ardere derivata dalla attuazione della *raccolta associata*.

Per quanto riguarda il punto a), il cippato potenzialmente ritraibile dall'intera superficie forestale (cedui, fustaie, ecc.) di ogni singola provincia, da aree a macchiatico positivo, è stato stimato tenendo conto dei prezzi di mercato presenti localmente per i vari assortimenti principali. In questo caso, però, il prezzo di riferimento della legna da ardere è pari a 100 euro per tonnellata di sostanza fresca. I risultati sono illustrati nelle figure 5 e 6, ed in tabella 7.

Se valutiamo l'offerta potenziale di cippato derivato da residui forestali prodotti nelle diverse province esaminate, facendo riferimento ai prezzi del cippato attualmente riscontrabili sul mercato regionale (da 69 a 83 €/t s.f.), possiamo rilevare che, a livello regionale, le risorse energetiche complessivamente realizzabili ammontano a circa 440.599 tonnellate, che salgono a 446.217 tonnellate nel caso in cui il prezzo di

mercato del cippato raggiungesse gli 82 euro per tonnellata di sostanza fresca (30% di contenuto idrico).

Dall'esame dell'elasticità delle funzioni di offerta (Fig. 5), è possibile constatare l'elevata rigidità delle curve, che presenta valori di elasticità sempre molto prossimi a zero. Si tratta infatti di un processo produttivo che richiede elevati costi e che conseguentemente presenta una scarsa risposta rispetto alle variazioni di prezzo del prodotto. L'espansione della 'raccolta associata', su nuove superfici boschive, non permette grandi economie e quindi determina una scarsa risposta agli incrementi di prezzo.

Passando ad esaminare la produzione congiunta nei cedui tradizionalmente destinati alla produzione di legna da ardere possiamo osservare quanto segue.

Nell'ambito della produzione congiunta (legna da ardere e cippato) si ipotizza che la legna venga venduta al prezzo di mercato corrente. Nel caso specifico è stato ipotizzato un prezzo di 100 euro per tonnellata di sostanza fresca. La curva di offerta della legna da ardere, che andiamo quindi a costruire è una sorta di offerta incrociata, volta a verificare come varia la disponibilità di legna da ardere (in produzione associata), al variare del prezzo dell'assortimento complementare, ovvero, il cippato (Tab. 8).

Come si può notare dall'esame della tabella 8, pur mantenendo costante il prezzo della legna da ardere, la quantità offerta varia in relazione al prezzo del cippato prodotto dai residui di lavorazione del ceduo. In particolare, nel caso della regione Toscana, è possibile constatare che vendendo i residui ad un prezzo compreso tra i 69 e gli 82 euro a tonnellata, la quantità di legna da ardere prodotta con la raccolta associata, varia tra le 957.846 e le 968.076 tonnellate di legna da ardere.

Se comparate con le produzioni conseguibili nella situazione standard identificata nello scenario 1 (Tab. 6), osserviamo che la raccolta congiunta ha permesso un incremento della produzione di legna da ardere. A livello regionale, ad esempio, nella situazione standard (SC1), la produzione massima economicamente sostenibile in corrispondenza di un prezzo della legna da ardere di 100 €/t s.f., era pari a 695.999 tonnellate (Tab. 6); mentre adesso, con la raccolta associata e la vendita congiunta del cippato

Tabella 7. Offerta di cippato da residui forestali originati da tutti i soprassuoli forestali in funzione del prezzo di vendita (scenario 2).

Provincia	Prezzo cippato (€/t s.f.)									
	40	48	58	69	83	100	119	143	172	206
Arezzo	75.659	76.446	77.396	78.240	79.159	80.065	81.063	82.108	83.147	84.138
Firenze	81.056	81.655	82.280	82.945	83.661	84.434	85.174	85.856	86.465	86.975
Grosseto	63.969	65.860	66.443	67.015	68.100	68.668	69.253	69.812	70.428	71.062
Livorno	13.677	14.665	14.768	15.066	15.652	15.746	15.860	15.971	16.056	16.138
Lucca	34.066	34.364	34.704	35.075	35.507	35.942	36.372	36.777	37.198	37.594
Massa Carrara	30.888	31.053	31.519	31.801	32.191	32.479	32.813	33.261	33.749	34.177
Pisa	9.814	9.914	10.037	10.166	10.288	10.397	10.508	10.657	10.797	10.918
Pistoia	25.764	26.061	26.394	26.753	27.111	27.479	27.813	28.098	28.425	28.753
Prato	19.892	20.077	20.315	20.589	20.933	21.293	21.672	22.065	22.476	22.846
Siena	69.244	69.720	72.322	72.949	73.616	74.326	75.106	75.965	76.863	77.706
Regione Toscana	424.028	429.816	436.178	440.599	446.217	450.830	455.634	460.570	465.603	470.308



derivato da residui di lavorazione (a 69 €/t s.f.), essa si attesta a ben 957.846 tonnellate, ovvero, circa il 37% in più rispetto alla situazione produttiva con cantiere tradizionale.

In tabella 9 è stata nuovamente simulata la produzione di legna da ardere in relazione alle variazioni di prezzo del prodotto congiunto (cippato), ma in questo caso, è stato considerato un prezzo della legna da ardere pari a 130 euro/t s.f.

Ciò allo scopo di considerare eventuali dinamiche incrementali del prezzo della legna da ardere. È stato subito evidente che le quantità disponibili sono risultate maggiori (Tab. 9), rispetto alle simulazioni schematizzate nella tabella 8.

**Tabella 8.** Offerta di legna da ardere (t s.f./anno) in funzione del prezzo di vendita del cippato derivante dai residui delle utilizzazioni (scenario 2), con prezzo costante della legna da ardere pari a 100 €/t s.f.

Provincia	prezzo cippato (€/t s.f.)									
	40	48	57	69	82	100	119	143	172	206
Arezzo	173.779	176.375	178.866	181.825	184.819	187.485	189.806	192.404	194.677	196.676
Firenze	161.188	163.282	165.805	168.945	172.152	174.812	177.079	178.717	180.215	181.388
Grosseto	183.255	184.725	186.167	189.318	190.648	192.111	193.622	195.570	197.421	199.038
Livorno	37.167	37.474	38.461	40.384	40.622	40.998	41.443	41.676	41.859	41.987
Lucca	27.875	28.545	29.307	30.117	31.089	32.182	33.133	34.098	34.862	35.621
Pisa	68.793	70.651	71.791	73.363	74.618	75.645	77.769	79.355	80.675	81.980
Prato	9.293	9.608	9.901	10.155	10.399	10.672	11.050	11.341	11.515	11.684
Pistoia	25.470	26.337	27.296	28.101	28.769	29.263	29.839	30.576	31.331	31.951
Massa Carrara	33.775	34.251	34.802	35.520	36.134	36.831	37.462	37.912	38.352	38.758
Siena	188.837	196.906	198.409	200.118	202.033	204.232	206.934	209.818	212.321	214.166
Regione Toscana	909.472	928.202	940.862	957.915	971.364	984.330	998.256	1.011.610	1.023.399	1.033.454

**Tabella 9.** Offerta di legna da ardere (t s.f./anno) in funzione del prezzo di vendita del cippato derivante dai residui delle utilizzazioni (scenario 2), con prezzo costante della legna da ardere pari a 130 €/t s.f.

Provincia	prezzo cippato (€/t s.f.)									
	40	48	57	69	82	100	119	143	172	206
Arezzo	186.216	187.666	189.209	190.533	191.687	192.915	194.463	196.362	197.912	199.362
Firenze	173.117	174.554	175.865	177.090	178.398	179.415	180.362	181.357	182.359	182.956
Grosseto	193.136	193.828	194.608	195.569	196.505	197.534	198.509	199.626	200.869	202.390
Livorno	41.145	41.218	41.289	41.448	41.719	41.794	41.881	41.978	42.069	42.171
Lucca	30.999	31.484	32.123	32.806	33.452	34.156	34.693	35.249	35.825	36.539
Pisa	76.347	76.931	77.675	78.354	79.782	80.651	81.673	82.673	83.779	84.563
Prato	10.354	10.516	10.655	10.819	11.074	11.320	11.551	11.639	11.711	11.795
Pistoia	28.832	29.156	29.505	29.901	30.350	30.867	31.320	31.720	32.121	32.440
Massa Carrara	37.087	37.321	37.591	37.865	38.107	38.302	38.588	38.837	39.102	39.399
Siena	205.825	206.860	207.994	209.331	210.755	212.201	213.338	214.364	215.298	216.145
Regione Toscana	983.056	989.534	996.515	1.003.716	1.011.830	1.019.155	1.026.377	1.033.805	1.041.045	1.047.759

## 2.5 SCENARIO 3: Produzione di biomasse energetiche dai soli soprassuoli cedui e cippatura della pianta intera

Lo scenario 3 ha preso in considerazione le sole superfici tradizionalmente destinate alla produzione di legna da ardere, ipotizzando una loro utilizzazione con sistema *full tree system*<sup>17</sup> e cippatura della pianta intera. I risultati complessivi sono rappresentati nella tabella 10.

In questo caso, l'offerta complessiva regionale di biomasse provenienti dai soli soprassuoli cedui attualmente destinati a produrre legna da ardere, risulterebbe pari a quasi 1.253.000 tonnellate di sostanza fresca.

Tabella 10. Offerta totale dei soprassuoli per la produzione di legna da ardere (t) nell'ipotesi di cippatura della pianta intera e vendita del cippato (scenario 3).

Provincia	prezzo cippato (€/t s.f.)									
	40	48	57	69	82	100	119	143	172	206
Grosseto	140.999	183.965	213.944	232.144	245.567	252.659	258.896	263.445	269.470	273.888
Lucca	22.658	26.607	31.428	37.529	42.438	46.434	49.205	51.263	53.472	54.903
Pisa	64.826	74.469	84.971	92.821	98.792	103.662	108.783	112.762	115.158	115.677
Massa Carrara	26.523	33.946	39.498	43.300	46.291	49.524	51.160	52.264	53.161	53.666
Regione Toscana	684.196	908.599	1.077.583	1.188.059	1.252.672	1.316.721	1.362.526	1.391.592	1.414.834	1.430.141

## 3. Conclusioni

L'esigenza di affrancare le produzioni energetiche nazionali dalla forte dipendenza dai combustibili fossili, ha spinto i Governi dei Paesi industrializzati, ad un esponenziale sviluppo di strumenti finanziari finalizzati a favorire l'uso di risorse rinnovabili. È per questo che negli ultimi anni si sono delineati e attuati, a livello nazionale e regionale, molteplici strumenti di finanziamento per lo sviluppo delle risorse energetiche di origine agroforestale; basti pensare ai decreti attuativi delle ultime Leggi finanziarie, all'introduzione di certificati verdi agricoli, ai finanziamenti previsti dal Ministero dell'Ambiente per il raggiungimento degli obiettivi stabiliti dal Protocollo di Kyoto.

Si tratta, però, di strumenti che esigono un'attenta valutazione delle potenzialità territoriali, sia nazionali che regionali, circa le capacità produttive di risorse energetiche agroforestali utilizzabili secondo criteri di sostenibilità ambientale.

Per quanto riguarda la Toscana è opportuno infatti sottolineare che, l'uso di risorse rinnovabili di origine forestale, è, in realtà, già estremamente diffuso, in quanto la regione rappresenta il primo produttore e consumatore, a livello nazionale, di legna da ardere. Con una produzione media annua di oltre 1,1 milioni di metri cubi utilizzati ogni anno (Tab. 4) la Toscana rappresenta infatti il primo produttore nazionale di combustibili di origine forestale, con una energia equivalente erogata su base annua

<sup>17</sup> Esbosco degli alberi interi a strascico con trattore o con teleferica, rimandando sia la sramatura che la sezionatura all'imposto dove sono presenti mezzi per la cippatura.



di circa 2.700 GWh annui. Questo significa che in Toscana sono presenti micro-filiere, capillarmente diffuse sul territorio e caratterizzate soprattutto da piccole imprese a conduzione familiare talvolta coadiuvate da manodopera dell'Est Europa.

Le filiere e le risorse forestali che andiamo quindi a promuovere e studiare, devono necessariamente basarsi su attività complementare a tale struttura organizzativa, recuperando biomasse tradizionalmente caratterizzate da macchiatici negativi, ovvero: residui delle attività selvicolturali derivati da tagli di diradamento, sfolli, ripuliture di alvei fluviali e da ramaglia prodotta a seguito dei tagli selvicolturali realizzati per la produzione degli assortimenti principali.

In questa ottica il presente lavoro è stato quindi diretto a valutare proprio questi 'assortimenti residuali' che non trovano una collocazione sul mercato del legno tradizionale e che non confliggono, ma anzi integrano, le tradizionali attività selvicolturali. Peraltro, gli attuali prezzi di mercato degli assortimenti principali (soprattutto legna da ardere) non permettono una loro collocazione sulla filiera del legno cippato, caratterizzata da prezzi abbastanza inferiori.

Le metodologie sviluppate ed attuate per la stima delle biomasse residuali localmente disponibili, si sono basate su un modello di analisi territoriale (denominato *GEM: Green Energy Model*) fondato sulla teoria delle risorse rinnovabili e sulla teoria della localizzazione. Si tratta di modelli già applicati in precedenti esperienze (Bernetti, Fagarazzi 2003), ma che in questo caso sono stati ulteriormente implementati con algoritmi capaci di stimare l'offerta locale annua, con un dettaglio di circa mezzo ettaro, valutando sia l'offerta sostenibile dal punto di vista ecologico, sia l'offerta sostenibile dal punto di vista economico. Ovvero: da un lato l'offerta potenziale generata da tutte le superfici forestali della regione, stimata sulla base delle curve di accrescimento dei diversi soprassuoli forestali; e, dall'altro lato, l'offerta generata dalle sole superfici a macchiatico positivo.

Ciò ha portato alla quantificazione, a livello locale, dei diversi assortimenti prodotti dalle aree forestali e alla verifica delle potenzialità di sviluppo di eventuali filiere agroenergetiche, sia in termini di dimensioni, che di localizzazione.

Sulla base dei risultati emersi, i residui forestali dei boschi regionali, valutati rispetto allo scenario 'ecologico' (con produzione congiunta di assortimenti tradizionali e residui da destinarsi al settore energetico), individuano una potenzialità produttiva annua di oltre 956.000 tonnellate di biomasse fresche. L'introduzione delle variabili economiche riduce però sensibilmente le disponibilità potenziali di tale biomassa, raggiungendo appena le 440.000-446.000 tonnellate annue di sostanza fresca (Tab. 7).

Tale drastica riduzione delle potenzialità produttive è principalmente legata alle difficili condizioni stazionali in cui si trovano i nostri boschi, cui si aggiunge la scarsa disponibilità (in alcune aree), di una efficiente rete di viabilità forestale ed extra-forestale.

Ciò significa che la strutturazione di una filiera forestale-legno energia economicamente efficiente, non può prescindere dallo sviluppo di un'adeguata rete viaria forestale e di piattaforme logistiche e commerciali dei combustibili legnosi che favoriscano la gestione forestale anche in aree remote.

I risultati forniti rappresentano dunque una informazione indispensabile per l'attuazione di qualsiasi strumento di finanziamento del settore e per una corretta pianificazione a livello territoriale del settore agroenergetico. I risultati dimostrano infatti

che l'equazione «in questa area il bosco c'è, quindi ci sono tante biomasse forestali» non è valida se non associata all'equazione «in questa area ci sono tante imprese forestali, quindi tanti prodotti legnosi», di conseguenza, appare cruciale che la programmazione di impianti termici e di cogenerazione, debba basarsi su reti energetiche di medio-piccole dimensione, in aree dove sussistono sia boschi utilizzabili con profitto, sia imprese forestali già avviate e capaci di attivare produzioni complementari legate alla produzione di cippato, In tal modo sarà possibile garantire filiere agro-energetiche stabili ed una offerta costante di biocombustibili.

### Bibliografia

- AA.VV. 2006. *Woodland Energy. La filiera legno – energia come strumento di valorizzazione delle biomasse legnose agroforestali*, Programma PROBIO MiPAF, ARSIA.
- AA.VV. 2007. *BIO-SOUTH: Valutazione tecnico-economica della produzione e dell'utilizzo di biocombustibili nei sistemi di riscaldamento e raffreddamento nel Sud Europa*.
- Bernetti I, Fagarazzi C., Sacchelli S., Ciampi C. 2009. *I comparti forestale e di prima trasformazione del Legno*, in ARSIA (a cura di), *Stima della potenzialità produttiva delle agrienergie in Toscana*, Manuale ARSIA, Press Service srl, Sesto Fiorentino, Firenze.
- Bernetti I. 1999. *Il mercato delle biomasse forestali per scopi energetici: un modello di offerta*, «Rivista di Economia Agraria», anno LIII, n. 3.
- Bernetti I., Fagarazzi C. 2003. *BIOSIT: una metodologia GIS per lo sfruttamento efficiente e sostenibile della "risorsa biomassa" a fini energetici*, DE, DEART, ETA.
- Bernetti I., Romano S. 2007. *Economia delle risorse forestali*, Liguori, Napoli.
- Cesano D., Guidi D. 2006. *Opportunità di sviluppo della filiera bosco – legno – energia nel territorio del Mugello*, Ecosoluzioni.
- Fagarazzi C. 1999. *Strumenti di analisi del mercato delle biomasse agro-forestali per uso energetico*, Tesi di dottorato di ricerca in Economia delle Risorse Alimentari e dell'Ambiente, Istituto Universitario Navale, Napoli.
- Fagarazzi C. 2008. *L'offerta di residui legnosi*, in Bernetti I., Fagarazzi C. (a cura di), *Valutazione della domanda di biocombustibili solidi (legno cippato) nell'area dell'Appennino Pistoiese*, Centro Editoriale Toscano, Firenze.
- Hellrig B. 2001. *Numeri per la dendroenergetica*, edizione provvisoria, <<http://www.tesaf.unipd.it/pettenella/papers/AltraDocumentazione/numeri.pdf>>.
- ISTAT 2007. *Le utilizzazioni forestali*, <<http://www.istat.it/agricoltura/datiagri/foreste/>>.
- Johansson P.O., Lofgren K.G. 1985. *The economics of forestry & natural resources*, TJ Press Ltd, Padstow.
- Pearce D. W., Turner R.K. 1989. *Economics of natural resources and the environment*, Hemel Hempstead, Harvester and Wheatsheaf.
- Regione Toscana, ARSIA 2010. *Compagnia delle Foreste. Rapporto sullo stato delle foreste in Toscana 2009*, Litograf Editor, Perugia.
- Regione Toscana 2008. *Modifiche ed integrazioni al prezzo regionale per interventi ed opere forestali di cui al D.G.R. n. 158/2007*, Bollettino Ufficiale della Regione Toscana, n. 5 del 31/12/2008.
- Spinelli R., Nati C., Verani S. 2009. *Protocollo tecnico di utilizzazione dei boschi cedui*, in *La filiera legno energia: risultati del progetto interregionale Woodland Energy*, ARSIA Regione Toscana, Press Service, Firenze.



## Profili curatori

*Claudio Fagarazzi*, è ricercatore confermato presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze. È membro del Centro Interdipartimentale per le Energie Alternative e Rinnovabili (CREAR) dell'Università degli Studi di Firenze, della Società Italiana di Economia Agraria (SIDEA). È titolare del corso di Economia e Valutazioni Ambientali del Corso di laurea Magistrale in Pianificazione e Progettazione della Città e del Territorio e del corso di Valutazione dei beni ambientali al Master di II livello in «Architettura sostenibile delle città mediterranee» dell'Università di Firenze. È autore di oltre 60 pubblicazioni sulle tematiche dell'economia forestale, della valutazione ambientale e della pianificazione territoriale e ambientale tramite l'impiego di modelli di analisi multicriteriale.

*David Fanfani*, è ricercatore in Tecnica e Pianificazione Urbanistica presso la Facoltà di Architettura di Firenze. È docente dei corsi di Laurea triennale e magistrale in Pianificazione presso il polo universitario di Empoli. Si occupa di temi riguardanti la relazione fra pianificazione e sviluppo locale con particolare riferimento all'impiego di metodi di Scenario strategico e al governo del territorio agroforestale. Oltre a numerosi saggi su questi argomenti, ha pubblicato: *L'università del territorio. Reti regionali per lo sviluppo locale: il caso toscano* (Alinea, Firenze, 2001), e *Pianificare tra città e campagna. Scenari, attori e progetti di nuova ruralità per il territorio di Prato* (Firenze University Press, Firenze, 2009), *Patto Città-Campagna. Un progetto di Bioregione urbana per la Toscana Centrale* (Alinea, Firenze, 2010) (con A. Magnaghi).



## TERRITORI

Il tema della pianificazione energetica è tornato ad assumere negli ultimi anni una crescente importanza sia in relazione ai crescenti costi, scarsità ed impatti che l'approvvigionamento e consumo energetico comporta sia in relazione alle prospettive, sempre più ampie, determinate dallo sviluppo delle tecnologie per lo sfruttamento di fonti rinnovabili. In questo quadro lo sviluppo ed impiego di queste ultime tecnologie appare spesso privo di riferimenti ed integrazione con il più ampio quadro della pianificazione del territorio e, dunque, di coordinamento con le altre attività antropiche e risorse territoriali. In questo quadro il libro cerca di comporre gli elementi di una prospettiva in cui la pianificazione energetica non si configuri come una ulteriore "pianificazione separata" ma come una attività integrata con i più generali strumenti di governo del territorio e, in particolare, in grado di impiegare in maniera sostenibile le risorse del territorio anche in una prospettiva di sviluppo locale endogeno.

**Claudio Fagarazzi**, Ricercatore presso l'Università di Firenze, si occupa, nell'ambito delle discipline agro-forestali e della Economia Agraria, di energie alternative e rinnovabili. È docente del Corso di laurea Magistrale in Pianificazione e Progettazione della Città e del Territorio e di Master di II livello. È autore di numerose pubblicazioni sulle tematiche dell'economia forestale, della valutazione ambientale e della pianificazione territoriale e ambientale.

**David Fanfani**, Ricercatore in Pianificazione Urbanistica presso la Facoltà di Architettura di Firenze. È docente del corso di laurea magistrale in Pianificazione presso il polo di Empoli. Si occupa di temi riguardanti la relazione fra pianificazione e sviluppo locale con particolare riferimento al governo del territorio agro-forestale. Su questo è autore di numerose pubblicazioni fra le quali *Patto Città-Campagna. Un progetto di Bioregione urbana per la Toscana Centrale* (Firenze, Alinea 2010) (con A. Magnaghi).

22,90 €

