

FILIERA LEGNO-ENERGIA

UN SUPPORTO ALLA REDAZIONE DEI PIANI DI APPROVVIGIONAMENTO
DI BIOMASSA LEGNOSA PER FINI ENERGETICI



FORESTE IN LOMBARDIA: una risorsa multifunzionale

FUNZIONI, CARATTERISTICHE E SUPERFICI

In base al più recente Inventario Forestale Nazionale (2015) **le foreste lombarde coprono 692.220 ha (26% della superficie regionale totale)**. La forma di governo a fustaia occupa una superficie di 246.000 ha, mentre i cedui raggiungono 302.000 ha (per la maggior parte adulti e invecchiati in misura pari al 63% e 32%, rispettivamente). Le categorie forestali più rappresentate sono: abete rosso (15%), castagneti (14%) e ostrieti-carpineti (14%).

L'area basimetrica e il volume legnoso medio sono rispettivamente di 26 m²/ha e 215 m³/ha, tra i più alti a livello nazionale. L'abete rosso mostra i volumi unitari più alti (382 m³/ha), seguito dai castagneti (260 m³/ha). L'incremento medio annuo lordo ammonta a 5,6 m³/ha nei cedui e 6,6 m³/ha all'anno nelle fustaie.

Relativamente alla proprietà, quella **privata copre il 64%** della superficie forestale, mentre quella **pubblica ammonta al 35%**. La disponibilità al prelievo legnoso è stimata su una superficie complessiva di circa 542.000 ha (87% della superficie forestale regionale). **Ogni anno si preleva circa il 15% dell'incremento annuo lordo**. Oltre l'85% di tale quantità viene impiegata come legna da ardere. **Nonostante ciò, nel 41% dei boschi regionali la gestione non è effettuata e nel 39% sono applicate pratiche selvicolturali minime**. Secondo il più recente Rapporto sullo Stato delle Foreste di Lombardia (2020), nel 2019 i boschi hanno assorbito oltre 3 milioni di tonnellate di CO₂, pari alle emissioni medie annue di oltre 617.000 cittadini lombardi.

GESTIONE E PIANIFICAZIONE FORESTALE IN LOMBARDIA ^{*1,2,4}

LA GESTIONE FORESTALE SOSTENIBILE

La strategia dell'Unione Europea per le foreste del 2030 riconosce a queste un ruolo fondamentale nell'economia e nella società, creando posti di lavoro, materie prime, acqua pulita e molto altro.

Riconosce inoltre alle foreste un fondamentale ruolo di alleate all'adattamento e lotta ai cambiamenti climatici, in accordo con il «Green Deal europeo». La multifunzionalità delle foreste contribuisce ad un'economia sostenibile e climaticamente neutra e garantisce ricostruzione, resilienza ed adeguata protezione di tutti gli ecosistemi, in accordo con la "Strategia sulla biodiversità per il 2030". La stessa Strategia europea sottolinea come questi obiettivi possano essere raggiunti adottando pratiche di gestione forestale realmente sostenibili alle quali affiancare un uso a cascata del legname ed un uso circolare della risorsa legno. La gestione sostenibile delle foreste deve tenere conto delle loro caratteristiche e dei tre pilastri della sostenibilità: ambientale, economica e sociale.

In Italia, il Testo unico in materia di foreste e filiere forestali (D. Lgs. 34/2018) riconosce e promuove la Gestione forestale sostenibile o gestione attiva quale "strumento programmatico e operativo di scelta responsabile, in grado di portare le diverse esigenze dell'economia, dell'ambiente e della società sul territorio al fine di garantire la conservazione delle foreste e la fornitura di beni e relativi Servizi ecosistemici".

Il progetto USEFOL ha tra i suoi obiettivi quello di proporre un modello di gestione sostenibile delle foreste, nell'ambito delle aree pilota, che a partire dalla pianificazione definisca le migliori strategie di utilizzo di questa risorsa fino alla fornitura dei prodotti finali.

STIMA DELLE BIOMASSE IN BOSCO

La prima fase della gestione forestale sostenibile è l'analisi della risorsa forestale presente su un territorio, con l'obiettivo di fornire beni e servizi alle filiere economiche e alla società, tenendo conto dei limiti e delle criticità presenti.

La stima può essere svolta a diverse scale di indagine, a partire da fonti già disponibili per il territorio, da documenti redatti appositamente o da misure "ad hoc". **La stima dei volumi e degli incrementi è la base quantitativa per pianificare una gestione forestale sostenibile.** Di seguito sono brevemente illustrati i principali strumenti di pianificazione previsti sia dal "Testo unico in materia di foreste e filiere forestali (TUFF)" sia dalla **normativa forestale della Regione Lombardia**.

PIANI DI INDIRIZZO FORESTALE

Il TUFF individua nei Piani forestali di Indirizzo Territoriale (PFIT) uno strumento di pianificazione rivolto a territori omogenei per caratteristiche ambientali, paesaggistiche, economico-produttive o amministrative. L'obiettivo dei PFIT è individuare, mantenere e valorizzare le risorse silvo-pastorali e coordinare le attività necessarie alla loro tutela e gestione attiva.

I piani devono contenere:

- a)** le destinazioni d'uso delle superfici, gli obiettivi e gli indirizzi di gestione per la loro tutela, gestione e valorizzazione;
- b)** le priorità d'intervento necessarie al raggiungimento degli obiettivi;
- c)** il coordinamento tra i diversi livelli di programmazione e pianificazione vigenti, in conformità con i piani paesaggistici regionali e la gestione delle aree naturali protette;
- d)** gli interventi strutturali e infrastrutturali al servizio del bosco e le azioni minime necessarie allo sviluppo delle filiere forestali locali;
- e)** gli indirizzi di gestione silvo-pastorale per la redazione degli strumenti di pianificazione.

In Regione Lombardia la normativa individua nei Piani di Indirizzo Forestale (PIF) i piani forestali alla scala territoriale. Sono delegati al PIF la delimitazione delle aree classificate "bosco", la regolamentazione dei cambi di destinazione d'uso di bosco e pascolo e l'individuazione degli indirizzi selvicolturali generali. I PIF hanno una durata di 15 anni. A fine 2022 risultano vigenti 55 piani (82% della superficie regionale), 18 sono in redazione, 3 in istruttoria, mentre 13 comprensori sono ancora privi di tale strumento.



PIANI DI ASSESTAMENTO FORESTALE

Il TUFF definisce come strumento di pianificazione di maggior dettaglio, indispensabile a garantire tutela, valorizzazione e gestione della risorsa, i Piani di Gestione Forestale o strumenti equivalenti. Questo livello di pianificazione interessa il singolo proprietario pubblico o privato, e può essere redatto a scala aziendale o sovraziendale, in conformità con i PFIT.

In Regione Lombardia sono definiti i “Piani di Assestamento Forestale” (PAF) con lo scopo di quantificare le superfici boscate, il loro volume e incremento, e programmare gli interventi di gestione. La durata dei PAF è 15 anni.

La Lombardia ha una lunga tradizione di pianificazione, con piani redatti a par-

tire dal 1928 e una diffusione capillare nell’ambito della proprietà pubblica.

Al 2021 risultano vigenti 82 PAF con una prevalenza assoluta di piani redatti per la proprietà pubblica (56). Seguono proprietà privata (16), mista (7) e collettiva (3).

I piani ricadono per il 98% in territori montani, interessando qui circa 149.200 ha di bosco, pari circa al 30% dei boschi di questa fascia altitudinale. Ricadono in queste superfici i PAF riferiti a Peccete (18,9%), Lariceti, Larici-cembrei e Cembrei (18,4%) e Faggete (12,6%).

Per la redazione di piani di approvvigionamento, il PAF è da ritenersi lo strumento conoscitivo più adeguato.

LE STIME CON DATI TELERILEVATI

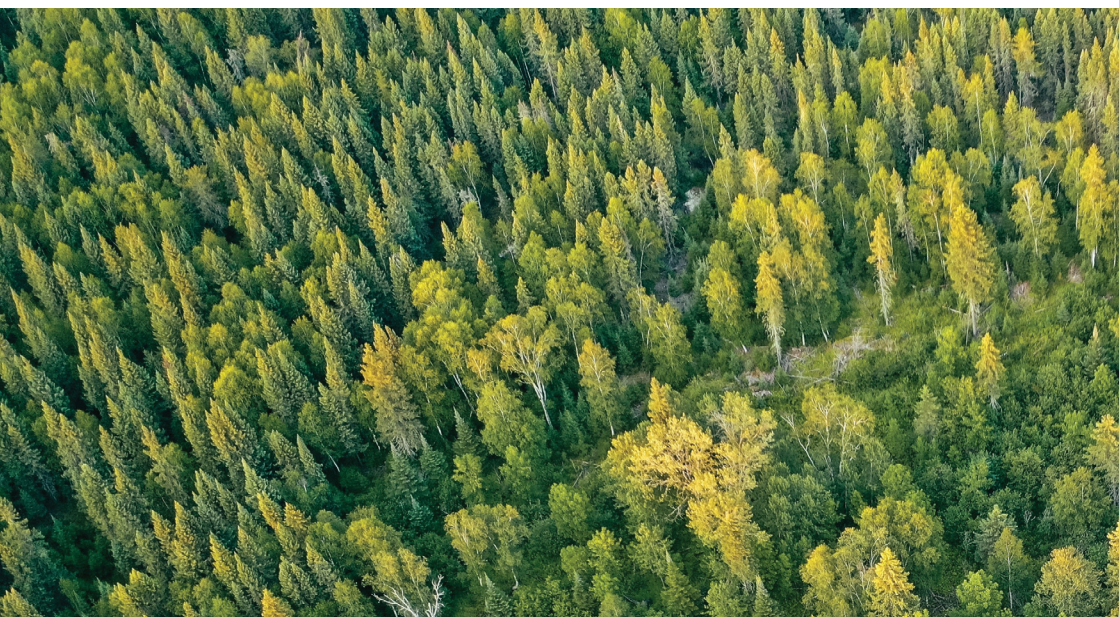
In assenza degli strumenti di pianificazione sopra illustrati, è possibile stimare la risorsa legnosa attraverso l'utilizzo di tecnologie di telerilevamento da drone, aereo o satellite utilizzando immagini multispettrali e dati LiDAR. In particolare, le tecnologie satellitari offrono dati con qualità sempre più elevata, spesso gratuiti e sempre aggiornati; aspetti questi rilevanti ai fini del monitoraggio nel tempo della risorsa legnosa.

Per ottenere stime accurate su volume, massa e composizione delle foreste, occorre sempre integrare i dati telerilevati con i dati misurati a terra, mediante modelli matematici che mettono in relazione queste due tipologie di dato.

Il progetto USEFOL ha costruito un modello a scala locale per mettere in

relazione il volume legnoso stimato in campo e le stime di altezza degli alberi fornite dal LiDAR satellitare (missione GEDI). I dati GEDI utilizzati (L2A) contengono informazioni relative alla quota del suolo, all'altezza massima degli alberi e alla distribuzione delle altezze degli alberi all'interno di plot circolari con diametro di 25 metri.

La stima del volume legnoso su tutta la superficie delle aree pilota è stata realizzata con un modello basato su immagini multispettrali Sentinel-2 a 20 metri di risoluzione spaziale. Il prodotto finale di tale elaborazione è una carta in formato raster dei volumi legnosi che, incrociata con altri strati informativi come i tipi forestali, fornisce la base conoscitiva per la redazione dei piani di approvvigionamento.



RILIEVI "AD HOC"

Il rilievo del volume legnoso e dell'incremento in bosco richiede la scelta di aree di saggio rappresentative, la misura accurata del diametro a petto d'uomo e dell'altezza di alberi campione, l'utilizzo di equazioni allometriche per stimare il volume legnoso e la raccolta di carote incrementali per stimare l'incremento annuo. La prima fase consiste nella scelta delle aree di saggio, che devono essere rappresentative della foresta da analizzare e in numero sufficiente da produrre stime statisticamente robuste. Nelle aree di saggio si misurano specie e diametro ad altezza petto di tutti gli alberi, e l'altezza di alcuni alberi campione (minimo 30 per specie in tutto), con l'uso di ipsometri analogici o digitali, al fine di costruire una relazione matematica altezza-diametro per ogni specie. Una volta raccolti i dati,

si utilizzano le equazioni allometriche, come quelle pubblicate dall'Inventario Forestale Nazionale, che permettono di stimare il volume legnoso e la massa degli alberi campione, a partire dalle misure del diametro e dell'altezza. Per stimare l'incremento annuo si possono utilizzare le carote incrementali, prelevando un campione di legno dal tronco dell'albero campione e contando gli anelli di accrescimento nel centimetro di legno più esterno. Questo dato, inserito in apposite equazioni come la formula di Schneider, consente di calcolare l'incremento percentuale dell'albero e della sua classe diametrica, convertendo infine la stima in incremento corrente assoluto per il popolamento.



PIANI DI APPROVVIGIONAMENTO DI BIOMASSA LEGNOSA PER FINI ENERGETICI ^{*1,2,4}

CRITERI DI ESCLUSIONE E IMPIEGO A CASCATA DEL LEGNO

Nel processo di definizione delle potenzialità produttive di un comprensorio nel sostenere una filiera legno-energia è di estrema importanza valutare attentamente tutti i fattori che possono concorrere nel limitare o impedire l'utilizzo della risorsa legnosa.

Queste limitazioni possono derivare dalle caratteristiche del bosco (specie, stadio evolutivo, volume, tasso di accrescimento, presenza di disturbi), dalla sua localizzazione nel territorio (morfologia ed accessibilità) o dalla normativa (livello di protezione, limitazioni da regolamento forestale o da piano di gestione in vigore). Nel definire quindi i volumi di legno prelevabili in modo sostenibile nel medio-lungo periodo ai fini dell'approvvigionamento di una filiera legno-energia, è indispensabile escludere dal prelievo

o ridurre con opportuni coefficienti:

- **categorie forestali di scarso interesse** ai fini dell'utilizzo a cascata del legno (es. alneti, corileti, formazioni a maggiociondolo, mughete, betuleti);
- **popolamenti forestali** che per limiti stagionali o stadio evolutivo si caratterizzano per **bassi valori di biomassa o incremento corrente annuo**;
- **popolamenti interessati da disturbi naturali** la cui ricostituzione richiede l'assenza di ulteriori disturbi (es. incendi, schianti da vento, attacchi parassitari);
- **popolamenti che si sviluppano su comprensori ad elevato rischio di dissesto idrogeologico** (es. frane attive, scivolamenti, aree a rischio di inondazione/allagamento);

- **popolamenti con una funzione prevalente diversa dalla funzione produttiva** (es. boschi di protezione diretta, boschi a valenza turistico-ricreativa, boschi inclusi in aree protette);
- **popolamenti difficilmente accessibili** per assenza di un'adeguata viabilità forestale a servizio del sito di prelievo.

Tutti questi elementi possono essere dedotti incrociando le informazioni derivanti dalla pianificazione forestale (PFIT, PIF, PGF, PAF) con gli strati informativi disponibili per il territorio in esame quali le cartografie tematiche relative ai vincoli territoriali, dissesto idrogeologico, aree protette, viabilità, disturbi, e con le stime di volume e incremento precedentemente ricavate.



Funzione di protezione:

le foreste proteggono i nuclei abitati, le strade e altre infrastrutture dalla caduta di massi e dalle valanghe.



Funzione turistico-ricreativa:

le foreste ci consentono di apprendere, conoscere, praticare sport, o più semplicemente rilassarci.



Funzione di conservazione della biodiversità: boschi diversi costituiscono habitat diversi, adatti alle esigenze di vita di molteplici specie animali e vegetali.



Funzione di produzione:

le foreste producendo prodotti legnosi e non legnosi forniscono materie prime e reddito.



Funzione paesaggistica:

le foreste connotano il paesaggio montano lombardo.



Funzione di stoccaggio di CO₂:

attraverso la fotosintesi, gli alberi trasformano l'anidride carbonica contenuta nell'aria in carbonio organico incorporato nel legno.

CRITERI DI PRELIEVO

Nel definire un piano di approvvigionamento della filiera legno-energia è necessario definire i possibili scenari di gestione che il territorio esaminato può sostenere nel tempo ipotizzando un'evoluzione dell'utilizzo della risorsa legnosa dettata da contesti economici e climatici mutevoli.

Per tale motivo, pur rimanendo fermo un approccio di gestione forestale sostenibile, può essere utile definire tre scenari di gestione individuati secondo i seguenti criteri:

- 1 **“scenario ordinario”** basato sull'utilizzo attuale della risorsa legnosa definita attraverso statistiche di prelievo registrate a scala di Regione e nel rispetto dei limiti imposti dalla normativa;
- 2 **“scenario di adattamento climatico”** basato sulla necessità di applicare interventi selvicolturali e strategie finalizzati ad incrementare resistenza e resilienza dei popolamenti forestali;
- 3 **“scenario di massimizzazione di produzione di legname da opera”** basato sulla necessità di applicare interventi selvicolturali e strategie finalizzati ad incremen-

tare la produzione di assortimenti legnosi di qualità per l'edilizia (a sostituzione di materiali ad elevato tasso di emissione di CO₂).

Le percentuali di prelievo legnose possono quindi, per singola categoria forestale, essere definite, all'interno di ogni scenario applicato, sulla base della funzione prevalente del popolamento e dell'eventuale presenza/assenza di fattori di esclusione o limitazione.

Il confronto tra gli scenari così ottenuti, nell'ambito di un periodo di 30 anni, **consente di valutare se tutte le opzioni messe in campo siano da ritenersi sostenibili ai fini della creazione e permanenza di una filiera legno-energia** nel medio-lungo periodo o se in opposto sia necessario attuare scelte di pianificazione diverse alla luce di eventuali criticità intrinseche alla filiera o indotte da fattori ad esso esterno. **Il processo di utilizzo a cascata del legname nei diversi scenari è definito infine applicando percentuali di perdite di lavorazione nelle diverse fasi di trasformazione del legno**, passando dal bosco alla segheria sino alla centrale termica. Le perdite di lavorazione sono valutate ed applicate a partire dalla specie legnosa (conifera o latifolia) e dall'assortimento ritraibile sulla base della dimensione del fusto (diametri e lunghezze).



EFFETTI DELL'USO DI BIOMASSA SU CICLO DEL CARBONIO E CRISI CLIMATICA

Uno dei risvolti più importanti dei prelievi di biomassa legnosa è il suo potenziale effetto di mitigazione della crisi climatica. Il legno può essere usato per produrre energia termica e elettrica, nonché biocarburanti e idrogeno verde.

Si tratta di una **risorsa rinnovabile**, poiché la gestione forestale può garantirne la continuità nel tempo e, diversamente dai materiali fossili e minerali. Proprio la sostituzione di questi ultimi comporta l'effetto più interessante dal punto di vista climatico: **la biomassa legnosa può provenire da filiere con impatti climatici molto bassi e può sostituire materiali con impronte carboniche elevate** come i combustibili fossili, il cemento e l'acciaio.

La biomassa vegetale è formata da composti organici, quindi rappresenta un serbatoio di carbonio sottratto all'atmosfera con una vita media pari a quella

dei prodotti che si generano a partire da essa. Ciononostante, **non è corretto sostenere che la biomassa legnosa che viene combusta ha un impatto nullo in termini di gas climalteranti**, per due motivi principali.

Il primo è che la filiera del legno comporta emissioni fossili dovute al taglio, alla lavorazione e al trasporto dei prodotti e emissioni biogeniche legate alla produzione di scarti che, decomponendosi, aumentano temporaneamente le emissioni dei boschi.

Il secondo motivo è che ogni prelievo comporta un'attesa di diversi anni affinché la foresta, crescendo, riassorba il carbonio emesso con la combustione; un tempo di attesa troppo lungo (oltre i 20-25 anni) rischia di aumentare eccessivamente le concentrazioni di CO₂ in atmosfera nel breve termine e di mettere in dubbio il riassorbimento del carbonio a causa degli stress climatici a cui la foresta in crescita potrebbe essere soggetta.

IMPATTO DEL PRELIEVO DI BIOMASSA SU ALTRI SERVIZI ECOSISTEMICI E BIODIVERSITÀ

Criteria UE di sostenibilità per il prelievo di biomassa a fini energetici

Le foreste offrono una moltitudine di servizi ecosistemici, come il sequestro di carbonio, la regolazione del ciclo idrologico e il supporto alla biodiversità. Il prelievo di legno ha impatti su tutti questi servizi.

Asportare legname comporta sempre una diminuzione temporanea dello stock di carbonio e con esso la disponibilità di habitat per le specie forestali. Prelievi troppo intensi o frequenti, la rimozione del legno morto, delle ceppaie e dei residui fini possono causare erosione dei suoli, la riduzione degli orizzonti organici e la perdita di nutrienti come azoto

e fosforo. Infine, l'impianto di alberi a rapido accrescimento per la produzione di biomassa energetica su vasta scala comporta grandi rischi per la biodiversità legata agli ecosistemi preesistenti.

Ciononostante, sono diversi gli studi che puntano ad armonizzare le necessità della filiera del legno alla fornitura di servizi ecosistemici, minimizzando gli impatti negativi con un prelievo attentamente calibrato. In alcuni casi i prelievi possono addirittura avere un effetto positivo, come nel caso della selvicoltura preventiva nei confronti degli incendi boschivi o di diradamenti mirati ad aumentare la resilienza alla siccità.



La proposta di aggiornamento della Direttiva Europea sulle Energia Rinnovabili, approvata da Parlamento, Commissione e Consiglio UE nel marzo 2023, stabilisce che sarà esclusa da incentivi economici l'energia elettrica prodotta utilizzando in grandi impianti (7.5 MW) tronchi da sega e da impiallacciatura, legname industriale, ceppaie e radici, in contrasto con il principio dell'**uso del legno a cascata**. Anche il legname provenien-

te da foreste vetuste e da aree protette non sarà incentivabile. Oltre a ciò, **ogni paese membro dovrà pianificare la propria produzione di bioenergia all'interno dei Piani Nazionali per l'Energia e il Clima**, assicurando il rispetto degli obiettivi di sequestro del carbonio obbligatori e dei target nazionali di mitigazione del cambiamento climatico.



MECCANIZZAZIONE FORESTALE*3

OPERAZIONI FORESTALI: MACCHINE E CANTIERI DI LAVORO

Le operazioni forestali possono essere eseguite con macchine diverse, il cui impiego influenza la produttività del lavoro e, quindi, i relativi costi.

Nell'**abbattimento** con motosega (soluzione più diffusa nei contesti alpini italiani) la produttività del lavoro (m^3/h , t/h) varia - principalmente in funzione di: diametro alla base del fusto, densità popolamento, pendenza e accidentalità del terreno - da 1 per tagli intercalari (sfolli e diradamenti) a $3 m^3/h$ per tagli di maturità. Tali valori corrispondono a $0,5-1,5 t/h$ SS (sostanza secca), considerando una densità basale media pari $m_{SS}/V_{TQ} = 0,5 t/m^3$ (rapporto tra massa legnosa anidra, umidità $U = 0\%$ e volume allo stato fresco, $U \geq 30\%$).

Applicando un processore a un trattore (TR) agricolo o forestale o a una macchina movimento terra è possibile eseguire contemporaneamente **sramatura e depezzatura**, aumentando la produttività del lavoro a $10-15 m^3/h$ ($5-7,5 t/h$ SS) e $15-40 m^3/h$ ($7,5-20 t/h$ SS) rispettiva-

mente con la prima e la seconda opzione. Il processore è particolarmente indicato per le conifere, causa la loro ridotta ramosità.

Nel **concentramento ed esbosco** con TR + carro, TR + pianale di carico e TR + verricello (FIGURA 1 sinistra) la produttività del lavoro dipende dalle condizioni operative (distanza da percorrere, massa trasportata, velocità medie di trascinamento - nel caso di concentramento con verricello - e percorrenza, accidentalità e pendenza del terreno), variando da $3-6 m^3/h$ ($1,5-3 t/h$ SS; TR + verricello) a $5-12 m^3/h$ ($2,5-6 t/h$ SS; TR + carro/pianale). L'impiego della teleferica permette, invece, di svincolarsi da molte **condizioni operative sito-specifiche**.

La produttività del lavoro delle gru a cavo a stazione motrice mobile (FIGURA 1 destra: tipologia di teleferica più diffusa nei nostri contesti alpini grazie alla possibilità di caricare il materiale in qualsiasi punto lungo la linea e concentrare sotto la linea più fusti lateralmente rispetto a essa, fino a una distanza di 30 m) varia - escludendo i tempi di montaggio e smontaggio della linea - da $3 a 12 m^3/h$ ($1,5-6 t/h$ SS) in funzione di: capacità di carico della gru

(0,6-3 t), distanza e senso di esbosco (indicativamente: 4-6 viaggi/h per esbosco in discesa e distanze ≤ 600 m; 2-4 viaggi/h operando in salita a più di 600 m) e velocità del carrello.

Il **carico e trasporto** sono attuati con TR + carro/pianale (d $\leq 15-20$ km, 5-12 m³/h, pari a 2,5-6 t/h SS), in base a capacità di carico del mezzo, distanza e velocità di percorrenza. Per distanze supe-

riori si utilizzano più convenientemente autotreni o autoarticolati.

La **biomassa residuale** (ramaglia e cimali per le conifere) è di norma sottoposta, prima del trasporto, a **cippatura**, la cui produttività dipende dal diametro del materiale da sminuzzare (da 10 a 20 m³/h, pari a 2-4 t/h SS per cippatrici accoppiate a TR, oltre nel caso di macchine azionate da motore endotermico autonomo).



FIGURA 1 - Sinistra: esbosco con TR + verricello (archivio Compagnia delle Foreste S.r.l.).
 Destra: esbosco con gru a cavo a stazione motrice mobile (archivio Compagnia delle Foreste S.r.l.).

CRITERI DI SCELTA DEI CANTIERI DI LAVORO

Nell'ambito del Progetto USEFOL è stato studiato e realizzato da UniMi-DiSAA un **modello (denominato "FOREMA") per la scelta ottimale del cantiere di meccanizzazione da allestire per il recupero** (raccolta e trasporto) della biomassa disponibile in ciascuna particella forestale. Il modello si compone di un **database** e di un' **interfaccia per l'utente**.

Nel database i possibili cantieri di lavoro sono individuati combinando diverse

"Categorie" che caratterizzano sette "Parametri Tecnici", a loro volta aggregati nei seguenti "**Fattori Limitanti**": (1) caratteristiche della foresta; (2) caratteristiche del sistema produttivo e (3) condizioni operative sito-specifiche (**TABELLA 1**).

In base al "**Metodo di Lavoro**", è stabilita la sequenza delle Operazioni (OP) sulle quali è organizzato il cantiere di meccanizzazione (**TABELLA 2**).

N.	Fattore limitante	N.	Parametro Tecnico	Categoria
1	Caratteristiche della Foresta	1	Modalità di gestione	Ceduo
				Fustaia
2	Caratteristiche del sistema produttivo	2	Assortimento legnoso	Legna da ardere
				Travi/paleria
				Cippato
		3	Metodo di lavoro	Legno corto
				Fusto intero
				Albero intero
4	Livello tecnologico macchine	Basso		
		Medio-alto		
3	Condizioni operative sito-specifiche	5	Classe di transitabilità strada forestale	Medio-alta
				Medio-bassa
		6	Classe di accessibilità particella forestale	Alta
				Media
				Bassa
		7	Massa legnosa recuperata	$\leq 15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ SS}$
$> 15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ SS}$				

TABELLA 1 - Fattori limitanti, parametri tecnici e categorie (Legenda: SS = sostanza secca).

Conseguentemente, per ciascuna OP, FOREMA definisce la **“Tipologia” delle macchine potenzialmente utilizzabili** (TABELLA 3).

Ciascuna Tipologia di macchina è caratterizzabile da un **“Livello Qualitativo di Impiego”** (basso; medio; alto) che ne esprime la facilità d’uso, fondamentale legata alla sua manovrabilità e ma-

neggevolezza nelle condizioni operative selezionate dall’operatore. Nella sua interfaccia, FOREMA richiede all’operatore di: individuare le “Categorie” che compongono ciascun “Parametro Tecnico”, selezionando poi – per ciascuna OP – la “Tipologia di macchina” che si intende impiegare, in base ai suggerimenti del database.

Operazioni (OP)	Metodo di lavoro		
	Legno corto	Fusto intero	Pianta intera
Abbattimento	Prima	Prima	Prima
Sramatura	Seconda	Seconda	Quarta
Sezionatura	Terza	Quinta	Quinta
Concentramento	Quarta	Terza	Seconda
Esbosco	Quinta	Quarta	Terza
Cippatura	-	-	Sesta
Carico e trasporto	Sesta	Sesta	Settima

TABELLA 2 - Sequenza delle OP in base al metodo di lavoro, con riferimento ai contesti alpini italiani.

Operazioni (OP)	Metodo di lavoro		
	Legno corto	Fusto intero	Pianta intera
Abbattimento	Motosega	Motosega	Motosega
Sramatura			Motosega; TR + processore
Sezionatura		TR + verricello; TR + carro; TR + pianale; teleferica	
Concentramento	-	-	TR + verricello; teleferica
Esbosco			Cippatrice
Cippatura	Sesta	Sesta	Settima
Carico e trasporto			

TABELLA 3 - Tipologie di macchine più impiegate nei contesti alpini in base al metodo di lavoro (Legenda: TR = trattore agricolo/ forestale).

COSTI E PARAMETRI AMBIENTALI DEI CANTIERI DI LAVORO

Conoscere i costi delle OP meccaniche è indispensabile sia per i soggetti che devono redigere i bilanci aziendali, sia per i decisori pubblici che devono ottimizzare l'impiego delle risorse tecniche e umane e programmare interventi selvicolturali. Se tali costi sono calcolati accuratamente, è possibile avvalersi di alcuni parametri anche per quantificare i potenziali impatti sull'ambiente.

I costi di ciascuna OP meccanica (e, dunque, di un intero cantiere formato da più OP) sono, di norma, calcolati considerando i **Costi Fissi** (CF; €/anno) e i **Costi Variabili** (CV; €/h) dei mezzi coinvolti, e vengono espressi su base temporale (costo orario; €/h).

I **CF** (ammortamento, assicurazioni, tasse e spese di ricovero) sono indipendenti dal tempo di utilizzo (h/anno) della macchina e, pertanto, sono presenti anche se la macchina è ferma.

I **CV** sono, invece, proporzionali all'uso della macchina e sono relativi a:

- **consumi diretti** (carburante, additivi, lubrificanti, eventuali altri beni consumabili);
- **manutenzioni ordinarie** e riparazioni;
- **addetti**.

Nel caso di operazioni condotte accoppiando TR + operatrice, CF e CV vanno calcolati per entrambe le macchine in base ai rispettivi **parametri tecnico-economici** (durata fisica, obsolescenza tecnica, coefficienti di manutenzione e riparazione), tenendo presente che - per i TR - l'impiego annuo è dato dall'uso con tutte le macchine.

Durante il "ciclo di vita" della macchina **oltre ai consumi diretti, vi è un progressivo "consumo"** (al netto di quanto sarà recuperabile al suo smaltimento) **di materiali e di risorse primarie con i quali la macchina è stata inizialmente costruita e mantenuta**. In aggiunta, **si ha l'immissione in suolo, acqua e aria di inquinanti**, i principali dei quali sono: i gas di scarico dei motori particolare (in atmosfera), metalli pesanti dovuti all'abrasione degli pneumatici (nel suolo).

Per calcolare i costi economici e i principali parametri ambientali di una generica OP meccanizzata, è stato realizzato da UniMi-DiSAA il **modello di simulazione "ENVIAM"**, implementato nel Progetto USEFOL. In ENVIAM, l'OP viene scomposta in **13 "tempi di esecuzione"** (h), per ciascuno dei quali sono calcolati i consumi (carburante, lubrificanti, additivi) e le corrispondenti quantità di inquinanti. Le masse dei composti inquinanti (CO₂, CO, HC, NOx e PM) sono calcolate in funzione del carico (rapporto tra potenza



richiesta dalla macchina e potenza nominale del motore), variabile in ciascuna fase della OP. I consumi dei principali materiali costruttivi (acciaio e altri metalli, vetro, plastiche e gomme ecc.) e il rilascio di alcuni metalli pesanti nel suolo (Cd, Pb, Zn) e l'abrasione degli pneuma-

tici sono, invece, calcolati tenendo conto del tempo totale di esecuzione dell'OP (h) rispetto alla durata fisica (h) della macchina.

IMPIEGO DELLA BIOMASSA LEGNOSA ^{*3}

CARATTERISTICHE ENERGETICHE DEI BIOCOMBUSTIBILI

Le principali caratteristiche da considerare in un biocombustibile sono: Potere Calorifico Inferiore, umidità (su base umida), Potere Calorifico Netto, tenore in ceneri, massa volumica apparente, granulometria, densità energetica.

Il **Potere Calorifico Inferiore** (PCI; MJ/kg SS) indica l'energia termica liberata dalla combustione completa - in eccesso di aria e pressione costante - dell'unità di massa anidra del biocombustibile, al netto del calore latente di evaporazione dell'acqua ($c_{EV} = 2,447 \text{ MJ/kg H}_2\text{O}$)

prodotta nella reazione di ossidazione. Per le più diffuse specie alpine si ha $PCI = 18-19 \text{ MJ/kg SS}$.

L'**umidità su base umida** (U; % TQ) è il rapporto tra massa di acqua e la massa tale quale (TQ). All'**abbattimento** - a seconda di: specie legnosa ed epoca di taglio - tale valore è, di norma, pari al 40-45%.

Il **Potere Calorifico netto** (PCN; MJ/kg TQ) è l'energia liberata dall'unità di massa di biocombustibile TQ, al netto del calore latente di evaporazione della massa di acqua libera (umidità) presente nel biocombustibile.





FIGURA 1 - Sinistra: cippatura integrale di una fustaia di conifera (archivio Compagnia delle Foreste S.r.l.).
 Destra: legno cippato (archivio Compagnia delle Foreste S.r.l.).

Il **tenore in ceneri** (A ; % SS) esprime la massa delle componenti minerali (assorbiti dalla pianta) rispetto alla massa anidra. A seconda di: specie legnosa, caratteristiche del terreno, porzione della pianta (legno o corteccia), **$A = 0,5-2,5\%$** . Il tenore in ceneri ha un significato pratico importante, determinando sia soluzioni e modalità di evacuazione delle ceneri dai dispositivi termici, sia il relativo costo di smaltimento.

La **massa volumica apparente** (γ_A ; kg/m^3) è il rapporto tra la massa di biocombustibile e il volume occupato così come questo è allestito e stoccato; ne deriva che tale parametro - al contrario della densità (γ ; kg/m^3) - considera anche i volumi vuoti tra le singole unità di biocombustibile. γ_A può essere riferita alla massa anidra (kg/m^3 SS) o alla massa tal quale (kg/m^3 TQ). In quest'ultimo caso, il valore assume enorme importanza nel determinare volumi e costi di trasporto-stoccaggio. Nel caso di legna da ardere con $U = 40-45\%$, si ha **$\gamma_A = 300-400$ o $600-700$ kg/m^3 TQ**

se allestita in tronchetti (rispettivamente stoccati in catasta riversata o ordinata), **$\gamma_A = 250-350$ kg/m^3 TQ** se in forma di cippato in cumulo (**FIGURA 1**).

La **granulometria** definisce le dimensioni medie (V_U ; cm^3) di una singola unità fisica di biocombustibile: nell'allestimento in tronchetti si ha **$V_U = 3.300-4.000$ cm^3** ; nel caso di cippato **$V_U = 0,8-12$ cm^3** , in funzione della tipologia e della modalità di impiego della cippatrice. Tale parametro condiziona le modalità di carico del dispositivo termico: esclusivamente manuale e discontinuo nel caso di tronchetti, meccanico e continuo con cippato.

La **densità energetica** (DE ; MJ/m^3) rappresenta l'energia termica contenuta nell'unità di volume ed è calcolabile come prodotto tra suo PCN e γ_A del biocombustibile (espressa sul TQ). La DE è fondamentale nel **confronto di differenti combustibili (da fonte rinnovabile e non) in termini di costi unitari ($\text{€}/\text{MJ}$) di trasporto o stoccaggio dell'energia.**



CARATTERISTICHE DEI GENERATORI TERMICI

La legna in tronchetti (combustibile legnoso più usato) è impiegata in generatori di **potenza termica nominale** (trasferita al fluido termovettore) $PT_N < 30$ kW caricati manualmente e saltuariamente per la copertura di fabbisogni termici domestici o piccole unità produttive.

Il **rendimento termico** (η_T) è dato dal rapporto tra la potenza termica nominale e la potenza termica al **focolare** (potenza introdotta con il flusso di biomassa, data dal prodotto tra il PCN (MJ/kg TQ) e la portata massica (kg/h)).

I generatori a legna più diffusi sono quelli a combustione montante o inversa con biomassa su griglia (FIGURA 2 sinistra). Nel primo caso l'aria primaria entra dal sotto-griglia e innesca la combustione; la fiamma "monta" verso l'alto interessando l'intero carico che occupa la camera di combustione. L'elevata sem-

plicità costruttiva è correlata alla presenza di notevoli quantità di incombusti gassosi e si ha $\eta_T = 70-80\%$. Nei più complessi dispositivi a fiamma inversa, la camera di combustione è posta sotto la griglia (in refrattario); l'aria primaria è insufflata nella sovrastante camera di carico e "dirige" la fiamma verso il basso, interessando quindi la sola biomassa adagiata sulla griglia, con $\eta_T = 90-95\%$.

Il cippato è utilizzato in generatori più complessi ($0,1 < PT_N < 15$ MW) - caricati meccanicamente e continuamente - per coprire elevati fabbisogni termici di unità produttive o di sistemi di teleriscaldamento (TLR) in assetto dedicato (solo calore) o cogenerativo (calore + elettricità). I generatori hanno ampia camera di combustione e griglia inclinata (talvolta mobile - FIGURA 2 destra), per la produzione di acqua calda (assetto dedicato) o vapore (assetto cogenerativo).

Dai cumuli di stoccaggio (in strutture coperte o all'aperto) il cippato è movimentato con mezzi meccanici nell'area di carico; qui vi sono sistemi (raschiatori, coclee) che alimentano il dispositivo (coclee, pistoni idraulici, che consentono anche di modulare il flusso di cippato, kg/h, e, dunque, la potenza) di immissione del cippato nella griglia della camera di combustione. Granulometria omogenea e ridotta è sempre correlata al corretto funzionamento delle componenti idraulico-meccaniche, riducendo inoltre negli ammassi di cippato nell'area di carico i fenomeni di *bridging* (effetto ponte), causa di interruzione del flusso di biomassa. Via via che la combustione procede, il cippato si muove verso l'estremità inferiore della griglia dove un sistema meccanico provvede a estrarre le ceneri più grossolane.

Nella parte superiore della camera i gas incombusti vengono in contatto con aria secondaria che aumenta η_T a valori del **80-85%**. La griglia fissa è impiegata con cippato con **$U < 30-35\%$** , granulometria ridotta e omogenea, in impianti con **$PT_N = 0,1-1$ MW**, mentre la mobile con cippato più grossolano e umido, in impianti con **$PT_N = 1-15$ MW**.

All'uscita della camera di combustione (1.000-1.200°C), i fumi transitano nel sistema di scambio termico, cedendo gran parte del calore al fluido termovettore, transitano nel sistema di trattamento fumi e poi sono veicolati al camino.

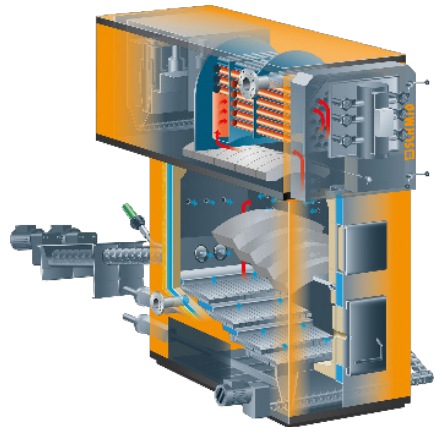
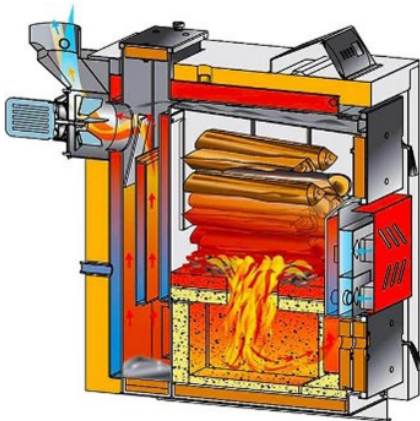


FIGURA 2 - Sinistra: generatore termico a combustione inversa per legna in tronchetti (fonte: www.lavorincasa.it);
 Destra: generatore termico a griglia inclinata mobile per cippato (fonte: www.viessmann.it).

IMPIANTI DI TELERISCALDAMENTO (TLR)

Caratteristiche e parametri operativi

Per dimensionare un impianto di TLR occorre stabilire - con orizzonte temporale di 20-25 anni - **le biomasse disponibili in un territorio di riferimento, entro il quale l'approvvigionamento risulti sostenibile**, in termini sia **economici**, sia **ambientali**. Da tale "censimento" - identificando il **mix di biomasse disponibili** (t/anno), assumendo valori medi operativi (PCN, MJ/kg TQ; η_T , %) - si stima la potenza nominale media dell'impianto ($PT_{N,m}$; MW) in base al tempo funzionamento (h/anno) e, di conseguenza, l'"offerta" di calore (ET; MJ). Le potenziali utenze termiche allacciabili - in base **all'entità dei propri fabbisogni e la relativa distribuzione temporale** - si sommano, determinando l'andamento nel tempo della "domanda" energetica. Tale profilo, per periodi più o meno prolungati (nell'arco della giornata o oltre), può eccedere l'offerta, generando "picchi".

Al riguardo, anche se sovradimensionati rispetto a $PT_{N,m}$, i generatori termici a biomassa hanno - rispetto a quelli a fonte fossile - maggiori difficoltà nell'adeguarsi alle variazioni di carico indotte dall'utenza. Riducendo il flusso di biocombustibile, la potenza viene ridotta, ma non è possibile scendere sotto certi limiti (30-35%), e la modulazione conseguente le variazioni nella domanda termica ostacola l'ottimizzare del processo (minore rendimento,

aumento delle emissioni, maggiori sollecitazioni delle componenti). L'adeguamento ai **carichi termici variabili** è risolvibile dotando l'impianto di **sistema di accumulo**, volano termico (negli impianti di taglia più elevata rappresentato dalla stessa massa d'acqua contenuta nella rete di TLR) in cui immagazzinare - riscaldando il fluido - il calore in concomitanza di ridotta domanda e utilizzarlo nei momenti di maggiore richiesta. In ogni caso, per fronteggiare periodi di fermo impianto e situazioni particolari (picchi di breve durata), tutti gli impianti di TLR prevedono l'installazione di generatori di soccorso alimentati con fonte fossile.

Il cippato necessario all'ordinario funzionamento per un determinato periodo di tempo viene via via preparato, tenuto conto delle dinamiche dell'offerta che caratterizzano il bacino di riferimento. Per contenere i costi di trasporto-stoccaggio, la biomassa legnosa è spesso trasportata all'impianto sottoforma di tronchi, periodicamente sminuzzati da imprese di servizi agro-meccanici. Considerando poi che le dimensioni delle componenti di un impianto di TLR (dispositivi di carico, generatore, rimozione ceneri, trattamento fumi, ventilatori e pompe, ecc.) sono sensibilmente maggiori rispetto a un impianto di pari potenza termica alimentato con fonte fossile, risul-

ta evidente come - già in fase di studio di fattibilità - la reperibilità di ampi spazi (strutture, aree scoperte) sia un aspetto irrinunciabile.

Se l'impianto è dedicato alla generazione di sola energia termica (ET) - grazie a una pompa e un circuito idraulico chiuso e coibentato - trasporta l'acqua calda (75-80°C) alle utenze, presso le quali mediante scambiatori è rilasciato il calore. Il fluido raffreddatosi ritorna al generatore, chiudendo il ciclo di trasferimento termico. Nel caso di sistemi di TLR, il circuito idraulico diventa una vera e propria rete di tubazioni sotterranee, diffusa su ampi territori e che - nei sistemi più complessi - raggiunge anche centinaia di utenti.

Se l'impianto opera in assetto cogenerativo (contemporanea generazione di calore ed elettricità), il fluido termovettore è trasformato - mediante un **evaporatore** - in gas a elevate temperatura e pressione, così da alimentare un **ciclo di potenza (ciclo Rankine) basato sull'impiego di gruppo turbina-alternatore**. Nel caso dell'acqua, il fluido è vapore che - portato alla **turbina** - espande, mettendo in rotazione la macchina e il generatore di energia elettrica (EE) connesso. Con taglie impiantistiche più contenute e coerenti con l'impiego del legno cippato, si impiega il **ciclo Rankine organico (ORC)** (FIGURA 3) che fa uso di un fluido termovettore organico ad elevato peso molecolare. Dalla turbina il fluido esce, ancora allo stato gassoso e molto caldo, passa prima attraverso un **sistema di ri-**

generazione e poi in un **condensatore**, grazie al quale - raffreddandosi - ritorna allo stato liquido e, come tale, è pompato al **rigeneratore** (che preriscalda il fluido organico) e, da qui, all'evaporatore del generatore termico. Il calore di condensazione è recuperato e copre i fabbisogni termici delle utenze allacciate alla rete di distribuzione. Facendo ricorso a sistemi ORC - rispetto al calore prodotto dal generatore termico - i rendimenti in EE risultano $\eta_{EE} = 18-25\%$, mentre quelli in ET $\eta_{ET} = 75-80\%$.

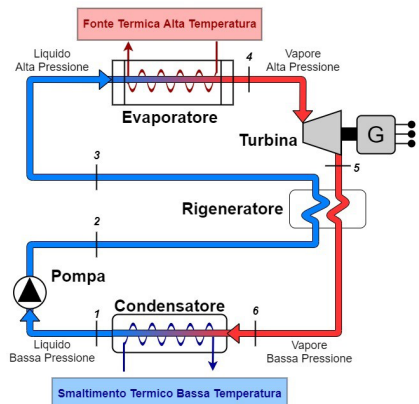


FIGURA 3 - Schema del ciclo Rankine organico (ORC) (fonte: www.aerweb.it/turbine-orc/).

PROBLEMATICHE RELATIVE ALLA COMBUSTIONE DELLE BIOMASSE

Con allestimenti in tronchetti correlati a impianti domestici, lo stoccaggio avviene in catasta di norma ordinate, permettendo all'aria di circolarvi liberamente e garantendo l'evaporazione naturale dell'acqua; nelle nostre condizioni climatiche, l'essiccazione - dopo alcuni mesi (8-12) - permette di raggiungere $U = 15-20\%$, determinando il significativo aumento del PCN del biocombustibile.

Nel caso di impianti di TLR, il cippato giunto all'impianto come tale o prodotto in loco, viene ammassato in cumuli (FIGURA 4 sinistra) (4.000-6.000 m³) all'aperto o in strutture coperte; in entrambi i casi non subisce alcun trattamento e l'essiccazione naturale risulta limitata a causa della difficoltà dell'aria

di circolare liberamente nel cumulo. All'aperto, lo strato (10-20 cm) a contatto con l'aria, pur deteriorandosi causa marcescenze, funge da "cappello" per il materiale sottostante.

Se la combustione non è adeguatamente condotta risulta incompleta, con produzione di composti (i principali dei quali sono CO, HC, PM) che, immessi nell'ambiente, possono risultare pericolosi per la salute. Nei dispositivi termici di bassa potenza (fabbisogni domestici) il controllo del processo si attua mediante **dispositivi elettronici (sonda lambda, termocoppie)** che modulano continuamente la portata di aria immessa nel generatore in funzione delle variazioni di temperatura nella camera di combu-



FIGURA 4 - Sinistra: cippato stoccato in cumulo (archivio Compagnia delle Foreste S.r.l.).
Destra: clinkers derivanti da solidificazione ceneri basso-fondenti (fonte: www.pelletit.it).



stione, della concentrazione di CO e O₂ nei fumi. Gli impianti di medio-elevata potenza - oltre al controllo dei flussi d'aria (primaria e secondaria) - sono sempre dotati di **sistemi per abbattere la concentrazione sia dei PM** (filtri a secco, filtri a maniche, precipitatori a ciclone ed elettrostatici), **sia dei composti chimici dannosi** (sistemi di riduzione catalitici o non).

Relativamente alle ceneri, uno dei principali problemi riguarda la loro fusibilità, che si verifica per taluni biocombustibili in cui è particolarmente elevata la presenza di minerali con **temperatura di fusione** minore delle temperature raggiunte nella camera di combustione. Al raffreddamento della camera si possono formare agglomerati (*clinkers*) (FIGURA 4 destra), dannosi per le componenti meccaniche all'interno del gene-

ratore (griglie mobili, estrattori ceneri). Per ovviare al problema si può aggiungere al biocombustibile sali (CaCO₃, (NH₄)₂SO₄, Ca₃(PO₄)₂) che aumentano la temperatura di fusione delle ceneri. Il **sistema di trattamento dei fumi** è imponente, ma indispensabile per trattene- re i particolati più minuti e permettere la riduzione dei composti inquinanti **entro i limiti emissivi imposti dalle norme**. Lo smaltimento delle ceneri è fondamentale per impianti di elevata potenza alimentati con elevate quantità di biocombustibile, ed è frequentemente gestito con l'ausilio di contoterzisti.

IL PROGETTO USEFOL ^{*1,2,3}

UN CASO STUDIO

Con il progetto USEFOL sono stati realizzati diversi modelli per quantificare la biomassa e il carbonio attualmente presente nelle foreste pubbliche di Valle Camonica e Alta Valtellina, e simulare le dinamiche future di accrescimento del bosco in funzione della modalità di gestione e degli effetti del cambiamento climatico.

In particolare, per stimare la biomassa e il carbonio attualmente presenti, è stato realizzato uno specifico modello di calcolo (denominato **WOCAS**) che, impiegando le informazioni contenute nei PAF e in accordo con le linee guida dell'IPCC, quantifica, a scala di singola particella, la biomassa legnosa epigea (fusto, rami e cimoli), ipogea (radici) e la sostanza organica morta (legno morto e lettiera) applicando un bilancio di massa annuale in accordo con le Linee Guida dell'IPCC e in base a differenti scenari.

Per la Valle Camonica, WOCAS è stato applicato a 2.019 particelle forestali (**37.000 ha circa**) per il periodo **1984-2021**, mentre **per la Valtellina**,

l'applicazione ha riguardato 493 particelle (**10.500 ha circa**) per il periodo **2005-2021**. Per valutare le dinamiche future di accrescimento del bosco sono stati utilizzati due modelli: **3PG** per prevedere l'impatto dei cambiamenti climatici sulla crescita degli alberi e **CBM (Carbon Budget Model)** per studiare gli effetti dei prelievi forestali sui flussi di carbonio.

Gli scenari analizzati sono stati il Business as Usual, uno scenario di prevenzione disturbi (incendi e schianti da vento) diffuso su tutta l'area di studio e uno scenario di massimizzazione degli assortimenti legnosi con vita media elevata. È stato anche realizzato uno studio sulle potenzialità delle filiere forestali locali di offrire legname utile a sostituire materiali a elevata impronta carbonica come il cemento e l'acciaio nel settore edilizio. Sono stati calcolati i valori dei fattori di sostituzione, ossia le emissioni risparmiate utilizzando legno anziché cemento e mattoni. Gli scenari di previsione possono supportare gestori e decisori pubblici, promuovendo un uso efficiente della risorsa legno compatibilmente con la fornitura degli altri servizi ecosistemici e la conservazione della biodiversità. **La meccanizzazione delle operazioni**

forestali è fondamentale per ottimizzare il prelievo del legno da destinare ai diversi usi. Il prezzo finale del legno utilizzato è infatti fortemente condizionato dai costi delle operazioni, il cui contenimento è indispensabile per ottenere l'uso efficiente di questa risorsa rinnovabile. Relativamente a questo aspetto, è stato studiato e realizzato un modello (denominato "**FOREMA**") per la scelta ottimale del cantiere di meccanizzazione da allestire

per il recupero (raccolta e trasporto) della biomassa disponibile in ciascuna particella forestale. Infine, attraverso l'implementazione di un modello già predisposto (denominato "**ENVIAM**") sono stati calcolati i costi economici e i principali parametri ambientali dei cantieri di meccanizzazione forestali più diffusi nell'arco alpino.



GLOSSARIO

Cure colturali: operazioni selvicolturali rivolte al miglioramento futuro della composizione, struttura, resilienza e funzione del bosco.

Dati LiDAR: immagini ottenute con telerilevamento attivo che forniscono dati sulle altezze e la stabilità di quelli che rimangono nel bosco.

Deforestazione o disboscamento: eliminazione definitiva del bosco in un diverso uso del suolo (agricolo, urbano o altro).

Diradamento: tipo di cura colturale che consiste nel taglio di alberi attentamente selezionati con lo scopo di favorire la crescita e la stabilità di quelli che rimangono nel bosco.

Disturbi naturali: cambiamenti improvvisi nella massa, composizione e struttura di un ecosistema, causati da eventi atmosferici o dall'influenza di altri organismi.

Effetto di sostituzione: emissioni climateranti evitate grazie all'utilizzo di materiali o combustibili a basso o nullo tasso di emissione.

Emissioni climalteranti: immissione di gas a effetto serra (CO_2 , CH_4 , N_2O) nell'atmosfera da parte delle attività umane o di fenomeni naturali.

Equazioni allometriche: equazioni che permettono di stimare il volume o la massa di un albero a partire da dati dendrometrici come l'altezza e il diametro del tronco. Dato che diverse specie hanno forme diverse, ogni specie dispone di diverse equazioni allometriche con coefficienti specifici ricavati da un elevato numero di alberi campione utilizzati per comprendere le relazioni matematiche che intercorrono tra altezza, diametro del tronco e volume totale dell'albero.

Filiera: insieme articolato (anche detto "rete" o "sistema") che comprende le principali attività (e i loro principali flussi materiali e informativi), le tecnologie, le risorse e le orga-

nizzazioni che concorrono alla produzione, trasformazione, distribuzione, commercializzazione e fornitura di un prodotto finito.

Filiera corta: filiera produttiva caratterizzata da un numero limitato e circoscritto di passaggi produttivi (biomasse prodotte entro un raggio di 70 km dall'impianto/centro di trasformazione) e operatori economici che si impegnano a promuovere la cooperazione, lo sviluppo economico locale e stretti rapporti socio-territoriali tra produttori e consumatori.

Funzione di protezione diretta: funzione che la foresta svolge nei confronti dei pericoli naturali (valanghe, caduta massi, scivolamenti superficiali e lave torrentizie), mitigando l'effetto in presenza dell'uomo (insediamenti, attività economiche e vie di comunicazione).

Funzione di protezione generica o indiretta: funzione svolta nei confronti della conservazione del suolo dall'erosione diffusa o incanalata. Questa è svolta da tutti i popolamenti forestali, ma è più o meno importante in funzione di giacitura, pendenza, morfologia e condizioni geopedologiche.

Immagini multispettrali: immagini contenenti diverse bande spettrali (rosso, verde, blu, infrarosso vicino, infrarosso ad onda corta), ottenute da rilievi "ad hoc" (aereo, drone, satellite).

Indici spettrali: indici ottenuti combinando matematicamente due o più canali di immagini multispettrali, capaci di descrivere situazioni come lo stress idrico, la mortalità e il vigore delle foreste.

Regolamento forestale regionale: norme di competenza regionale che definiscono obblighi, divieti, i limiti minimi e massimi alle utilizzazioni forestali della regione in cui si applica.

AUTORI

* 1 - ROBERTA BERRETTI, MATTEO GARBARINO, DONATO MORRESI, RENZO MOTTA

Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Ambientali (DISAFA)

* 2 - SEBASTIAN BROCCO, GIORGIO VACCHIANO

Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali. Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA)

* 3 - MARCO FIALA, LUCA NONINI

Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali. Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA)

* 4 - MARIO TEVINI

Associazione Consorzi Forestali Regione Lombardia (ACFL)



Regione
Lombardia



Il Progetto “USEFOL – Approcci innovativi per la valutazione della fornitura di servizi ecosistemici in foreste lombarde” è finanziato dalla Regione Lombardia (Progetti di ricerca in campo agricolo e forestale – BANDO 2018)

COORDINATORE

Dipartimento di Scienze Agrarie Forestali e Alimetari (DISAFA)



UNIVERSITÀ
DI TORINO



Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio e Agroenergia (DiSAA)



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



DiSAA
DIPARTIMENTO
di SCIENZE
AGRARIE e
AMBIENTALI

fiper

FEDERAZIONE ITALIANA PRODUTTORI
DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI



Associazione Consorzi
Forestali della Lombardia

Per maggiori informazioni visita il sito www.usefol.it



Progetto grafico Compagnia delle Foreste Srl - Arezzo

Stampato a Maggio 2023