



**Dipartimento di scienze e tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la
Natura e l'Energia**

Corso di Dottorato di Ricerca in Scienze e tecnologie per la
gestione forestale e ambientale - (XXIV CICLO)

Titolo tesi di Dottorato di Ricerca

**Analisi della sostenibilità tecnica ed economica della produzione di
energia da biomasse legnose per centrali di media-piccola potenza**
(s.s.d. AGR/06)

Tesi di dottorato di:
Dott. Giulio Sperandio

Coordinatore del corso
Prof. Rosanna Bellarosa

Firma

Tutore
Dott. Rodolfo Picchio

Firma

Co-tutore
Dott. Stefano Verani

Firma

Data della discussione

27 Maggio 2013

Summary

Analysis of the technical and economic sustainability of energy production by woody biomass for heating plants of medium-low power

The thesis analyzes the technical and economic sustainability of a wood-energy micro-chain based on biomass consumption for thermal heating of the buildings of the CRA-ING of Monterotondo (Rome). The analysis, developed on four case studies, involves both aspects related to the establishment of energy chain in relation to the domestic production of biomass by Short Rotation Forestry (SRF) poplar plantation and potential supply by small forest stands outside the farm. For both these production processes an analysis of the optimization of the logistics of biomass harvesting to energy use was developed. The results from the first three case studies have allowed the development of an economic model of the overall analysis of the sustainability of the wood-chain for heating energy production. The average production of biomass obtained by three poplar clones, AF2 (*P. x canadensis* Moench), AF6 (*P. nigra* L. x *P. x generosa* A. Henry) and Monviso (*P. generosa* A. Henry x *P. nigra* L.), referring to the first harvesting (two-year cycle) and second harvesting (three-year cycle) of the plantation, was respectively 10.1 and 13.0 t ha⁻¹ year⁻¹ of dry matter, with better yields of the AF2 clone. On the three-year cycle, the single row plantation has achieved better production performance than the twin row plantation, with 13.9 vs. 12.2 t ha⁻¹ year⁻¹ of dry matter. The local survey conducted in the study area has highlighted the presence of 17,445 t of fresh biomass by small forest stands, in part potentially usable in the heating plant and located at a logistic distance of less than 10 km. About 45% of this biomass has a total estimated utilization cost below 45 € t⁻¹. The estimated cost of SRF harvesting, calculated with multivariate approach (PLS), was variable from 8.69 € t⁻¹ to 16.56 € t⁻¹ in relation to the logistic organization of the yard. The global economic evaluation on the life cycle of the investment related to the two compared biomass and diesel heating systems shows, for the experimental conditions described, an overall saving of 156,703 € of the biomass heating system, compared to the diesel heating system, corresponding at a saving per unit of thermal energy of 15.60 € GJ⁻¹.

Keywords: wood-energy chain, biomass, economic sustainability, heating system, costs, harvesting, PLS, LCCA, NPV

Riassunto

Analisi della sostenibilità tecnica ed economica della produzione di energia da biomasse legnose per centrali di media-piccola potenza

La tesi analizza la sostenibilità tecnica ed economica di una microfiliera energetica basata sul consumo di biomassa aziendale per il riscaldamento termico degli edifici del CRA-ING di Monterotondo (Roma). L'analisi, sviluppata su quattro casi studio, ha riguardato sia aspetti attinenti alla costituzione della microfiliera energetica in relazione alla produzione interna di biomassa da *short rotation forestry* di pioppo (SRF) e a potenziali approvvigionamenti da piccole formazioni forestali esterne all'azienda, sia aspetti relativi ai singoli processi produttivi, sviluppando un'analisi di ottimizzazione della logistica della raccolta della SRF ad utilizzo energetico. I risultati conseguiti dai primi tre casi studio hanno permesso lo sviluppo di un modello economico di analisi complessiva della sostenibilità della filiera in esame. La produzione media di biomassa ottenuta dalla SRF con i cloni AF2 (*P. x canadensis* Moench), AF6 (*P. nigra* L. x *P. x generosa* A. Henry) e Monviso (*P. x generosa* A. Henry x *P. nigra* L.), riferita al primo (turno biennale) e secondo taglio (turno triennale) della piantagione, è stata rispettivamente di 10,1 e 13,0 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca, con migliori rese per il clone AF2 rispetto agli altri due cloni. Nel turno triennale, la tipologia d'impianto a file singole ha ottenuto migliori performance produttive rispetto alle file binate, con 13,9 contro 12,2 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca. L'indagine territoriale condotta nell'area di studio ha posto in evidenza la presenza di 17.445 t di biomassa fresca relativa a piccole formazioni forestali, in parte potenzialmente utilizzabile (poste a distanza inferiori ai 10 km dalla centrale), delle quali circa il 45% presenta dei costi complessivi di utilizzazione inferiori a 45 euro t⁻¹. La stima del costo della raccolta di SRF, con approccio multivariato (PLS), è risultata variabile da 8,69 euro t⁻¹ a 16,56 euro t⁻¹ in relazione all'organizzazione logistica del cantiere. La valutazione economica complessiva del ciclo di vita dell'investimento nei due progetti a confronto, sistema di riscaldamento a biomassa e a gasolio, mostra, per le condizioni sperimentali descritte, un vantaggio complessivo del sistema a biomassa, rispetto a quello a gasolio, di 156.703 euro, corrispondente mediamente a 15,60 euro GJ⁻¹.

Parole chiave: filiera energetica, biomassa, sostenibilità economica, sistema di riscaldamento, costi, raccolta, PLS, LCCA, VAN.

RINGRAZIAMENTI

Sono grato e onorato di avere avuto, in questo percorso, come mio tutor, il Dott. Rodolfo Picchio che mi ha sostenuto in questi anni di dottorato. A lui va un particolare ringraziamento per il supporto professionale e personale che ha rinforzato la motivazione per il completamento di questa tesi. Voglio ringraziare in modo sentito il mio collega e amico Dott. Stefano Verani per il suo sostegno e la generosità in tutti questi anni di collaborazione. La sua amicizia mi ha ispirato tante volte e mi è stato da esempio per il pragmatismo positivo, l'ottimismo e l'incoraggiamento a non mollare mai, con la sua capacità di porsi sovente la domanda giusta per una efficace soluzione dei problemi. Ringrazio sentitamente i colleghi e amici Dott. Giuseppe Pignatti e Dott.ssa Flora De Natale, con i quali ho collaborato nel progetto FORFAR, e che mi hanno proficuamente stimolato e ispirato nello sviluppo dello studio sulla logistica dei trasporti della biomassa. Un sincero ringraziamento va anche ai colleghi e amici Dott. Corrado Costa e Dott. Paolo Menesatti per il loro efficace e preciso supporto statistico e per il loro incoraggiamento nel proseguire il cammino intrapreso. Ringrazio il collega Ing. Francesco Gallucci, coordinatore del Progetto BTT (Bio-Termo-Test), per la sua disponibilità e collaborazione nel reperimento dei dati relativi al funzionamento della nuova centrale a biomassa installata presso il CRA-ING e destinata alla micro-cogenerazione di energia elettrica. Sono profondamente grato ai Sig.ri Franco Bernardini, Mario Marsili, Cesare Cervellini, Gino Brennetti e Sandu Lazar per la collaborazione avuta durante il reperimento dei dati tecnici, dei tempi di carico del cippato e dei consumi di carburante durante le operazioni relative all'utilizzazione del cippato nella centrale termica.

Infine, voglio cogliere questa importante occasione per un profondo e sentito ringraziamento, cosa che fino ad ora non avevo mai fatto, ai miei genitori Valter e Maria che, nonostante le molte difficoltà incontrate durante tutta una vita, mi hanno comunque permesso, con grande sacrificio, di continuare gli studi universitari e ottenere una laurea, cioè di raggiungere quello che era considerato e penso lo sia ancora, un traguardo veramente ambito e importante.

Infine, un caro pensiero alla mia famiglia, che è per me il valore più prezioso, alla quale voglio esprimere la mia più profonda gratitudine e riconoscenza. Ai miei figli Francesco e Carmen che, anche per l'impegno di questa tesi, ho dovuto sovente trascurare, ma soprattutto voglio ringraziare in modo speciale mia moglie Stefania che si è maggiormente sacrificata in famiglia per potermi dare l'opportunità di portare a termine questo importante traguardo e per aver fortemente creduto in me e nelle mie possibilità, con la sua comprensione, il suo amore, la sua pazienza e il suo sostegno incondizionato soprattutto nei momenti di maggiore sconforto e difficoltà lungo il cammino intrapreso.

INDICE

	Pag.
PREMESSA	6
1. INTRODUZIONE	8
1.1. QUADRO GENERALE: ASPETTI ENERGETICI E AMBIENTALI	8
1.2. CONSUMI ED IMPIEGHI ENERGETICI A LIVELLO NAZIONALE	11
1.3. BIOMASSE LEGNOSE PER USO ENERGETICO	13
1.4. FILIERA LEGNO-ENERGIA	15
1.5. COMPETIZIONE NEI SETTORI DI UTILIZZO DELLA BIOMASSA	18
1.6. ENERGIA TERMICA ED ELETTRICA DALLE BIOMASSE	20
1.7. LOGISTICA DELLE BIOMASSE AD USO ENERGETICO	26
1.8. PRINCIPALI PROCESSI DI CONVERSIONE ENERGETICA DELLE BIOMASSE	27
1.8.1. CONVERSIONE TERMOCHIMICA	27
1.8.2. CONVERSIONE ATTRAVERSO PROCESSI BIOCHINICI	29
1.8.3. CONVERSIONE ATTRAVERSO PROCESSI FISICI	31
2. L'AREA DI STUDIO E LA CENTRALE TERMICA	33
2.1. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO E DELLE PIANTAGIONI ENERGETICHE DI PIOPPA	33
2.2. CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA CENTRALE A BIOMASSA	36
3. MATERIALI E METODI	40
3.1. STRUMENTI E MATERIALI UTILIZZATI	40
3.1.1. CAVALLETTO DENDROMETRICO	40
3.1.2. CALIBRO DIGITALE	40
3.1.3. ROTELLA METRICA	40
3.1.4. TABELLA CRONOMETRICA	41
3.1.5. VERNICE SPRAY	41
3.1.6. DINAMOMETRO PORTATILE	41
3.1.7. TELEMETRO IPSOMETRO	41
3.1.8. DISTANZIOMETRO LASER	41
3.1.9. BILANCIA ELETTRONICA	42
3.1.10. STUFA DA LABORATORIO	42
3.1.11. PERSONAL COMPUTER	42
3.1.12. MISURATORE DI ENERGIA	42
3.2. METODOLOGIA DI RILIEVO DEI DATI	43
3.2.1. PIANTAGIONI DI PIOPPA SRF	43
3.2.2. FORMAZIONI FORESTALI IN AMBIENTE RURALE IN PROSSIMITA' DELLA CENTRALE TERMICA	44
3.3. METODOLOGIA DI CALCOLO DEI COSTI MACCHINA	52

3.3.1. COSTI FISSI ORARI	53
3.3.2. COSTI VARIABILI ORARI	55
3.3.3. COSTI ORARI DI ESERCIZIO	57
3.3.4. ALTRI ELEMENTI UTILI	57
3.4. METODOLOGIA DI ANALISI STATISTICA	59
3.4.1. ANALISI STATISTICA DEGLI ASPETTI DENDROMETRICI DELLA PIANTAGIONE SRF	59
3.4.2. ANALISI MULTIVARIATA NELLA LOGISTICA DELLA RACCOLTA DELLA PIANTAGIONE SRF	61
3.5. METODOLOGIA DI ANALISI ECONOMICA DELLA FILIERA	71
3.5.1. ASPETTI METODOLOGICI GENERALI	71
3.5.2. CONFIGURAZIONE DELLA STRUTTURA LCCA	71
3.5.3. APPLICAZIONE DEL METODO LCCA ALLA MICROFILIERA ENERGETICA	73
4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	81
4.1. CASO STUDIO I. PRODUZIONE DI BIOMASSA DA PIANTAGIONI SRF AZIENDALI	83
4.1.1. EFFETTO DEL CLONE SULLA CRESCITA E SULLA PRODUZIONE	83
4.1.2. EFFETTO DELLA DENSITÀ' SULLA CRESCITA E SULLA PRODUZIONE	85
4.2. CASO STUDIO II. ANALISI DELL'UTILIZZAZIONE E DELLA LOGISTICA DEL TRASPORTO DI BIOMASSA DA PICCOLE FORMAZIONI FORESTALI	89
4.2.1. DISPONIBILITÀ POTENZIALE DI BIOMASSA DALLE FAR	89
4.2.2. ANALISI ECONOMICA DELLA LOGISTICA DELL'UTILIZZAZIONE DI BIOMASSA	90
4.3. CASO STUDIO III. ANALISI DELLA LOGISTICA DELLA RACCOLTA DELLA SRF	96
4.3.1. RISULTATI TECNICI	96
4.3.2. RISULTATI ECONOMICI	99
4.4. CASO STUDIO IV. ANALISI DELLA SOSTENIBILITÀ ECONOMICA DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA DA BIOMASSA LEGNOSA	102
6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	108
BIBLIOGRAFIA	113

PREMESSA

La ricerca è stata sviluppata con l'obiettivo principale di analizzare, da un punto di vista tecnico ed economico, le criticità e i benefici di un modello di microfiliera energetica a biomassa legnosa e finalizzato alla fornitura di calore e di acqua sanitaria per edifici aziendali dell'Unità di ricerca per l'Ingegneria Agraria del Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione Agricola – CRA-ING di Monterotondo (Roma).

Come bacino di approvvigionamento della biomassa legnosa necessaria all'alimentazione di una centrale termica (232 kW di potenza) è stata considerata una superficie di 100 km² (un quadrato di 10 km, all'interno della quale è localizzata la microfiliera). Parte della biomassa necessaria all'alimentazione della caldaia deriva da piantagioni appositamente costituite all'interno dell'azienda. Il modello di valutazione è riferito a un sistema di filiera di produzione di sola energia termica, con la prospettiva di una implementazione verso un modello energetico, ancora poco diffuso in Italia, basato sulla cogenerazione di energia elettrica su piccolissima scala.

L'analisi complessiva sviluppata ha riguardato: *a*) le problematiche attinenti alla costituzione della microfiliera energetica considerando i processi di realizzazione, gestione, aspetti produttivi e raccolta (con particolare riferimento alla meccanizzazione) delle piantagioni costituite; *b*) la logistica del trasporto nell'approvvigionamento di biomassa derivante dalle altre formazioni boschive presenti nel bacino di approvvigionamento; *c*) l'analisi complessiva della filiera.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi dei processi produttivi riguardanti la filiera legno-energia è stato possibile costruire il modello di valutazione che ha permesso di formulare un giudizio finale sul livello di convenienza della filiera energetica a biomassa per produzione di calore rispetto a un sistema di riscaldamento basato sull'impiego di combustibili fossili che, nel caso specifico, è rappresentato da una caldaia a gasolio.

La possibilità di collaborare ad alcuni progetti finanziati dal Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (COFEA; FLORENER; BTT) e ad un progetto finanziato dal Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura (FORFAR), ha consentito di sviluppare da un lato, algoritmi innovativi GIS-based per l'ottimizzazione della logistica facendo riferimento sia a potenziali utilizzazioni di piccole formazioni forestali nell'area territoriale di approvvigionamento della filiera energetica, sia alla raccolta di piantagioni forestale energetiche SRF (Short Rotation Forestry) e, dall'altro, un'analisi economica basata sul metodo del *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), che rappresenta uno strumento di analisi di ingegneria

economica utile e di supporto alle decisioni quando si rende necessario confrontare due o più alternative di progetti durante un intero ciclo di vita. Il modello economico di valutazione, tenuto conto di una durata poliennale degli investimenti, è basato sull'applicazione dell'approccio di calcolo finanziario del *Net Present Value* (NPV), nel caso specifico applicato ai soli costi rilevati globalmente per il sistema energetico a biomassa sviluppato su piccola scala e per quello alternativo a combustibile fossile.

La tesi è stata sviluppata sulla base dei risultati ottenuti in quattro specifici casi studio. Il primo ha riguardato le performance produttive di piantagioni energetiche di pioppo costituite presso l'azienda del CRA-ING, appositamente realizzate per produrre biomassa da utilizzare come combustibile nella centrale per il riscaldamento di locali ed uffici (Di Matteo *et al.*, 2012). Il secondo caso studio fa riferimento ai risultati ottenuti da un'indagine territoriale che ha permesso di sviluppare un'analisi sull'ottimizzazione della logistica di trasporto della biomassa potenzialmente ritraibile da un'area di circa 100 km² intorno al centro aziendale del CRA-ING (progetto FORFAR), applicando una metodologia di valutazione della logistica su base GIS (Menesatti *et al.*, 2012). Il terzo caso studio è rappresentato da un esempio applicativo di un metodo di analisi innovativo basato su regressioni multivariate PLS (Partial Least Squares) sulla logistica di raccolta di piantagioni di pioppo SRF (Short Rotation Forestry) con macchina falciatrinciataratrice. I risultati ottenuti da questo metodo di analisi sono stati posti a confronto con quelli riferiti all'applicazione del metodo più tradizionale delle regressioni lineari multiple OLS (Old linear Squares) al fine di verificare la maggiore accuratezza nell'interpretazione dei dati sperimentali (Costa *et al.*, Submitted, 2013).

Il quarto caso applicativo, che valorizza i risultati raggiunti con i precedenti casi studio, sviluppa un'analisi focalizzata alla determinazione di un sistema di valutazione globale della sostenibilità tecnica ed economica del modello di microfiliera energetica basato sul consumo di biomassa. (Verani *et al.*, submitted, 2013).

1. INTRODUZIONE

1.1. QUADRO GENERALE: ASPETTI ENERGETICI ED AMBIENTALI

L'interesse per le biomasse come fonte alternativa ai combustibili fossili è enormemente cresciuto a partire dai primi anni '90 a seguito soprattutto delle politiche europee di incentivazione delle colture energetiche, della ratifica del protocollo di Kyoto e della successiva attuazione degli impegni assunti dai paesi membri in termini di riduzione delle emissioni di CO₂, della generalizzata crescita della domanda energetica a livello internazionale e delle continue variazioni del prezzo del petrolio e dei suoi derivati.

Nel dicembre 2009, infatti, l'Unione Europea, nell'ambito dei negoziati avviati a Copenaghen per un aggiornamento dei propositi sanciti dal protocollo di Kyoto (il post-Kyoto o Kyoto 2) (Schulze *et al.*, 2002; Whalley and Walsh, 2008; Bodansky, 2011) ha fissato di raggiungere entro il 2020 degli obiettivi ambientali ed energetici molto ambiziosi (obiettivo 20-20-20):

- raggiungere il 20% del fabbisogno energetico complessivo con le sole fonti energetiche rinnovabili;
- ridurre i consumi energetici complessivi del 20%;
- ridurre unilateralmente del 20% le emissioni di CO₂ rispetto dell'anno base 1990, che potrebbe arrivare al 30% entro il 2030 e ad oltre il 50% entro il 2050, in caso di accordo internazionale;
- raggiungere una quota pari al 10% di biocarburanti nell'ambito del consumo complessivo dei carburanti, innalzando il limite menzionato nella direttiva 2003/30/EC che risultava pari al 5,75% al 2010.

Anche gli Stati Uniti hanno indicato come obiettivo per il 2025 la sostituzione del 30% dei combustibili liquidi derivati dal petrolio per il trasporto con bio-carburanti e del 25% dei composti organici di origine petrolifera utilizzati nell'industria con composti derivati da biomasse. Inoltre, lo sviluppo di un mercato delle quote di emissione della CO₂ (*emission trading*), anche in USA, è destinato a costituire un altro fattore trainante per la domanda di biomasse ad uso energetico.

Con l'adozione della Energy Roadmap 2050, del 15 dicembre 2011 (COM 2011 885/2), la Commissione Europea ha fissato come ulteriore obiettivo comunitario la riduzione dall'80% al 95% delle emissioni inquinanti entro il 2050 rispetto ai livelli del 1990, aumentando del 40% il livello fissato al 2020. Sono sostanzialmente quattro le modalità prospettate per un sistema energetico a zero emissioni:

- efficienza energetica, con effetti soprattutto sul versante della domanda;

- sviluppo delle fonti rinnovabili;
- sviluppo delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO₂, CCS (*Carbon Capture and Storage*), che comprendono la cattura della CO₂ dalle emissioni industriali, il trasporto ai siti di stoccaggio e l'iniezione in rocce sotterranee adatte al confinamento;
- considerazione del nucleare, che l'Unione non prescrive agli Stati membri, ma continua a ritenere quale alternativa sicura e sostenibile rispetto alle fonti tradizionali. La strategia si basa su una serie di opzioni che rappresentano degli scenari esemplificativi, che esaminano 5 diverse combinazioni dei principali elementi sopra elencati per ottenere una riduzione dell'85% delle emissioni al 2050.

Tali “scenari di decarbonizzazione” elaborati utilizzando il modello PRIMES sono rappresentati come segue:

- elevata efficienza energetica – Si ipotizzano misure di efficienza energetica che porteranno ad una diminuzione della domanda di energia del 41% al 2050, rispetto al periodo 2005-2006;
- tecnologie di approvvigionamento diversificate – Si ipotizza che tutte le tecnologie a basso carbonio competano liberamente, sulla base di ipotesi sui costi dell'energia nel modello (compresi i prezzi di CO₂), senza nessuna misura specifica di sostegno;
- quota elevata di energia da fonti rinnovabili – Si ipotizzano ulteriori misure di sostegno alle energie rinnovabili al fine di raggiungere entro il 2050 il 75% di energia rinnovabile nel consumo finale di energia e un contributo delle fonti rinnovabili alla produzione di elettricità pari al 97%;
- tecnologia di cattura e stoccaggio di CO₂ (CCS) - Scenario simile allo scenario 2, che ipotizza l'impiego ritardato delle tecnologie CCS, e un maggiore contributo dell'energia nucleare;
- ricorso limitato all'energia nucleare – Si ipotizza che nessun nuovo reattore nucleare oltre quelli già in costruzione venga realizzato, in relazione ad una maggiore penetrazione delle tecnologie CCS (32% della generazione).

La Roadmap non indica nessuna delle opzioni prospettate come quella vincente, tuttavia emergono in particolare una serie di elementi comuni in tutti gli scenari: innanzitutto la crescita del contributo delle energie rinnovabili, che nel 2050 rappresenterà il 55% del consumo energetico finale lordo; il ruolo cruciale dell'efficienza energetica; l'incremento del ruolo dell'elettricità, che nel 2050 raggiungerà una quota compresa tra il 36% e il 39%; la crescita degli investimenti di capitale e la diminuzione del costo dei combustibili fossili.

Nei prossimi decenni si prevede, quindi, una rivoluzione radicale nelle tecnologie di produzione e trasporto dell'energia, purché massicci investimenti finanziari vengano messi a disposizione della cosiddetta "economia verde". Tuttavia, l'interesse per l'uso delle biomasse a scopi energetici non è nuovo. Per millenni l'uomo ha utilizzato il legname come fonte di energia sia per il riscaldamento, sia per cuocere gli alimenti. Fino agli inizi del 1900 gran parte delle fonti di energia utilizzata dalle società umane proveniva dall'agricoltura e dalle foreste. Solo a partire dal 1920 il petrolio ha progressivamente sostituito gli oli vegetali, l'amido e la cellulosa come fonte di energia e come materia prima per i processi industriali. Attualmente, le biomasse coprono il 14% degli usi energetici primari nel mondo, con 55 milioni di TJ/anno. L'impiego di tale fonte mostra, però, un forte grado di disomogeneità fra il nord e il sud del mondo. Di fatto, i Paesi in via di sviluppo ricavano mediamente il 38% della propria energia dalle biomasse, pari a 48 milioni di TJ/anno, ma in molti di essi tale risorsa, rappresentata fondamentalmente da legna, paglia e rifiuti animali, soddisfa fino al 90% del fabbisogno energetico totale. Nei Paesi avanzati, invece, le biomasse concorrono per il 3% agli usi energetici primari con 7 milioni di TJ/anno. In particolare, gli USA ricavano il 3.2% della propria energia dalle biomasse, equivalente a 3.2 milioni di TJ/anno; l'Europa, complessivamente, ne ricava il 3.5%, con punte del 18% in Finlandia, 17% in Svezia e 13% in Austria; l'Italia copre appena il 2% del proprio fabbisogno energetico con le biomasse, si pone quindi al di sotto della media europea.

1.2. CONSUMI ED IMPIEGHI ENERGETICI A LIVELLO NAZIONALE

La domanda di energia primaria, nel 2009 (ENEA, 2010), si è attestata sui 180,2 Mtep. Il dato scaturisce da una contrazione significativa dell'apporto delle fonti fossili, pur a fronte della crescita delle rinnovabili (+13,7%) e delle importazioni di energia elettrica (+11%). La caduta della domanda di energia primaria, rispetto ai valori del 2008 (-5,8%) evidenzia una accelerazione, rispetto alla discesa dei consumi primari, registrata ormai negli ultimi 4 anni. Nell'analisi dei possibili scenari sviluppata dall'ENEA (2012), in considerazione degli effetti delle azioni combinate di misure, politiche ed investimenti, nella piena attuazione del nuovo Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica (PAEE, 2011) si prevede che, rispetto allo *Scenario di riferimento* (Scenario A), che prevede un consumo energetico crescente fino a 189 Mtep nel 2030, lo *Scenario delle Politiche Correnti* (B) comporta una riduzione di consumo di energia primaria rispetto a quella data pari al 10%, mentre tale riduzione arriva al 17% nello *Scenario della Roadmap* (Scenario C) (Figura 1).

La composizione percentuale della domanda per fonte energetica (Figura 2) evidenzia la specificità italiana, nel confronto con la media dei 27 Paesi dell'Unione Europea, relativamente all'elevato ricorso a petrolio e gas (nel 2010 oltre il 75% del totale), all'import strutturale di elettricità (intorno al 5% negli ultimi anni), al ridotto contributo dei combustibili solidi (8%) e al mancato ricorso al nucleare.

La variazione del mix rispetto al 2009 conferma la tendenza di riduzione del ricorso al petrolio (-1,9%), che pure rimane la fonte più utilizzata, a favore del gas (+0,8%) e l'aumento del peso delle rinnovabili (+1%). Queste hanno conseguito, soprattutto negli ultimi tre anni, un'accelerazione notevole.

Le fonti rinnovabili (12% del totale) rappresentano un consumo energetico

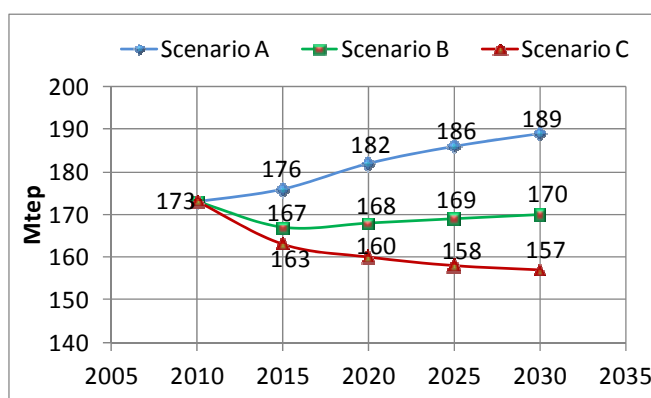


Figura 1. Previsione del Consumo energetico nazionale secondo tre possibili scenari (Fonte: ENEA 2012)

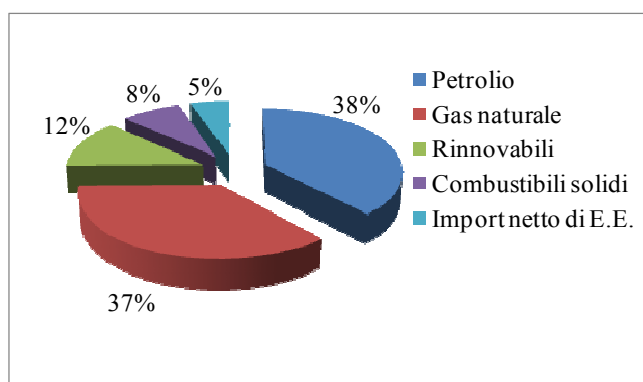


Figura 2. Incidenza delle singole fonti sulla composizione della domanda energetica nazionale (Fonte: ENEA, 2012)

equivalente a 19,3 Mtep, il 52% del quale rappresentato dall'idroelettrica, seguita poi da legna e assimilati con il 19,8%, dall'eolico (7%), dal geotermico (6,7%) e dai biocombustibili (5,7%) (Figura 3).

A seguito di recenti scoperte e rivalutazioni della consistenza dei giacimenti di idrocarburi in Italia, l'offerta interna di petrolio e gas dovrebbe aumentare nei prossimi anni e la produzione incrementarsi di quasi il 50%, contrastando il declino rilevato nell'ultimo decennio se non invertendo la tendenza. Ma tali prospettive sembrano in parte legate al mutamento di atteggiamenti a livello locale sullo sfruttamento di queste risorse.

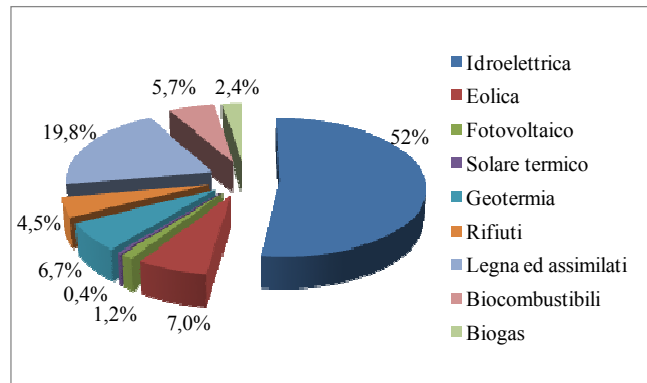


Figura 3. Ripartizione percentuale delle fonti rinnovabili (Fonte: ENEA,2012)

Nel 2010 il peso della fattura energetica del nostro Paese è stato pari a 53.866 milioni di euro (+27,1% rispetto al 2009) e la sua incidenza sul valore nominale del PIL pari al 3,4%. La suddivisione della fattura energetica per fonte indica che il petrolio, seguito dal gas, continua a rappresentare il maggior onere, anche se il suo peso tende a ridursi (da oltre 64% nel 2000 al 53% nel 2010). Tuttavia il peso dei biocombustibili, anche se ancora poco significativa in termini di valori assoluti, mostra un incremento sostenuto rispetto all'anno precedente .

Gli impieghi finali di energia nel 2010 sono aumentati del 4,4% rispetto all'anno precedente, raggiungendo i 138,6 Mtep, un valore comunque lontano dai livelli pre-crisi. Tale crescita è dovuta alla ripresa dei consumi nel settore industriale (+7,3%), negli usi del settore civile (+5,9%) e negli usi non energetici (+16,2%); in marcata diminuzione i consumi dell'agricoltura (-7,6%) e del settore dei trasporti (+0,2%).

La ripartizione degli impieghi finali per settore evidenzia il peso crescente del settore civile (con una quota in salita dal 30,3% del 2007 al 35,4% del 2010) e dei trasporti (30,6%) mentre il settore industriale, la cui quota è in netto calo negli ultimi cinque anni (-5%), copre il 23,2% dei consumi finali. Agricoltura, bunkeraggi e usi non energetici (soprattutto industria petrolchimica) consumano il restante 10,8%.

1.3. BIOMASSE LEGNOSE PER USO ENERGETICO

Le biomasse legnose, come già accennato, nell'ambito del dibattito intorno alla produzione energetica da fonti rinnovabili, attualmente stanno assumendo un ruolo sempre più importante, a livello internazionale e nazionale, in relazione al soddisfacimento della domanda energetica, anche in considerazione delle positive implicazioni ambientali e sociali oltre che economiche collegate al loro utilizzo. Tra le diverse fonti rinnovabili, infatti, le biomasse legnose rispondono pienamente a queste esigenze, contribuendo alla funzione di sostituzione di combustibili fossili e, conseguentemente alla riduzione delle emissioni in atmosfera di anidride carbonica (Anonimo, 1996; Marland e Schlamadinger, 1997; Hall, 1998; Hall e Scrase, 1998; Tustin, 2000). Altri importanti motivi che contribuiscono a stimolare l'attenzione crescente verso le biomasse sono per esempio la prevalente localizzazione delle risorse forestali in aree interne svantaggiate che fanno collegare la valorizzazione delle biomasse legnose alle politiche di sviluppo delle aree marginali, così come la ricerca di opportunità di utilizzo alternativo dei terreni attualmente destinati a produzione agricole eccedentarie porta a valorizzare le produzioni specializzate di biomasse legnose come strumento di diversificazione e stabilizzazione delle economie rurali. Globalmente, la legna grezza costituisce una fonte primaria d'energia di grande rilevanza, specialmente nei paesi in via sviluppo dove, secondo la FAO, essa soddisfa il 15% della domanda d'energia complessiva, contro il 7% dei paesi sviluppati. Nei paesi più poveri le biomasse legnose non solo rappresentano la prima fonte energetica, ma costituiscono praticamente l'unica sorgente di energia per la popolazione rurale, con evidenti conseguenze di carattere sociale dal momento che la legna ha un ruolo essenziale per la copertura di bisogni di base, quali sono l'alimentazione (cottura dei cibi), l'illuminazione e il riscaldamento. Tuttavia, è proprio nei paesi occidentali dove si registra di recente il maggiore interesse verso l'impiego della biomassa come fonte energetica.

Già a metà degli anni '70, in concomitanza con la prima crisi energetica, molti paesi sviluppati presero le prime iniziative per valorizzare la legna – e più in generale le biomasse – per produrre energia alternativa alle fonti fossili, avviando attività promozionali e finanziando investimenti in ricerca e sviluppo. In Italia, pur riconoscendo il raggiungimento di qualche risultato lusinghiero e incoraggiante, a 30 anni di distanza dalla crisi energetica si può affermare che la bioenergia stenta ad affermarsi a scala industriale ed è rimasta ancora allo stadio di sviluppo, nonostante una considerevole serie di affermazioni programmatiche, qualche (limitato) investimento pubblico in attività di ricerca e un'adeguata politica tariffaria e fiscale per favorire l'uso del legno a fini energetici. A questo parziale insuccesso hanno contribuito la riduzione dei prezzi dei combustibili convenzionali verificatasi negli anni '80 e '90. In effetti il

mercato, dato un sistema di prezzi che solo parzialmente è in grado di internalizzare i costi e benefici sociali dell'impiego delle diverse fonti di energia, non è stato finora in grado di stimolare un utilizzo delle biomasse a fini energetici a scala industriale. Tuttavia, va registrato che - a livello di consumi domestici in aree rurali, soprattutto montane - l'impiego di legna come fonte di energia è andato in Italia gradualmente ma costantemente crescendo a partire dagli anni '70, anche per la spontanea diffusione di sistemi di conversione in energia termica più efficienti. L'utilizzazione energetica della legna proveniente dai boschi è stata trascurata anche dalla politica forestale, che ha erroneamente ritenuto la legna da ardere un prodotto obsoleto, a domanda inelastica rispetto al reddito, destinato quindi ad essere emarginato dal mercato dalla diffusione di altre forme rinnovabili d'energia. Non ci si è così resi conto che la presenza e lo sviluppo di una domanda di legna da ardere poteva essere un potente stimolo alla realizzazione di interventi di miglioramento colturale di molti boschi degradati, riducendo, ad esempio, i costi di avviamento di cedui ad altofusto, oltre a poter sostenere un'economia forestale che, soprattutto in aree appenniniche e prealpine, era e rimane sostanzialmente collegata a forme di governo a ceduo e, quindi, alla produzione di piccoli assortimenti. Tuttavia, i recenti indirizzi di politica ambientale ed energetica scaturiti dagli accordi internazionali sullo sviluppo sostenibile (la Convenzione sui Cambiamenti Climatici, per la Biodiversità, per la Lotta contro la Desertificazione, i Principi Forestali e altri processi e accordi internazionali fino agli ultimi Accordi di Johannesburg), la necessità di ridurre la dipendenza energetica dall'estero (tra i Paesi più industrializzati, l'Italia è la nazione con il minor tasso di auto approvvigionamento di energia), le politiche di diversificazione degli impieghi di terreni agricoli a produzioni eccedentarie e l'esigenza di valorizzare le fonti interne d'energia stanno aprendo prospettive interessanti per i sistemi d'energia rinnovabile e per le biomasse ligno-cellulosiche in particolare (Trossero, 2000). La crescente sensibilità delle collettività verso i temi ambientali, il temuto e verosimile incremento dei prezzi dei combustibili fossili, lo sviluppo della tecnologia di condizionamento e di conversione energetica del materiale ligno-cellulosico stanno portando ad una maggiore diffusione di questa forma di energia.

1.4. FILIERA LEGNO-ENERGIA

La filiera degli impieghi energetici di biomasse legnose, contrariamente a quanto possa sembrare ad una prima valutazione è caratterizzata da notevoli elementi di complessità. Per un insieme diverso di ragioni, che si cercherà di evidenziare nel seguito, le caratteristiche economiche della domanda e dell'offerta, i canali di approvvigionamento, il sistema dei prezzi e, quindi, i margini di convenienza all'utilizzo delle biomasse sono, infatti, molto eterogenei.

Innanzitutto si è in presenza di impieghi finali diversi delle biomasse legnose che, in alcuni casi, comportano forti condizioni di competizione (non sempre scevre da conflitti tra le organizzazioni in gioco, viste le politiche di incentivazione pubblica esistenti per alcune destinazioni finali).

Nel sistema foresta-legno si possono individuare diverse filiere; l'utilizzo a fini energetici di biomasse legnose si può, quindi, porre in competizione con:

- la produzione industriale di pannelli;
- la produzione di paste ad uso cartario;
- l'utilizzo in una serie molto articolata di nicchie di mercato (produzione di paleria, carbone vegetale attivato per filtri o impieghi farmaceutici, di tannino, di segatura per impieghi zootecnici, di prodotti compositi legno-plastica per la realizzazione di sedie da ufficio, cruscotti per auto, ecc.).

Nel settore degli impieghi di biomasse a fini energetici, si ha una notevole diversificazione delle categorie di utilizzatori, con diverse propensioni di spesa (APAT, 2003). La "disponibilità a pagare" per l'acquisto di biomasse è, infatti, ben diversa tra:

- gli utilizzatori tradizionali di legna da ardere in aree rurali che possono ricorrere a forme di autoproduzione o che godono del diritto di Uso civico di legnatico che hanno l'esplicito o tacito diritto di raccogliere i residui delle lavorazioni boschive (consuetudine diffusa soprattutto nelle proprietà forestali collettive);
- gli utilizzatori di legna e carbone vegetale in camini o per barbecue in aree urbane o nelle seconde case in zone turistiche;
- le imprese che utilizzano legna da ardere in attività connesse alla ristorazione (pizzerie, forni, ristoranti, ecc.);
- le industrie del legno e della carta che fanno utilizzo dei propri sottoprodotti e scarti di lavorazione in impianti aziendali;
- le centrali che producono energia e/o calore impiegando diverse tipologie di biomasse.

E' evidente che l'elasticità della domanda di biomasse a fini energetici varia in misura significativa tra le diverse figure di utilizzatori sopra richiamate. In particolare l'elasticità rispetto al reddito ha un andamento del tutto peculiare: nelle fasce della popolazione a basso reddito c'è una tendenza a ridurre i consumi sostituendo il legname con altri combustibili (la legna da ardere si caratterizza quindi come un bene inferiore), nelle fasce a reddito alto c'è una domanda di legna da ardere per camini, stufe, forni, ecc. crescente (ovvero tale prodotto assume le caratteristiche di un bene superiore). Sul lato dell'offerta, le biomasse legnose possono essere rese disponibili in diversi assortimenti, in differenti fasi del ciclo di vita del prodotto legnoso, quindi con costi di produzione estremamente disomogenei. In molti casi le biomasse legnose sono disponibili a costi nulli, come nell'assegnazione di piante in piedi ad Uso civico. Nelle situazioni non rare in cui le imprese di lavorazione del legno non siano in grado di sostenere gli ingenti costi per impianti di trasformazione energetica che rispettino la normativa sulle emissioni, lo smaltimento dei residui legnosi può comportare dei costi e, quindi, una disponibilità a pagare perché il materiale sia impiegato da terzi. La convenienza all'utilizzo delle biomasse a fini energetici, oltre evidentemente ad essere connessa ai costi di produzione della materia prima, dipende da almeno altri tre fattori:

- la logistica, ovvero i costi di trasporto e stoccaggio, che possono fortemente incidere sui costi del materiale alla bocca dell'impianto;
- i sistemi di produzione di energia, ovvero il tipo e le dimensioni degli impianti, le modalità di alimentazione degli stessi, l'assortimentazione del materiale (tronchetti formato stufa, sminuzzato, pellet, ecc.), il rendimento energetico;
- i costi di produzione di energia con combustibili convenzionali (in genere fossili) o con altre fonti energetiche rinnovabili, alternativa che si può porre nelle condizioni di applicazione di tecniche di green pricing o dei certificati verdi.

La loro disponibilità e la velocità di ricostituzione del materiale consumato (bruciato) dipendono da una molteplicità di fattori che possono essere riuniti in due grandi gruppi: le caratteristiche ambientali e stagionali ed i fattori antropici (contesto socio-economico-politico). Dato per scontato che il prelievo non possa in ogni caso superare la produzione corrente, in quanto la riduzione del capitale produttivo porterebbe ad una diminuzione della produttività totale e della qualità del sistema, i fattori ambientali influenzano la capacità produttiva del sistema e determinano le quantità che in misura assoluta possono essere prelevate nello spazio e nel tempo.

Alcuni esempi: se in un ambiente temperato con buone precipitazioni (aree collinari e montane delle Alpi) un sistema forestale è in grado di produrre $5-10 \text{ t ha}^{-1}\text{anno}^{-1}$, in ambiente boreale i

ritmi di accrescimento sono molto più lenti ($0,5-1 \text{ t ha}^{-1}\text{anno}^{-1}$) e quindi il prelievo, a prescindere dalla biomassa legnosa presente, deve essere molto più cauto. In ambiente tropicale umido è invece la natura dell'ecosistema, con equilibri molto precari, a porre delle limitazioni nonostante produzioni decisamente elevate. Il secondo gruppo di fattori, quello legato all'attività dell'uomo, complica ulteriormente il calcolo di quanta biomassa possa realmente essere destinata alla produzione di energia. Da una parte le condizioni economiche e sociali pongono dei limiti circa le aree in cui effettuare il prelievo, cioè la disponibilità di spendere risorse via via maggiori man mano che le condizioni dell'accessibilità ai siti di raccolta diventano più difficoltose (morfologia, pendenza, viabilità presente, possibilità di meccanizzazione ecc.). D'altro canto, il patrimonio forestale svolge una molteplicità di funzioni che impongono dei vincoli che spesso cozzano con l'esigenza di un intenso prelievo di legno (per altro possibile dal punto di vista ecologico e tecnico), basti pensare alla funzione di protezione idrogeologica oppure a quella turistico-paesaggistica.

1.5. COMPETIZIONE NEI SETTORI DI UTILIZZO DELLA BIOMASSA

Anche la funzione produttiva entra fortemente in gioco in questo contesto. Il legno è una materia prima di estrema importanza per innumerevoli manufatti quotidianamente utilizzati dall'uomo, dai mobili ai pavimenti alle strutture nell'edilizia per cui, al di là delle tensioni sul rapporto prezzo opportunità, esiste un'obiettiva impossibilità di utilizzare tutta la biomassa legnosa presente in un bosco per scopi energetici.

Dal punto di vista gestionale le biomasse “vergini”, cioè quelle provenienti dalla produzione primaria, possono derivare dagli scarti della funzione produttiva primaria (legname da opera) oppure da popolamenti destinati ad hoc alla loro produzione. Inoltre esse possono essere prodotte “in foresta” o “fuori foresta” se i siti rientrano o meno nella definizione legale di bosco.

Nel primo caso il sistema selvicolturale adottato tiene esclusivamente conto delle caratteristiche (dimensioni e qualità) degli assortimenti che costituiscono l'obiettivo produttivo e, almeno in teoria, lo “scarto” dovrebbe essere ridotto alle quantità minime possibili. Naturalmente è possibile in questo caso distinguere nei diversi approcci selvicolturali al bosco. Se ad esempio in pecceta o faggeta la selvicoltura è di norma una selvicoltura di popolamento con la quale tutti gli alberi del bosco rientrano più o meno negli obiettivi gestionali, nei boschi misti (soprattutto di latifoglie), la selvicoltura d'albero che concentra le cure su pochi individui rende possibile la produzione di masse maggiori da destinare alla produzione di energia. Nella produzione fuori foresta (arboricoltura da legno a ciclo lungo), la biomassa oltre che provenire dalla ramaglia e dai cimali delle piante principali, può essere ottenuta dalle piante accessorie (arboree o arbustive), già previste e destinate a questa funzione in sede di progettazione dell'impianto. I popolamenti destinati all'esclusivo utilizzo energetico, le *Short Rotation Forestry* (SRF) e *Medium Rotation Forestry* (MRF), dal punto di vista selvicolturale, hanno l'innegabile aspetto positivo di non dover perseguire obiettivi di qualità degli assortimenti ma solo di quantità di materia prima prodotta. Per contro, mentre è molto facile utilizzare anche legname di pregio per la combustione, diventa piuttosto complicato e lungo trasformare un popolamento con scarse qualità tecnologiche del legname presente in una produzione di assortimenti di pregio. Nel bosco propriamente detto la produzione di legno destinato esclusivamente alle biomasse da energia trova nel governo ceduo la forma ottimale di gestione. La facilità di rinnovazione, il rapido accrescimento nei primi anni ed i turni relativamente brevi rendono questi tipi di boschi una fonte preferenziale di biomassa legnosa. Dal punto di vista produttivo, dopo il relativamente lungo periodo di abbandono al quale gran parte di queste formazioni è stato sottoposto (molti popolamenti cedui non più ordinariamente gestiti si trovano oggi a superare

per 2-3 volte il turno consuetudinario), la massa legnosa accumulata supera spesso i 200 m³ con incrementi medi che raggiungono facilmente 8-10 m³ ha⁻¹ anno⁻¹). Per altro l'aspetto negativo è che in molti di questi boschi le ceppaie hanno ormai perso la capacità pollonifera e quindi la gestione ordinaria a ceduo non è più possibile e la massa legnosa deve necessariamente essere ottenuta attraverso i tagli di avviamento all'alto fusto; questo fatto implica una selezione accurata dei fusti (martellata da parte di un tecnico forestale) ed un prelievo dilazionato nel tempo. Un ulteriore problema all'utilizzo di questa risorsa è dovuto alla diffusa mancanza di una adeguata viabilità in grado di facilitare le operazioni forestali connesse all'utilizzazione del bosco.

1.6. ENERGIA TERMICA ED ELETTRICA DALLE BIOMASSE

Diversi studi ed indagini a livello nazionale ed europeo mostrano come i consumi di biomassa per il riscaldamento domestico siano in aumento. Ciò è confermato dall'aumento dei consumi di biomassa in generale e di pellet in particolare e dal numero di apparecchi installati che risulta quasi raddoppiato negli ultimi 10 anni (ENEA, 2012). Per un utilizzo sostenibile delle risorse disponibili si sta promuovendo in particolare l'utilizzo delle biomasse per la produzione di calore ad uso civile o industriale, con eventuale produzione combinata di energia elettrica in impianti cogenerativi.

Nel nostro Paese è presente un buon potenziale di biomassa disponibile da residui della lavorazione del legno, residui agroindustriali e da filiere boschive che permetterebbero uno sviluppo notevole del settore (paglie: 16.000 kt/anno; potature: 5.000 kt/anno; sanse e vinacce: 1.320 kt/anno; foreste: 2.200 kt/anno). Particolarmente significativa è la crescita della produzione di elettricità da biomasse solide, che è stata mediamente pari al 14,7% per anno dal 2001 (20,8 TWh prodotti), arrivando a 62,2 TWh nel 2009, con un aumento del 7,4% rispetto al 2008. La maggior parte di questa produzione (62,5% nel 2009) proviene da impianti di cogenerazione, che utilizzano la biomassa con elevata efficienza consentendo il recupero e la riutilizzazione anche di una frazione significativa del calore prodotto dalla generazione elettrica. Il Piano di Azione Nazionale (PAN) sulle rinnovabili affida un ruolo fondamentale alle biomasse: infatti queste andranno a coprire, rispetto al totale delle fonti rinnovabili, il 19% del totale di consumi di

elettricità (18.780 GWh), il 54% dell'obiettivo sulla quota di rinnovabili negli usi di calore e raffrescamento (5.670 ktep) e l'87% dell'obiettivo di rinnovabili per il settore dei trasporti (2.530 ktep).

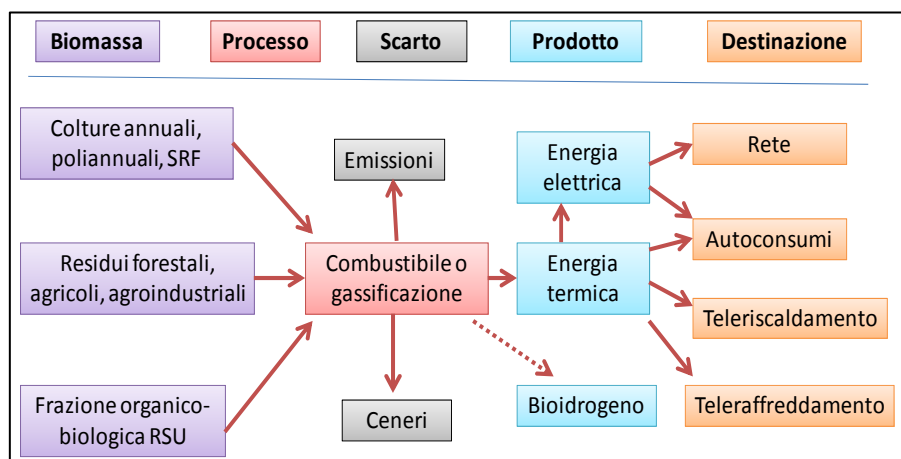


Figura 4. Schema di filiera dei biocombustibili solidi

La Figura 4 mostra uno sinteticamente uno schema di filiera dei biocombustibili solidi, con indicazione delle principali fonti di reperimento della biomassa, dei processi produttivi e prodotti finali e delle destinazioni finali.

Relativamente al recupero della biomassa da residui forestali, va ricordato come sia spesso difficile accedere ai boschi e ai terreni a causa della presenza di vincoli di varia natura, delle pendenze dei terreni, della carenza di infrastrutture (viabilità, presenza di imposti, ecc.). Le principali barriere alla diffusione dell'uso della biomassa sono di carattere economico ed ambientale (con riferimento alle problematiche connesse all'emissione di particolato), ma occorre fare opportune distinzioni in base alla taglia degli impianti ed alla tipologia di applicazioni. Notevoli incertezze provengono soprattutto dalla variazione dei prezzi della biomassa (in particolare le forti oscillazioni nel prezzo del pellet) e dai regimi di incentivazione. Queste ultime sono in alcuni casi variabili di anno in anno e non garantite a lungo termine. Così come altre tecnologie di sfruttamento delle rinnovabili, anche gli impianti a biomassa spesso non si sostengono economicamente se non sono incentivati a livello nazionale o locale. Alcuni studi hanno individuato nella combustione della biomassa legnosa una delle principali fonti di particolato in atmosfera (sia PM10 che PM2,5), portando all'applicazione di disposizioni a livello locale e regionale che limitano l'utilizzo degli apparecchi per il riscaldamento domestico alimentati a biomassa legnosa. A questo proposito è da rilevare come molti degli apparecchi di piccola taglia per la combustione di biomassa presenti sul mercato nazionale siano progettati in base a criteri ormai obsoleti associando impropriamente il termine biomassa al concetto di "combustione pulita" senza prestare la dovuta attenzione alla fenomenologia della combustione e della formazione di inquinanti e promuovendo l'utilizzo di biomasse alternative al legno (mais, sansa, gusci ecc.) il cui utilizzo in realtà comporta problemi non ancora completamente risolti in questo tipo di apparecchi.

La proponibilità di impianti decentralizzati, ove possibile, con la produzione di oli vegetali e di biomasse da utilizzare per la produzione diretta di elettricità e calore o attraverso la trasformazione mediante processi di digestione anaerobica in biogas, sembrerebbe un percorso più sostenibile da un punto di vista agro-energetico, maggiormente accattivante per i produttori agricoli e adeguato alla tipologia aziendale di piccole e medie imprese che caratterizza il territorio italiano. Lo sviluppo di filiere corte a supporto di impianti di piccole dimensioni (0,5 – 1,0 MW di potenza) consente una più razionale gestione delle superfici da destinare alla coltivazione di colture energetiche e dei residui colturali, evitando o riducendo eventuali impatti sugli agro-ecosistemi, sul paesaggio e sulla popolazione. D'altra parte l'integrazione di filiere corte, singole o multiple, nella stessa azienda o territorio e l'utilizzazione dei residui colturali impone piani agronomici diversificati favorendo l'interruzione di scelte monocolturali con l'introduzione di colture dedicate ed evitando di nuocere alla fertilità dei terreni, alla stabilità

dei sistemi agricoli ed alla gradevolezza del paesaggio, rendendo quindi maggiormente sostenibile la pratica agricola.

Pur essendo largamente diffusa l'opinione per la quale lo sviluppo di filiere corte comporti un basso impatto ambientale, ancora pochi sono gli studi a riguardo, ma soprattutto poche sono le informazioni relative ad un'ampia casistica riferita alle peculiarità territoriali e delle tipologie strutturali-produttive delle aziende che comprenda anche i sistemi di trasporto impiegati e lo stoccaggio delle biomasse.

Nonostante l'indubbio vantaggio dal punto di vista del bilancio di CO₂, la produzione di energia mediante combustione di biomassa legnosa non sembra essere sempre un processo ottimale dal punto di vista dell'impatto ambientale. Di fatto la biomassa legnosa è un combustibile solido la cui combustione è affetta da problemi simili a quelli del carbone e di altri combustibili di scarto e richiede, quindi, una gestione accurata al fine di minimizzare le emissioni inquinanti. Inoltre, la biomassa legnosa grezza (es. sminuzzato) ha un potere calorifico inferiore (PCI) piuttosto basso se rapportato al volume e quindi il suo trasporto, specialmente da fonti di approvvigionamento distanti, può avere un impatto ambientale non trascurabile, che può vanificare parte dei vantaggi derivanti dall'uso di una fonte rinnovabile. D'altro canto, l'attivazione di una filiera corta ottimizzata può portare notevoli vantaggi non solo dal punto di vista ambientale ma anche, per lo sviluppo locale del territorio coinvolto, dal punto di vista economico e sociale. Direttamente connessi a questi aspetti di efficienza energetica e basso impatto delle tecnologie adottate, vi sono gli aspetti più strettamente legati alla tipologia del territorio considerato:

- il legno ha un carattere territoriale più marcato di tutte le altre materie prime: la sua produzione è ubiquitaria almeno alle nostre latitudini e alle nostre condizioni climatiche, al netto delle superfici territoriali soggette a certe destinazioni urbanistiche (residenziali, industriali e infrastrutturali) incompatibili con una vera funzione di produzione del legno. Si è visto comunque come anche in queste ultime aree una certa quota di legno-energia venga prodotta come scarto della manutenzione del verde, comunque presente. Pertanto la filiera legno-energia ha una fortissima relazione col territorio e con gli innumerevoli attori che a vario titolo vi operano: la prima fase del processo produttivo della filiera in esame, cioè la produzione di legno come porzioni vegetali separate dalla vegetazione che lo genera, avviene e può avvenire praticamente dappertutto. Sono piuttosto altri gli elementi che fanno la differenza nell'attivazione o meno di una filiera a valle, ovvero nella prosecuzione delle operazioni di raccolta, condizionamento, lavorazione,

- omogeneizzazione del prodotto: in particolare quantità reperibile, distanza e costo di recupero, domanda per il prodotto legno-energia finale;
- la filiera complessiva è data dal complesso di altre filiere, una per ciascun prodotto finale (legna da ardere, cippato, pellet); le filiere di questi prodotti sono molto differenti per grado di articolazione, numero di operatori coinvolti, livello di diffusione sul territorio, volume economico complessivo, ma sono comunque interdipendenti tra loro, nel senso che gli operatori di una filiera possono svolgere un ruolo produttivo in più filiere contemporaneamente;
 - il punto di possibile debolezza generale nella filiera legno-energia, per gli impianti ad uso collettivo, è rappresentato dalla sua relativa complessità organizzativa. Costruire le relazioni di filiera necessarie per gestire una rete di teleriscaldamento, è certamente più complesso che comprare gasolio o GPL. E' un percorso che presuppone una cultura dello sviluppo locale, che si costruisce attraverso il coinvolgimento dei soggetti economici ed istituzionali del territorio, e che in definitiva consente di realizzare obiettivi che rappresentano il punto di maggior forza della filiera legno-energia. Un altro aspetto critico è rappresentato dal differenziale di costo tra le caldaie tradizionali e le moderne caldaie a legna. Tale criticità è comunque bilanciata dal rilevante risparmio sui costi energetici, che consente di ripagare l'investimento in un tempo variabile tra i 4-7 anni. Inoltre con il crescere della domanda di questo tipo di impianti è prevedibile in prospettiva una diminuzione dei costi.

Ipotizzando che la biomassa di partenza sia legname proveniente dall'ambiente forestale, sarà opportuno valutare la convenienza ad avviare la filiera sulla base delle seguenti considerazioni: esistenza della domanda di biomassa, distanza di movimentazione che non deve superare i 30-40 km (filiera corta), accessibilità delle risorse forestali, tipologia di gestione forestale (cedui vs. fustaie), proprietà forestale, livello di meccanizzazione forestale, logistica e stoccaggio delle biomasse. E' quindi necessario pianificare con attenzione, soprattutto quando non si fa conto su forme di incentivo o contributo, se e come avviare una filiera- legno energia.

Le recenti disposizioni programmatiche e legislative, a livello nazionale e regionale, testimoniano l'impegno delle istituzioni nell'orientare il consumo e lo sviluppo di tecnologie e di prodotti da fonti rinnovabili. Tale impegno si è concretizzato, principalmente, con l'esenzione da accisa di quote significative di biocarburanti (200 mila t dal 2005 al 2010), con l'erogazione di sussidi all'impianto di colture dedicate alla produzione di biomasse (in alcune Regioni), con l'introduzione di un sistema di mercato basato sulla emissione di Certificati Verdi

(CV), che possono tutelare meglio il reddito dei produttori di materia prima (gli agricoltori). In particolare, a partire dalla Finanziaria 2008 e nel suo “collegato” sono previsti incentivi per la produzione di energia elettrica in impianti alimentati da biomasse agroforestali. Le specifiche condizioni per accedere a tale regime implicano sia che le biomasse e il biogas utilizzati per alimentare gli impianti derivino da prodotti agricoli, di allevamento e forestali, ivi inclusi i sottoprodotti, sia che questi prodotti siano stati ottenuti nell’ambito di intese di filiera o contratti quadro, oppure da filiere corte, ossia quelle in cui i prodotti sono ricavati entro un raggio di 70 km dall’impianto che li utilizza per generare elettricità.

Le modalità di incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti alimentati da fonti rinnovabili (esclusi gli impianti fotovoltaici) sono attualmente stabilite dal DM 6 luglio 2012. Possono accedere agli incentivi gli impianti di potenza non inferiore a 1 kW. Gli incentivi si applicano agli impianti nuovi, integralmente ricostruiti, riattivati, oggetto di intervento di potenziamento o di rifacimento che entrano in esercizio a partire dal 1° gennaio 2013.

Gli incentivi sono riconosciuti sulla produzione di energia elettrica netta immessa in rete dall’impianto. L’energia elettrica autoconsumata non ha accesso agli incentivi. In base alla potenza dell’impianto sono previsti due distinti meccanismi incentivanti:

- una tariffa incentivante omnicomprensiva (T_o) per gli impianti di potenza fino a 1 MW che viene calcolata con la formula $T_o = T_b + P_r$, determinata cioè dalla somma tra una tariffa incentivante base (T_b), il cui valore è individuato per ciascuna fonte, tipologia di impianto e classe di potenza nell’Allegato 1 del DM 6/07/2012, e l’ammontare di eventuali premi (P_r) per tipo d’impianto (es. riduzione emissioni). L’energia immessa in rete dagli impianti che accedono alla tariffa omnicomprensiva risulta nella disponibilità del GSE (Gestore Servizi Energetici) e non del produttore.
- un incentivo (I) per gli impianti di potenza superiore a 1 MW e per quelli di potenza fino a 1 MW che non optano per la tariffa omnicomprensiva che viene calcolato con la formula $I = T_b + P_r - P_z$, come differenza tra la tariffa incentivante base, a cui vanno sommati eventuali premi di cui ha diritto l’impianto, e il prezzo zonale orario dell’energia (riferito alla zona in cui è immessa in rete l’energia elettrica prodotta dall’impianto). L’energia prodotta dagli impianti che accedono all’incentivo (I) resta nella disponibilità del produttore.

La tariffa base per gli impianti a biomassa varia in funzione della tipologia di classificazione della biomassa e della potenza netta erogata. Per la biomassa derivante da sottoprodotti di origine biologica, tale tariffa decresce all’aumentare della potenza e passa per esempio da 0,257 €/kWh per impianti di potenza inferiore a 300 kW, a 0,145 €/kW per impianti superiori a 5

MW. Per il biogas, in riferimento alla stessa potenza, si passa rispettivamente da 0,236 a 101 €/kW.

In entrambi i casi la durata del diritto agli incentivi è di 20 anni. Con il DLgs 28/2011 le biomasse che usufruiscono della tariffa omnicomprensiva, devono tuttavia essere certificate e conformi alle classi di qualità A1 e A2 così come stabilito nelle norme UNI-EN 14961-2 per il pellet e UNI-EN 14961-4 per il cippato. Opportunità per l'uso energetico di biomasse agro-forestali derivano, inoltre, sia dal Quadro strategico nazionale (QSN), approvato dalla Commissione europea con decisione del 13 luglio 2007 per l'utilizzo dei fondi strutturali 2007-2013 assegnati all'Italia per la politica regionale di sviluppo (il quale destina una consistente quota delle risorse allo sviluppo delle FER), sia dalle nuove misure per lo sviluppo rurale. Vi è un grosso interesse del mondo agricolo e agro industriale per le opportunità offerte nella realizzazione di filiere agro-energetiche; l'agricoltore è chiamato ad assumere competenze anche nel settore della produzione elettrica, della cogenerazione, della produzione ed utilizzo dei biocarburanti.

1.7. LOGISTICA DELLE BIOMASSE AD USO ENERGETICO

Il settore della logistica è l'anello della filiera che unisce il settore produttivo (l'agricoltura) con il settore industriale (la trasformazione). Le scelte che si fanno nella individuazione, per esempio, della macchina per la raccolta di una coltura energetica, influenzano sia la redditività della coltura, sia i costi di trasporto, sia la possibilità in industria di conservare il prodotto e di dover prevedere sistemi di pre-trattamento alla bocca dell'impianto. E' un settore che contribuisce in maniera sostanziale al bilancio economico della coltura ma specialmente all'impatto ambientale della filiera.

A questo riguardo, sempre facendo riferimento per esempio alla scelta del cantiere di raccolta, questo influisce sulla qualità del taglio basale (riducendo nelle colture poliennali la possibilità di infiltrazione di patogeni nella ceppaia), influisce sul compattamento del terreno agricolo, dovuto sia agli organi propulsori della raccogliitrice che alla scelta del sistema di trasporto fuori campo del prodotto, ma influisce anche sull'impatto ambientale dei trasporti dal campo all'industria di trasformazione avendo la possibilità di aumentare sensibilmente la massa volumica del prodotto riducendo quindi di il numero dei trasporti su strada.

La scelta del cantiere di raccolta può incidere inoltre sulla conservabilità del prodotto, influenzando quindi sul dimensionamento degli impianti di trasformazione o sull'esigenza di prevedere sistemi di stoccaggio.

E' quindi un settore strategico per l'agricoltore ma specialmente per l'industriale che deve assicurarsi l'approvvigionamento del materiale con le caratteristiche fisiche volute (pezzatura, omogeneità, umidità ecc). Il settore delle macchine agricole è caratterizzato in Italia da una miriade di piccoli imprenditori che se da un lato hanno una capacità imprenditoriale e di innovazione notevole, dall'altra hanno scarse risorse economiche da investire nella ricerca, specialmente nel settore delle bioenergie, in cui il successo economico non è legato tanto ai risultati tecnici raggiunti quanto alle indicazioni di politica agricola ed energetica regionali, nazionali e comunitarie.

Il sistema agricolo e agro-alimentare italiano, grazie ad un interessante quadro di strumenti ed incentivi che si è venuto componendo con le misure varate dalle ultime leggi finanziarie, è direttamente interessato sia per la possibilità di realizzare a breve termine piccole centrali elettriche per la cogenerazione alimentate a biomasse sia per la produzione e l'utilizzo nel fondo agricolo di biocarburanti.

1.8. PRINCIPALI PROCESSI DI CONVERSIONE ENERGETICA DELLE BIOMASSE

Le strade per produrre energia dalle biomasse vegetali passano attraverso differenti modalità di conversione, che possono essere brevemente riassunte nei tre grandi raggruppamenti seguenti di conversione: termochimica, biologica e fisica (Candolo, 2005) (Figura 5).

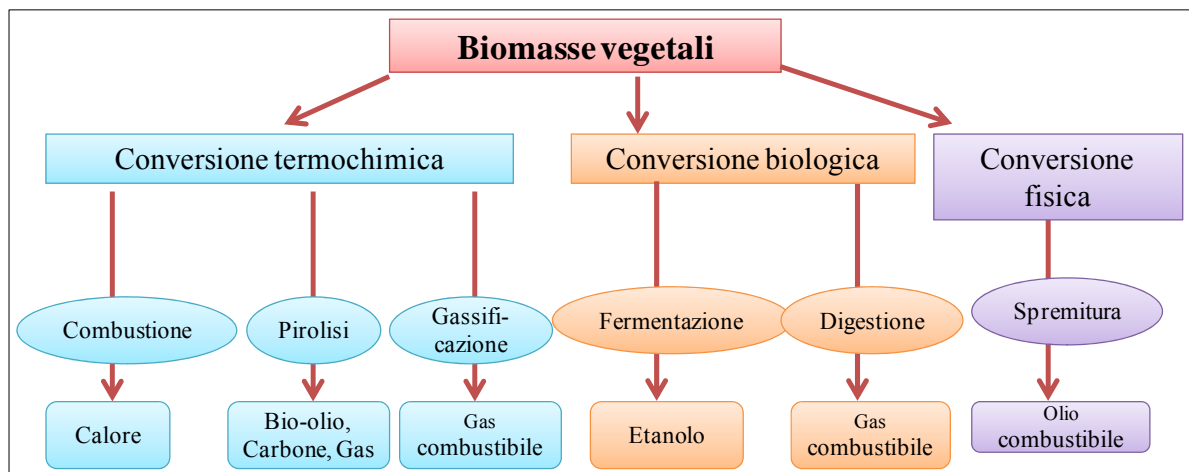


Figura 5. Schema relativo alle diverse modalità di conversione delle biomasse vegetali

1.8.1. CONVERSIONE TERMOCHIMICA

dell'energia presente nelle biomasse vegetali può essere ottenuta con diversi processi, quali la combustione, la pirolisi e la gassificazione.

La combustione è il processo più tradizionale, per essere efficiente richiede la riduzione del contenuto d'acqua della biomassa, riduzione che in genere viene ottenuta essiccando i prodotti all'aria. Ad esempio l'energia prodotta dalla combustione di 1 kg di legno secco è di circa 1.25×10^7 J. Se partiamo però da un prodotto con il 10% di materia secca, possiamo stimare che per far evaporare 9 kg di acqua necessitiamo di circa 2.2×10^7 J, da ciò si deduce che il processo di combustione è utilizzabile solamente se partiamo da prodotti aventi il più basso grado di umidità possibile, e comunque l'essiccazione deve avvenire attraverso l'azione del sole, che rende il processo economicamente conveniente. La combustione è da un punto di vista termodinamico, un processo di conversione dell'energia chimica del combustibile (biomasse) in calore.

Il calore si genera grazie alla reazione di ossidazione del carbonio in presenza di sufficiente ossigeno secondo la reazione: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{calore}$.

In Italia esistono circa 40 grossi impianti per la produzione di energia dalla combustione di biomasse, generalmente residui della lavorazione del legno, per una potenza elettrica totale di circa 330 MW. Tali impianti sono di tipo cogenerativo, nel senso che l'energia finale è data da calore ed energia elettrica. Parte del calore prodotto viene infatti utilizzato per produrre vapore che serve ad alimentare delle turbine collegate a dei generatori elettrici. La parte di calore rimanente può essere impiegata per utenze industriali o residenziali.

L'efficienza di tali impianti è dell'ordine del 20-25%, quindi piuttosto modesta. Tale rendimento si può abbassare ulteriormente se la biomassa di partenza ha un potere calorifico basso, dovuto essenzialmente ad un contenuto di umidità elevato. Gli impianti di cogenerazione per poter ottenere rendimenti vicini al 25% devono essere medio-grandi, cioè avere circa 10 MW di potenza elettrica. Per generare tali potenze le quantità di biomasse da bruciare diventano considerevoli, rendendo necessari complessi e costosi sistemi di abbattimento delle sostanze tossiche presenti nei fumi. In definitiva gli impianti che producono energia utilizzando la combustione delle biomasse vegetali possono interessare prevalentemente le piccole utenze domestiche. In effetti il mercato rende già disponibili caldaie che possono essere alimentate a legna, a cippato di legna, a granella di mais, a pellet, che consentono di provvedere alle necessità di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

La pirolisi (Figura 6) è un processo di conversione termochimica della materia organica, chiamata anche distillazione a secco, che si basa sulla trasformazione della biomassa ad opera del calore, in forte carenza di ossigeno. La pirolisi si può applicare a qualsiasi materiale organico purché a basso contenuto di acqua (<15%). Il materiale viene portato a temperature comprese tra i 200 e i 700 °C, talvolta immettendo opportune quantità di ossigeno che consentono l'innesco di una parziale combustione che porta ad un aumento della temperatura. Come prodotto finale si ottengono prodotti gassosi, liquidi e solidi in percentuale dipendente dai parametri di reazione. La ricerca in merito ha portato a sviluppare tre tipi di pirolisi:

- **pirolisi lenta**, ottenuta con temperature minori di 600 °C, e

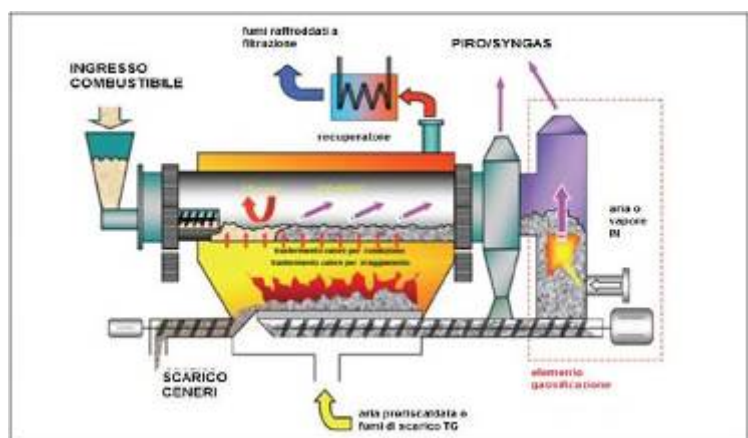


Figura 6. Schema di un impianto di conversione termochimica mediante pirolisi

lungo periodo di permanenza a tali temperature; il prodotto principale ottenuto è un carbone da legna che rappresenta circa il 30% della sostanza secca iniziale;

- **pirolisi veloce**, ottenuta con temperature tra i 500 e 650 °C: si ottengono prodotti gassosi che raggiungono l'80% del peso iniziale;
- **flash pirolisi**, condotta con temperature sui 650 °C e tempi di permanenza molto ridotti a tali temperature, inferiori ad 1 secondo; consente di ottenere un 60% di prodotti liquidi.

La flash pirolisi è il processo più promettente, in quanto consente di trasformare la biomassa in un prodotto liquido chiamato bioolio o raw tar, ad elevato contenuto energetico, facilmente trasportabile e conservabile per lungo tempo senza problemi di degradazione.

Allo studio della pirolisi vengono destinate ingenti risorse in tutto il mondo, attualmente tale processo è ancora in una fase sperimentale.

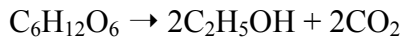
La gassificazione è un processo fisico chimico per mezzo del quale si trasforma un combustibile solido (legno, biomasse vegetali in genere) in un combustibile gassoso. Il processo consiste in una ossidazione incompleta dei composti carboniosi portati ad elevata temperatura (circa 1000 °C) in ambiente carente di ossigeno. Il gas ottenuto, chiamato syngas, può essere utilizzato direttamente per alimentare motori a combustione interna utilizzabili per la produzione di energia elettrica. Il syngas è una miscela di azoto, metano, idrogeno, monossido di carbonio ed altri gas. Il rendimento dei gassificatori per la produzione di energia elettrica è dell'ordine del 30-35%, valori nettamente superiori agli impianti a combustione. La maggior complessità impiantistica, unita ad alcune problematiche non ancora risolte relative alla depurazione del syngas, relega tale processo alla fase di impianti pilota. La gassificazione delle biomasse legnose può costituire inoltre una straordinaria opportunità per ottenere a costi relativamente bassi idrogeno, da utilizzare, per esempio, nelle celle a combustibile.

1.8.2 CONVERSIONE ATTRAVERSO PROCESSI BIOCHIMICI

La conversione attraverso processi biochimici dell'energia delle biomasse vegetali è sicuramente la via più conosciuta e collaudata anche in impianti industriali di trasformazione energetica. Essenzialmente i metodi di conversione biologica possono essere suddivisi in due processi:

- fermentazione alcolica,
- digestione anaerobica.

La **fermentazione alcolica** è il processo di trasformazione biochimica per mezzo del quale gli zuccheri sono trasformati in alcool etilico secondo la reazione:



La produzione di etanolo partendo da biomasse ad alto contenuto di zuccheri è ampiamente collaudata, in Brasile la fermentazione della canna da zucchero permette di ottenere etanolo ad un costo competitivo con quello della benzina. In Italia sono state effettuate esperienze con la barbabietola da zucchero, con costi di trasformazione antieconomici. In molte piante le molecole di glucosio sono presenti in forme polimere, sotto forma di amido e cellulosa, con struttura generale $(C_6H_{10}O_5)_n$. Gli amidi e l'emicellulosa possono essere convertiti in glucosio attraverso processi di idrolisi. L'idrolisi della cellulosa attraverso l'uso di acidi è stato utilizzato in Germania durante la seconda guerra mondiale, con costi tuttavia molto elevati. Attualmente sono stati sviluppati metodi alternativi di idrolisi, che si avvalgono degli enzimi prodotti da batteri (genere *Trichoderma*) o lieviti (*Sporotrichum polvirulentum*). Negli Stati Uniti tali processi sono utilizzati per produrre etanolo dalla granella di mais. In Cina il materiale di partenza utilizzato è la granella di sorgo. Il bioetanolo è il biocombustibile liquido più diffuso nel mondo, con 18 milioni di tonnellate prodotte nel 2004.

La **digestione anaerobica** (Figura 7) è un processo di conversione operato da batteri che partendo da biomasse ricche in cellulosa permette di ottenere un biogas contenente circa il 65%

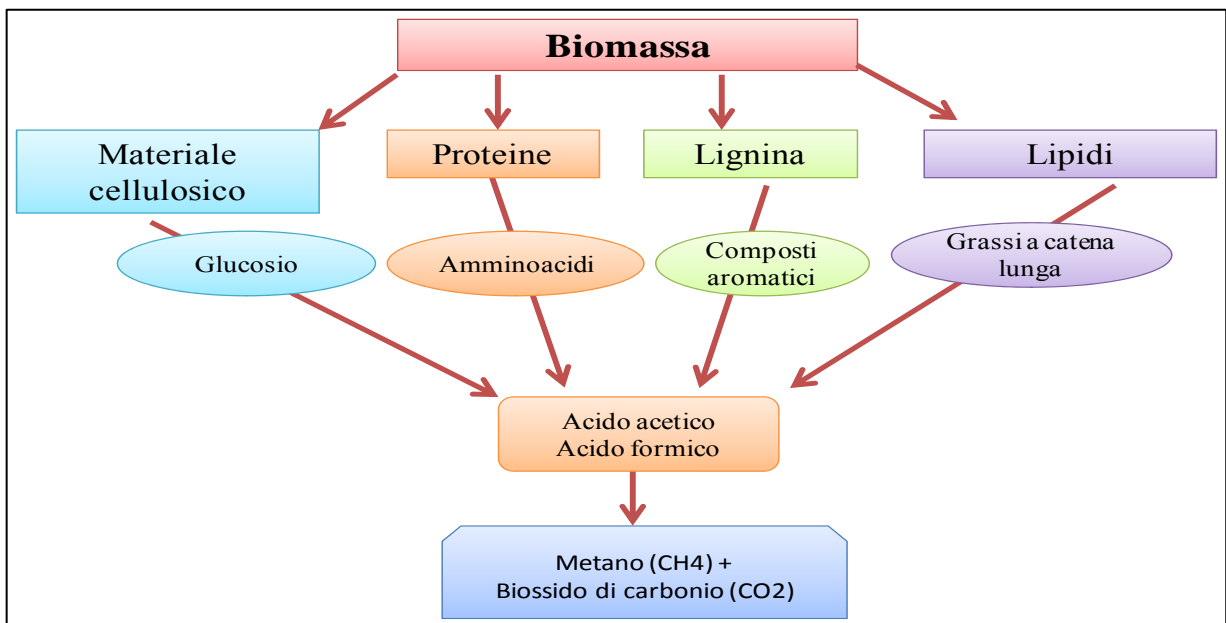


Figura 7. Schema del processo di conversione della biomassa attraverso la digestione anaerobica

di metano. Tale gas viene utilizzato per alimentare un motore endotermico collegato ad un generatore elettrico. L'energia elettrica prodotta viene direttamente immessa nella rete distributiva, e venduta a prezzo remunerativo (certificato verde) in quanto ottenuta da fonte energetica rinnovabile.

La biomassa più utilizzata è l'insilato di mais, da 1 t di silomais digerito si ottengono circa 10 m³ di metano. La componente digerita residua è utilizzabile come concime. Tali impianti sono molto diffusi nel nord Europa. Per ottimizzare il rendimento dell'impianto è conveniente disporre di utilizzatori del calore prodotto, in quanto per ogni kWh elettrico si produce circa 1 kWh sotto forma di energia termica. Per alimentare un impianto a biogas avente 1 MW di potenza elettrica sono necessari circa 300 ettari di insilato di mais. Tali impianti sono relativamente semplici e non richiedono personale specializzato per assicurarne il funzionamento.

1.8.3. CONVERSIONE ATTRAVERSO PROCESSI FISICI

La conversione fisica è essenzialmente un processo di spremitura meccanica applicato a granella ad alto contenuto di olio (girasole colza, soia). Il risultato finale della spremitura è un olio combustibile e dei pannelli proteici contenenti una percentuale di olio (max 10%) utilizzabili dall'industria mangimistica. L'olio vegetale così ottenuto, che è una miscela di esteri metilici degli acidi grassi, può essere utilizzato direttamente come carburante per motori diesel leggermente modificati, o essere trattato chimicamente per renderlo simile al gasolio. Tale processo prende il nome di trans esterificazione e porta alla produzione di estere metilico (biodisel) e glicerina. La glicerina ottenuta viene utilizzata in campo cosmetico, il biodisel è utilizzabile come il normale gasolio.

In Italia la quota massima di biodisel defiscalizzato è fissata in 200.000 t anno⁻¹, ed è stata ridotta rispetto alle 300.000 t anno⁻¹ consentite nelle annate passate. L'imposta sulla fabbricazione dei combustibili, la cosiddetta accisa, se ridotta porterebbe indubbiamente ad un notevole aumento della produzione di biocarburanti. Un produttore di energia elettrica derivante da fonti rinnovabili (es. da biogas alimentante un generatore elettrico) ha diritto ad un incentivazione, chiamata certificato verde, emessa dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale. Ogni MWh prodotto da fonte energetica rinnovabile ha diritto ad 1 certificato verde. Il prezzo di vendita del MWh è fissato in base a fasce tariffarie che tengono conto dell'orario di immissione dell'energia nella rete. Il certificato verde viene rilasciato per i primi otto anni di esercizio dell'impianto. I grossi produttori di energia elettrica hanno l'obbligo di produrre una quota di energia derivante da fonti energetiche rinnovabili. Tale quota è pari al 2% dell'energia

elettrica prodotta o importata da fonte non rinnovabile nell'anno precedente, eccedente i 100 GWh/anno. L'obbligo di immettere in rete energia prodotta da fonti rinnovabili si può assolvere anche comperando i certificati verdi di altri soggetti. Si viene quindi a creare un mercato dei certificati verdi, ad esempio nel 2011 il valore medio di un certificato verde è stato di 113,1 €/MWh (11,31 €cent/kWh).

Per quanto riguarda la produzione di bioetanolo e di biodisel vengono fissate delle quote defiscalizzate che vengono assegnate agli operatori che dispongono di impianti per la produzione e miscelazione di tali prodotti. Le quote defiscalizzate assegnate fino al 2007 non consentono di prevedere incrementi produttivi di tali biocombustibili. L'utilizzo di olio vegetale non esterificato come combustibile, attualmente non è regolamentato da norme ufficiali. Se, come già ricordato, venisse operata una riduzione delle accise sui biocarburanti, limitata a quelli originati da produzioni nazionali, si darebbe un impulso al settore delle energie rinnovabili ed all'agricoltura nel suo complesso.

2. L'AREA DI STUDIO E LA CENTRALE TERMICA

2.1. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO E DELLE PIANTAGIONI ENERGETICHE DI PIOPPO

L'area sperimentale oggetto di studio ha riguardato un'area complessiva di 10.000 ha nella quale è stata condotta l'indagine sulla consistenza e distribuzione delle piccole formazioni forestali in ambiente rurale potenzialmente utilizzabili a fini energetici (caso studio 2), all'interno della quale è situata l'azienda dell'Unità di Ricerca per l'Ingegneria Agraria del Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura (CRA-ING) di Monterotondo (RM), località Tormancina (42°06' N, 12°37' E). Nell'azienda, della superficie complessiva di circa 80 ettari distribuiti in pianura e collina, a 30 km ad est della capitale (Figura 8), è stata

costituita la piantagione di pioppo di SRF e installata la centrale a biomassa oggetto di studio (casi studio 1 e 4). La piantagione è stata realizzata su un campo con giacitura pianeggiante a prevalente contenuto di argilla e con basso livello di sostanza organica, azoto e fosforo (Colorio et al. 1996). La tessitura è franco-argillosa con il 38% di argilla, il 38% di sabbia, il 24% di limo e scheletro trascurabile. La significativa presenza di argilla conferisce pesantezza al terreno, una permeabilità moderatamente bassa ed una buona capacità di ritenzione idrica. Il PH è pressoché neutro, con assenza quasi totale di calcare.

La **piantazione sperimentale** Short Rotation Forestry (SRF) è stata realizzata nel 2005 e 2006 su 7 ettari di cui 4 impiantati meccanicamente con impiego di trapiantatrice di talee (Verani *et al.*, 2006). Sono stati monitorati i dati meteorologici dell'area (temperatura media mensile e piovosità) tramite una stazione posta in prossimità della piantagione. Nella Figura 9 è mostrato il diagramma termo-pluviometrici

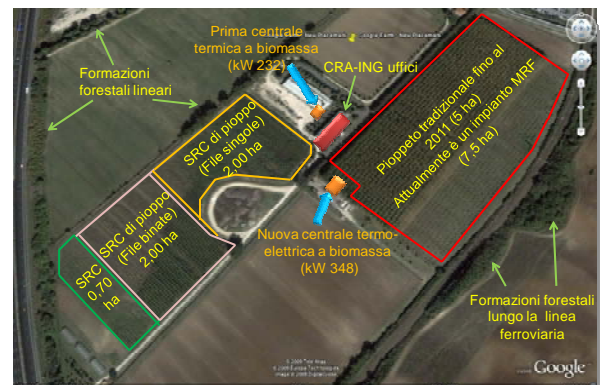


Figura 8. Centro della microfiera energetica presso il CRA-ING di Monterotondo (RM)

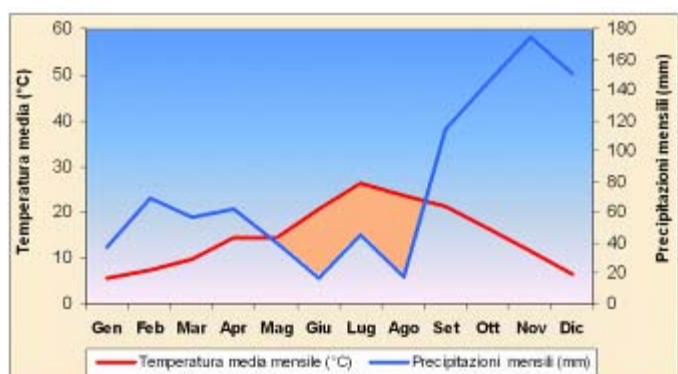


Figura 9. Diagramma termopluviometrico relativo all'area di studio per l'anno 2006 (secondo Walter-Lieth)

relativo all'anno 2006 (secondo Walter-Lieth), mentre della Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle condizioni meteorologiche avute durante il periodo 2006-2010.

L'impianto di SRF meccanizzato, sottoposto a monitoraggio su una superficie di 4 ettari, è stato realizzato secondo due tipologie sperimentali: file singole (*single row* – SR) e file binate (*twin rows* – TR) (Figura 10). La distanza tra le file sono state per entrambi le tipologie di 2,80 m, mentre sulle file le talee sono state impiantate ad una distanza teorica di 0,50 m l'una dall'altra. Nelle binate la distanza tra le file di una stessa bina è stata di 0,75 m (Figura 11).

Tabella 1. Dati meteorologici dell'area di studio nel periodo 2006-2010

Anni	Precipitazioni annuali mm	Precipitazioni Maggio-Agosto mm	Temperatura media annuale °C	Temperatura media a Giugno °C
2006	512,6	30,3	15,8	27,2
2007	473	18,5	16,5	25
2008	780,5	49,5	15,5	24,5
2009	927,2	65,4	15,6	24,5
2010	905,3	75,4	15	25,7
2001-2010	627,5	42,3	15,3	25,4

Le densità effettive ottenute in campo sono risultate di 7.140 talee ha⁻¹ per le file singole e 10.360 talee ha⁻¹ per le file binate. In base alle pratiche di gestione raccomandate in Italia (Facciotto, 1998), la

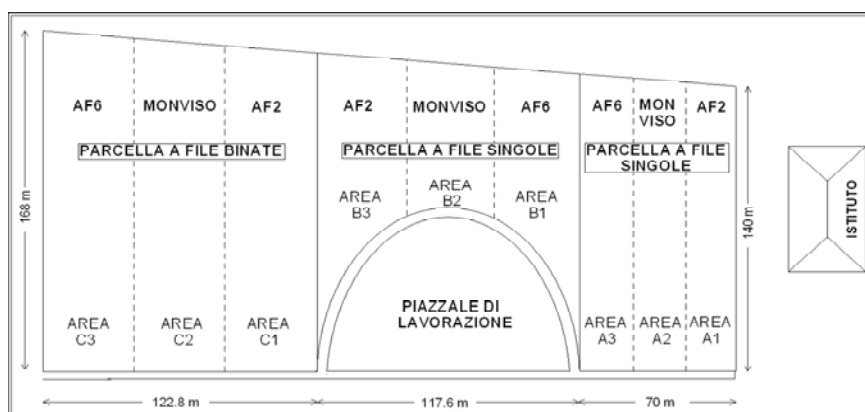


Figura 10. Schema delle piantagioni SRF monitorate, distinte per tipologia d'impianto e per clone

piantazione è stata realizzata mediante l'esecuzione delle seguenti operazioni agronomiche:

- 1) doppia lavorazione del terreno (rippatura profonda ed aratura leggera);
- 2) fertilizzazione di fondo

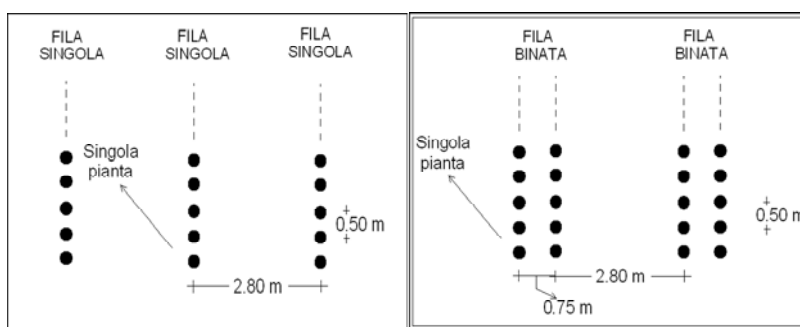


Figura 11. Schema delle due tipologie d'impianto della SRF di pioppo: file singole e file binate

- con 100 kg ha⁻¹ di PO₂ e 100 kg ha⁻¹ di K₂O;
- 3) affinamento del terreno prima dell'impianto tramite erpicatura con erpice rotante;
 - 4) impianto meccanizzato con impiego di trapianta talee (talee di 22-24 cm) (Figura 12);
 - 5) diserbo chimico post-impianto antigerminello (p.a. oxifluarfen, 480 g/ha) ;
 - 6) fertilizzazione di copertura con 100 kg ha⁻¹ di N;
 - 7) irrigazione di soccorso con 400 m³ ha⁻¹ di volume d'adacquamento.
 - 8) Taglio della piantagione (*cut back*) a fine stagione vegetativa per un migliore affrancamento delle ceppaie e favorire un maggior ricaccio di polloni per l'anno successivo.



Figura 12. Fase d'impianto della SRF con trapianta talee

I cloni di pioppo impiegati nell'impianto e posti a confronto durante il loro ciclo di accrescimento sono: AF2 (*P. x canadensis* Moench); AF6 (*P. nigra* L. x *P. x generosa* A. Henry); Monviso (*P. x generosa* A. Henry x *P. nigra* L.) (Facciotto et al., 2006; Picco F. et al., 2007). Questi cloni sono stati selezionati per produrre elevate quantità di biomassa ad uso energetico e per la loro resistenza alle infezioni naturali di *Melampsora* spp. e *Marssonina brunnea*.

2.2. CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA CENTRALE A BIOMASSA

I rilievi sperimentali e l'elaborazione dei risultati ottenuti relativamente all'analisi della sostenibilità economica della microfiliera energetica di Monterotondo, sono stati condotti in riferimento all'utilizzazione della centrale a cippato che utilizzava la biomassa autoprodotta dalle piantagioni SRF aziendali per produrre energia termica sufficiente al fabbisogno di riscaldamento invernale degli uffici del CRA-ING di Monterotondo (Figura 13). Il volume dell'edificio è di 5880 m³ che venivano riscaldati precedentemente utilizzando una centrale termica funzionante a gasolio. Il periodo di riscaldamento considerato è mediamente di 5 mesi, cioè di 150 giorni, da novembre ad aprile dell'anno successivo. L'installazione della centrale a cippato ha comportato alcuni adattamenti al sistema di distribuzione del calore già esistente. Le modifiche o integrazioni sono state necessarie essenzialmente per quanto riguarda il sistema di collegamento del gruppo caldaia con all'impianto di riscaldamento dell'edificio esistente installando uno scambiatore di calore modello ZILMET tipo 23 a 29 piastre (pressione max 10; temperatura max 104 °C) (Figura 14) che ha tenuto separati i due circuiti, quello della produzione di acqua calda della caldaie e quello della rete di riscaldamento dell'edificio. E' stato poi installato un accumulatore dell'acqua calda della capacità di 3000 litri, per garantire il buon funzionamento dell'impianto di riscaldamento e svolgere una funzione di volano termico per l'acqua nel circuito di riscaldamento dell'impianto (Figura 15).

La **centrale termica a cippato** di riferimento per l'analisi è di piccola potenza nominale, 232 kW (Figura 16), dimensionata per il riscaldamento invernale e la produzione di acqua sanitaria per gli uffici della struttura di ricerca. Le componenti principali della centrale sono riportate nello schema di Figura 17.



Figura 13. Edificio adibito ad uffici del CRA-ING, riscaldato a biomassa



Figura 14. Scambiatore di calore a piastre



Figura 15. Accumulatore collegato all'impianto di riscaldamento

La centrale è di tipo automatico funzionante a cippato di legno. Il gruppo termico, modello standard, è un generatore di calore per impianti di riscaldamento ad acqua fino a 90 °C e per la produzione di acqua calda sanitaria. Utilizzabile in svariati settori. La caldaia soddisfa i requisiti di rendimento ed i limiti di emissione della Classe 3 della norma UNI EN 303-5:2004: Rendimento della caldaia $n_K = 82,5\%$, $CO_{10\%O_2} = 1184 \text{ mg/m}^3$, $OCG_{10\%O_2} = 30 \text{ mg/m}^3$, $Polveri_{G10\%O_2} = 76,4 \text{ mg/m}^3$.

Il **gruppo termico** è un generatore di calore per impianti di riscaldamento ad acqua fino a 90 °C e per la produzione di acqua calda sanitaria. E' utilizzabile in svariati settori:

- Civile, per riscaldamento di abitazioni mono e plurifamiliari, uffici, ristoranti, alberghi;
- Agricolo, per il riscaldamento di serre, agriturismi, stalle di allevamento, grossi fabbisogni di acqua calda per produzioni agroalimentari;
- Industriale, per il riscaldamento di capannoni, locali di lavoro, in particolar modo l'industria del legno.



Figura 16. Centrale a biomassa oggetto della sperimentazione

La **struttura** è di tipo monolitico, smontabile e sostituibile nei suoi pezzi di ricambio. E' composta da più parti e più precisamente da: basamento, caldaia, bruciatore, cappa fumi, serbatoio combustibile, quadro comandi.

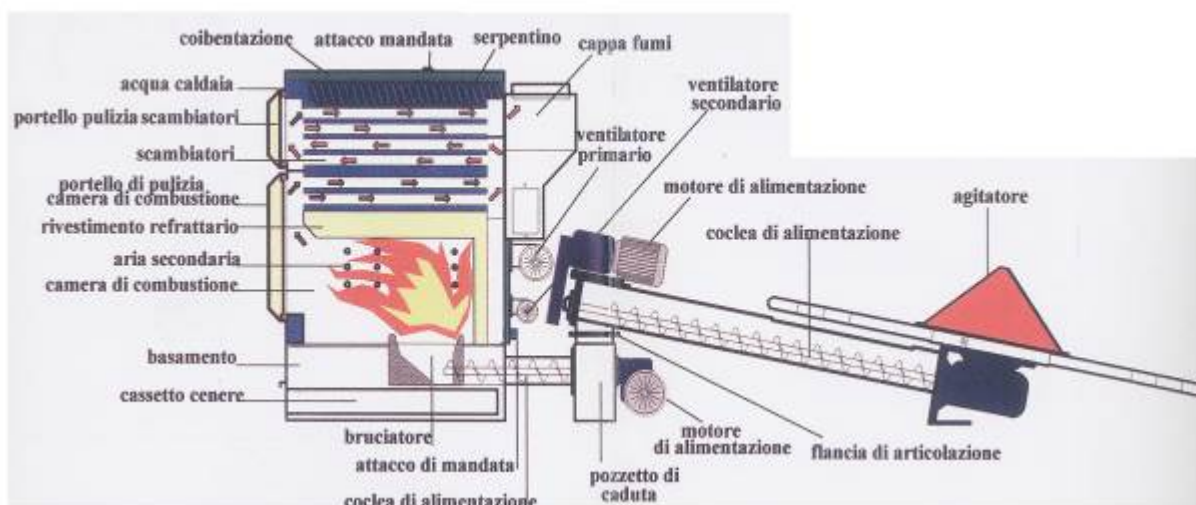


Figura 17. Schema relativo alle principali componenti della centrale termica

La **caldaia** é costituita da uno scambiatore di calore a tubi di fumo del tipo Mannesman immersi sull'acqua. Per avere il massimo rendimento termico è stato creato un circuito con ben quattro giri di fumo, al fine di allungare il più possibile il percorso e la superficie di scambio termico. La parte esterna, al fine di evitare la minima dispersione termica, è coibentata da un materassino di lana di vetro dello spessore di 10 cm, ricoperto da carter in lamiera verniciata con polveri epossidiche.

Il **bruciatore** è del tipo con alimentazione dal basso e per questo motivo è in grado di bruciare oltre a cippato di ottima qualità, anche cippato di qualità inferiore, gusci di mandorle, nocciole, pinoli ed altri combustibili con la stessa granulometria. Onde evitare ritorni di fiamma, vengono utilizzate due coclee che mediante un pozzetto di caduta, creano uno stacco del combustibile; due ventilatori di tipo tangenziale, molto silenziosi, forniscono l'aria, comburente dividendola in aria primaria, secondaria e terziaria; il braciere e le parti soggette ad usura sono costruiti in ghisa massiccia per garantirne una lunga durata, man mano che il combustibile brucia, spinge la cenere in un apposito cassetto posto sotto lo stesso bruciatore; in collaborazione con la camera di combustione, viene prodotta una combustione ottimale.

La **cappa fumi** è stata ideata e progettata secondo un particolare ed esclusivo sistema di recupero di calore ormai perso. Questo calore viene reintegrato tramite il condotto dell'aria primaria del bruciatore, al fine di sfruttare al massimo la combustione.

La **prima accensione** e regolazione si effettua in manuale (Automatica optional). Per le successive, la caldaia riparte in automatico, grazie al sistema di automantenimento che mantiene il braciere sempre pronto anche dopo lunghissime soste. La regolazione della combustione viene effettuata sul quadro comandi, variando sia la quantità del combustibile, che la quantità di aria comburente al bruciatore.

La **manutenzioni ordinaria** della caldaia è limitata a pochi minuti a settimana, grazie ad una combustione pulita e priva di incombusti solidi: essa consiste nella pulizia del bruciatore, in caso si siano formate eventuali croste, nello svuotamento del cassetto cenere sia del bruciatore che nella cassa fumi e nel pulire i tubi di fumo con l'apposito sistema al fine di mantenere sempre un ottimale scambio termico.

La **manutenzione straordinaria** consiste nel controllare ogni fine stagione lo stato dei componenti soggetti ad usura. In ogni caso non si richiedono tempi lunghi in virtù del fatto che la caldaia è stata progettata e costruita secondo le caratteristiche di accessibilità ed intercambiabilità dei suddetti pezzi.

Il **serbatoio combustibile** (Figura 18), in questo tipo di caldaia a pescaggio diretto, è di tipo metallico, installato nella parte posteriore con angolazione di 180°. La struttura è cubica, della capacità iniziale di 20 m³, avente sulla base interna un agitatore con 4 balestre ruotanti che permettono di scaricare il cippato in un pozzetto inferiore da dove, tramite una coclea di alimentazione, avviene il trasporto del combustibile verso la caldaia.



Figura 18. Serbatoio del cippato

Il **quadro comandi** (Figura 19) è di tipo elettronico-digitale e regola il funzionamento automatico leggendo la temperatura dei fumi di combustione e quella dell'acqua della caldaia, tramite apposite sonde, a secondo dei parametri impostati dall'utente. La programmazione si suddivide in due menù: utente e protetto, consentendo una facile impostazione dei parametri di funzionamento. L'utente può variare, all'interno del proprio menù, quattro valori:



Figura 19. Quadro elettronico dei comandi della centrale termica

- 1) variazione della quantità di combustibile al bruciatore;
- 2) quantità di aria comburente al bruciatore;
- 3) la temperatura di accensione della pompa di linea;
- 4) la temperatura di esercizio dell'acqua della caldaia.

3. MATERIALI E METODI

3.1. STRUMENTI E MATERIALI IMPIEGATI NELLA RICERCA

I principali strumenti e materiali utilizzati nel rilievo dei dati sperimentali sono correlati alle attività seguenti:

- rilievo dei dati dendrometrici delle piantagioni energetiche dedicate e alle formazioni forestali insistenti nell'area di studio;
- rilievo dei tempi di lavoro delle macchine impiegate nelle varie operazioni d'impianto delle SRF e successive cure colturali e, soprattutto, in relazione alla fase di raccolta della biomassa con macchine specializzate;
- rilievi di laboratorio relative alla misurazione dei parametri fisici della biomassa;
- rilievi energetici relativamente alla produzione di energia termica della caldaia a cippato.

3.1.1. CAVALLETTO DENDROMETRICO

Modello "Silvanus" da 50 cm, con precisione di 0,5 cm, utilizzato per la misurazione dei diametri alla base e a 1,3 m di altezza delle piante forestali e dei polloni delle piantagioni di pioppo (Figura 20)



Figura 20. Cavalletto dendrometrico

3.1.2. CALIBRO DIGITALE

Modello "Stainless Hardened", utilizzato per il rilievo dei diametri, con capacità di misura fino a 150 mm, risoluzione 0,01 mm. (Figura 21).



Figura 21. Calibro digitale

3.1.3. ROTELLA METRICA

In materiale plastico della lunghezza di 20 m, utilizzata per la misurazione delle distanze nelle aree di saggio e le altezze delle piante abbattute (Figura 22)



Figura 22. Rotella metrica

3.1.4. TABELLA CRONOMETRICA

Modello “Minerva” ad azione meccanica, dotata di tre cronometri per il rilievo dei tempi delle singole operazioni o fasi di lavoro ed un totalizzatore, per il rilievo dei tempi di lavoro delle macchine (tempi sono espressi in centesimi di minuto) (Figura 24).



Figura 24. Tabella cronometrica

3.1.5. VERNICE SPRAY

Bombolette di vernice ecologica di colore rosso o giallo utilizzata per la delimitazione delle aree di saggio in sede di rilievi dendrometrici nelle piantagioni SRF di Monterotondo (Figura 25)



Figura 25. Bombolette spray

3.1.6. DINAMOMETRO PORTATILE

Modello digitale “Kern HCB 20K50 per pesare in campo la massa fresca delle piante intere o parti di fusto. Peso massimo 20 kg, precisione 50 g. (Figura 26).



Figura 26. Dinamometro

3.1.7. TELEMETRO IPSOMETRO

Modello Vertex TR3 60 e Transponder. Ipsometro professionale ad ultrasuoni utilizzato per determinare le altezze degli alberi e la loro distanza e gli angoli zenitali (Figura 27).



Figura 27. Telemetro a ultrasuoni

3.1.8. DISTANZIOMETRO LASER

Modello Bushnell Yardage Pro, utilizzato per la rilevazione delle distanze nella raccolta di SRC di pioppo con falciatrinciacaricatrice (precisione $\pm 0,91$ m). (Figura 28)



Figura 28. Distanziometro laser

3.1.9. BILANCIA ELETTRONICA

Per la misurazione in laboratorio dei pesi dei campioni di legno e di cippato fresco e secco (Figura 29)



Figura 29. Bilancia di precisione

3.1.10. STUFA DA LABORATORIO

Modello Stufa ventilata impiegata per la determinazione del contenuto idrico dei campioni con essiccazione a 105 °C. (Figura 30)



Figura 30. Stufa da laboratorio

3.1.11. PERSONAL COMPUTER

Modello Toshiba con programmi Microsoft Word ed Excel, per la prima elaborazione dei dati raccolti e la successiva elaborazione statistica.

3.1.12. MISURATORE DI ENERGIA

Modello “Simens Ultraheart ad ultrasuoni, per la registrazione dell’output totale di energia prodotta (in MWh), dell’energia istantanea (in MWh), del flusso d’acqua riscaldata (in m³/h) e della differenza di temperatura (Figura 31).



Figura 31. Misuratore di energia ad ultrasuoni

3.2. METODOLOGIA DI RILIEVO DEI DATI

3.2.1. PIANTAGIONI DI PIOPPA SRF

I dati sperimentali oggetto di studio sono relativi ai rilievi dendrometrici delle piantagioni Short Rotation Forestry (SRF) presenti nell'azienda del CRA-ING di Monterotondo (RM).

I dati sperimentale sono stati rilevati su 18 aree di saggio nelle file singole, ciascuna di 67 m² (6 aree per clone), e 12 aree di 57 m² ciascuna (4 aree per clone) nella piantagione a file binate.

I rilievi hanno riguardato i diametri a petto d'uomo (1,30 m di altezza) dei singoli fusti o dei polloni per ceppaia (*diameter at breast height* - DBH), il numero di polloni totale e per ceppaia, le altezze, i pesi per pollone, il grado di sopravvivenza delle ceppaie e la stima della produzione di biomassa fresca e anidra per ettaro.

Nel 2007 e nel 2010 sono stati effettuati due interventi di raccolta. Prima di tali interventi è stata effettuata la misurazione dei parametri di accrescimento relativamente alle diverse tipologie e ai cloni. Al fine di valutare i rendimenti produttivi dei cloni e le relazioni allometriche tra peso fresco e DBH sono stati misurati e pesati 180 alberi (30 per ognuno dei 3 cloni per ciascuna delle due tipologie d'impianto). Per ottenere il peso secco, è stato determinato il contenuto di umidità misurato su 45 cilindri di legno (15 per ogni clone). I dischi sono stati estratti dalla parte basale, dalla parte centrale ed apicale del fusto. appena prima di ogni ciclo di taglio, pesati con una bilancia di precisione e posti in stufa a 105 °C per la determinazioni del contenuto idrico secondo i metodi termogravimetrici indicati da norme internazionali (Norma UNI EN 14774-1:2009; UNI ISO 3130:1985 e UNI 9091:1987).

La relazione allometrica tra il peso del pollone e il diametro è stata stabilita utilizzando regressioni non lineari (Al Afas *et al.*, 2008; Verani e Sperandio, 2008), del tipo:

$$Y=a x^z \quad (1)$$

Dove:

Y , peso fresco del pollone (in kg),

x , diametro in cm (DBH),

a e z , parametri di regressione da determinare.

Nella Tabella 2 sono riportati i parametri statistici per la costruzione dell'equazione (1) in riferimento alla piantagione caratterizzata come R3S2 e R6S3.

Tabella 2. Relazione tra peso fresco e diametro (DBH) per clone e densità d'impianto in R3S2 (rotazione biennale) e R6S3 (rotazione triennale)

	2007 (R3S2)			2010 (R6S3)		
	a	z	R ²	a	z	R ²
SR - Low density						
AF2	0.252	1.94	0.84	0.363	1.92	0.93
AF6	0.170	2.25	0.84	0.302	2.09	0.96
Monviso	0.136	2.52	0.96	0.327	1.98	0.92
TR - High density						
AF2	0.218	2.01	0.92	0.451	1.69	0.94
AF6	0.188	2.19	0.63	0.488	1.81	0.94
Monviso	0.335	1.84	0.90	0.939	1.21	0.92

3.2.2. FORMAZIONI FORESTALI IN AMBIENTE RURALE IN PROSSIMITA' DELLA CENTRALE TERMICA

I rilievi sono stati effettuati nell'ambito dello studio relativo ad un'indagine condotta su un'area territoriale di circa 10.000 ha, localizzata a nord di Roma nella quale sono compresi parte dei terreni aziendali appartenenti al patrimonio immobiliare del CRA in località Tormancina (Monterotondo-RM) (Figura 32). Oltre a parte del territorio di Monterotondo, l'area di studio ha compreso anche parte dei territori dei comuni di Montelibretti, Palombara, Cretone, Fiano Romano, Capena e Moricone, come evidenziato in Figura 33. L'indagine, condotta all'interno del Progetto FORFAR (Formazioni di specie forestali in ambiente rurale "FAR") (2011), è stata finalizzata all'aumento di conoscenze sulle caratteristiche dendrometriche, produttive ed ambientali di formazioni forestali presenti in ambiente rurale (FAR).

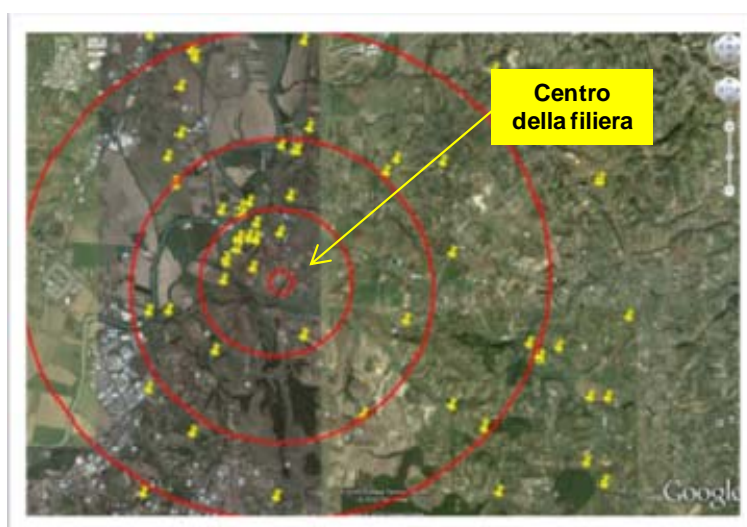


Figura 32. Area di studio del comprensorio di approvvigionamento per la filiera CRA-ING (da Google Earth)

Queste formazioni forestali, per carenza di requisiti in

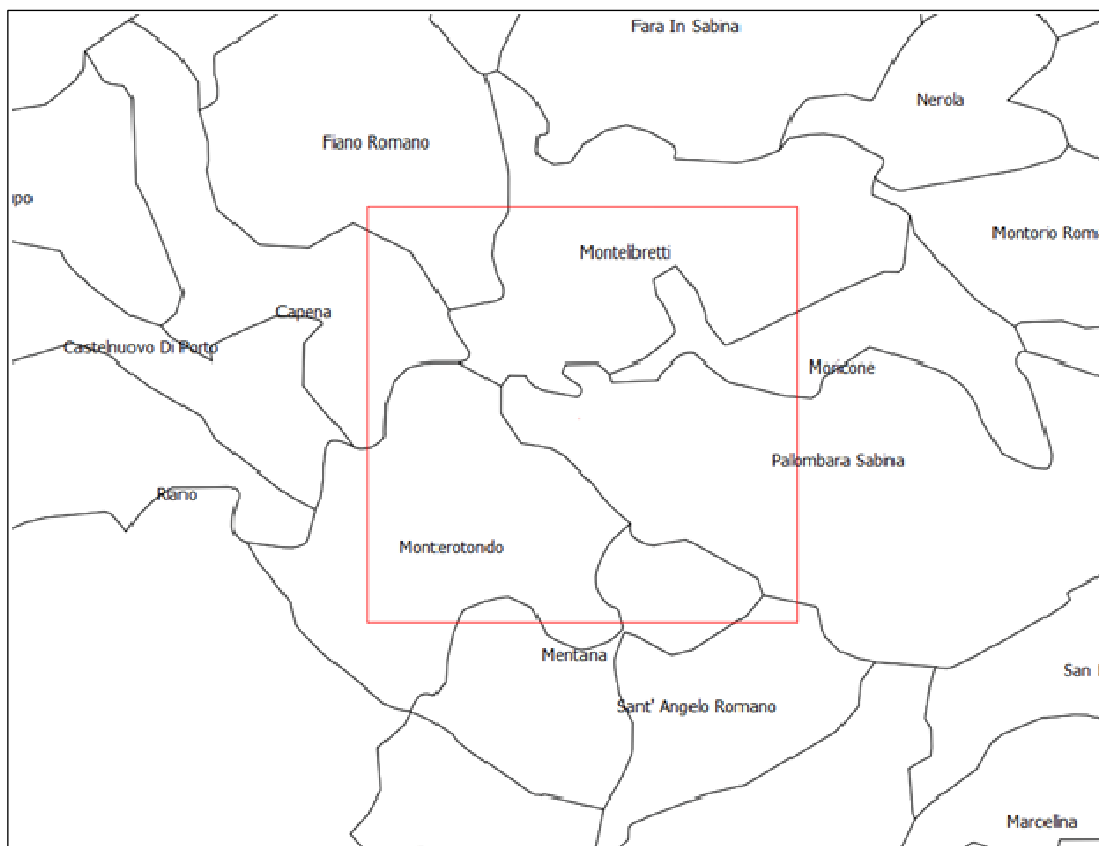


Figura 33. Area di studio di 100 kmq intorno al centro della filiera CRA-ING, sezione delle carta tecnica regionale (proiezione UTM/ED50, fuso 33)

termini di superficie minima, estensione, grado di copertura, sviluppo, non vengono considerate classificabili come “boschi” o “foreste” secondo la definizione adottata a livello nazionale ed internazionale (ISTAT, IFNC, EUROSTAT, FAO), e quindi sfuggono ad un censimento ufficiale. Sono comprese all’interno di questa categoria tutte quelle formazioni rappresentate da boschetti su piccole superfici, formazioni forestali lineari, piante sparse, piantagioni forestali energetiche, piantagioni di arboricoltura da legno, i cui criteri di identificazione e definizione sono stati oggetto di analisi specifica. Tali categorie di formazioni “fuori foresta”, nonostante il crescente interesse che hanno ricevuto negli anni all’interno del comparto della ricerca forestale (Paletto *et al.*, 2006; Grappoli, 1999; Kleinn, 2000), spesso sfuggono ad un sistematico monitoraggio a livello nazionale rendendo più difficile la disponibilità e reperibilità di informazioni e di conoscenze sull’entità di questo fenomeno e sui possibili positivi effetti che tali formazioni potrebbero offrire in ambiti territoriali e, in senso più esteso, a livello nazionale, in termini non solo ecologici, ambientali e paesaggistici, ma anche dal punto di vista delle potenzialità economico-produttive (Pettenella e Serafin, 1999, Mezzalira, 1997; APAT, 2003).

L'idea seguita nello studio è stata quella, pertanto, di verificare le condizioni e la possibilità che la biomassa potenzialmente ottenibile dalle FAR potesse utilmente contribuire ad integrare il fabbisogno di biocombustibili in filiere legno-energia realizzate su piccola scala a livello aziendale o in piccoli comprensori locali. Il contributo delle FAR potrebbe servire a compensare temporanee carenze di biocombustibile nelle filiere normalmente ottenibile da più tradizionali fonti di approvvigionamento (utilizzazioni boschive, residui di potature di colture arboree agrarie, scarti di lavorazione di attività agricole e industriali), e, in tempi relativamente più recenti, da piantagioni appositamente dedicate a fini energetici (colture energetiche a rapida crescita ceduate a breve-medio turno – Short Rotation Forestry (SRF) e Medium Rotation Forestry (MRF) (Verani *et al.*, 2010a, Facciotto e Schenone, 1998).

L'analisi è stata pertanto orientata ad evidenziare il livello di convenienza economica del possibile utilizzo a fini energetici delle FAR esaminando i possibili processi produttivi ed i costi associati relativi all'utilizzo a fini energetici di queste formazioni calcolando l'ammontare dei costi necessari, sulla base delle caratteristiche stazionali e dendromentiche delle formazioni, per l'acquisizione del materiale in piedi, all'abbattimento, l'estrazione, il trasporto e la trasformazione in cippato della biomassa da utilizzare nella centrale termica della filiera.

Lo strato informativo di partenza su cui è stato sviluppato il modello di calcolo economico è dato dalle particelle FAR interpretate, identificate e digitalizzate da ortofoto bianco/nero e mediante estrazione da immagini *Google Earth*. A partire da queste sono state individuate una serie di aree campione ottenute dall'intersezione del tematismo con un grigliato di celle 50x50 m, la cui costruzione è stato realizzata utilizzando il software ArcView 3.1, allo scopo di ottenere una superficie il più possibile uniforme per la stima della biomassa e per il successivo calcolo delle distanze di trasporto dal sito al centro di filiera (Figura 34).

La mappa digitale è stata ottenuta per foto interpretazione sulle ortofoto a colori caricate su Google Earth per la zona in esame. E' stata successivamente importata in ArcView e intersecata a quella della griglia, mediante un'operazione di "clip" dell'estensione di Geoprocessing di ArcView, in modo da suddividere i poligoni sulla base del reticolo, individuando così la porzione di FAR intercettata da ogni cella.

Da qui si è proceduto al calcolo dei coefficienti di costo e dei successivi parametri considerati nell'analisi, quali: la biomassa presente per singola cella (in t), la distanza media della cella dalla base stradale (in m) e la distanza del percorso su strada fino alla centrale termica (in km).

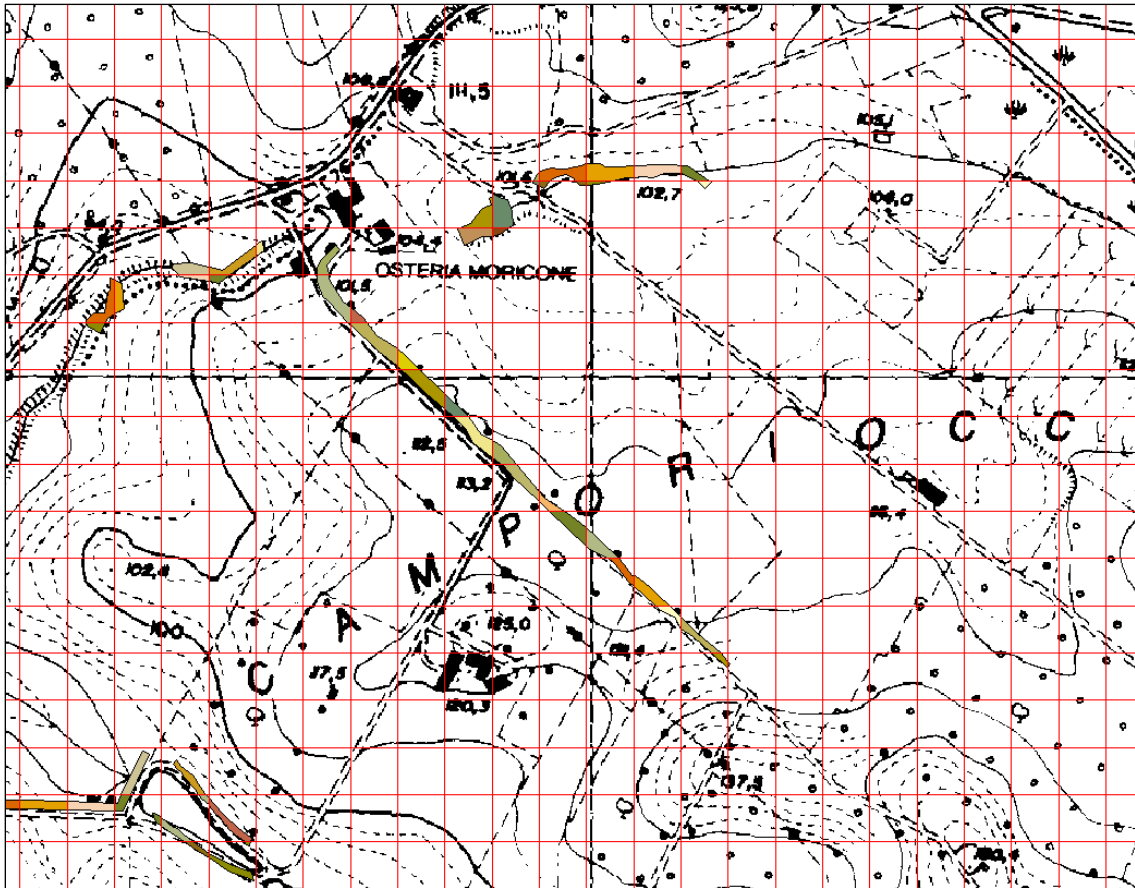


Figura 34. Determinazione della consistenza delle FAR all'interno delle griglie 50x50 m.

Lo schema di analisi della logistica delle utilizzazioni delle FAR e dei parametri del modello è mostrato in Figura 35, dove si evidenzia come il calcolo del minore costo è espresso in funzione dei costi di utilizzazione specifici della formazione forestale individuata per ogni cella, della presenza di biomassa, delle caratteristiche della stazione e dei possibili percorsi alternativi per arrivare a destinazione (centro della filiera).

La formula generale applicata per la valutazione dei costi complessivi di utilizzazione, per singola cella (euro per cella) e per unità di prodotto (euro per tonnellata), è stata la seguente:

$$CF = Cma + Caa + Ces + Ccs + Ctr + Cci \quad (2)$$

dove:

CF = costo finale di produzione di cippato;
 Cma = costo di macchiatico della FAR
 Caa = costo abbattimento, parziale allestimento e accumulo delle piante;
 Ces = costo di esbosco;
 Ccs = costo di carico e scarico;
 Ctr = costo di trasporto su strada;
 Cci = costo di cippatura alla centrale.

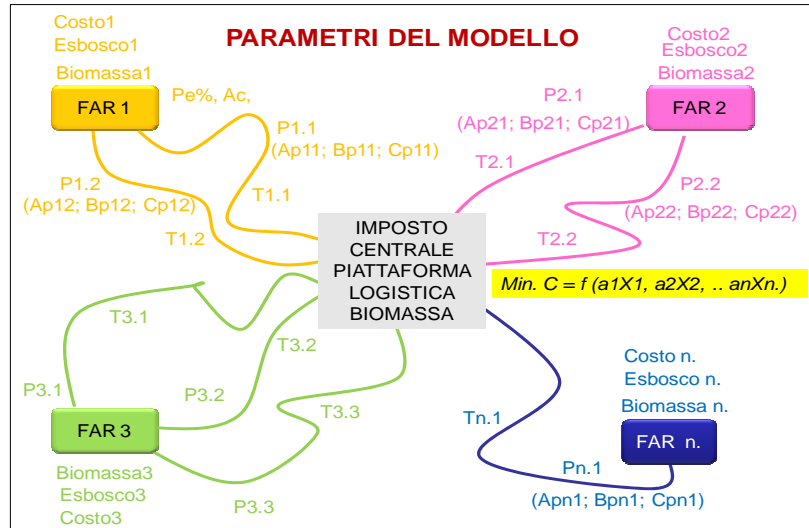


Figura 35. Modello di valutazione economica del costo di utilizzazione delle FAR

Il costo di esbosco e di trasporto è stato calcolato per ogni cella in funzione della distanza percorsa a viaggio (andata e ritorno), della quantità di biomassa trasportata, del numero di viaggi necessari in riferimento alla biomassa per cella e della capacità di carico del mezzo di trasporto che, nel caso specifico, dati comunque le piccole entità delle superfici interessate, è stata considerata di circa 3,5 t.

Il costo di trasporto (ed esbosco) per cella di FAR è stato calcolato quindi con la seguente formula generale:

$$Ctr (Ces) = Nv \times Pe \times Tp \times Ch \quad (3)$$

dove:

$Ctr (Ces)$ = costo di trasporto su strada o costo di esbosco (in € cella⁻¹);

Nv = numero di viaggi necessari, ottenuto arrotondando all'unità superiore il valore del rapporto tra la biomassa presente per cella e la capacità di carico del mezzo di trasporto;

Pe = percorso del trasporto su strada o percorso di esbosco andata e ritorno (in km);

Tp = tempo totale di percorrenza ottenuto sulla base di una velocità media del mezzo (in h);

Ch = costo orario del vettore per il trasporto su strada o esbosco (in € h⁻¹).

Per la determinazione dei costi del cantiere di utilizzazione delle FAR, è stato preso come criterio di riferimento la minimizzazione del livello d'impiego della meccanizzazione. Nella

Tabella 3 sono riportati gli elementi e i coefficienti tecnici ed economici delle macchine ed attrezzature prese in considerazione per la composizione dei cantieri e per la valutazione dei costi di utilizzazione. Il costo della manodopera, riferito ad un operatore specializzato, è stato considerato unico per tutti i casi in esame e pari a 15 euro h⁻¹, oneri sociali, previdenziali ed assistenziali compresi.

Tabella 3. Elementi tecnici ed economici delle macchine ed attrezzature considerate nel calcolo analitico dei costi orari del cantiere di utilizzazione

Descrizione voci	Unità di misura	Motosega	Trattore	Rimorchio 25 m ³ (2assi)	Camion con gru (portata 3,5 t)	Claas 890	Testa GBE1	Cippatrice Pezzolato con gru PTH
Valore a nuovo	€	700	50.300	12.000	50.000	294.000	120.000	220.000
Valore di recupero (20%)	€	140	10.060	2.400	10.000	58.800	24.000	44.000
Vita utile	anni	3	10	10	7,5	8	8	8
Impiego annuo	h	1.200	1.000	300	800	1.000	500	1.000
Potenza nominale	kW	2,8	81	0	150	390	0	320
Tasso d'interesse	%	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Consumo medio carburante	l/h	1,35	12,15	0,00	6,25	42,90	0,00	38,40
Consumo medio lubrificanti	l/h	0,27	0,49	0,00	0,25	1,72	0,00	0,38
Spazio rimessaggio (mq)	m ²	35,0	20,0	10,0	30,0	30,0	10,0	30,0
Costo conduttore del mezzo	€/h	15,00	15,00		15,00	23,00		15,00
Costo medio carburante	€/l	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Costo medio lubrificante	€/l	4,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Costo set pneumatici	€	0	2.000	1.000	1.600	2.000	0	1.600
Costo costruzione ricovero	€/m ²	500	500	500	500	500	500	500
Coeff. riparazioni		0,70	0,60	0,40	0,65	0,65	0,70	0,65
Coeff. manutenzioni		0,05	0,10	0,05	0,10	0,15	0,15	0,15
Coeff. assicurazioni		0	0,02	0	0,03	0,03	0	0,03
Coeff. spese generali		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Coeff. lubrificanti		0,2	0,04	0,01	0,04	0,04	0,01	0,01
Coeff. spese varie		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Coeff. cambio pneumatici		0	1,5	1	1,1	1,6	0	1,6
Coeff. spese rimessaggio		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

All'interno delle FAR è stata fatta una distinzione per le SRF, poiché queste ultime, essendo piantagioni specializzate da raccogliere a turni di 2-3 anni, hanno bisogno di un cantiere altamente specializzato per questa operazione. In Italia, come già descritto, il cantiere più adottato è attualmente rappresentato da una raccogliatrice semovente (falciatrinziacaricatrice) affiancata durante il lavoro da almeno due trattori con rimorchi a sponde alte, idonei per il trasporto del prodotto cippato (Verani *et al.*, 2010b).

Il calcolo della biomassa per singola cella è stato ottenuto a partire dai rilievi di campo effettuati sulle aree campione. E' stato stimato un valore di biomassa medio per unità di superficie (t ha⁻¹), in funzione della grado di copertura della FAR nella singola cella (rada, aperta o densa). Per il calcolo delle distanze è stato utilizzato il tool "cost distance" di ArcGIS

che permette di individuare su una superficie continua, definita griglia di costi, il tragitto più conveniente.

Costruita la griglia di costi è stato possibile calcolare la distanza media (in km) delle celle rispetto al centro di filiera (sito di localizzazione della centrale termica). Per ogni cella è stato calcolato un costo di attraversamento, in funzione delle condizioni territoriali, attribuendo valori diversi in relazione alle differenti caratteristiche del tragitto in modo tale da privilegiare la viabilità stradale ordinaria (valore attrattivo), rispetto ad un tragitto dove compaiono ostacoli per presenza di autostrade, linee ferroviarie o corsi d'acqua, che invece viene penalizzato (valore repulsivo). In relazione alla pendenza dei tragitti, vengono attribuiti valori diversi in modo tale da privilegiare percorsi con acclività minore.

La valutazione economica riferita all'intero ciclo produttivo dell'utilizzazione delle FAR è stata svolta sulla base della determinazione dei costi orari delle macchine e delle attrezzature prescelte per lo svolgimento delle singole operazioni di abbattimento/allestimento/accumulo, estrazione, trasporto in centrale e sminuzzatura del materiale legnoso grezzo di origine. Tali costi sono stati calcolati applicando una metodologia analitica che ha tenuto conto di coefficienti e formule matematiche riportate nel prossimo capitolo 3.3. Metodologia di analisi dei costi macchina.

La scelta della composizione del cantiere di utilizzazione più idoneo nelle diverse situazioni, ha tenuto conto della dispersione sul territorio delle FAR e dell'esiguo concentrazione di superfici accorpate da utilizzare, per cui, il criterio seguito è stato quello di minimizzare la dotazione di macchine e di manodopera da impegnare nel lavoro.

Sono state previste sostanzialmente due diverse tipologie di cantieri distinguendo il caso particolare delle SRF presenti nell'azienda CRA-ING, rispetto a tutti le altre tipologie di FAR. Per le SRF è stato indispensabile considerare l'impiego di una macchina semovente falciatrinciacaricatrice, affiancata da almeno due trattori agricoli con rimorchio a sponde alte.

Relativamente alle altre FAR, invece, è stato considerato un cantiere forestale a minima meccanizzazione costituito come segue:

- per l'abbattimento, il parziale allestimento e l'accumulo ordinato delle piante, sono state considerate tre opzioni in relazione alla quantità di biomassa stimata per cella: biomassa inferiore a 2 t, un operatore forestale con una motosega professionale; biomassa compresa tra 2 e 5 t, due operatori (motoseghista più aiuto) ed una motosega; biomassa maggiore di 5 t, due operatori e due motoseghe;
- per l'esbosco, in condizioni di accessibilità dei siti e quindi con possibilità di arrivare in prossimità del sito di taglio, un camion con gru (capacità di carico 3,5 t) e relativo

conduttore, altrimenti, un trattore con gru munito di rimorchio a sponde alte e relativo conduttore;

- per il trasporto su strada lo stesso camion di cui al punto precedente;
- per la cippatura del materiale legnoso in prossimità della centrale termica, una cippatrice autoalimentante con relativo conduttore.
- Il sistema di lavoro ritenuto più idoneo allo scopo e da adottare è quello dell'albero intero (WTS - *Whole Tree System*), anche se si ritiene necessario procedere, dopo l'abbattimento della pianta, ad una sua parziale depezzatura a circa 3-5 m al fine di favorire la movimentazione ed il carico su camion delle frazioni di piante per il successivo trasporto in centrale.

3.3. METODOLOGIA DI CALCOLO DEI COSTI MACCHINA

Il calcolo dei costi delle macchine e delle attrezzature, effettuato in tutti i casi studio ad eccezione del primo, fa riferimento sia alle operazioni meccanizzate relative alle piantagioni energetiche di pioppo coltivate a *Short Rotation Forestry* (impianto, lavorazioni annuali, raccolta e stoccaggio della biomassa prodotta), sia alle operazioni di utilizzazione boschiva ipotizzate per le formazioni forestali presenti nell'area di studio. Il calcolo analitico dei costi delle macchine e della manodopera impiegata è stato condotto anche in relazione alle operazioni di produzione e movimentazione del cippato di legno utilizzato come combustibile nella centrale termica della micro filiera analizzata per la produzione di calore.

Il calcolo dei costi delle macchine ed attrezzature è stato condotto seguendo un approccio analitico basato sulla distinzione del costo di esercizio orario in costi fissi e costi variabili. Il metodo adottato e le formule di calcolo considerate per la determinazione delle singole voci di costo, riportate più in dettaglio di seguito, sono state elaborate tenuto in considerazione alcuni tra i metodi di calcolo più diffusi ed utilizzati a livello nazionale (Biondi, 1999; Baraldi e Capelli, 1973; Hippoliti, 1997; Lazzari e Mazzetto, 2005; Ribaud, 1977) ed internazionale (Fao, 1992, Miyata, 1980).

Il Costo di esercizio delle macchine e delle

Tabella 4. Elementi tecnici ed economici di base per il calcolo dei costi

Descrizione delle voci	Simbolo
Valore a nuovo (euro)	V _o
Valore di recupero (euro)	V _n
Vita utile (anni)	A
Potenza (kW)	P
Tempo programmato (giorni/anno)	T _{pa}
Coefficiente di utilizzazione della macchina (%)	cu
Tempo produttivo lordo (giorni/anno)	T _{pr}
Tempo lordo giornaliero (ore/giorno)	cug
Utilizzazione media giornaliera (ore/giorno)	ug
Tempo programmato (ore/anno)	H _t
Tempo produttivo della macchina (ore/anno)	h
Tempo totale produttivo (ore)	H
Tempo medio improduttivo (%)	T _i
Tasso d'interesse (%)	i
Consumo specifico carburante (kg/kWh)	cs
Consumo carburante (litri/ora)	chc
Consumo lubrificanti (litri/ora)	chl
Peso specifico carburante (kg/litro)	sc
Peso specifico oli lubrificanti (kg/litro)	sl
Spazio rimessa macchina (m ²)	S _r
Costo di costruzione ricovero (euro/m ²)	C _{cr}
Prezzo del carburante (euro/litro)	C _{ca}
Prezzo lubrificanti (euro/litro)	C _{lu}
Costo set pneumatici (euro)	C _{pn}
Durata pneumatici (ore)	dp
Paga base manodopera (euro/anno)	Ma
Paga base giornaliera manodopera (euro/giorno)	Mg
Costo manodopera su tempo produttivo macchina	Mom
Costo manodopera (con oneri sociali) (euro/ora)	Mo
Incidenza oneri sociali (%)	Os
Tempo di lavoro manodopera (giorni/anno)	cuo
Numero componenti manodopera (n.)	nm
Tasso di deprezzamento macchina	td
Coefficiente riparazioni e manutenzioni	crm
Coefficiente Assicurazioni, Tasse, Ricovero e s.g.	cat
Coefficiente spese generali	csG
Coefficiente lubrificanti	clu
Coefficiente costi vari	csv
Coefficiente cambio pneumatici	cpn
Coefficiente ricovero	csr
Fattore di carico motore (*)	fc

(*) P_u/P_n ; P_u = potenza utilizzata; P_n =

attrezzature sono stati calcolati sulla base della ripartizione in costi fissi e costi variabili. Le formule adottate per queste due categorie di costo fanno riferimento agli elementi tecnici ed economici, con i relativi simboli adottati, riportati nella Tabella 4. Nella Tabella 5 vengono riportate le formule adottate per effettuare il calcolo dei costi orari. La descrizione analitica delle singole voci è riportata di seguito.

Tabella 5. Formule adottate per il calcolo dei costi orari fissi, variabili e totali

Elementi	Simbolo	Formule adottate	Formula riferita all'anno
COSTI FISSI	CFh	[AM+IN+AS+TA+RM+SG]	[AM+IN+AS+TA+RM+SG] x h
Ammortamento	AM	$(V_o - V_n)/H$	$(V_o - V_n)/A$
Interessi	IN	$[(V_o + V_n)/2h] \times i$	$[(V_o + V_n)/2] \times i$
Assicurazioni, Tasse, ricovero e s.g.	AT	$(V_o \times \text{cat})/h$	$(V_o \times \text{cat})/h$
COSTI VARIABILI	CVh	[RI+MA+CA+LU+PN+SV]	[RI+MA+CA+LU+PN+SV] x h
Riparazioni e Manutenzioni	RM	$(V_o \times \text{cm})/H$	$(V_o \times \text{cm})/h$
Carburante	CA	$\text{chc} \times \text{Cca}$	$(\text{chc} \times \text{Cca}) \times h$
Lubrificanti	LU	$\text{chl} \times \text{Clu}$	$(\text{chl} \times \text{Clu}) \times h$
Pneumatici	PN	$(\text{cpn} \times \text{Cpn})/H$	$[(\text{cpn} \times \text{Cpn})/H] \times h$
COSTO MACCHINA	CMh	CFh + CVh	(CFh + CVh) x h
COSTO MANODOPERA	MOh	nm x Mo	(nm x Mo) x h
COSTO TOTALE DI ESERCIZIO	CTh	CMh + MOh	(CMh + MOh) x h

3.3.1. COSTI FISSI ORARI

I costi fissi vengono riferiti inizialmente all'anno e successivamente riportati a costi orari tenendo conto dell'utilizzo annuo espresso in ore delle macchine e delle attrezzature. Rientrano nella categoria dei costi fissi le *Quote di ammortamento*, gli *Interessi* sul capitale anticipato, le *Quote assicurative*, le *Imposte*, le *Quota di ricovero* del mezzo, le *Spese di direzione, sorveglianza, amministrazione e generali*. In particolare il significato delle voci di cui sopra e le modalità di calcolo seguite per ottenerle vengono riportate di seguito:

Quota di ammortamento (AM). Tiene conto dell'usura del mezzo e rappresenta la somma di denaro che teoricamente bisognerebbe accantonare ogni anno per avere la possibilità di ottenere, dopo un certo numero di anni, una somma di denaro che unita al valore di recupero (V_n) permette di ricostituire il capitale inizialmente investito. Una delle formule maggiormente utilizzata e adottata per il calcolo è la seguente (approccio lineare):

$$AM = \frac{V_0 - V_n}{A}$$

dove: V_0 corrisponde al prezzo di acquisto della macchina; V_n al valore di recupero; n al numero di anni di vita utile della macchina.

Il valore V_0 viene calcolato secondo la formula: $V_n = V_0 (1 - td)^A$

dove td = tasso di deprezzamento (variabile in linea di massima 10-20%). Nel caso in cui non si prevede alcun valore di recupero della macchina a fine ciclo, allora il coefficiente $td = 100\%$ e la quota di ammortamento verrà ottenuta dividendo V_0 per A . Qualora l'accantonamento delle quote venga fatto depositandole in banca, allora sarebbe più appropriato utilizzare una formula finanziaria di calcolo che tenga conto anche degli interessi composti che maturano con gli anni e cioè:

$$AM = (V_0 - V_n) \frac{i}{(1+i)^A - 1} \quad \text{dove } i = \text{tasso di interesse bancario; } A = \text{numero anni}$$

Interessi (IN) - Fanno riferimento al prezzo d'uso del capitale mediamente investito. Tenuto conto che nel tempo il valore della macchina diminuisce progressivamente, tale voce viene calcolata moltiplicando il valore medio della macchina per un determinato tasso d'interesse tramite la formula: $IN = V_m \times i$

dove: $V_m = \frac{V_0 + V_n}{2}$; i = tasso di interesse

in linea generale come tasso d'interesse potrebbe essere considerato quello non agevolato offerto dalle Banche per i crediti agrari;

Quote di assicurazione, tasse, ricovero e spese generali (AT) – Si propone di calcolare questa serie di spese in un'unica quota in quanto tutte proporzionali genere al valore della a nuovo della macchina. Il coefficiente utilizzato tiene conto di tutte le voci e può variare dal 2-4% V_0 . Nel caso in cui è possibile risalire alle spese effettivamente pagate annualmente per queste tutte queste voci, allora il rispettivo costo orario può essere calcolato dividendo la quota annuale per il numero medio annuo di ore produttive della macchina.

La Quota di ricovero che rappresenta la spesa annua che bisogna sostenere per mantenere la macchina/attrezzatura in un luogo riparato, potrebbe essere calcolata in modo separato, tenendo conto per esempio del canone di affitto vigente in zona per rimesse di analoghe caratteristiche, oppure seguendo il criterio della attribuzione del costo di costruzione del ricovero (rimessa in muratura, prefabbricato, tettoia, ecc.) considerando i prezzi medi a m^2 o a m^3 . Tale costo dovrà essere ripartito per il numero di anni di presunta durata della struttura, per determinare la quota

annua di ricovero da rapportare successivamente allo spazio occupato (ingombro) e al tempo medio di impiego annuo dalla macchina/attrezzatura. Nel caso delle trattrici agricole si presuppone che tale ricovero sia costituito da un locale chiuso a prova di fuoco. Al fine di tener conto della durata utile del ricovero, potrà essere utilizzato un coefficiente moltiplicativo del costo di costruzione in linea di massima variabile dal 5% e il 2% in considerazione di una durata media del ricovero rispettivamente di 20 e 50 anni.

3.3.2. COSTI VARIABILI ORARI

Questa categoria di costi, come accennato, è strettamente collegata con l'uso della macchina/attrezzatura e in essa si comprendono le spese di *Manutenzione* del mezzo, le spese per le *Riparazioni*, il costo per il consumo di *Combustibile e Lubrificante*, le spese per l'usura dei *Pneumatici/cingoli* di macchine motrici e, infine, le *Spese varie*. Il *Costo del personale*, conduttore del mezzo e di eventuale personale aiutante pur essendo un costo variabile viene nel calcolo separato dalle altre voci per evidenziare il costo macchine dal costo complessivo di esercizio.

Riparazioni e Manutenzione (RM) - Comprende tutte le spese per la manodopera impiegata nelle riparazioni, il costo dei pezzi di ricambio, le spese per le revisioni periodiche, ecc., le spese di manodopera necessarie per svolgere le varie operazioni di manutenzione ordinaria volte a garantire il buon funzionamento della macchina/attrezzatura (controllo serraggi, pulizia parti meccaniche, lubrificazione e ingrassaggio, messa a punto, ecc.). In mancanza di un dato analitico facendo un resoconto annuale (e riportato all'ora) di tutte le operazioni di riparazione e manutenzioni a carico del mezzo, tale spesa è rapportata al valore a nuovo V_0 della macchina/attrezzatura tramite un coefficiente moltiplicativo da stimare caso per caso. Tale coefficiente potrebbe assumere valori molto diversi in dipendenza del tipo di macchina e, soprattutto, in riferimento ad un impiego agricolo o forestale. Un valore utilizzato varia tra il 50% e il 110% del V_0 nell'arco dell'intera vita utile della macchina.

Carburante (CA) - Tale costo dovrebbe essere direttamente ottenuto registrando il consumo effettivo di combustibile in rapporto al lavoro svolto dalla macchina motrice. Per poter effettuare un calcolo utilizzando formule matematiche che tengano conto dei diversi consumi al variare della gravosità del lavoro (diverso carico motore) è necessario stabilire per le singole macchine come varia il consumo specifico di combustibile (espresso in litri/kW di potenza oppure kg/kW). Si adotta pertanto la seguente formula:

$$CA = (0,250 \times fc \times P) / sc \times Cca = chc / sc \times Cca$$

dove:

0,250, consumo specifico in kg/kWh;

fc, fattore di carico motore;

P, potenza in kW;

sc, peso specifico carburante;

Cca, Costo in euro L⁻¹ del gasolio;

chc, consumo orario di carburante in L h⁻¹.

Lubrificazione (LU) - Il costo del lubrificante può essere ottenuto rilevando direttamente i consumi effettivi. Tali consumi, tuttavia, possono essere rapportati al consumo di combustibile per cui la formula utilizzata è la seguente:

$$LU = chc \times clu \times Clu$$

dove:

chc, consumo orario di carburante in L h⁻¹;

clu, coefficiente consumo lubrificanti (2,7% e 4%).

Clu, Costo del lubrificante in euro L⁻¹;

Pneumatici/cingoli (PN) - Anche questa voce è desumibile direttamente considerando il costo di un cambio di pneumatici/cingoli e il numero di sostituzioni effettuate nell'arco dell'intera vita utile della macchina. Secondo questa impostazione di calcolo, tale costo viene valutato separatamente dal resto dei costi rientranti nella voce già descritta delle riparazioni. La formula utilizzata, riferita alla vita utile della macchina, potrebbe essere la seguente:

$$PN = (cpn \times Cpn) / H = [(H/dp - 1) \times Cpn] / H;$$

dove:

cpn, coefficiente cambio pneumatici;

Cpn, Costo di un set di pneumatici (o cingoli) in euro;

dp, durata pneumatici;

H, tempo totale in ore.

Costo della manodopera (Mo) - Viene considerato per il conduttore del mezzo e per il personale ausiliario eventualmente necessario per lo svolgimento del lavoro. Il calcolo viene effettuato tenendo conto dell'effettiva remunerazione spettante al personale qualificato relativamente

all'anno di riferimento. Le tariffe devono essere comprensive di tutti gli oneri previdenziali ed assistenziali previsti per il settore agricolo.

3.3.3. COSTI ORARI DI ESERCIZIO

Il costo di esercizio orario della macchina è ottenuto facendo la somma dei costi orari fissi e i costi orari variabili e del costo della manodopera del conduttore del mezzo e dell'eventuale personale aggiuntivo impegnato nel lavoro meccanico.

La formula utilizzata è pertanto la seguente:

$$CTh = CMh + MOh$$

Dove:

$$CMh = CFh + CVh$$

$$MOh = Mo \times nm$$

con *CTh*, costo totale di esercizio orario della macchina;

CMh, costo orario della sola macchina;

MOh, costo orario della manodopera impegnata.

3.3.4. ALTRI ELEMENTI UTILI

La durata economica di una macchina può identificarsi in quella che viene definita come la sua durata tecnica o durata fisica in ore (H), cioè quel numero massimo di ore di lavoro effettivo oltre il quale non è più conveniente procedere a riparazioni. Questo numero di ore di lavoro, ovviamente, dipende da quanto intensamente la macchina viene fatta lavorare e dalle condizioni di gestione del mezzo, sia in ambiti temporali brevi (ora, giorno) che di maggiore durata (anno). I trattori e altri motori di macchine sono dotati di conta ore che indica, in relazione al numero di giri del motore, quante ore sta in funzione la macchina anche per consentire una adeguata e regolare manutenzione. Il conta ore è regolato in modo tale da segnare 1 ora di lavoro quando il motore sta acceso per 1 ora ad un regime di giri tale da tenere la presa di potenza (p.d.p.) a 540 giri al minuto (tra il regime di coppia massima e quello di potenza massima, circa il 75-80% di questa). Pertanto, altri parametri importanti che entrano in gioco in questi metodi di calcolo risultano essere l'intensità di utilizzo della macchina, sia giornaliera (*ug* = ore di impiego al giorno) che annua (ore di impiego all'anno, o giorni di impiego all'anno). Il coefficiente di impegno del motore (*fc*) in una determinata operazione, rappresenta la quota di potenza della macchina che viene impegnata nel lavoro e che influisce sui consumi di carburante. La formula utilizzata per il calcolo dei consumi è stata impostata tenendo conto di un consumo specifico orario di 250 g/kWh rispetto alla potenza massima della macchina che va moltiplicato per il

fattore f_c , valutato mediamente variabile da 0,25 a 0,85, secondo il tipo di lavoro svolto e il tipo di operatrice azionata dalla macchina, per poter stimare in modo appropriato il consumo della macchina durante lo svolgimento dello specifico lavoro.

3.4. METODOLOGIA DI ANALISI STATISTICA

L'analisi statistica è stata condotta sui dati relativi agli aspetti dendrometrici e produttivi delle piantagioni SRF di pioppo e in relazione allo studio dei tempi di lavoro durante la raccolta delle piantagioni SRF condotta con impiego di falcatrinciacaricatrice Claas Jaguar 880.

3.4.1. ANALISI STATISTICA DEGLI ASPETTI DENDROMETRICI DELLA PIANTAGIONE SRF

L'analisi statistica è stata effettuata sui dati di campo e di laboratorio riferiti alla piantagione di pioppo coltivate a SRF del CRA-ING di Monterotondo. L'impianto oggetto di studio è stato realizzato nell'anno 2005 su una superficie di 4 ha, secondo le due tipologie a file singole e a file binate, utilizzando i tre cloni AF2, AF6 e Monviso. (Picco *et al.*, 2007). Le piantagioni sono state monitorate sin dal loro impianto (anno 2005) tramite rilievi dendrometrici sistematici in 30 aree di saggio individuate all'interno della piantagione al fine di stabilire gli accrescimenti e la biomassa prodotta. Sono stati valutati e confrontati, in relazione a due tagli colturali, il primo riferito ad un ciclo biennale ed il secondo ad un ciclo triennale, gli accrescimenti e la produzione di biomassa ottenuta.

Su un campione complessivo di 180 polloni (30 x 3 cloni x 2 tipologie), sono state elaborate le curve ipsometriche per singolo cloni al fine di relazionare le altezze con i diametri presi a 1,3 da terra. e, a seguito dei rilievi sui pesi del campione di piante osservato, sono state elaborate le curve del peso fresco per singola pianta sempre in funzione del diametro.

I due modelli di equazioni presi in considerazione sono stati i seguenti (Verani e Sperandio, 2008):

$$\text{Per le curve ipsometriche:} \quad Y_H = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

$$\text{Per le curve dei pesi:} \quad Y_W = dx^z \quad (4)$$

dove:

Y_H = altezza della pianta in m,

Y_W = peso fresco della pianta in kg,

x = diametro in cm,

a, b, c, d, z = parametri delle equazioni.

Sui dati sperimentali è stata condotta un'analisi statistica della varianza (ANOVA) a due fattori utilizzando il software statistico PRISM 4.01 (grafico-Pad Software, Inc. di San Diego, CA, USA). Le misure dendrometriche dei polloni sono state considerate come osservazioni mentre la densità d'impianto e i singoli cloni come fattori. Per verificare quali gruppi hanno influito sulla significatività tra le medie (con livello di confidenza $\alpha = 0.05$), è stata effettuato il test HSD di Tukey (Honestly Significant Difference). Il test, disponendo di k medie, ognuna calcolata su n dati (numerosità campionaria di ciascun gruppo), calcola il valore HSD secondo la formula:

$$HSD = Q_{(\alpha, k, df)} \sqrt{\frac{S_e^2}{n}}$$

Il valore Q (Q -studentizzato), dipende dal livello di confidenza α (0.05), dal numero di medie a confronto (k) e dai gradi di libertà della varianza d'errore ($N-k$). Il valore si ricerca in tavole tabulate. Le differenze tra le medie di tutti i gruppi vengono confrontate con il valore HSD ottenuto. Risultano significative (ossia significativamente diverse) le differenze che in valore assoluto sono superiori al valore HSD (p -value < 0.05).

Nell'analisi della significatività statistica delle differenze tra le due tipologie di piantagione R3S2 e R6S3, relativamente al contenuto idrico dei campioni rilevati, è stato adottato il t -test di Student.

Tutti i test statistici di significatività assumono inizialmente la cosiddetta *ipotesi zero*, anche chiamata *ipotesi nulla*. Quando si effettua il confronto fra due o più gruppi di dati (campioni), l'ipotesi zero prevede sempre che non esista alcuna differenza tra i gruppi riguardo al parametro considerato. Quindi se l'ipotesi nulla è valida, i campioni vengono dalla stessa popolazione e le eventuali differenze osservate nei campioni (il parametro considerato) vanno attribuite al solo caso. Una decisione di respingere l'ipotesi nulla (presa sulla base del test statistico) è probabilmente giusta, ma potrebbe anche essere errata. La probabilità di commettere questo errore si chiama *livello di significatività* del test.

Il livello di significatività di un test può essere scelto a piacere dallo sperimentatore. Questa probabilità, chiamata anche valore P , di solito viene fissata ai valori tipici di 0.05 (5%) o di 0.01 (1%). Questa probabilità rappresenta una stima quantitativa della probabilità che le differenze osservate siano dovute al caso. Gli statistici definiscono questo concetto in un modo più preciso dicendo: il valore P è la probabilità di ottenere un risultato altrettanto estremo o più estremo di quello osservato se la diversità è interamente dovuta alla sola variabilità campionaria, assumendo quindi che l'ipotesi iniziale nulla sia vera.

3.4.2. ANALISI MULTIVARIATA NELLA LOGISTICA DELLA RACCOLTA DELLA PIANTAGIONE SRF

Approccio del modello di analisi

L'analisi statistica condotta per la modellizzazione negli aspetti di logistica della raccolta delle SRF è basata sulla modellizzazione multivariata. Per la stima del modello di analisi dei tempi lordi di raccolta in funzione di una serie di variabili relative al carico trasportato, alla distanza percorsa, alla potenza dei trattori impiegati per il trasporto del cippato prodotto e al numero di polloni per ceppaia, sono stati utilizzati e applicati modelli chemometrici di analisi statistica multivariata PLS e PLSDA.

La Partial Least Squares (PLS) (Wold *et al.*, 2001) rappresenta una delle tecniche statistiche più affidabili, utilizzate per cercare le correlazioni tra i segnali di uscita di uno strumento multicanale e le informazioni contenute nelle N misure stesse. In particolare il modello è utilizzato in senso predittivo per stimare quantitativamente il valore dei parametri di riferimento.

Il modello opera attraverso apposito algoritmo (SIMPLS, De Jong 1993) sull'insieme delle informazioni rilevate (variabili di input, matrice X , X_{block}) e sia sui valori quantitativi di riferimento, sia sulle classi funzionali osservate (tempi lordi di raccolta, Y). Poiché i valori appartenenti ad uno stesso data-set sono legati da complessi rapporti funzionali, il modello, attraverso una procedura iniziale di calcolo di massime correlazioni, determina, tramite un processo ricorsivo, l'insieme minimo di n variabili di stima (*latent and score variable*) le quali sono rappresentabili in uno spazio n -dimensionale e che sono utilizzate dalla PLS per calcolare la miglior matrice di regressione (B) tra le X e le Y . La matrice B ottima è quella che minimizza la matrice degli errori di stima del modello (E), secondo l'equazione matriciale:

$$Y = BX + E$$

Il modello comprende una fase di *trainig* e una fase di *test di validazione*, e per entrambe è possibile calcolare gli errori per ciascuna fase. L'andamento degli errori è, in genere, decrescente per la fase di training (RMSEC) e crescente per la fase di cross-validazione (RMSECV). Il numero di variabili latenti utilizzato si basa sulla minimizzazione contemporanea di questi due tipi di errori, oppure sulla migliore performance del test.

Attraverso la matrice B , sono stimati i nuovi valori di Y (valori stimati, matrice Y') espressi o come etichetta di classe - class label - oppure come valore quantitativo. Il confronto tra i valori

osservati Y e i calcolati Y' consente di valutare il grado di corretta classificazione a priori o l'efficienza di predizione dei valori osservati.

L'algoritmo di base PLS può essere utilizzato per due tipologie analitiche:

- predizioni quantitative;
- classificazioni o modellamenti.

Il primo caso, è rappresentato tipicamente dalla stima di un parametro quantitativo, nel caso in oggetto di tipo fisico (misurato in modo tradizionale). Il grado di correttezza della stima deve essere dedotto tramite il confronto diretto delle Y misurate con quello delle Y' stimate, calcolando differenti parametri indicativi della efficienza di predizione, come:

- coefficiente di correlazione (r) tra valori predetti e misurati
- RMSE (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{I_p} (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

- SEP (standard error of prevision)

$$SEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{I_p} (\hat{y}_i - y_i - bias)^2}$$

dove:

\hat{y}_i - è il valore predetto di ogni osservazione;

y_i - è il valore misurato di ogni osservazione;

n - numero di osservazioni nel set dei valori predetti;

$bias$ - differenza sistematica tra I valori misurati e predetti.

essendo:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{I_p} (\hat{y}_i - y_i)$$

In altre situazioni, si ha la necessità di sviluppare un modello PLS che sulla base delle informazioni multicanale (spettro) possa attribuire il campione di misura a:

- una ed una sola delle classi predeterminate (classificazione);
- una delle classi predeterminate o a nessuna di esse (modellamento); in questo caso se il campione non è attribuito alla classe si indica come *outlier*.

Per questa tipologia di analisi, il modello multivariato è più correntemente chiamato PLSDA, Partial Least Square Discriminate Analysis.

La PLSDA non è altro che un'analisi di regressione PLS nella quale la variabile “risposta” è categorica (y-block; sostituito da un set di dummy-variables (1,0) per ogni categoria) esprimendo la classe di appartenenza delle unità statistiche.

In classificazione, la PLSDA non ammette, come variabili risposta, altre che non siano quelle che definiscono i gruppi di individui (i modelli costruiti dalla PLS sono resi, dalla PLSDA, categorici, quindi discriminanti). Come conseguenza, tutte le variabili misurate giocano lo stesso ruolo rispetto alla classe assegnata. La PLSDA stabilisce la percentuale di corretta classificazione e il peso di ogni pixel in ciascun *latent vector* (LV) (vale a dire nei parametri principali che descrivono il modello). L'abilità di predizione della PLSDA dipende anche dal numero (k) di LV usati nel modello. Il valore ottimale di k viene determinato dalla predizione dei risultati per gruppi indipendenti di campioni (test set) per differenti valori di k , e determinando quel valore per il quale la più alta percentuale di corretta classificazione è stata trovata nel test set.

Nel modellamento, la PLSDA calcola la “probabilità di predizione” e una soglia di classificazione per ciascuna classe modellata. Queste sono calcolate usando il metodo Bayesiano che essenzialmente prende i valori y predetti dal modello PLSDA, adatta ad essi una distribuzione normale e poi usa ciò per calcolare la probabilità di osservare un dato valore y . Il metodo stabilisce la percentuale di corretta classificazione ed il peso di ciascuna specie in ogni LV. Questa analisi esprime anche i parametri statistici indicanti l'efficienza di modellazione segnalata dalla sensibilità e dalla specificità dei parametri. La sensibilità (*sensitivity*) è la percentuale di specie della categoria accettata dal modello di classe. La specificità (*specificity*) è la percentuale di specie di categorie differenti dal modello, quindi rigettate dal modello di classe.

Anche nella PLSDA, il modello include una fase di calibrazione (*training*) ed una di test di validazione, e per entrambe le fasi, può essere determinata la percentuale di corretta classificazione calcolando gli errori residui. Per ogni variabile Y , il modello calcola l'errore residuale che esso può compiere nella fase di training a seconda del numero di variabili latenti considerate (RMSEC: errore quadratico medio in fase di calibrazione). Lo stimatore della prestazione della regressione è rappresentato dalle seguente formula:

RMSEC – Root Mean Square Error of Calibration,

$$RMSEC = \sqrt{\frac{PRESS}{N}}$$

Dataset di analisi

I valori osservati costituiscono il blocco delle variabili indipendenti per l'analisi multivariata. Per lo sviluppo di modelli supervisionati PLS o PLSDA è necessario associare a tali informazioni le relative risposte note (Y). Sia la PLS che la PLSDA hanno la possibilità di operare predizioni o classificazioni su Y multiple (Yblock), in modo che con un solo modello sia possibile effettuare una stima multicomponente. Tuttavia, normalmente, tale stima, dovendo considerare contemporaneamente tutti i parametri di risposta, è meno performante della stima dei singoli componenti affidata a singoli e distinti modelli.

Nel complesso, per il caso in esame sono state sviluppate analisi relative a:

1. stima i valori dei singoli parametri rilevati attraverso modellizzazione singola (predizione quantitativa attraverso analisi PLS)
2. stima i valori dei singoli parametri chimici rilevati sui diversi campioni attraverso modellizzazione multipla (predizione quantitativa attraverso analisi PLS)
3. classificazione di parametri qualitativi attraverso analisi PLSDA

Strategia di modellazione e test

Per conferire maggiore robustezza e possibilità di generalizzazione alle analisi modellistiche, dove presenti almeno più di 30 misure, la strategia di analisi multivariata sia PLS che PLSDA è stata la seguente:

1. ripartizione dell'intero dataset (DS) in due parti:
 - a. dataset per il modello (DM), comprendente il 75% di DS
 - b. dataset per il test indipendente (DT) comprendente il restante 25% dell'intero (DS)
2. la ripartizione è stata effettuata attraverso:
 - a. partitioning algorithm that takes into account the variability in both X- and Y-spaces called SPXY (Harrop Galvao *et al.*, 2005) per PLS
 - b. funzione di estrazione basata sulle distanze e algoritmo di Kennard-Stone per PLSDA (Kennard & Stone, 1969)

I dati campione sono stati divisi in due gruppi sulla base dell'algoritmo di Kennard-Stone (1969) nel seguente modo:

- i) il 75% dei campioni di ogni singolo raggruppamento sono andati a costituire una serie di calibrazione (*training set*) utilizzata per sviluppare il modello di calibrazione;
- ii) il 25% dei campioni (la parte rimanente di ogni categoria) sono stati utilizzati per valutare la bontà della predizione attraverso un test indipendente ("*test set*"). In realtà il modello di Kennard-Stone va a scegliere per primi gli individui da prelevare per il test consentendo poi, per differenza, di individuare i restanti da utilizzare per il "*training set*" (Harrop Galvao et. al., 2005).

Preprocessing

Sia i dati di Xblock che quelli Y o Yblock sono stati preprocessati con differenti algoritmi al fine di limitare o esaltare effetti di scala, drift, noise.

La lista degli algoritmi di preprocessing applicati sui dataset PLS e PLSDA è riportata in Tabella 6.

Tabella 6. Lista degli algoritmi di preprocessing applicati sui dataset PLS e PLSDA

<i>Sigla preprocessing</i>	<i>Descrizione</i>
None	no preprocessing
Abs	takes the absolute value of the data
Autoscale	centers columns to zero mean and scales to unit variance
Detrend	remove a linear trend
Gls weighting	generalized least squares weighting
Groupscale	group/block scaling
Mean center	center columns to have zero mean
Msc (mean)	multiplicative scatter correction with offset, the mean is the reference spectrum
Median center	center columns to have zero median
Normalize	normalization of the rows
Osc	orthogonal signal correction
Sg	Gavitsky-Golay smoothing and derivatives
Snv	standard normal deviate

Iterazione di modellizzazione

Il DM è stato utilizzato per lo sviluppo di differenti modelli derivati dalla combinazione fattoriale di

- numero crescente di variabili latenti (LV, da 1 a 20)

- differenti tipi di preprocessing per Xblock (14)
- differenti tipi di preprocessing per Yblock (4) solo per modelli PLS

Attraverso tecniche di estrazione di datamining, sono state derivate le migliori combinazioni LV - preprocessing cui corrispondevano i modelli più performanti.

La scelta delle combinazioni *best performing* è stata effettuata anche sulla base delle performance derivate sui test indipendenti, effettuati per tutti i modelli utilizzando il dataset DS. Il test è indipendente nel senso che per la costruzione dei modelli, calibrati e validati, e non erano utilizzati in alcun modo i dataset di test.

Questa procedura è generalmente ritenuta valida per sottoporre a maggiore *stress* statistico i dataset di analisi e per ottenere risultati più affidabili.

Le iterazioni modellistiche sono state sviluppate attraverso un'apposita routine software realizzata in ambiente Matlab 7.1 e PLS Toolbox 4.0.

Il modello utilizzato nella stima del tempo lordo di raccolta della farciatrinciacaricatrice Claas Jaguar 880, si compone di una serie di matrici numeriche relative ai vari parametri di calcolo dei valori di stima la cui funzione è:

$$y_{new} = X_{new} * (W * inv(P' * W) * inv(T' * T) * T' * Y) \quad (5)$$

dove:

y_{new} : è la nuova predizione del tempo lordo di raccolta

X_{new} : sono i nuovi dati rilevati di tutte le variabili del modello su cui effettuare la nuova predizione, i valori di X_{new} devono essere preprocessati utilizzando lo stesso algoritmo utilizzato nel modello (autoscale equivalente alla normalizzazione);

W : la matrice di pesi delle X originali, fornita dal modello;

P' : la trasposta della matrice dei loadings delle X originali, fornita dal modello;

T : la matrice (e la sua trasposta T') degli score delle X originali, fornita dal modello;

Y : la matrice dei valori Y originali;

inv : rappresenta l'operazione di inversione matriciale.

Questo modello è quindi immediatamente disponibile per l'utilizzo applicando i nuovi dati rilevati (X_{new}) alla funzione (1) attraverso software di calcolo matriciale.

L'equazione semplificate della (1) e applicata nello studio di riferimento è la seguente:

$$T = X W (P W)^{-1} (S_t S)^{-1} S_t Y \quad (6)$$

dove:

T , tempo lordo;

X , matrice valori;

W , matrice pesi assi;

P , matrice pesi variabili;

S , matrice delle variabili latenti;

S_t , matrice trasposta di S ;

Y , valori di T del modello.

Base metodologica dei dati sperimentali

Lo studio è stato condotto nel sito "Le Risaie", nel comune di Viterbo (42 ° 22 '47 "N, 12 ° 02'21" E), ed ha riguardato la rilevazione dei tempi e dei costi dell'operazione di raccolta condotta con impiego di una falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar 880 con testata GBE-1, affiancata da tre carri raccolta. La piantagione sottoposta al taglio era un Short Rotation Forestry (SRF) di pioppo del clone AF2 ed era caratterizzata come una R2S2 (radice di 2 anni e fusto di 2). La superficie sottoposta al taglio era di 15,4 ettari ed era costituita da un impianto a file singole con sesto di 0,66 m tra le piante e 2,50 m tra le file, con una densità di 6060 talee per ettaro. Il cippato prodotto dalla macchina veniva raccolto e trasportato da tre carri raccolta che si alternavano nell'affiancare la raccoglitrice durante il lavoro. I rimorchi avevano capacità di carico diversa e rispettivamente di 25 m³, 16 m³ e 13 m³. Il carico medio trasportato dai tre rimorchi è stato calcolato come un valore medio ottenuto da tre pesate per ciascun carico. I valori ottenuti, che sono stati successivamente considerati nell'elaborazione statistica erano pari a tonnellate 7,37, 4,74 e 3,66. La squadra operativa era costituita dai quattro conducenti delle macchine. I trattori che trainavano i rimorchi erano rispettivamente, a partire dal carico maggiore, un Lamborghini 165 DT (120 kW), un Fiat 115 DT (84 kW) e un Fiat 80/90 DT (58 kW). Il rilievo dei tempi di lavoro del cantiere, rilevati a livello di ogni singolo carico, è stato condotto evidenziando i tempi delle diverse fasi operative del lavoro (Karcha et al, 2005;. Puttock et al, 2005;. Verani *et al*, 2010b;. Picchio *et al.*, 2012). Il rilievo è stato condotto con utilizzo di tabella cronometrica Minerva, dotato di tre cronometri centesimali (Harstela, 1991; Costo Action FP-0902, 2012; Berti *et al.*, 1989).

Base metodologica dei dati economici

L'analisi è stata focalizzata sullo studio dell'ottimizzazione delle prestazioni e dei costi dell'operazione di raccolta della falciatrinciacaricatrice in relazione alla capacità di carico, ponendo a confronto i risultati ottenuti con due diversi approcci statistici: il sistema tradizionale di regressione lineare (OLS, Ordinary Linear Regression) e il sistema innovativo di analisi multivariata (PLS, Partial Least Square). L'obiettivo dell'analisi economica è stato quello di individuare l'ipotetico migliore cantiere (quello che rende i costi più bassi) tra le tre ipotesi di cantiere di raccolta formulate di seguito:

Ipotesi 1: 3 Lamborghini 165 DT trattori dotati di un rimorchio portata 25 m³ ciascuno;

Ipotesi 2: 3 Fiat 115 DT trattori dotati di una capacità di carico rimorchio 16 m³ ciascuno;

Ipotesi 3: 3 Fiat 80/90 DT trattori dotati di rimorchio 13 m³ capacità di carico ciascuno.

Il calcolo del costo orario delle macchine ed attrezzature per ogni cantiere di lavoro fa riferimento alla metodologia descritta nel capitolo 3.3. Gli elementi principali utilizzati e i valori ottenuti dei costi orari sono riportati in Tabella 6. La Tabella 7 invece riportano i costi orari calcolati per i tre cantieri di raccolta ed utilizzati per il calcolo economico del costo della raccolta per tonnellata e per ettaro.

Tabella 6. Principali elementi tecnici ed economici per il calcolo del costo delle macchine ed attrezzature

Descrizione	Claas Jaguar 880	Testa GBE-1	Fiat 80/90 DT	Fiat F 115 DT	Lamborghini 165 DT	Rimorchio 1 (25 m ³)	Rimorchio 2 (16 m ³)	Rimorchio 3 (13 m ³)
Prezzo d'acquisto (€)	250,000	90,000	40,000	57,000	80,000	14,000	11,000	10,000
Valore di recupero (€)	41,943	15,099	4,295	6,120	8,590	962	756	687
Periodo di vita (anni)	8	8	10	10	10	12	12	12
Utilizzo della macchina (h)	800	800	1000	1000	1000	300	300	300
Potenza (kW)	350	-	58	84	120	-	-	-
Tasso d'interesse (%)	6	6	6	6	6	6	6	6
Consumo carburante (l/h)	44.18	-	8.27	11.73	16.43	-	-	-
Consumo lubrificante (l/h)	1.77	0.10	0.33	0.47	0.66	0.05	0.05	0.05
Costo conduttore (€/h)	23	23	15	15	15	15	15	15
Prezzo carburante (€/l)	1.05	-	1.05	1.05	1.05	-	-	-
Prezzo lubrificanti (€/l)	9	-	9	9	9	-	-	-
COSTI FISSI	53.51	16.98	6.31	8.90	12.41	5.32	4.22	3.86
COSTI VARIABILI	117.10	14.21	32.28	38.55	46.89	2.76	2.43	2.31
COSTI TOTALI	170.61	31.19	38.59	47.45	59.30	8.08	6.65	6.17

Tabella 7. Costi orari calcolati per i tre cantieri di raccolta ipotizzati (comprensivi ciascuno del costo della raccogliitrice)

<i>Ipotesi di cantiere</i>	<i>Fixed cost</i>	<i>Variable cost</i>	<i>Total cost</i>
Ipotesi 1 (N.3 Lamborghini 165 DT, N.3 rimorchi da 25 m ³)	123.68	280.26	403.94
Ipotesi 2 (N. 3 Fiat 115 DT, N.3 rimorchi da 16 m ³)	109.86	254.23	364.08
Ipotesi 3 (N.3 Fiat 80/90 DT, N.3 rimorchi da 13 m ³)	100.98	235.10	336.08

Altri parametri utilizzati per costruire il modello sono riportati di seguito:

- 1) calcolo della biomassa per ettaro in relazione ai singoli carichi utilizzando la seguente formula:

$$B_{ha} = \frac{x2}{dist} \times 4000 \quad (7)$$

dove:

B_{ha} , biomassa per ettaro (t ha⁻¹)

$x2$, carico trasportato secondo le diverse ipotesi (t)

$dist$, lunghezza percorsa per effettuare un carico

4000 è una costante espressa in m ha⁻¹ e rappresenta l'estensione lineare per ettaro della piantagione

- 2) Calcolo della produttività:

$$Pr = \frac{x2}{T} \quad (8)$$

dove:

Pr , produttività di raccolta (t h⁻¹),

$x2$, carico trasportato secondo le diverse ipotesi (t)

T , tempo lordo di raccolta (h) calcolati con i due approcci regressione.

3) Calcolo del costo di raccolta :

$$HCt = \frac{Tc}{Pr} \quad (9)$$

dove:

HCt , costo di raccolta per tonnellata (euro t^{-1})

Tc , costo orario del cantiere (euro h^{-1})

Pr , produttività di raccolta ($t h^{-1}$), espressa dalla formula (8).

3.5. METODOLOGIA DI ANALISI ECONOMICA DELLA FILIERA

3.5.1. ASPETTI METODOLOGICI GENERALI

La metodologia Life Cycle Cost Analysis (LCCA) o anche Life Cycle Cost (LCC) comunemente si propone di effettuare una valutazione complessiva di scelte di configurazione in cui venga considerato un orizzonte temporale non esclusivamente limitato al periodo di delivering del prodotto/servizio all'utente finale, ma esteso al periodo di utilizzo successivo, fino alla dismissione del bene. Inoltre, si propone di valutare non esclusivamente le determinazioni materiali (costi e benefici) legate alla realizzazione del bene e al suo utilizzo, ma tende a valutarne le implicazioni più generali, relative agli effetti, nocivi o benefici, che ricadono sul sistema complessivo in cui la realizzazione ha luogo e vita. Lo stesso tipo di filosofia si ritiene esportabile quando si voglia realizzare uno strumento di supporto decisionale per la valutazione degli assetti e delle scelte strategiche da intraprendere relativamente alla definizione ed alla configurazione di un *policy* di *Supply Chain*, ovvero la decisione di come definire la distribuzione di siti di ricerca e sviluppo, progettazione, produzione, e la architettura di canali di distribuzione ed approvvigionamento. Sarebbe allora possibile definire dei modelli, analitici o implementati in via simulativa, che, recependo dati di input, siano in grado di fornire delle indicazioni relative ad opportunità di delocalizzazione o ridefinizione della rete e dell'assetto logistico, del rischio associato alle varie opzioni in relazione a fattori aleatori o di difficile definizione, e valutabili comparativamente e complessivamente nel tempo, in termini di costo. Questo ultimo aspetto potrebbe essere realizzato ispirandosi alla visione ed alla filosofia LCCA, purché si valutino anche in termini di costo i fattori rilevanti di meno immediata possibilità di valorizzazione, aleatori, in quanto dipendenti da contesti politici, economici e sociali esterni, ed il loro grado di incertezza. Alla luce di queste considerazioni si possono prospettare le fasi fondamentali dello sviluppo del progetto per quanto riguarda l'applicazione delle metodologie proprie del LCCA alle scelte relative alla gestione della supply chain.

3.5.2. CONFIGURAZIONE DELLA STRUTTURA LCCA

L'approccio LCCA si propone di identificare tutti i costi e benefici futuri, relativi ad una o più opzioni di investimento e/o scelta di configurazione tattica e strategica, riportandoli al loro valore presente con l'impiego delle classiche tecniche di valutazione degli investimenti in modo da rendere il confronto tra le diverse scelte più efficace, considerare l'impatto di tutti i costi previsti, caratterizzanti il ciclo vita dell'investimento e non solo di quelli di investimento

iniziale, e facilitare la scelta tra soluzioni alternative diverse. Per raggiungere tali obiettivi saranno identificati:

- *Costi di investimento iniziali* (od oneri relativi alla scelta strategica). Possono essere suddivisi in tre categorie i costo: costi di acquisto, costi di acquisizione/finanziari e costi di installazione e avviamento;
- *Durata della vita dell'investimento* (o valutazione delle prospettive evolutive e concatenate dello scenario nel tempo relativi alla scelta strategica). Aspetto di fondamentale importanza perché si tratta di una variabile avente influenza esponenziale sull'analisi, possono identificarsi cinque diversi assetti di orizzonte temporale: vita funzionale, vita fisica; vita tecnologica, vita economica e vita legale.
- *Tasso di sconto* (o valutazione del rischio associato ai parametri di scenario evolutivo o aleatori relativi alla scelta strategica). Indispensabile per riportare le voci di costo al loro valore presente, e per valutare la sensibilità alla variazione del valore assunto dai fattori di scenario nel corso del tempo, esso rappresenta un parametro cruciale dell'analisi. Il tasso di sconto appropriato può variare moltissimo rispetto alla scelta di posizionamento del sistema e dovrà essere determinato attraverso valutazioni contabili mirate e con l'impiego di tecniche finanziarie adeguate (ed attraverso il modello di comportamento dinamico del sistema simulato);
- *Costi operativi e di manutenzione* (od oneri/benefici nel tempo relativi alla mantenimento della scelta strategica). Rappresentano tutti i costi legati alla conduzione e al mantenimento dell'impianto, ovvero: costi di manodopera diretta e indiretta, materiali diretti e indiretti, costi di stabilimento, costi energetici e di servizio (od i costi ed i benefici relativi al sostentamento o di esito relativi alla scelta di assetto osservata). Saranno valutati sulla base dati ricavati da assetti organizzativi simili e previsioni sulla potenzialità produttiva a lungo termine;
- *Costi di dismissione* (o di rientro o conversione evolutiva della scelta strategica osservata). Costi relativi al fine vita dell'assetto in fase di studio, come, ad esempio, costi di demolizione, smaltimento o vendita;

- *Grado di incertezza e analisi di sensitività* (od analisi del rischio sia relativa al modello sia relativa alla volatilità del valore effettivo assunto dai fattori rilevanti della scelta strategica). LCCA dipende fortemente dal grado di affidabilità delle assunzioni e dei dati introdotti nella struttura dei costi, è quindi molto importante valutare il grado di incertezza associato alle valutazioni effettuate e l'influenza che eventuali errori potrebbero avere sulla risposta del modello. In particolare si possono considerare cinque principali fonti di incertezza, ovvero: differenze tra prestazioni reali e prestazioni previste, modifiche della configurazione dovute a differenze di impiego da parte degli utilizzatori, innovazioni tecniche non previste, cambi di assetto economico ed errori nella stima dei rapporti tra le parti che possono influenzare i costi complessivi della struttura.

3.5.3. APPLICAZIONE DEL METODO LCCA ALLA MICROFILIERA ENERGETICA

L'analisi economica si è concentrata sulla valutazione della sostenibilità della produzione di biomassa relativamente alla gestione delle piantagioni SRF e dell'intera microfiliera energetica basata sull'autoproduzione ed autoconsumo di biomassa per il riscaldamento di edifici, posta a confronto con un sistema di riscaldamento alimentato da un combustibile fossile, quale il gasolio da riscaldamento. Il metodo di analisi adottato segue l'approccio del Life Cycle Cost Analysis (LCCA) (Fuller and Petersen, 1995); Rushing *et. al.*, 2010; Juurma and Polder, 2011) per la valutazione di investimenti che hanno una certa durata nel tempo, per i quali è necessario esaminare tutte le fasi d'investimento, partendo dalla fase iniziale di progettazione sino alla dismissione. Questa analisi può essere svolta utilizzando alcuni indici di valutazione finanziaria tra i quali il VAN (Valore Attuale Netto o Net Present Value - NPV), TRC (Tempo di Ritorno del Capitale o Pay Back Period – PBP), TIR (Tasso Interno di Rendimento o Internal Rate of Return – IRR), integrati con approfondimenti condotti attraverso la metodologia LCCA. In particolare, la metodologia permette di considerare e scindere le differenti componenti dell'investimento nella componente immobiliare, nella componente di gestione dell'impianto, nella componente di trasformazione del prodotto (Bonazzi e Mattia, 2007). La LCCA consente di effettuare valutazioni di costo tenendo in considerazione tutto il ciclo di vita dell'investimento e permette di valutare ipotesi alternative di investimento con l'obiettivo di scegliere quella cui è associato il minor impegno in termini di flussi finanziari in uscita. La LCCA permette di analizzare l'investimento nel complesso della sua vita utile, tenendo in considerazione tanto l'investimento iniziale quanto i costi connessi alla sua gestione futura. Ciascuna alternativa progettuale è valutata tenendo in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita, dalla progettazione alla dismissione finale concentrando l'analisi, a differenza del VAN,

sui soli costi, o sulle sole uscite monetarie, connesse ad un investimento. La metodologia LCCA tiene quindi in considerazione il fattore tempo attraverso un'attualizzazione dei flussi di cassa rilevati nel corso del complesso della vita dell'investimento che corrisponde all'orizzonte temporale di valutazione. La metodologia LCCA è molto utilizzata soprattutto nella valutazione di costruzioni edilizie, dove si considera (come primo elemento, i costi di progettazione e costruzione dell'edificio, cioè i costi sostenuti all'avvio dell'investimento (Rebitzer and Seuring, 2003).

Nel caso di studio, la durata prevista del periodo considerato per valutare le prestazioni dei due sistemi alternativi era 10 anni, indicato come un periodo di vita della caldaia. L'analisi economica ha iniziato a decorrere dalla campagna di investimento iniziale per l'acquisto della centrale di riscaldamento. Considerando il lungo periodo, l'analisi è stata condotta utilizzando formule finanziarie sulla base al NPV (Rushing *et. al.*, 2010; Sieglinde and Petersen, 1996; Menesatti *et al.*, 2012). Il metodo NPV è basato quindi sulla somma attualizzata dei redditi annui netti maturati nel periodo in esame. Nel caso in esame, tenuto conto che l'analisi è effettuata in termini di soli costi sostenuti negli anni dell'intero ciclo di produzione dell'energia termica, il parametro del calcolato sono i costi, per cui il metodo adottato è quello relativo al calcolo del valore attuale dei costi (PVC – Present Value of Cost). La formula applicata è pertanto la seguente:

$$PVC = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + P \quad (10)$$

dove:

C_t , costo totale all'anno t ;

r , tasso di sconto (nel caso in esame pari al 3%)

t , anno (variabile da 1 a 10);

P , costo iniziale dell'investimento.

Una volta determinato il valore PVC, per ottenere il valore che esprime il il costo equivalente annuale, tramite l'applicazione dell'approccio finanziario è stata adottata la seguente formula per calcolare questa grandezza definita EAC (Equivalent Annual Cost):

$$EAC = PVC \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (11)$$

dove:

PVC , valore attuale dei costi;

t , anno (variabile da 1 a 10);

r , tasso di sconto (pari al 3%).

Per il sistema di riscaldamento a biomassa è considerato nell'analisi anche il costo iniziale per la realizzazione della piantagioni SRF su una superficie idonea a soddisfare i fabbisogni annuali di biomassa (sotto forma di cippato) per alimentare l'impianto di riscaldamento. Nel costo d'impianto si comprendono, quindi, tutti i costi sostenuti per la preparazione iniziale del terreno con doppia lavorazione (rippatura profonda e aratura leggera), fertilizzazione di fondo, affinamento del terreno e impianto di talee meccanizzato. A ciò vanno aggiunti anche tutti i costi sostenuti per la successiva manutenzione e gestione della piantagione negli anni successivi al primo. A cadenza biennale si comprende anche il costo per la raccolta meccanizzata della biomassa, lo stoccaggio in azienda, la sua trasformazione in cippato e l'utilizzo nella centrale a biomassa. La considerazione di tutti questi costi equivale a valutare, per l'intero ciclo di vita considerato, il costo di produzione del cippato quale combustibile del sistema a biomassa, in confronto con l'investimento alternativo del sistema tradizionale di riscaldamento a gasolio. Al fine di rendere compatibile il confronto tra i due sistemi è stato considerato per il sistema a gasolio un investimento iniziale riferito ad una centrale a gasolio con equivalente capacità di produzione di energia termica anche in relazione ad un differente rendimento termico della caldaia.

La piantagione SRF è quindi considerata con ciclo di vita di 10 anni, dopo il quale si prevede l'espianto e il ripristino del terreno per una nuova coltura, il cui onere viene considerato nell'analisi. Dal punto di vista della produzione di biomassa, si prevedono raccolte biennali con un totale di cinque cicli produttivi.

Al fine di garantire un flusso costante di biomassa annuale durante il periodo considerato, in figura 36 è stato riportato un opportuno collegamento temporale tra la costituzione della piantagione SRF rispetto al ciclo di vita della centrale termica. Questo schema è stato anche la base per rappresentare il flusso di cassa dei costi per valutare il PVC e EAC della piantagione e la gestione termica centrale. Nella Figura 36, è mostrato lo schema considerato per l'applicazione del metodo di calcolo del PVC che prevedere la programmazione dell'impianto di SRF in modo tale da garantire alla centrale termica la quantità annuale di biomassa idonea per il fabbisogno dell'impianto di riscaldamento degli edifici.

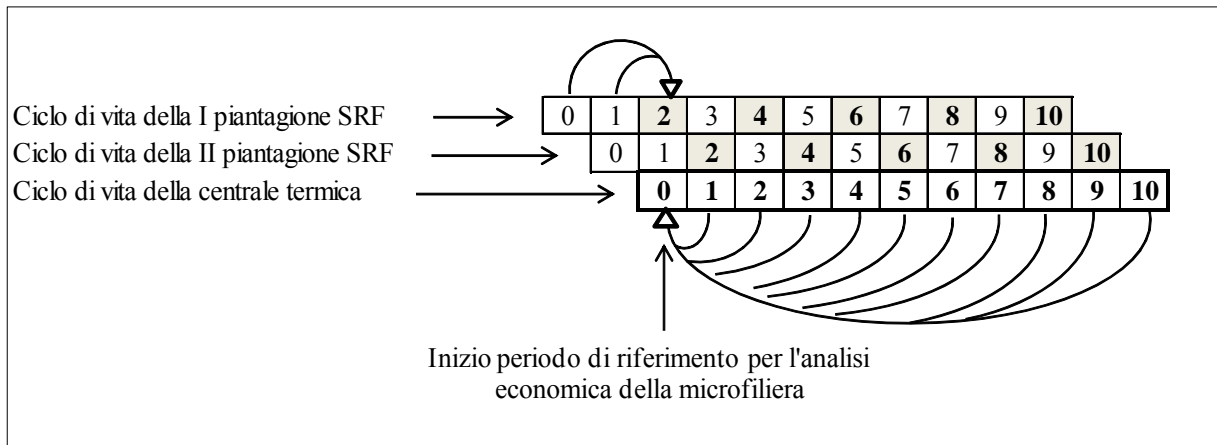


Figure 36. Schema relative al periodo considerato (ciclo di vita della centrale termica in anni) per la valutazione dell'indicatore PVC dell'investimento (sistema a biomassa), ed indicazione della produzione programmata della piantagione SRF a cadenza biennale

Per garantire l'immediata attivazione della centrale termica all'anno d'impianto, è necessario avere a disposizione già una quantità di biocombustibile pronta per l'utilizzo in caldaia. Per questo motivo il progetto di filiera di autoconsumo energetico, deve prevedere, tenuto conto che la raccolta va fatta con turno non minore di due anni, la costituzione di due parcelle equivalenti di piantagione SRF, nei due anni precedenti all'installazione della caldaia, come mostrato in Figura 36, in modo tale da garantire con tagli annuali alternati delle due parcelle SRF, l'approvvigionamento costante ogni anno. Il dimensionamento delle superfici da investire in SRF, nel caso di studio, sono state determinate, tenendo conto delle produzioni realmente realizzate al primo taglio colturale (circa $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di sostanza secca) e mantenendo prudenzialmente costante questo valore per ogni raccolta prevista negli anni successivi. La realizzazione delle due parcelle va effettuata rispettivamente due anni ed un anno prima dell'installazione della centrale termica per avere un primo ciclo di raccolta per una delle due parcelle SRF nel periodo febbraio-marzo dell'anno d'installazione della centrale che entrerà in funzionamento nel novembre dello stesso anno (anno 0 per l'analisi economica), permettendo alla biomassa raccolta di stagionare per almeno 6-8 mesi prima dell'utilizzo, quando il legno avrà persa molta umidità e sarà più adatto a bruciare in caldaia.

Per l'attualizzazione dei costi sostenuti per l'impianto e la manutenzione delle piantagioni nei due anni precedenti l'anno considerati d'inizio dell'investimento è stata applicato un fattore di posticipazione (f) per cumulare i suddetti costi all'anno d'inizio investimento (anno 0, inizio ciclo di vita della centrale termica). La formula utilizzata è stata la seguente:

$$f = (1 + r)^z \quad (12)$$

dove:

f , fattore di posticipazione finanziaria

r , tasso di sconto (pari al 3%);

z , anno (variabile da 0 a 2);

Al termine del ciclo produttivo (quinto ciclo di raccolta cadente al 10° anno per ogni parcella SRF), si prevede l'espianto con triturazione delle ceppaie e ripristino del terreno. Oltre ai costi diretti di gestione delle piantagioni (lavorazioni interfila, tagli colturali, eventuali trattamenti, ecc.) è stato considerato un costo medio annuo per l'uso del terreno (beneficio fondiario) di 500 euro per ettaro.

L'analisi è stata condotta secondo l'approccio dei prezzi costanti lungo tutto il periodo. Il calcolo dei costi delle macchine e delle attrezzature impiegate negli interventi colturali è stata fatto considerando la metodologia analitica descritta precedentemente. Infine, è stata condotta un'analisi di sensitività per valutare l'effetto di un cambiamento nel costo del carburante (gasolio e cippato) sul valore PVC per due sistemi di riscaldamento.

Le formule utilizzate per calcolare i parametri tecnici, economici ed energetici di base nel confronto tra i due sistemi di riscaldamento a cippato e a gasolio sono riportati in Tabella 8.

Nelle Tabelle 9 e 10, sono riportati rispettivamente i costi medi annuali di gestione delle piantagioni, distinti in relazione alla tipologia di piantagione (file singole e file binate), e i principali elementi tecnici relativi ai due sistema di riscaldamento posti a confronto nell'analisi LCCA per il periodo di 10 anni di durata dell'investimento. Infine, nella Tabella 11 si riportano i costi medi annuali di gestione dei due sistemi di riscaldamento, facendo riferimento, per il prezzo del combustibile e delle altre voci di costo all'anno 2009. Nella Tabella non è riportato il prezzo unitario del cippato, in quanto, essendo questo prodotto in azienda dalle piantagioni SRF, è inglobato nel calcolo dei costi d'impianto e gestione delle SRF che poi vengono utilizzati nel modello di analisi economica dell'intero ciclo di vita sulla base dell'applicazione del metodo NPV.

Per quanto riguarda il costo di raccolta, nella tabella si fa riferimento al sistema adottato per il primo taglio della piantagione, caratterizzata come R3S2 (radice di tre anni e fusto di 2 anni), che ha previsto l'impiego di una taglia ceppaie per l'abbattimento delle piante intere, e di un trattore munito di pinza anteriore adibito all'esbosco del piante e al loro accumulo in un'area

dell'azienda predisposta per lo stoccaggio delle piante intere (Figura 37). In questo caso il cippato è stato prodotto in una fase successiva, quando le piante erano già parzialmente disidratate, con l'utilizzo di una sminuzzatrice forestale professionale. Il secondo taglio invece, effettuato sulla piantagione R6S3 (radice di sei anni e fusto di 3 anni), è stato realizzato con l'impiego della falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar 880 (Figura 38) e due carri raccolta. In questo caso la macchina, con un solo passaggio in campo, taglia le piante, le raccoglie, le sminuzza e carica il cippato prodotto su un carro raccolta che lo trasporta e lo scarica nel luogo di stoccaggio (Verani *et al.*, 2009). Con il primo sistema i costi risultano più elevati rispetto al secondo, ma i rischi di una perdita di prodotto durante il periodo di stoccaggio della biomassa prima dell'utilizzo in caldaia risulta inferiore.

Tabella 8. Formule per la determinazione degli elementi tecnici, economici ed energetici dei due sistemi di riscaldamento (cippato e gasolio)

<i>Simb.</i>	<i>Elementi</i>	<i>Formule</i>
P_b	Potenza al bruciatore (kW)	
P	Potenza resa caldaia (kW)	$P = fu \times Vr = P_b \times r$
r	Rendimento caldaia (%)	$r = Pr / P \times 100$
Pl	Produzione di energia lorda (GJ/anno)	$Pl = P_b \times h$
F_a	Fabbisogno termico utile annuo (GJ/anno)	$F_a = P \times h$
C	Consumo combustibile (t/anno)	$C = (P \times h) / (pci \times r)$
h_g	Funzionamento giornaliero (h/giorno)	$h_g = h / g_a$
g_a	Funzionamento annuo (giorni/anno)	$g_a = h / g_a$
h	Funzionamento annuo (h/anno)	$h = h_g \times g_a$
w	Contenuto idrico del cippato (%)	$w = [(m_u - m_a) / m_u] \times 100$
m_u	Massa umida (cippato fresco) (kg)	
m_a	Massa anidra (disidratazione in stufa) (kg)	
pci	Potere calorifico inferiore (MJ/kg)	$pci = (18,5 \times (1 - w) - 2,44 \times w)$
C_{min}	Consumo comb. minimo (t/anno) w= 15%	$C = (P \times h) / (4,27 \times r)$
C_{max}	Consumo comb. massimo (t/anno) w= 55%	$C = (P \times h) / (1,94 \times r)$
fu	Fabbisogno unitario (kW/m ³)	
Vr	Volume riscaldabile (m ³)	$Vr = P / fu$
Cu	Costo unitario biomassa (€/t)	
C_a	Costo annuo combustibile (€/anno)	$Ca = Cu \times C$
C_{et}	Costo unitario energia termica utile (€/GJ)	$C_{et} = Cu / (pci \times r)$
C_{uc}	Consumo unitario caldaia (kg/kWh)	$C_{uc} = 1 / (0,278 \times pci)$
Ch	Consumo orario combustibile (kg/h)	$Ch = C_{uc} \times P_b$
C_g	Consumo giornaliero combustibile (t/g)	$C_g = Ch \times h_g$

Tabella 9. Costi medi annui di gestione delle piantagioni di SRF, distinti per tipologia (file singole e file binate)

<i>Operazioni</i>	<i>File singole (SR)</i>	<i>File binate (TR)</i>	<i>Media SRF</i>
Costo d'impianto (anno 0)	2.530,00	3.460,00	2.995,00
Manutenzione post-impianto (1° anno)	830,00	850,00	840,00
Raccolta, cippatura, stoccaggio, manutenzione annuale (2°-4°-6°-8°-10° anno)	800,00	1.035,00	917,50
Manutenzione annuale della piantagione (3°-5°-7°-9° anno)	280,00	250,00	265,00
Triturazione ceppaie (fine ciclo 10° anno)	300,00	300,00	300,00
Beneficio fondiario	500,00	500,00	500,00

Tabella 10. Principali elementi tecnici, economici ed energetici utilizzati nel calcolo dei costi di gestione dei due sistemi di riscaldamento

<i>Elementi</i>	<i>Sistema di riscaldamento a biomassa</i>	<i>Sistema di riscaldamento a gasolio</i>
Potenza termica (kW)	232	207
Potenza resa (kW)	186	186
Rendimento (%)	0,8	0,9
Energia lorda prodotta (MWh/anno)	348	310
Energia netta prodotta (MWh/anno)	279	279
Consumo di combustibile t/anno)	102,35	26,14
Funzionamento annuo (h/anno)	1500	1500
Contenuto idrico del cippato (%)	30%	
Prezzo del combustibile(€/t)		1.490,00
Produzione media di biomassa da SRC(t s.s./ha/anno)	10,2	
Fabbisogno teorico di biomassa (t s.s./anno)	67,66	
Superficie teoria di SRC (ha)	6,63	
Perdita media di stoccaggio (%)	10%	
Fabbisogno reale di biomassa (t/anno)	74,43	
Superficie reale di SRC (ha)	7,30	

Tabella 11. Costi medi annui di gestione dei due sistemi di riscaldamento (Cippato, C; Gasolio, D)

Voci di costo	Unità di misura	Sistema di riscaldamento a cippato (C)			Sistema di riscaldamento a gasolio (D)		
		Quantità	Prezzo €	Valore €	Quantità	Prezzo €	Valore €
Investimento iniziale	€	1.00	60,300.00	60,300.00	1.00	16,900.00	16,900.00
Manutenzione	h/anno	66.53	13.00	864.88	4.44	13.00	57.72
Riparazioni	€/anno ¹			603.00			169.00
Consumo di combustibile	kg/anno	85,224.49	(*)	(*)	26,138.28	1.49	38,946.04
Movimentazione del cippato	h/anno	71.65	35.00	2,507.65			
Consumo di energia elettrica	kWh/anno	12,375.00	0.12	1,485.00	6,825.00	0.12	819.00
Assicurazioni e servizi	€/anno			301.50			84.50
Direzione, amministrazione e sorveglianza	h/anno	14.00	13.00	182.00	3.00	13.00	39.00
Totale costo annuale	€/anno			5,944.14			40,115.26

(*) il Prezzo e valore del cippato non è riportato perché inglobato nel calcolo dei costi d'impianto e gestione delle piantagioni SRF (vedi Tabella 9)



Figura 37. Raccolta della SRF con Taglia ceppaie (A) che esegue l'abbattimento delle piante intere le quali vengono trasportate fuori campo e accatastate da un trattore munito di pinza anteriore (B).



Figura 38. Raccolta della SRF con impiego della Falcitrinciacaricatrice Claas Jaguar con testata GBE-1, che effettua in un solo passaggio il taglio delle piante, la raccolta e la sminuzzatura direttamente in campo.

4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La tesi è stata sviluppata con l'obiettivo finale di analizzare la sostenibilità tecnica ed economica di un modello di filiera su piccola scala finalizzato alla produzione di energia termica per riscaldamento di edifici aziendali. Il modello è stato costituito presso il CRA-ING, all'interno di un bacino di approvvigionamento di biomassa di circa 10.000 ettari. L'analisi ha riguardato le problematiche attinenti alla costituzione della microfiliera energetica, sulla base di quattro casi studio, con i quali è stato possibile indagare da un lato, su singoli processi di realizzazione e gestione delle piantagioni energetiche, gli aspetti produttivi e di meccanizzazione della raccolta e della logistica del trasporto della biomassa all'interno della filiera energetica e, dall'altro, l'analisi globale della filiera energetica, basata sull'utilizzo di biomassa, tramite la definizione di un modello di valutazione complessiva della sostenibilità tecnica ed economica.

La discussione dei risultati verrà pertanto effettuata in relazione ai quattro casi studio esaminati:

Caso studio I – Produzione di biomassa da piantagioni SRF aziendali - ha riguardato le performance produttive di piantagioni energetiche di pioppo dell'azienda dell'Unità di ricerca per l'ingegneria agraria di Monterotondo (CRA-ING), appositamente realizzate per produrre biomassa da utilizzare come combustibile nella centrale per il riscaldamento di locali ed uffici (Di Matteo *et al.*, 2012).

Caso studio II - Analisi dell'utilizzazione e della logistica dei trasporti di biomassa da piccole formazioni forestali - fa riferimento ai risultati ottenuti da un'indagine territoriale condotta su un'area di 10.000 ettari, situata intorno al centro termico del CRA-ING, che ha permesso di sviluppare un'analisi sull'ottimizzazione della logistica di trasporto della biomassa potenzialmente utilizzabile a fini energetici nella microfiliera (progetto FORFAR, 2011);

Caso studio III - Analisi della logistica della raccolta della SRF – riporta i risultati dell'applicazione del metodo di analisi multivariate PLS (Partial Least Squares), posto a confronto con il metodo maggiormente utilizzato della regressione lineare OLS (Ordinary Linear Regression), sulla logistica della raccolta delle SRF (Costa *et al.*, Submitted 2013, CIGR Journal).

Caso studio IV - Analisi della sostenibilità economica della produzione di energia termica da biomassa legnosa - riporta i risultati di un'analisi economica globale della filiera energetica di produzione di calore per il riscaldamento dell'edificio adibito ad uffici presso l'Unità di ricerca CRA-ING di Monterotondo (Verani *et al.*, submitted 2013, iForest).

4.1. CASO STUDIO I. PRODUZIONE DI BIOMASSA DA PIANTAGIONI SRF AZIENDALI

In questo primo caso studio sono state analizzate, dal punto di vista dendrometrico e delle performance produttive, le piantagioni di pioppo SRF realizzate appositamente per fini energetici all'interno dell'azienda dell'CRA-ING.

Le piantagioni sono rappresentate da due tipologie d'impianto:

- file singole (SR), aventi densità d'impianto di 7140 talee/ha;
- file binate (TR), aventi densità d'impianto di 10360 piante/ha.

Ciascuna tipologia è stata costituita con i tre cloni di pioppo AF2, AF6 e Monviso.

L'analisi statistica è stata finalizzata a testare il comportamento dei diversi cloni sperimentale nelle due tipologie d'impianto con particolare riferimento, per gli aspetti produttivi, ai due periodi in cui è stata effettuata la raccolta della piantagione, cioè nel 2007 e nel 2010, quando la piantagione era caratterizzata rispettivamente come R3S2 (radice di 3 anni e fusto di 2) e R6S3 (radice di 6 anni e fusto di 3). Sono stati sottoposti ad analisi statistica i dati sperimentali relativi a diametri, altezze, numero di polloni, umidità del legno, rese produttiva in sostanza fresca e secca. Relativamente ai dati di accrescimento è stata considerata anche la tipologia R4S1 (radice di 4 anni e fusto di 1) e R5S2 (radice di 5 anni e fusto di 2). E' stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) a due fattori, finalizzata ad evidenziare, per le tipologie R3S2 e R6S3, il comportamento dei cloni e l'interazione degli stessi con la diversa densità d'impianto, i cui risultati vengono di seguito esposti.

4.1.1. EFFETTO DEL CLONE SULLA CRESCITA E SULLA PRODUZIONE

E' stata osservata una variabilità tra i cloni nella maggior parte dei parametri studiati nelle piantagione caratterizzate come R3S2, R4S1, R5S2 e R6S3. Nella Tabella 8 sono mostrati i risultati dell'elaborazione statistica relativamente ai parametri di accrescimento e produttivi della R3S2 rilevati prima del taglio. Si evidenzia la non significatività statistica tra i cloni AF2 e AF6 in tutti i parametri (diametri, altezze e produzioni), che però presentano entrambi differenze significative rispetto al Monviso, il quale mostra un diametro medio maggiore degli altri ma una produzione di sostanza secca inferiore: $8,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ contro 10,8 di AF6 e 11 di AF2. Ciò a causa della minore densità di polloni per ettaro del Monviso (21.780) rispetto ad AF6 (28.197) e AF2 (28.552). Non significative risultano le differenza nella percentuale di

sopravvivenza che comunque supera sempre il 90%. L'interazione tra clone e densità risulta positiva rispetto all'altezza, al numero di polloni per ettaro e alla produzione per ettaro.

Tabella 8. Effetti dei trattamenti sperimentali su accrescimenti e rese produttive della SRC a rotazione biennale (R5S2) per le due tipologie di impianto (doppia fila TR; singola fila SR). (*): $P=0,05$; (**): $P=0,01$; (***) : $P=0,001$

Growth year	2007					
	(R3S2)					
Experimental treatment	DBH cm	Height m	Shoots plant ha ⁻¹	Shoots/Stump	Survival %	Yield Mg ha ⁻¹ y ⁻¹
AF2	2.6a	4.8a	28,552a	3.6a	92.2a	11.0a
AF6	2.7a	4.6a	28,197a	3.8a	90.6a	10.8a
MONVISO	2.7a	5.3b	21,780b	2.9a	92.5a	8.8b
TR - High density	2.9	2.7	24,214	2.6	89.3	11.8
SR - Low density	2.4	4.8	28,138	4.2	94.2	8.5
Average	2.7	4.9	26,176	3.4	91.7	10.1
clone	ns	***	**	ns	ns	*
density	ns	ns	**	**	*	**
clone x density	ns	**	**	ns	ns	**

La Tabella 9 mostra i risultati statistici riferiti alla piantagione caratterizzata R4S1, R5S2 e R6S3 che evidenziano significative differenze in tutti i parametri rilevati, eccezion fatta per il numero di polloni a ceppaia. Il clone AF2 solitamente mostra una performance di crescita migliori rispetto ai cloni AF6 e Monviso, con valori medi significativamente superiori nel

Tabella 9. Accrescimenti di anni differenti e rese produttive della SRC a rotazione triennale (R6S3) per le due tipologie d'impianto (file binate TR e file singole SR). (*): $P=0,05$; (**): $P=0,01$; (***) : $P=0,001$

Growth year	2008		2009		2010					
	1 st year (R4S1)		2 nd (R5S2)		3 th year (R6S3)					
Experimental treatment	DBH cm	Height m	DBH cm	Height m	DBH cm	Height m	Shoots plant ha ⁻¹	Shoots/Stump	Survival %	Yield Mg ha ⁻¹ y ⁻¹
AF2	1.8a	3.7a	2.6a	6.7a	3.3a	6.7a	27,551a	3.3a	90.2a	13.9a
AF6	1.4b	3.2b	2.2b	6.0b	3.1a	5.7b	25,612c	3.4a	84.3b	13.2a
MONVISO	1.5b	3.3b	2.0b	6.4a	2.8b	6.7a	26,639b	3.5a	88.9a	12.0b
TR - High density	1.5	3.4	1.9	5.7	2.7	6.2	28,840	3.0	85.6	12.2
SR - Low density	1.6	3.4	2.3	6.3	3.4	6.6	24,361	3.8	89.9	13.9
Average	1.5	3.4	2.1	6.0	3.1	6.4	26,601	3.4	87.8	13.0
clone	***	***	***	***	**	**	*	ns	*	*
density	ns	ns	**	***	**	ns	**	ns	*	*
clone x density	**	ns	ns	**	ns	***	**	ns	**	**

diametro ed nell'altezza in R4S1, nel diametro in R5S2 e nel numero di polloni per ettaro in R6S3. La produzione di biomassa per ettaro risulta mediamente superiore in AF2, tuttavia tale differenza è significativa solo nei confronti del Monviso.

L'interazione tra clone e densità risulta significativa anche in R6S3 come positiva. L'influenza del clone sugli accrescimenti è stata più significativa in R4S1 e R5S2 rispetto a R6S3. In termini di produzione media di biomassa anidra ottenuta per tipologia (TR e SR) si registrano comportamenti contrastanti in quanto in R3S2 si hanno valori medi più alti nelle file binate (11,8 t ha⁻¹ anno⁻¹) rispetto alle file singole (8,5 t ha⁻¹ anno⁻¹), mentre è al contrario in R6S3 (13,9 t ha⁻¹ anno⁻¹ delle singole contro 13,0 t ha⁻¹ anno⁻¹ delle binate).

Considerando che il contenuto di umidità rilevato dai campioni dei diversi cloni in R3S2 e R6S3 non mostra significative differenze anche se mediamente più elevato R6S3 (Tabella 10), le rese più elevate della R6S3 rispetto alla R3S2 sono da attribuire alla maggiore crescita dei polloni dopo il primo taglio di produzione, che ha favorito anche una certa uniformità nella produzione dei singoli cloni, dimostrata da una differenza di produzione di appena 1,9 t ha⁻¹ anno⁻¹ tra AF2 e Monviso in R6S3, contro 2,2 t ha⁻¹ anno⁻¹ tra gli stessi cloni in R3S2.

La resa media più alta è stata ottenuta dal clone AF2 in R6S3 e ciò è collegato anche al fatto che la percentuale di sopravvivenza delle ceppaie è risultata più alta (90,2%) rispetto ad AF6 (84,3%) e a Monviso (88,9%), unitamente a un maggior numero di polloni per ettaro (27.551 rispetto a 25.612 di AF6 e 26.183 di Monviso).

Tabella 10. Contenuto idrico distinto per clone in R3S2 e R6S3

Contenuto idrico (%)	R3S2	R6S3
AF2	52,41	55,96
AF6	53,01	55,62
Monviso	53,63	54,62

4.1.2. EFFETTO DELLA DENSITÀ' SULLA CRESCITA E SULLA PRODUZIONE

La densità ha avuto significativi effetti sia sulla crescita che sulla resa della piantagione in R3S2, R5S2 e R6S3, mentre differenze non significative si riscontrano in R4S1. In R3S2 l'effetto densità è significativo sui polloni per ceppaia oltreché sulla produzione. Sono individuabili due diverse fasi di crescita: la prima caratterizzata da un'assenza dell'effetto densità durata due anni (R3S2 e R4S1), mentre la seconda è caratterizzata da un aumento dell'effetto in R5S2 e R6S3. Questo potrebbe essere spiegato dal fatto che la fila binata (TR) ha

mostrato bassi valori di crescita, probabilmente casati dalla competizione intra-specifica più prolungata in R5S2 e R6S3 rispetto a R4S1.

L'analisi statistica relativa alle distribuzioni dei diametri nelle varie classi diametriche, effettuata per R3S2 e R6S3 in relazione ai diversi cloni (Figura 39) e alla tipologia delle file singole e binate (Figura 40) mostra come la distribuzione sia abbastanza diversa nei due casi, con maggiore concentrazione, come prevedibile, dei diametri nelle classi inferiori per R3F2 rispetto ad R6F3. In quest'ultima aumenta, invece, la frequenza nelle classi superiori soprattutto per il clone AF2, e AF6, che giustifica la maggiore produzione registrata rispetto Monviso. Nella R3F2, invece, il Monviso presenta diametri con maggiore frequenza delle classi superiori a 4 cm, ma il sensibile minore numero di polloni per ettaro, rispetto ad AF2 e AF6, ha determinato una riduzione significativa nella produzione di biomassa ($8,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, rispetto a $10,8$ e $11 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ rispettivamente di AF6 e AF2).

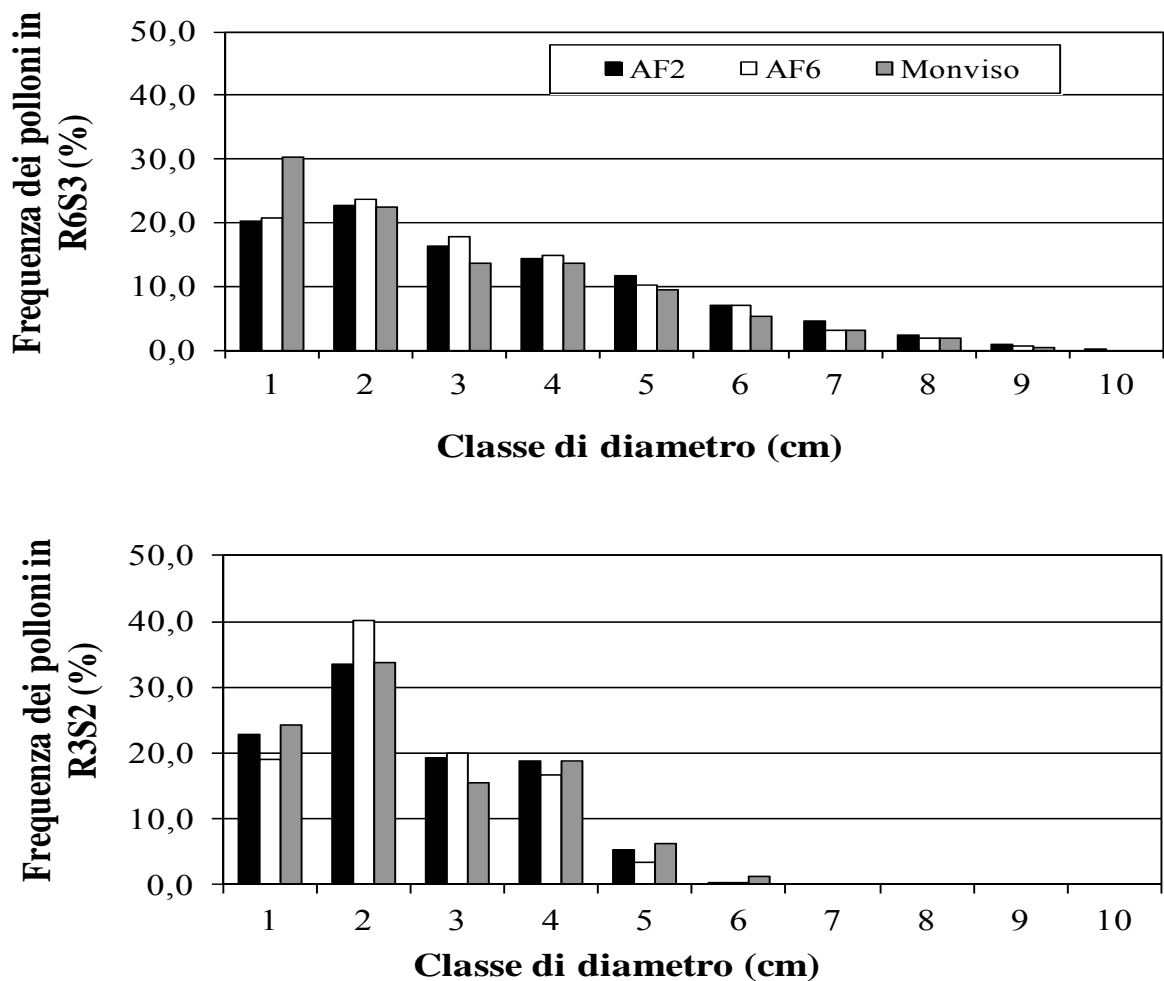


Figura 39. Distribuzione percentuale dei diametri in relazione alle classi diametriche per i diversi cloni in R3S2 e R6S3

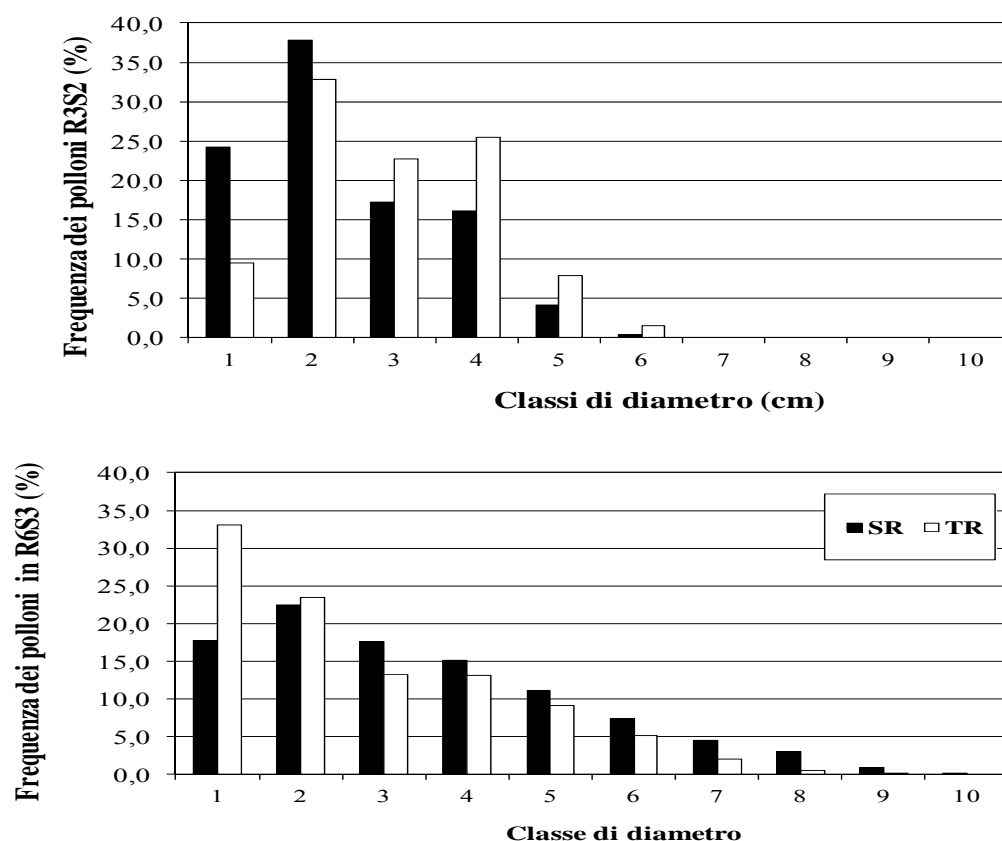


Figura 40. Distribuzione percentuale dei diametri per classe diametrica in R3S2 e R6S3 distinta per tipologia d’impianto (file singole SR; file binate TR)

Rispetto alla tipologia d’impianto i risultati ottenuti sono quasi sempre contrastanti tra R3S2 e R6S3 che giustificano i risultati di resa ottenuti. Nel caso della piantagione R3S2, i polloni delle file singole (SR) presentano frequenze più alte per classi fino a 2 cm, mentre sono sensibilmente ridotte nelle classi maggiori, giustificando in questo modo la maggiore produzione riscontrata per le file binate (TR), anche con un numero di polloni per ettaro sensibilmente inferiore rispetto alle singole.

Nella R6F3, invece, le frequenze riscontrate presentano un comportamento esattamente inverso al precedente. Diametri con frequenza più alta per la TR nelle classi fino a 2 cm, e più bassa nelle classi maggiori. Ciò giustifica il risultato diverso ottenuto nelle rese produttive, risultate superiori in SR rispetto a TR. La conseguenza di una maggiore frequenza nelle classi diametriche più basse, come le prime due classi, comporta conseguenze negative anche sulle caratteristiche qualitative della biomassa legnosa prodotta, che tende ad avere una maggiore percentuale di corteccia (Guidi et al., 2008; Spinelli *et al.*, 2011).

Alla luce di questi risultati, il turno triennale di taglio appare più soddisfacente rispetto al biennale, con produzioni medie complessive dell'intera piantagione di 13,0 t ha⁻¹ di biomassa anidra rispetto alle 10,1 t ha⁻¹ del turno biennale. In considerazione del turno triennale di raccolta, la tipologia d'impianto a singola fila (SR) risulta quella più consigliata, sia perché presenta una produzione più elevata rispetto alla tipologia TR (13,9 t ha⁻¹ rispetto a 12,2 t ha⁻¹), sia perché, associata ad una minore densità per ettaro e alle file singole, la gestione degli interventi colturali annuali è più semplice e le spese d'impianto più contenute (minore spesa per acquisto e posa in opera delle talee).

4.2. CASO STUDIO II. ANALISI DELL'UTILIZZAZIONE E DELLA LOGISTICA DEL TRASPORTO DI BIOMASSA DA PICCOLE FORMAZIONI FORESTALI

L'obiettivo dell'indagine specifica, condotta all'interno del progetto FORFAR, è stato quello di verificare, tramite un'analisi tecnico-economica, la sostenibilità e la possibilità di valorizzazione delle diverse tipologie di FAR presenti nell'are d'indagine di circa 10.000 km intorno all'azienda del CRA-ING dove è stata attivata la filiera energetica.

4.2.1. DISPONIBILITÀ POTENZIALE DI BIOMASSA DALLE FAR

L'analisi è stata condotta su un totale di 4337 celle (50x50 m) per complessivi 214 ha di FAR che rappresentano appena il 2,1% dell'intera area oggetto di studio (10.000 ha) (Figura 41). Ciò

evidenzia la forte dispersione sul territorio di queste formazioni anche se, in riferimento alle sole superfici FAR e agli obiettivi dello studio, i dati osservati, in particolare dal punto di vista della biomassa rilevata, sono risultati molto interessanti. Infatti, come mostrato in sintesi nella Tabella 11, dove vengono riportati i dati di stima della biomassa in relazione al grado di copertura delle FAR, si evidenzia la presenza di una massa legnosa complessiva stimata in circa 17.445 t, corrispondente mediamente a circa 4 t per singola cella, con una discreta media

per ettaro, soprattutto per le formazioni classificate dense ed aperte, essendo variabile in media rispettivamente da 125 t ha⁻¹ a 70 t ha⁻¹, mentre è estremamente ridotta quella attribuita alle formazioni rade (22 t ha⁻¹). Per il particolare caso delle SRF di pioppo, riguardanti una superficie complessiva di circa 4 ha localizzata in prossimità della centrale termica, al momento del

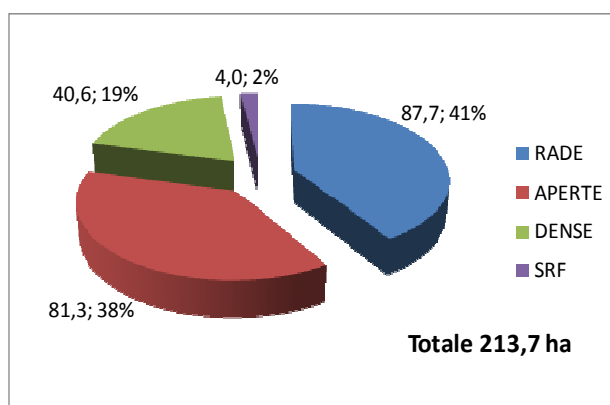


Figura 41. Superficie delle FAR (in ha) e ripartizione percentuale nelle singole tipologie riscontrate

Tabella 11. Stima della superficie e della biomassa totale e media ad ettaro per tipologia di FAR

Tipo di FAR	ha	t/ha	t	% su totale t
RADE	40,6	22,1	897,2	5,1
APERTE	87,7	70,0	6.139,9	35,2
DENSE	81,3	124,9	10.159,8	58,2
SRF	4,0	61,8	248,4	1,4
TOTALE	213,7	81,6	17.445,4	100,0

rilievo erano costituite da polloni di tre anni e con massa legnosa complessiva stimata in circa 62 t ha^{-1} . Le prime due categorie (dense e aperte) sono anche quelle di maggiore interesse per l'analisi svolta in questo studio in quanto rappresentano oltre l'80% della superficie a FAR e il 93% della biomassa stimata. Le specie forestali più rappresentate sono soprattutto cerro (*Quercus cerris*) che costituisce circa il 18% del totale in entrambe le due più importanti categorie e pino domestico (*Pinus pinea*) che va dal 16% al 19%. Ben rappresentato è anche l'olmo (*Ulmus minor*) e l'eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) nelle formazioni rade con una percentuale rispettivamente di 26% e 25%. Seguono molte altre specie tra le quali il platano (*Platanus x occidentalis*), praticamente riferito alle sole alberature stradali (circa il 14%, 12% e 2% rispettivamente nelle formazioni rade, aperte e dense), mentre il pioppo nero (*Populus nigra*) è evidente soprattutto nelle formazioni dense (9%).

Rispetto agli obiettivi dello studio e alla filiera di riferimento, la disponibilità teorica di biomassa ottenibile dalle FAR è risultata molto interessante. Osservando infatti la Figura 42 che stima il fabbisogno annuo teorico di biomassa della centrale termica di 232 kW di potenza in funzione sia della variazione del periodo di utilizzo della caldaia sia del contenuto di umidità della

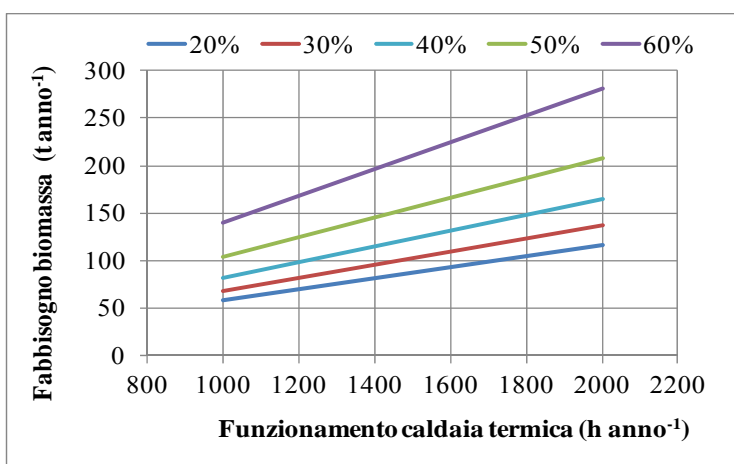


Figura 42. Stima del fabbisogno annuo di biomassa della centrale termica in relazione al periodo di funzionamento e al contenuto di umidità del prodotto (potenza caldaia 232 kW)

biomassa, si evidenzia come per valori di umidità media compresi tra il 30% e 40% (condizioni realistiche di umidità), la biomassa necessaria per il fabbisogno termico risulta di 140-170 t anno⁻¹ se si considera un periodo di funzionamento massimo di 2000 ore l'anno. Questo significa che le potenzialità produttive delle FAR potrebbero costituire un possibile fonte di approvvigionamento integrativo di biomassa per la filiera energetica.

4.2.2. ANALISI ECONOMICA DELLA LOGISTICA DELL'UTILIZZAZIONE DI BIOMASSA

Il modello di valutazione economica è stato costruito, come descritto nella parte metodologia dell'analisi, nell'ipotesi di destinare all'utilizzo energetico la biomassa potenzialmente ottenibile dalle FAR, in riferimento a siti posti in condizioni ambientali di accessibilità e con

pendenza media dell'area al di sotto del 40%, nei quali si è ritenuta possibile l'operazione di esbosco con mezzo meccanico.

I risultati dell'analisi territoriale hanno evidenziato che la condizione di accessibilità è verificata per circa il 99% dell'intera superficie a FAR e solo l'1%, cioè circa 2 ha, è risultato non accessibile.

Il modello economico, sviluppato secondo la metodologia descritta, è stato impostato per stimare il costo complessivo di produzione del cippato franco centrale termica del CRA-ING. Nella Tabella 12 sono riportati i principali elementi e coefficienti tecnici ed economici delle macchine ed attrezzature e i relativi costi di esercizio di riferimento per lo sviluppo dell'analisi economica. Il costo della manodopera, riferito ad un operatore specializzato, è stato considerato unico per tutti i casi in esame e pari a 15 € h⁻¹, oneri sociali, previdenziali ed assistenziali compresi.

Le Tabelle 12 e 13 riportano rispettivamente l'ipotesi di composizione dei cantieri di lavoro, rispettivamente in relazione all'abbattimento e alla raccolta e all'esbosco, trasporto e cippatura della biomassa.

Tabella .12. Ipotesi di cantieri di utilizzazione, di produttività e di costi in relazione alle specifiche condizioni delle FAR

Operazione	Cantiere	Produttività	Costo	
		t h ⁻¹	€ h ⁻¹	€ t ⁻¹
Abbattimento / allestimento / accatastamento	1 motosega + 1 operatore (< 2 t)	0,7	20,00	28,57
	1 motosega + 2 operatori (2-5 t)	1,3	35,00	26,92
	2 motoseghe + 2 operatori (> 5 t)	1,5	40,00	26,67
Raccolta SRF	1 Falcitrinciacaricatrice + GBE1 + 1 operatore	40,0	225,00	5,63
	2 Trattori + 2 rimorchi. (25m ³) + 2 operatori	40,0	115,00	2,88
Carico/scarico	1 Camion + gru + 1 operatore(< 2 t)	15,0	45,00	3,00
	1 Camion + gru + 1 operatore(2-5 t)	16,0		2,81
	1 Camion + gru + 1 operatore (> 5 t)	17,0		2,65
Cippatura alla centrale	1 cippatrice + gru + 1 operatore	29,0	133,00	4,59

Tabella 13. Composizione del cantiere e relativi dati tecnici ed economici dell'operazione di esbosco e trasporto su strada della biomassa

Operazione	Composizione cantiere	Produttività	Costo		Tempo	Viaggi
		t h ⁻¹	€ h ⁻¹	€ km ⁻¹ t ⁻¹	h km ⁻¹	N.
Esbosco	1 operatore + 1 camion + gru (> 2 t)*	17,5	45	2,57	0,20	1,0
	1 operatore + 1 camion + gru (2-5 t)*					1-2
	1 operatore + 1 camion + gru (> 5 t) *					>2
Trasporto su strada	1 operatore + 1 camion + gru (> 2 t)	175	45	0,257	0,02	1,0
	1 operatore + 1 camion + gru (2-5 t)					1-2
	1 operatore + 1 camion + gru (> 5 t)					>2

**In casi di particolare difficoltà di esbosco si prevede l'impiego di un trattore con rimorchio in sostituzione del camion (stesso costo orario).*

L'elaborazione economica del modello basato sull'impiego del tool “*cost distance*” di ArcGis ha portato alla realizzazione di carte tematiche dei costi di utilizzazione spazializzati per classi su tutta l'area esaminata. La Figura 43 rappresenta il quadro d'unione dell'area in scala 1:50000 con distinzione, mediante gradazione di colore, di sei classi di costo per l'utilizzazione delle FAR (la prima rappresenta le formazioni non accessibili), calcolato dapprima per tutte le celle e successivamente rapportato all'unità di prodotto (euro t⁻¹). Oltre al quadro d'unione sono state elaborate quattro carte in scala 1:25000 riferite ai quattro quadranti in cui è stata ripartita l'area (NE; NW; SE; SW). La Figura 44 mostra i risultati relativi al quadrante NW nel quale ricade il centro della filiera energetica di riferimento del CRA-ING.

La Figura 45 riporta, in sintesi, l'incidenza percentuale dei costi delle singole operazioni di utilizzazione per ogni tipologia di FAR. Si evidenzia chiaramente, come prevedibile, che il peso maggiore sui costi complessivi è da imputare all'operazione iniziale di raccolta della biomassa (abbattimento, allestimento e affastellamento) e subito dopo dal trasporto della stessa. Fa eccezione la SRF dove la raccolta è condotta in modo altamente meccanizzato ed è meno onerosa dell'eventuale acquisto delle piantagioni in piedi. Per la SRF, essendo la raccolta e la cippatura un'operazione unica, il relativo costo è stato interamente inglobato nella voce abbattimento/allestimento, mentre l'esbosco/trasporto include il costo dei due trattori considerati nel cantiere.

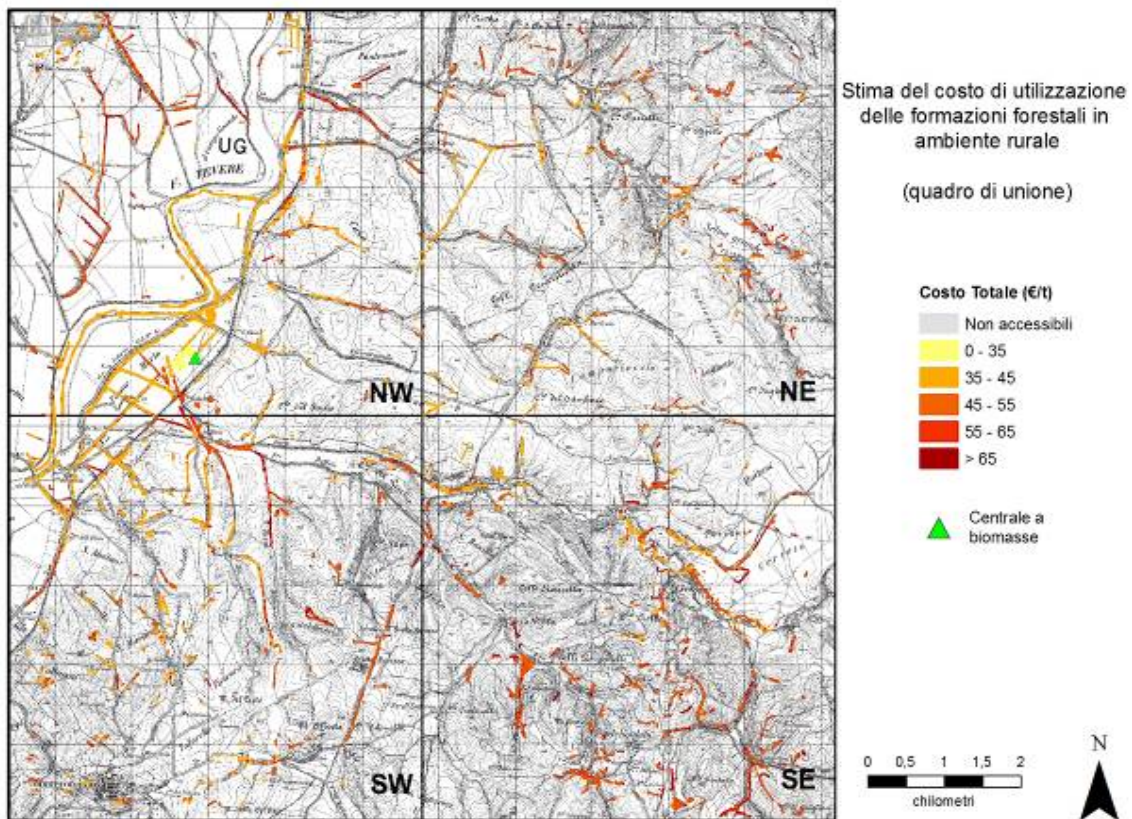


Figura 43. Quadro d'unione della mappa dei costi di utilizzazione delle FAR, distinti in sei classi di valori

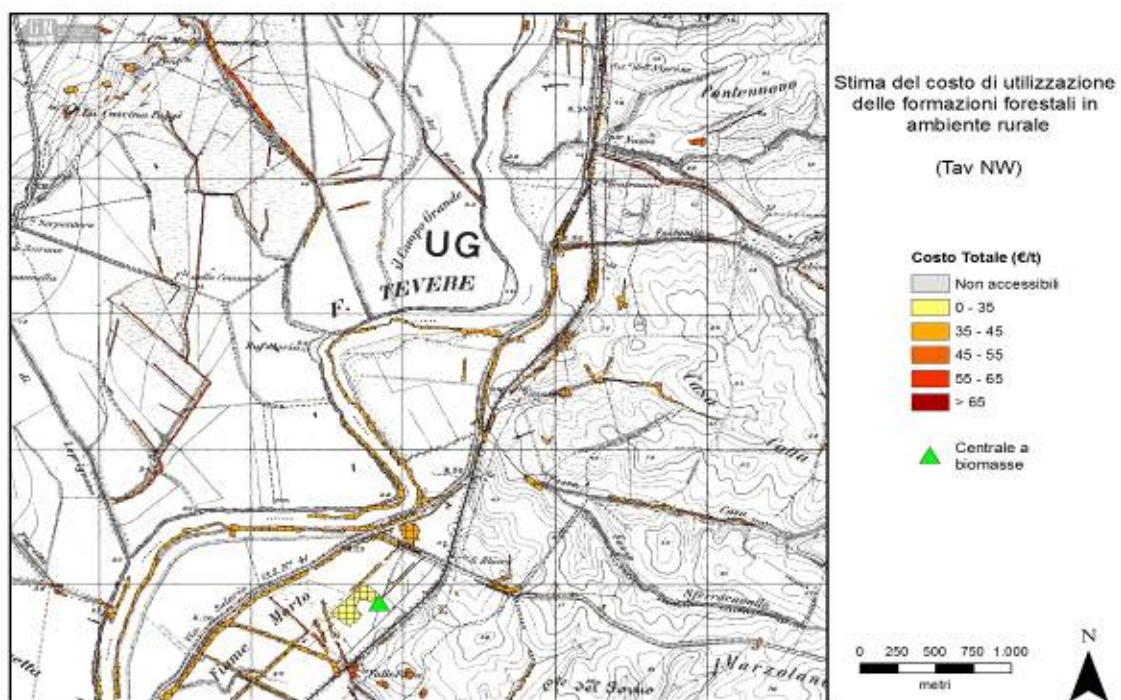


Figura 44. Sezione territoriale (riquadro NW) della localizzazione delle classi del costo di utilizzazione delle FAR con indicazione del centro di filiera

L'incidenza maggiore del costo per il trasporto/esbosco è rilevabile per la tipologia delle FAR rade. La scarsa presenza di biomassa per unità di superficie rende più inefficiente questa operazione poiché il modello di calcolo considera necessario un viaggio anche quando il camion non raggiunge il pieno carico. Infatti, per le rade, la media di biomassa per cella è poco più di 1 t rispetto alle 3,6 e 6,2 t delle FAR aperte e dense.

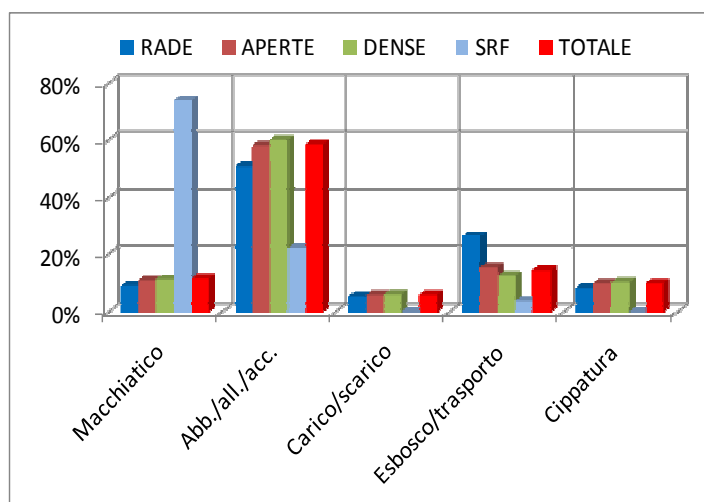


Figura 45. Incidenza percentuale dei voci del costo di utilizzazione per le diverse tipologie di FAR

I costi medi unitari riportati in Figura 46 risultano crescenti in modo inversamente proporzionali alla consistenza della biomassa per cella, per cui risultano mediamente più alti per le FAR rade e progressivamente più contenuti per le aperte, dense e SRF.

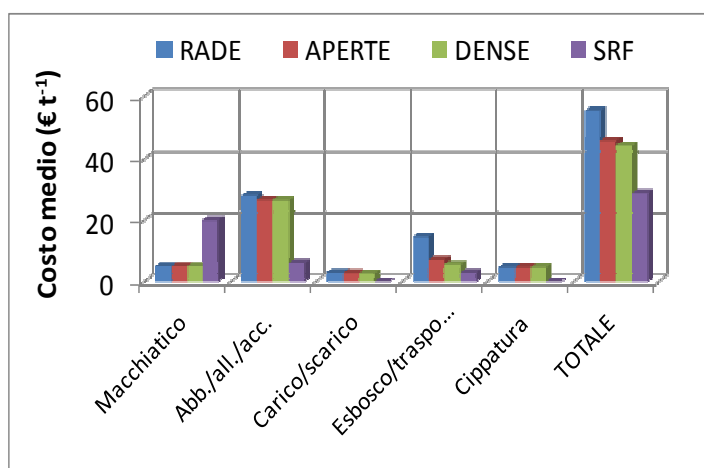


Figura 46.. Costi medi di utilizzazione ripartiti per singole operazioni e per tipologia di FAR

In riferimento all'estrapolazione dei dati per unità di superficie di Figura 47, si evidenzia come, fatta eccezione per le SRF che conservano la loro peculiarità, le altre FAR presentino costi estrapolati ad ettaro con andamento inverso rispetto ai costi per tonnellata, crescendo all'aumentare della biomassa per unità di superficie. E' determinante in questo caso la notevole differenza

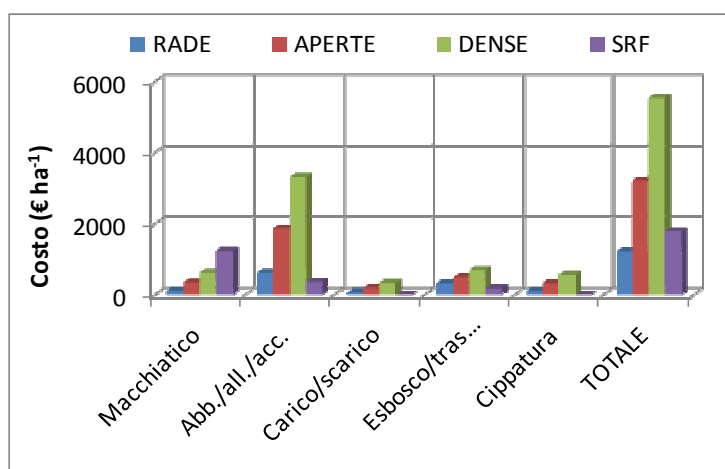


Figura 47. Analisi del costo ad ettaro in relazione alle singole operazioni e alla tipologia di FAR

quantitativa media di biomassa per unità di superficie delle diverse FAR. Nella Figura 48 sono rappresentati in sintesi i risultati medi ottenuti dal modello di spazializzazione dei costi con ripartizione percentuale delle FAR all'interno delle diverse classi di costo esaminate.

Circa il 90% della superficie totale delle FAR è associato a costi di utilizzazione inferiori 55 € t⁻¹, di questi, un consistente 50% è a meno di 45 € t⁻¹, mentre il restante 40% presenta costi compresi tra 45 € t⁻¹ e 55 € t⁻¹. Tale risultato, se posto a confronto con l'attuale andamento dei prezzi di mercato della biomassa portata a destinazione, dimostra come una soddisfacente sostenibilità economica possa essere realizzata solo per metà delle superfici coperte da FAR. In un contesto più ampio di filiera energetica, dove la trasformazione in energia termica e/o elettrica

valorizzerebbe maggiormente la biomassa utilizzata, anche l'altro 41% potrebbe essere considerato economicamente sostenibile. Le formazioni "rade" sono quelle associate ai costi più alti con oltre il 32% della superficie al di sopra di 55 € t⁻¹ con massimi anche estremamente elevati e tali da rendere tale tipologia la meno sostenibile dal punto di vista economico.

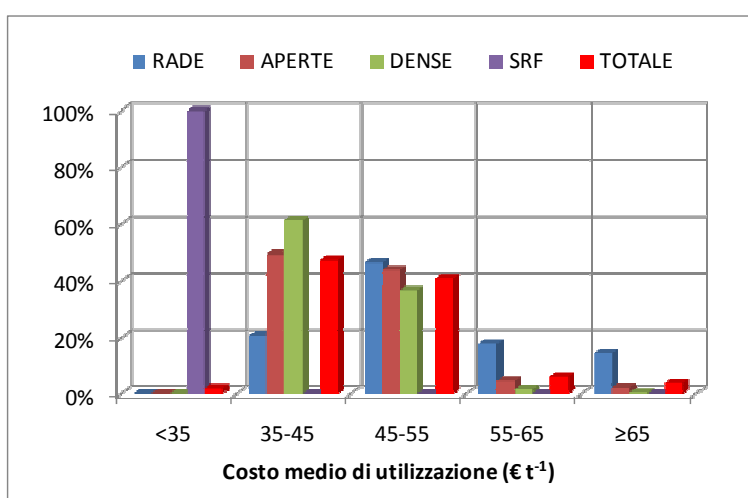


Figura 48. Ripartizione percentuale della superficie FAR in relazione alle classi di costo di utilizzazione (compreso prezzo di macchiatico e cippatura)

4.3. CASO STUDIO III. ANALISI DELLA LOGISTICA DELLA RACCOLTA DELLA SRF

Il terzo esempio applicativo è riferito all'analisi tecnica ed economica della raccolta di piantagioni di pioppo da biomasse. L'analisi è stata focalizzata sullo studio dell'ottimizzazione delle prestazioni e dei costi dell'operazione di raccolta condotta con una macchina falciatrinciacaricatrice. Lo studio ha posto a confronto le prestazioni produttive (tempi di lavoro, produttività) ed economiche (costo per unità di prodotto e di superficie) di tre tipologie di cantieri di raccolta (distinte per una diversa capacità di carico dei carri), impiegate nella raccolta di una piantagione caratterizzata come R2S2 (radice di 2 anni e fusto di 2 anni) L'analisi statistica dei tempi di lavoro è stata condotta secondo due approcci: il primo più tradizionale basato su regressioni lineari multiple OLS (Old linear Squares), mentre il secondo è rappresentato da un metodo analitico innovativo basato su regressioni multivariate PLS (Partial Least Squares).

4.3.1. RISULTATI TECNICI

La distanza media di raccolta per carico è risultata di 1254 m (intervallo tra 480 m 2552 m), con carico medio di 5,32 t. Il tempo medio lordo a viaggio è risultato di 11,67 minuti, con una produttività media lorda di 28,16 t h⁻¹.

Il carico medio trasportato con carri da 13 m³, 16 m³ e 25 m³, è stato rispettivamente di 3,66, 4,74 e 7.37 t. La ripartizione percentuale del tempo lordo osservato distinto nelle singole fasi è riportata nella Figura 49, che mostra come il tempo netto di raccolta (composto da raccolta e voltate) è stato elevato rappresentando l'89,95% del totale (75,22% la sola raccolta), mentre i tempi improduttivi sono risultati pari

all'8,61% e tempi di attesa l'1,44%. La velocità operativa della macchina è stata di 6,43 ± 1,28 km h⁻¹.

La modellizzazione dei dati sperimentali sui tempi, adottando l'approccio della regressione lineare multipla (metodo OLS) esprime la predizione del tempo lordo in funzione del carico e della distanza di raccolta tramite la seguente equazione:

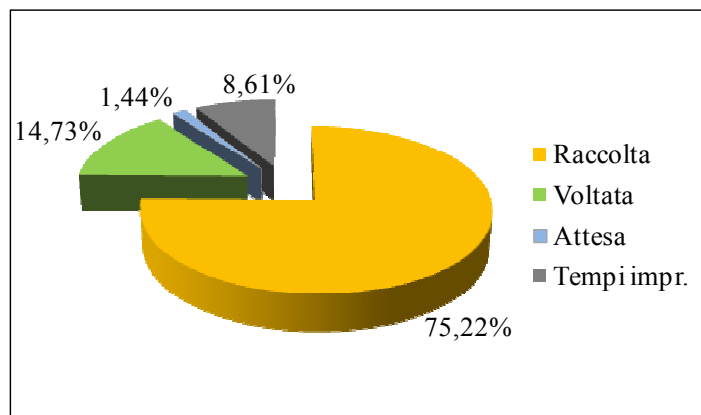


Figura 49. Ripartizione percentuale del tempo lordo di raccolta nelle singole fasi

$$T = 0.48 + 0.0043x_1 + 1.077x_2 \quad (15)$$

dove T è il tempo lordo per singolo carico e x_1 e x_2 rispettivamente la distanza raccolta e carico trasportato. L'analisi della varianza (ANOVA) ha evidenziato un valore di P inferiore a 0,0001.

La Tabella 14 mostra i principali indicatori per i due modelli OLS e PLS. La rappresentazione grafica della predizione del tempo lordo per singolo carico con i due approcci analitici è riportato in Figura 50.

Tabella 14. Indicatori statistici relativi ai due modelli di analisi per la piantagione R2S2

Dataset	R2F2	
	OLS	PLS
Regression analysis		
Observations (n)	49	49
X Variables (n)	2	5
Latent Vectors (n)	-	3
% Cumulated Variance X-block	-	99.25
% Cumulated Variance Y-block	-	85.97
RMSEC	-	1.50
RMSECV	-	1.69
r	0.919	0.927
r ²	0.844	0.859
RMSE	1.60	1.52
SEP	1.60	1.52
RPD	2.53	2.67

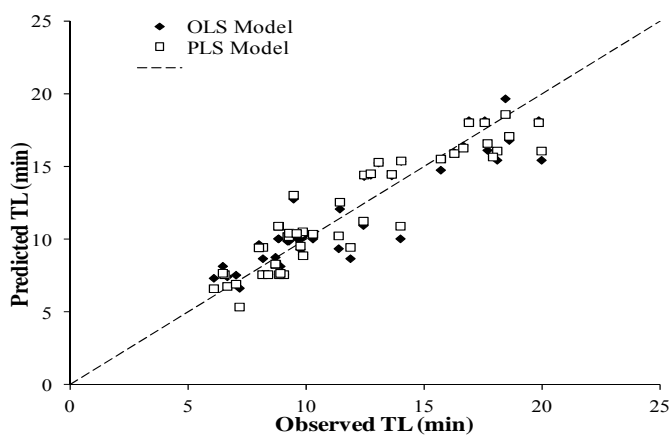


Figura 50. Valori osservati di tempo lordo (TL) rispetto ai valori di predizione dei due modelli OLS e PLS

Gli indicatori di errore del modello, SEP (standard error of prevision) e RMSE (root mean square error), riportati in tabella, sono inferiore del 5-6% nel modello PLS rispetto all'OLS. Inoltre, il valore di r (correlation coefficient) è maggiore per il modello PLS, con un incremento dello 0,8% rispetto al modello OLS. L'indicatore RPD (ratio of percentage deviation) è maggiore per il modello PLS e questo sta ad indicare che la predizione con PLS permette il potenziamento sistematico dei modelli di regressione ordinaria. I modelli sono entrambi considerati buoni ma un ampliamento del numero di osservazioni potrebbe determinare sicuramente il raggiungimento di valori più alti di RPD. Con questi indicatori, il modello PLS risulta più performante rispetto al modello OLS, come dimostrato anche da Costa et al. (2012).

Tabella 15 mostra il contributo relativo (peso) delle singole variabili X per ciascuno dei vettori latenti nel modello PLS.

Tabella 15. Modello PLS: Pesi delle variabili X per ciascun dei vettori latenti (LVs)

Variables	LV1	LV2	LV3
Distance	0.50	-0.19	-0.39
Load	0.46	0.41	-0.09
Production	-0.26	0.80	-0.55
N plants	0.50	-0.19	-0.39
Power	0.47	0.34	0.62

Tutte le variabili, contribuiscono fortemente al vettore latente $LV1$, fatta eccezione per la variabile produzione che, invece, da il suo massimo contributo al vettore $LV2$ e $LV3$. La potenza del trattore contribuisce sempre ma con maggiore decisione al vettore $LV3$.

La figura 51 mostra i risultati tecnici relativi alla predizione del tempo lordo (parte A) e della produttività (parte B) per ogni ipotesi di cantiere secondo i modelli OLS e PLS.

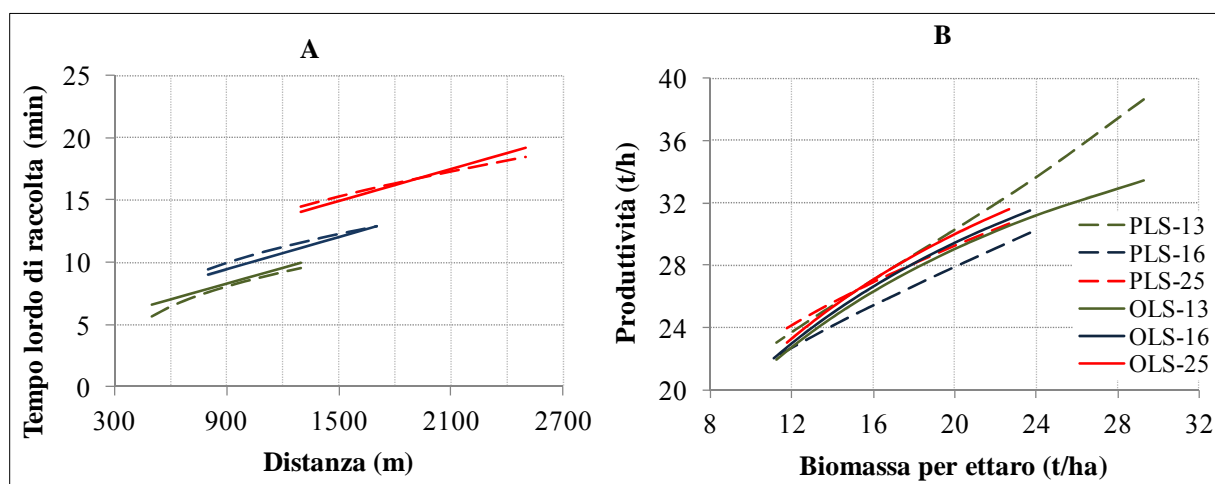


Fig. 51. Predizione del tempo lordo (A) e della produttività di raccolta (B) con i modelli OLS e PLS per i tre cantieri in relazione alla distanza (A) e alla resa per ettaro della piantagione (B)

In particolare, la predizione dei tempi lordi è riferita alla distanza percorsa per singolo carico, mentre la produttività è espressa alle rese produttive per ettaro della piantagione. Si evidenzia come tutte le curve presentino andamento crescente all'aumentare della variabile dipendente, ma solo per l'ipotesi 1 (capacità di carico maggiore) le curve si sovrappongono. In linea generale, nel modello PLS le tendenze sono meno lineari rispetto all'OLS. Con capacità di carico inferiore (ipotesi 3) il modello OLS sovrastimare il tempo lordo di raccolta rispetto al PLS, al contrario, il valore viene sottostimato per capacità di carico medie (ipotesi 2). Queste tendenze riflette e amplifica i valori stimati della produttività. In particolare, si verifica una marcata divergenza tra i due modelli soprattutto in riferimento a capacità di carico inferiore (ipotesi 3) all'aumentare della produzione di biomassa per ettaro.

La produttività della macchina risulta abbastanza elevata e variabile da un minimo di 22 t h⁻¹ ad un massimo di 39 t h⁻¹. La differenza nella stima della produttività lorda tra i due modelli è poco più del 6% per capacità di carico alta o media, mentre arriva ad oltre il 13% per il cantiere a bassa capacità di carico.

4.3.2. RISULTATI ECONOMICI

I risultati economici relativi alla stima dei costi in riferimento ai due modelli OLS e PLS sono riportati in Figura 52. In particolare nel grafico A sono rappresentate le curve del costo di raccolta a tonnellata in funzione della biomassa per ettaro, mentre, nel grafico B, quelli riferiti ad ettaro.

L'andamento delle curve, rispetto alla variazione della biomassa per ettaro, è decrescente per il costo a tonnellata e crescente per il costo ad ettaro. A parità di produzione per ettaro della piantagione, sia i costi a tonnellata sia quelli ad ettaro aumentano all'aumentare della capacità

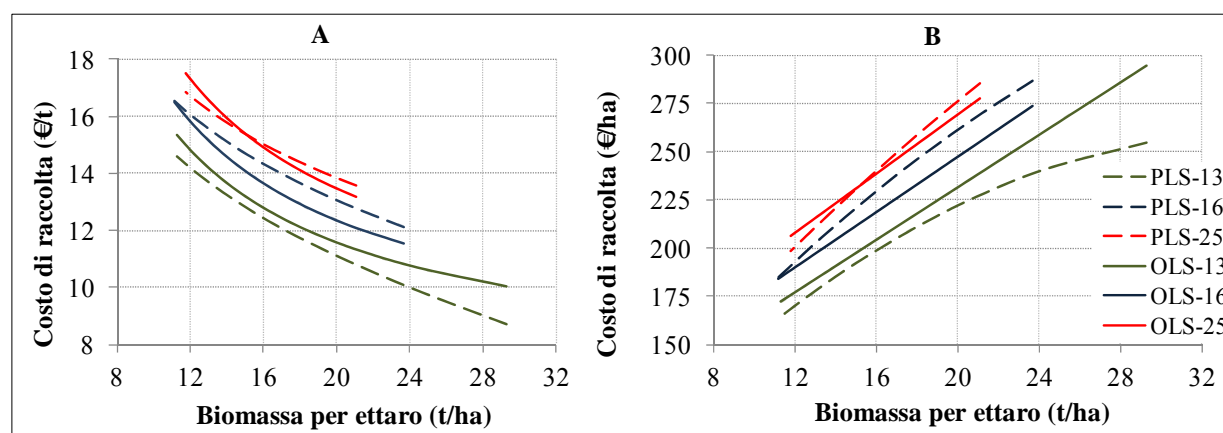


Fig. 52. Confronto dei risultati dell'approccio OLS e PLS sulla stima del costo di raccolta per tonnellata (A) e per ettaro (B) in funzione della resa della piantagione

di carico. Relativamente ai costi a tonnellata, il modello OLS sovrastima rispetto al PLS per i carichi più bassi, sottostima per quelli intermedi, mentre i carichi maggiori i valori sono prima maggiori e poi inferiori e le due curve si intersecano. In entrambi i casi di costo, a tonnellata e ad ettaro, il cantiere che utilizza carri a minore capacità di carico minimizza i costi e massimizza i vantaggi logistici.

La figura 53 rappresenta le differenze percentuali nella stima dei costi tra i due modelli statistici in riferimento alle diverse capacità di carico dei carri e in funzione della biomassa per ettaro. È possibile osservare che per capacità di carico inferiore (13 m^3), il modello OLS tende sempre a sovrastimare rispetto al PLS, e la differenza varia dal 4% al 16%. Con il carico intermedio (16 m^3), avviene il contrario (dal -0,3% al -4%). Con capacità di carico maggiori (25 m^3) si passa dal 4% a -2,9%.

Da un punto di vista economico gli scenari elaborati utilizzando il modello PLS conducono ad una stima del costo di raccolta per tonnellata variabile tra 8,69-14,59 €, 12,10-16,56 € e 13,18-16,31 € in riferimento a un crescente capacità di carico dei rimorchi utilizzati nei tre cantieri (13 m^3 , 16 m^3 e 25 m^3). La stima dei relativi costi per ettaro è variata tra i 164-254 €, 185-287 e 199-299 €. La differenza massima nella stima del costo per ettaro conseguente all'applicazione dell'approccio PLS rispetto all'OLS, è risultata di 40 €.

I risultati ottenuti rimangono validi in riferimento alle condizioni sperimentali, nelle quali la diversa capacità di carico dei carri raccolta non ha inciso sul tempo di attesa della macchina raccogliitrice poiché la distanza dal piazzale di scarico del cippato era estremamente ridotta. In condizioni diverse, cioè per distanze di scarico più elevate, il cantiere con carri a maggiore capacità di carico potrebbe

meglio ottimizzare il tempo operativo di raccolta, mentre, negli altri due cantieri si potrebbe verificare un aumento dei tempi di attesa.

L'adozione del metodo PLS, già da tempo applicata in altri contesti (dal food, alla chemiometria, alla zoologia), ha portato a notevoli vantaggi previsionali

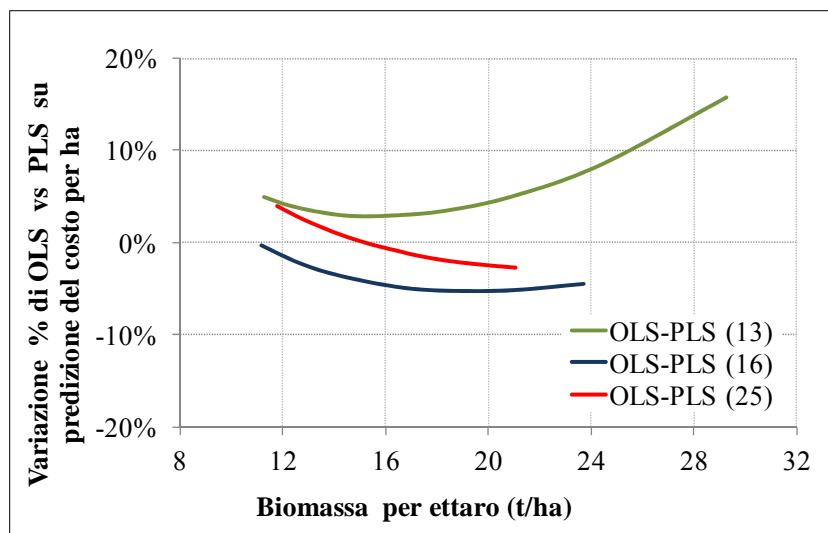


Figura 53. Variazione percentuale nella predizione del costo di raccolta per ettaro tra il metodo PLS e PLS

consentendo una più accurata (e con un minore errore) stima dei tempi di raccolta. Tali sistemi analitici, innovativi in campo forestale, visti questi primi promettenti risultati, potranno trovare ampio spazio d'impiego in future applicazioni.

4.4. CASO STUDIO IV. ANALISI DELLA SOSTENIBILITA' ECONOMICA DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA DA BIOMASSA LEGNOSA

Lo studio ha riguardato l'analisi della sostenibilità tecnica ed economica di una filiera energetica aziendale, costituita all'interno del CRA-ING, basata sull'impiego di biomassa per l'alimentazione di un sistema di riscaldamento di un edificio aziendale (uffici). L'obiettivo è stato quello di comparare questo sistema di riscaldamento a biomassa con quello tradizionale a gasolio al fine di evidenziare le differenze e la sostenibilità economica rappresentata del sistema che, durante l'intero ciclo di vita dell'investimento, riesce a minimizzare tutti i costi connessi. L'approccio di valutazione seguito è quello del LCCA (Life Cycle Cost Analysis) applicato pertanto al caso specifico di produzione di calore secondo due sistemi di riscaldamento:

- il sistema a biomassa prodotta all'interno della microfiliera;
- il sistema tradizionale a gasolio.

Il confronto tra i due sistemi è effettuato in considerazione dell'intero ciclo di vita (durata tecnica) delle centrali termiche che nel caso in esame è stato considerato pari a 10 anni. L'analisi LCCA prevede di esaminare tutti i costi realizzati e previsti nel periodo. Nel sistema di riscaldamento a biomassa si comprendono anche i costi riguardanti il ciclo di vita delle piantagioni energetiche SRF adibite alla produzione di biomassa aziendale. Si considerano, cioè, i costi iniziali d'investimento del sistema (acquisto centrale, progettazione, posa in opera), manutenzioni ordinarie e straordinarie, costi del combustibile, costi finali di smaltimento, recupero, costi d'impianto e di gestione delle SRF (o costo del cippato franco centrale se proveniente dall'esterno dell'azienda).

La costruzione del modello della sostenibilità economica, è stato impostato seguendo due livelli di analisi:

- il primo a monte della filiera e relativo alla verifica delle esigenze e delle potenzialità produttive delle piantagioni dedicate correlate al reale fabbisogno di biomassa della filiera, con sviluppo di analisi degli aspetti tecnici ed economici relativi alla costituzione e alla gestione delle piantagioni SRF, avvalendosi anche dei risultati ottenuti dai precedenti casi studio;
- il secondo relativo al processo di trasformazione energetica, con l'analisi dei dati correlati alla centrale termica e al suo funzionamento (installazione, manutenzione, gestione e periodo di funzionamento per la produzione di calore).

Il modello di valutazione della sostenibilità della filiera è stato realizzato facendo riferimento ad un ciclo di vita della centrale termica e delle piantagioni energetiche SRF pari a 10 anni secondo lo schema di Figura 36 di “Materiali e Metodi”.

La sostenibilità finale è stata valutata secondo il criterio del minimo costo di produzione dell’unità di energia termica (in GJ) ottenuta dai due sistemi in relazione alla domanda di energia termica richiesta per riscaldare l’edificio del CRA-ING. Il periodo medio annuale di funzionamento dell’impianto è stato considerato di 1.500 ore, con una produzione utile di energia termica complessiva di 1,004.40 GJ all’anno. Nelle Tabelle 9, 10 e 11, già mostrate in “Materiali e Metodi”, sono stati riportati gli elementi tecnici ed economici utilizzati per la comparazione dei due sistemi di riscaldamento. Nella Tabella 16, viene riportato, per l’intero periodo considerato di 10 anni, il flusso dei costi medi annuali utilizzati nel calcolo per i due sistemi di riscaldamento, cippato di legno (C) e gasolio (D). I dati sono stati trattati utilizzando il metodo finanziario di attualizzazione di valori futuri (*NPV*, Net Present Value), secondo l’approccio di analisi a prezzi costanti,

Tabella 16. Flusso dei costi medi annui stimati per i due sistemi di riscaldamento a cippato e a gasolio

Anni	Sistema a Cippato (C)	Sistema a Gasolio (D)
	k€	k€
0	97,06	16,90
1	13,07	40,12
2	13,07	40,12
3	13,07	40,12
4	13,07	40,12
5	13,07	40,12
6	13,07	40,12
7	13,07	40,12
8	14,13	40,12
9	11,43	40,12
10	5,35	40,12

calcolando per entrambi i sistemi il valore attualizzato dei costi (*PVC*, Present Value of Costs) e il costo equivalente annuale (*EAC*, Equivalent Annual Cost), applicando le equazioni (11) e (12) riportate in “Materiali e Metodi”.

All’anno 0, è riportato il costo iniziale dell’investimento, che comprende l’acquisto, la progettazione e la posa in opera, l’installazione ed il collaudo delle

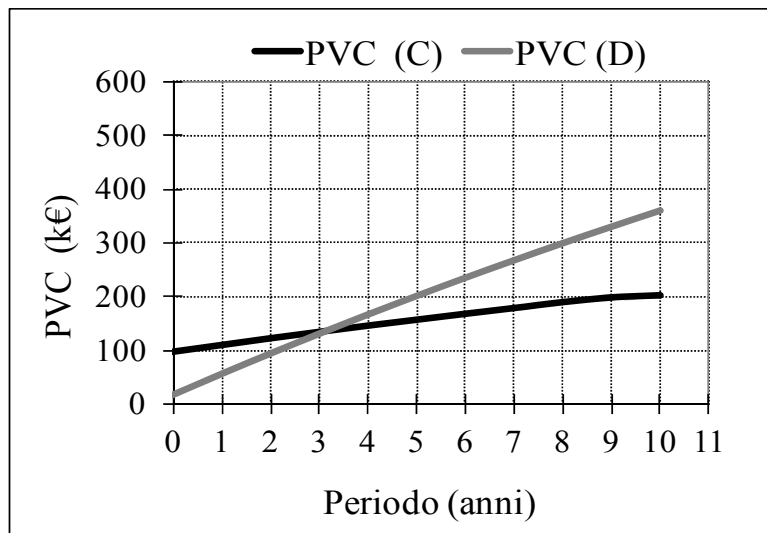


Figura 54. Valore attuale del flusso dei costi (PVC) per i due sistemi di riscaldamento: Cippato (C) e Gasolio (D), durante il periodo considerato

due centrali termiche. Per una giusta comparazione anche in termini di energia termica prodotta, la centrale a gasolio è stata considerata dimensionata in considerazione di una potenza termica resa simile a quella della centrale a cippato.

I risultati delle elaborazioni finanziarie sono riportati nelle Figure 54, 55, 56 e 57.

La Figura 54 mostra la variazione dell'indicatore *PVC* durante il periodo considerato per i due sistemi di riscaldamento posti a confronto (C e D).

Il valore attualizzato dei costi cumulati, mostra valori inizialmente più elevati per il sistema a cippato, per il quale pesa molto il più alto investimento iniziale per l'acquisto dell'impianto termico e la realizzazione delle piantagioni SRF. Successivamente, con l'aumentare degli anni, si fa sentire maggiormente il costo di gestione annuale della caldaia a gasolio più elevato rispetto al cippato. Nel grafico si evidenzia come, già a partire dal quarto anno, il sistema C

presenta una somma dei costi attualizzati più bassa rispetto a D ed il divario cresce con l'aumentare degli anni. Considerando l'intero periodo di 10 anni, il valore calcolato del *PVC* diventa pari a 202.388 euro per C contro 359.091 euro per D, con un

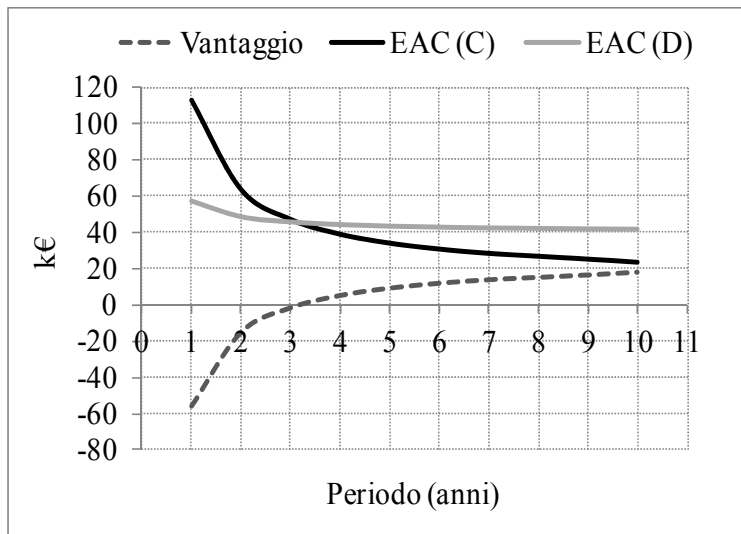


Figura 55. Costo annuo equivalente (EAC) per i due sistemi (C e D) nel periodo considerato e vantaggio economico del sistema C rispetto a D

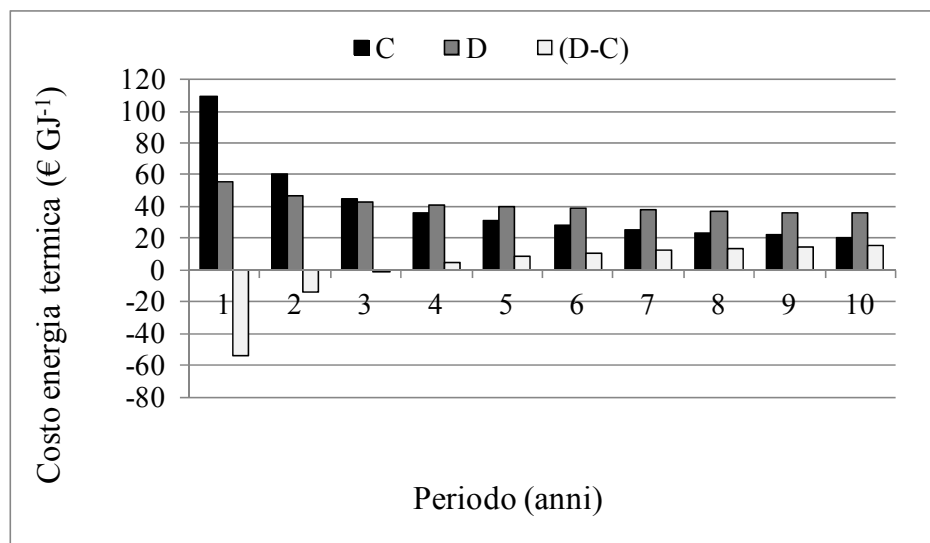


Figura 56. Variazione del costo unitario di produzione di energia termica nei due sistemi di riscaldamento C e D e relativo differenza di valori (D - C)

risparmio economico per il primo sistema stimato in 156.703 euro.

La Figura 55, che esamina l'andamento dell'indicatore *EAC* per i due sistemi e la relativa differenza per evidenziare il vantaggio economico realizzato dal sistema C su D, evidenzia ancor meglio questo risultato.

Alla fine del periodo, il valore calcolato per l'*EAC* nei due sistemi C e D è rispettivamente di 23.726 e 42.096 euro, con un risparmio medio annuale, per C rispetto a D, di 18.370 euro.

In Figura 56 è riportato il risultato del confronto tra i due sistemi in relazione al costo per unità di energia termica prodotta.

Il grafico evidenzia come, nell'arco dei 10 anni, il costo di produzione dell'unità di energia termica per il sistema a cippato inizia con valori molto alti dall'inizio dell'investimento per poi decrescere rapidamente fino a raggiungere il valore medio di 20,15 euro GJ^{-1} , mentre nel sistema a gasolio la diminuzione è molto meno accentuata per arrivare nei 10 anni ad un costo medio di 35,75 euro GJ^{-1} . Il vantaggio del sistema a cippato rispetto a quello a gasolio è risultato quindi di 15,60 euro GJ^{-1} .

Nella Figura 57 sono riportati i risultati di un'analisi di sensitività dei due sistemi ad una variazione del costo del combustibile. Nel caso del gasolio, la variazione percentuale è applicata rispetto al prezzo del gasolio considerato inizialmente nella valutazione (Tabella 11 in "Materiali e Metodi"). Per quanto riguarda il cippato, invece, tenuto conto che la sua produzione è aziendale ed

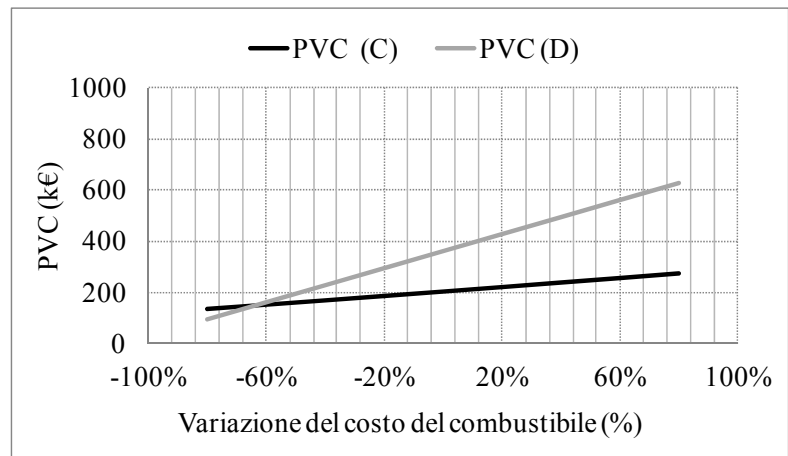


Figura 57. Analisi di sensitività relativa del valore PVC dei due sistemi in funzione della variazione percentuale del prezzo del Gasolio (D) e del costo di produzione del Cippato (C)

è ottenuta tramite la gestione delle piantagioni SRF, la variazione percentuale è stata applicata ai costi di tutte le operazioni concorrenti alla formazione del costo di produzione del cippato stesso. Il risultato dell'analisi sottolinea come, nel periodo di 10 anni, il sistema di riscaldamento a gasolio sia economicamente più vantaggioso solo quando la riduzione del suo prezzo di mercato sia superiore al 60% rispetto al valore di riferimento (1,49 euro kg^{-1}), cioè quando il prezzo assume un valore di 0,60 euro kg^{-1} .

Da un punto di vista economico, l'analisi condotta sottolinea la sostenibilità della filiera nell'utilizzo della biomassa per produrre energia termica, rispetto all'impiego di una fonte energetica non rinnovabile quale in gasolio. In relazione al contesto esaminato e al periodo considerato di durata dell'investimento, il sistema di riscaldamento a biomassa presenta vantaggi economici rispetto al sistema a gasolio che si traducono mediamente in una riduzione di costo di 56,17 euro per MWh di energia termica in relazione ad una erogazione media annuale per il riscaldamento dell'edificio di 279 MWh.

Con la Figura 58 si è voluto evidenziare la relazione del sistema filiera con la base produttiva della biomassa in riferimento alle piantagioni SRF. Il grafico pone a confronto la variazione del vantaggio economico ottenibile dal sistema di riscaldamento a biomassa rispetto a quello a gasolio, in relazione ad una possibile variazione dei livelli produttivi della piantagione dedicata. Il grafico è stato costruito ipotizzando livelli di rese produttive diverse che comporterebbero conseguentemente una variazione della superficie da investire in SRF e del costo d'investimento iniziale.

Nella simulazione esposta nel grafico, una riduzione della produzione a 6 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹, rispetto a quella media considerata (circa 10 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹), cioè con una riduzione del 41%, comporterebbe una conseguente riduzione del vantaggio economico del 43%, in relazione ad un costo di produzione del

cippato aumentato del 70%. Inversamente, un aumento delle rese della SRF verso un valore limite di 16 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹ (aumento del 57%), comporterebbe un incremento di appena il 22% nel vantaggio economico del sistema, in corrispondenza di un costo di produzione del cippato ridotto del 36% rispetto a quello considerato.

L'andamento della curva di costo della produzione del cippato è stata costruita tenendo conto dei costi riportati nella Tabella 9 di "Materiali e Metodi", dove il costo di raccolta della SRF è riferito al sistema di lavoro che prevede il taglio delle piante intere, l'accumulo delle stesse nel luogo di stoccaggio aziendale e la sminuzzatura da effettuarsi in una fase successiva, quando il

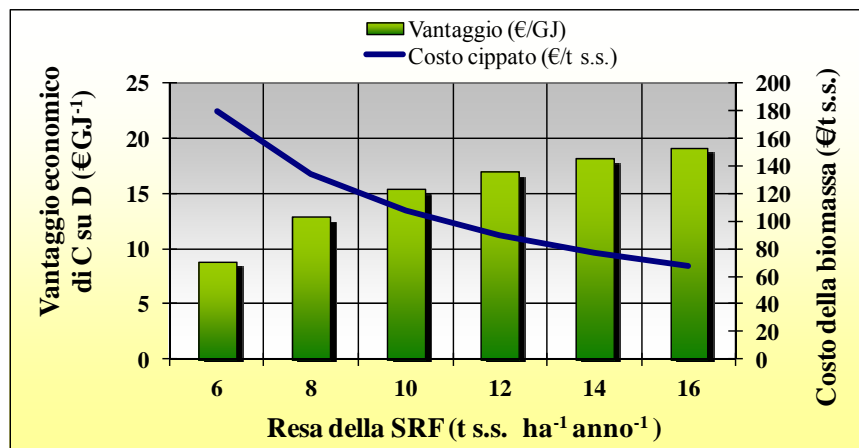


Figura 58. Variazione del vantaggio economico del sistema di riscaldamento a Cippato (C), rispetto al sistema a Gasolio (D), in relazione ad una possibile variazione delle rese produttive della SRF

materiale legnoso è parzialmente disidratato. Volendo considerare, invece, il sistema di raccolta che prevede l'impiego di una falciatrinciacaricatrice, il cui costo è stato analizzato nel "Caso Studio III", allora la riduzione del costo medio di produzione del cippato comporterebbe un aumento del vantaggio economico rispetto al caso considerato anche di oltre il 20%.

I risultati ottenuti nel "Caso Studio II" hanno evidenziato che il costo complessivo calcolato per l'utilizzazione delle FAR presenti nell'area di studio intorno alla centrale termica è risultato per il 90% inferiore a 55 € t⁻¹ di biomassa fresca. Tenuto conto che mediamente il contenuto idrico di queste formazioni è inferiore rispetto al pioppo nelle SRF, e mediamente stimabile in circa il 45% della massa fresca, l'utilizzo di questa biomassa ad integrazione del fabbisogno della microfiliera energetica del CRA-ING, comporterebbe comunque un vantaggio economico assimilabile a quello calcolato in riferimento alla SRF aziendale.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La gestione delle risorse forestali a livello internazionale è un punto chiave nel rapporto tra ambiente e sviluppo. A partire dall'adozione del Protocollo di Kyoto a livello internazionale è cresciuta l'attenzione e l'impegno per una effettiva riduzione delle emissioni di gas per contrastare l'effetto serra che innegabilmente altera gli equilibri bioclimatici del pianeta. Tra le azioni volte a perseguire questo obiettivo, quelle orientate all'aumento della capacità di fissaggio di carbonio attraverso la riforestazione e la buona gestione forestale sono considerate fondamentali (Vande Walle *et al.*, 2007). I negoziati globali attualmente in corso e tesi ad ottenere nuove mitigazioni del cambiamento climatico determineranno nel prossimo futuro la direzione e l'intensità dei cambiamenti a lungo termine per limitare il riscaldamento globale. L'Unione europea, in questo contesto, si è prefissata obiettivi ambiziosi da raggiungere a partire dall'obiettivo 20-20-20 che prevede il raggiungimento entro il 2020 della produzione del 20% di energia da fonti rinnovabili, tra cui le biomasse, della riduzione dei consumi complessivi di energia del 20%, della riduzione unilateralmente del 20% delle emissioni di CO₂ rispetto al 1990 e, infine, della sostituzione del 10% del consumo di carburante con biocarburanti.

Tra le energie rinnovabili le bioenergie ricoprono nel nostro paese un ruolo importante per la produzione di energia termica ed elettrica e secondo un rapporto ENAMA del 2010, rappresentano con il 30% la seconda fonte di energia primaria (Sperandio *et al.*, 2012). Per la produzione di energia elettrica in Italia sono presenti 450 impianti, mentre per la produzione di energia termica si contano 86 impianti di teleriscaldamento (18 dei quali forniscono anche energia elettrica in cogenerazione). La maggior parte dei piccoli teleriscaldamenti e delle caldaie ad uso domestico, stimate in alcuni milioni di unità, sono invece prevalentemente ubicati nel nord Italia e Toscana (Sperandio e Verani, 2012), mentre al sud Italia l'uso di bioenergie su piccola scala è estremamente ridotto.

E' sulla base di queste considerazioni che è stata impostata la tesi con l'obiettivo finale di stimolare, dimostrandone la sostenibilità economica, una maggiore diffusione dell'uso di bioenergie legnose per produzione di energia termica e acqua sanitaria su piccola scala anche nel centro-sud d'Italia. I quattro casi studio considerati esaminano i principali fattori per la costituzione di un modello di filiera legno-energia esportabile, appunto, anche in altre realtà territoriali del nostro Paese. Il modello si basa infatti sul concetto di autoproduzione o di filiera estremamente corta considerando che uno degli aspetti più critici della filiera è il trasporto della biomassa dal luogo di produzione a quello del consumo, dato che con il trasporto si immette

CO₂ nell'atmosfera riducendo fortemente il vantaggio ambientale dell'uso di biomasse. Annualmente nelle 450 centrali esistenti vengono utilizzati 1,8 milioni di tonnellate di legno, di tale quantità 1 milione di tonnellate viene importato: risulta evidente come i vantaggi ambientali derivati dall'impiego di biomasse siano in parte vanificati. La pianificazione e la realizzazione di filiere di piccole dimensioni, come nello studio effettuato, che minimizzano o addirittura azzerano (nel caso di autoconsumo) le distanze di trasporto, risulta uno strumento che massimizza il beneficio ambientale (mitigazione dei cambiamenti climatici con riduzione dell'effetto serra) dell'utilizzo di biomasse legnose.

Dei quattro casi studio esaminati l'ultimo è quello che analizza la sostenibilità economica della microfiliera evidenziando un reale vantaggio economico dell'uso di biomasse rispetto all'uso del gasolio nella produzione di energia termica. Gli altri tre casi approfondiscono aspetti tecnico-economici che in qualche maniera risultano propedeutici all'analisi economica globale.

Dal primo caso studio relativo all'analisi della produzione di biomassa da piantagioni SRF costituite appositamente all'interno dell'azienda del CRA-ING, possono essere tratte le seguenti considerazioni:

- La produttività media ottenuta risulta in linea con le produzioni nazionali, 10,1 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca per il ciclo biennale e 13 t ha⁻¹ anno⁻¹ per il ciclo triennale, nonostante gli *input* energetici forniti alla piantagione siano stati ridotti e le caratteristiche del terreno su cui insistono e le condizioni microclimatiche non siano proprio ottimali per questi tipo di piantagione (terreno prevalentemente argilloso, con scarsa presenza di sostanza organica e deficit idrico per scarse precipitazioni nel periodo estivo).
- Tra i tre cloni impiegati, AF2, AF6, Monviso, il primo ha avuto le migliori performance di accrescimento. I risultati di produzione ottenuti nel ciclo biennale ed in quello triennale sembrano dare un'indicazione positiva per quest'ultimo, considerando anche che, nella raccolta, la falciatrinciacaricatrice non ha avuto problemi. Allungando il turno da 2 a 3 anni si ottiene anche un prodotto con minore percentuale di corteccia e quindi di maggiore valore energetico (Spinelli *et al.*, 2011).
- La tipologia d'impianto deve essere a file singole non solo per i migliori risultati avuti al secondo ciclo, ma anche per i minori costi associati per l'impianto e la manutenzione rispetto alle file binate.

Il secondo caso studio, relativo all'utilizzazione e alla logistica dei trasporti di biomassa da piccole formazioni forestali, definite FAR (formazioni forestali in ambiente rurale), oltre ad avere una valenza conoscitiva per questi tipi di soprassuoli nell'area di studio, che non sono oggetto di rilevazione o censimento ufficiali, propone un modello di rappresentazione ed analisi della disponibilità di biomassa sul territorio che costituisce una fase preliminare indispensabile per la realizzazione di una filiera legno-energia in quanto fornisce una programmazione per l'approvvigionamento di materiale nel caso in cui le piantagioni appositamente costituite non riescano a fornire le produzioni ipotizzate a causa, per esempio, di condizioni meteorologiche avverse (siccità prolungata), oppure di eccessivi attacchi parassitari che riducono le rese produttive previste per le piantagioni dedicate. Di particolare interesse è risultata la definizione del modello di determinazione del costo di utilizzazione e di trasporto impostato su base cartografica e implementato con strumenti GIS, che ha permesso di sviluppare una mappatura dei costi di utilizzazione in relazione alle diverse tipologie di FAR per un'area di studio di 100 km². Il modello sviluppato permette quindi di evidenziare e localizzare sul territorio le potenziali fonti di biomassa, distinte per tipologia (dense, rade, aperte o SRF) con minore incidenza dei costi di utilizzazione e di trasporto della biomassa (minimizzazione dei percorsi) al fine di una valutazione della sostenibilità economica di un loro utilizzo all'interno della filiera. Il modello sviluppato potrebbe trovare applicazione in altri contesti territoriali magari estendendo l'indagine ad aree di studio più ampie, per sviluppare il censimento di fonti di biomassa distribuite sul territorio verificandone la loro predisposizione allo sviluppo di filiere energetiche.

In definitiva, la definizione di una mappa relativa alla localizzazione di futuri potenziali bacini di utenza, piattaforme logistiche della biomassa e impianti di trasformazione energetica, potrebbe favorire la diffusione di modelli di sviluppo virtuosi individuando i siti territoriali più idonei e stimolando di conseguenza anche una possibile maggiore integrazione e collaborazione pubblico/privato sul territorio (comunità montane, comuni, imprese e associazioni forestali, proprietari terrieri).

Il terzo caso studio che ha riguardato l'analisi della logistica della raccolta di piantagioni SRF, risulta di particolare importanza in quanto l'operazione di raccolta, insieme a quella della costituzione della piantagione, risulta la più onerosa. L'impiego di rimorchi con capacità di carico commisurata alle caratteristiche produttive della piantagione permettono una giusta impostazione del cantiere che, riducendo i tempi improduttivi, aumenta la produttività di lavoro e minimizza i costi dell'operazione. Di conseguenza si riducono anche i costi di gestione della

filiera energetica. In ultima analisi con questo studio si è arrivati ad una modellizzazione predittiva dei tempi e dei costi di raccolta, considerando variabili indipendenti che in studi precedenti con applicazione di approcci di analisi più tradizionali non venivano considerate.

L'adozione del metodo PLS, già da tempo applicata in altri contesti scientifici (dal food, alla chemiometria, alla zoologia), è da ritenersi innovativo in questo settore, nel quale è normalmente adottato il metodo OLS. Rispetto all'analisi della regressione lineare multipla l'approccio di analisi multivariata ha portato a notevoli vantaggi previsionali consentendo una più accurata (e con un minore errore) stima dei tempi di raccolta e conseguentemente anche dei costi unitari (per tonnellata e per ettaro). Tali sistemi analitici, che sicuramente risultano innovativi in campo forestale, visti i risultati e la maggiore robustezza del modello di analisi, potranno trovare sicuramente ampio spazio d'impiego in future applicazioni.

I risultati ottenuti con il quarto caso studio hanno dimostrato la sostenibilità economica del modello di microfiliera energetica finalizzata alla produzione di calore. Il confronto è stato effettuato con l'approccio LCCA che, nel caso di studio, si propone di identificare tutti i costi futuri, relativi ad due opzioni di investimento, riportandoli al loro valore presente con l'impiego di tecniche di attualizzazione finanziaria. L'approccio LCCA è da ritenersi innovativo rispetto al contesto esaminato, in quanto applicato ad un caso di studio singolare che individua un modello produttivo di energia termica impostata prevalentemente sul consumo di biomassa da piantagioni di pino dedicate (SRF), oppure da biomassa locale reperibile a minima distanza dal centro di filiera.

I risultati ottenuti dall'analisi economica effettuata sulla microfiliera energetica ne evidenziano la sua sostenibilità. In relazione al contesto esaminato e al periodo considerato di durata dell'investimento (10 anni), il sistema di riscaldamento a cippato presenta vantaggi economici rispetto al sistema a gasolio che si traducono mediamente in una riduzione di costo di 56,17 euro per MWh di energia termica, corrispondente a $15,60 \text{ GJ}^{-1}$, in relazione ad una erogazione media annuale per il riscaldamento dell'edificio di 279 MWh.

La costituzione di filiere energetiche che utilizzino centrali termiche di piccole dimensioni, come quella esaminata, od oggi risulta essere lo strumento più interessante per implementare l'uso di bioenergie, specialmente al centro-sud Italia. Il ridotto consumo annuale permette una programmazione molto più semplice per l'approvvigionamento di materiale rispetto alle grosse centrali elettriche e le loro ridotte dimensioni, con conseguente riduzione di fumi, sono sicuramente accettate meglio dalle comunità locali. Una maggiore distribuzione territoriale di filiere energetiche basate su impianti di trasformazione di piccole dimensioni, a livello di

aziende singole oppure in forma aggregata produce un beneficio all'azienda, all'imprenditore agricolo o al gestore dell'impianto, in quanto vi è partecipazione diretta al valore aggiunto della biomassa prodotta e della sua conversione in energia. Tuttavia, bisogna ricordare che l'utilizzo delle biomasse per produzione energetica non è sempre un processo senza impatto ambientale. Se da un lato la moderna agricoltura ricorre ad energia, macchinari e sostanze chimiche, ciò avviene anche per processi fisici di lavorazione, preparazione e trasformazione biochimica delle biomasse che avvengono prima della conversione energetica. Questo implica che, sebbene si faccia ricorso a materie prime rinnovabili, è necessario valutare i carichi ambientali generati dall'intero ciclo di produzione dell'energia prodotta dalle biomasse per poter esprimere delle valutazioni accurate sui vantaggi ambientali che si possono ottenere. Pertanto, la complessità di implicazioni ecologiche, economiche e di impatto sociale richiedono valutazioni e definizioni più puntuali rispetto alle differenti produzioni di biomasse ed alle tecnologie di processo e di conversione utilizzate.

BIBLIOGRAFIA

Al Afas N., Marrn, N, Van Dougen S., Laureyseus I, Ceulemans R. 2008. Dynamics of biomass production in a poplar culture over three rotation (11 years). *Forest Ecology and Management* 255:1883-1891 –doi 10.1016/j. Foreco 2007.12.010

Anonimo. 1996. Renewable sources of Energy with special emphasis on biomass: progress and polizie. Report of the Secretary-General of the United Nations to the Economic and Social Council. Report EC13/1996/CRP.1

APAT, 2003. Le biomasse legnose. Un indagine sulle potenzialità del settore forestale italiano nell'offerta di fonti di energia. Ed. APAT, Rapporti 30/2003

Baraldi G., Capelli G., 1973. Elementi tecnici per il calcolo del costo di esercizio delle macchine agricole. *Genio Rurale* n. 9:37-76.

Berti S., Piegai F., Verani S. 1989. Manuale d'istruzione per il rilievo dei tempi di lavoro e delle produttività nei lavori forestali. Quaderni dell'Istituto di Assestamento e Tecnologia Forestale. Fascicolo IV. Università degli Studi di Firenze.

Biondi P. 1999. Meccanica agraria. Le Macchine Agricole. Utet, Torino.

Bodansky. 2011. The Copenhagen climate change conference: a post mortem 2010. Available from: <http://www.indiaenvironmentalportal.org.in/files/SSRN-id1553167pdf> [Accessed 27 September 2011]

Bonazzi G. Iotti M, 2007. La valutazione degli investimenti: un approfondimento attraverso l'analisi life cycle cost (lcc) nell'impresa agraria. *Ann. Fac. Medic. Vet. di Parma* (vol. XXVII, 2007) pag. 321 - pag. 344.

Candolo G. 2005. Biomasse vegetali: i possibili processi di conversione energetica. *Agronomia* 4:31-38.

Colorio G., Beni C., Facciotto G., Allegro G., Frison G. 1996. Influenza del tipo di preparazione reimpianto su accrescimento e stato sanitario del pioppeto. *L'informatore Agrario* 22:51-57

Costa C, Sperandio G, Verani S. 2013. Logistics in biomass energy plantation harvesting. *Agricultural Engineering International, CIGR Journal*. (Submitted: febbraio 2013)

COST Action FP-0902. 2012. Good practice guidelines for biomass production studies. Editors: Magagnotti N., Spinelli R. Published by CNR IVALSAs, Sesto Fiorentino (Firenze). 50 pp.

De Jong S. 1993. SIMPLS: an alternative approach to partial least squares regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 18: 251–263.

Di Matteo G., Sperandio G., Verani S. 2012. Field performance of poplar for bioenergy in southern Europe after two coppicing rotations: effects of clone and planting density. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 5: 224-229. SISEF: <http://www.sisef.it/iforest/>.

ENEA. 2010. Rapporto Energia e Ambiente 2009, Roma.

ENEA. 2012. Rapporto Energia e Ambiente. L'analisi 2009-2010.

Facciotto G., Giorcelli A., Vietto L., Allegro G., Castro G., Picco F. 2006. Nuovi cloni di pioppo. *Agricoltura (Emilia Romagna)*, 34 (6): 71-78. 2006;

Facciotto G., Schenone G. 1998. Il pioppo fonte di energia rinnovabile. *Sherwood* 35, 19-26.

FAO. 1992. Cost control in forest harvesting and road construction. *FAO Forestry Paper* 99.

FORFAR, 2011 Formazioni forestali in ambiente rurale (FAR): Conservazione delle risorse e valorizzazione delle funzioni (2011). Progetto finanziato dal CRA, Coord. Dott. Giuseppe Pignatti.

Fuller SK., Petersen SR. 1995. Life-cycle Costing manual for the Federal Energy Management Program. *NIST Handbook* 135:222pp.

Grappoli R. 1999. Siepi, filari e biodiversità nella Valpadana interna: l'esempio di Cremona tra 1980 e 1997. *Monti e Boschi* 2: 19-23.

Guidi W, Piccioni E, Ginanni M, Bonari E. 2008. Bark content estimation in poplar (*Populus deltoites* L.) short-rotation coppice in Central Italy. *Biomass and Bioenergy* 32: 518-524. - doi: 10.1016/j.biombioe.2007.11.012

Hall D.O. 1998. Biomass Energy versus carbon sinks: trees and the kyoto protocol. *Environment* 1: 1-39.

Hall D.O., Scrase ,1998. Will biomass be the environment friendly for the future? *Biomass & Bioenergy* 15: 357-367.

Harrop Galvao R K, Ugulino Araujo M C, Emidio Jose G, Coelho Pontes M J, Cirino Silva E., Bezerra Saldanha T C. 2005. A method for calibration and validation subset partitioning, *Talanta*, 67: 736-740.

Harstela P. 1991. Work study in forestry. *Silva Carelica* 18:1-41.

Hillring, B. 2002. Rural development and bioenergy – experiences from 20 years of development in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 23: 443-451.

Hippoliti G. 1997. Appunti di meccanizzazione forestale. Collana Universitaria. Studio Editoriale Fiorentino, 332 pp.

Iacoponi L., Romiti R. 2001. Economia e politica agraria. *Il Sole 24 ore*. Edagricole.

Juurma M., Polder A. 2011 Energy efficiency aspects in wood production value chain. 10th International Symposium: Topical problems in the field of electrical and power engineering. Parnu, Estonia January 10-15.

Karcha, K., Jouhiaho, A., Mutikainen, A., Mattila S. 2005 Mechanized energy wood harvesting from early thinnings. *International Journal of Forestry Engineering* 16(1):15-26.

- Kennard R.W., Stone L.A. 1969. Computer aided design of experiments. *Technometrics* 11: 137-148.
- Kleinn K. 2002. On large area inventory and assessment of trees outside forests. *Unasyuva* 51:3-10.
- Lazzari M., Mazzetto F. 2005. Economia e calcolo dei costi d'esercizio. *Prontuario di meccanica agraria e meccanizzazione, Parte Prima - Unità 3*. REDA Edizioni: 62-71.
- Marland G., Schlamadinger b. 1997. Forest for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass & Bioenergy* 13: 389-397.
- Menesatti P, Canali E, Sperandio G, Burchi G, Devlin G, Costa C, 2012. Cost and waste comparison of reusable and disposable shipping containers for cut flowers. *Packaging Technology and Science* 25: 203-215. ISSN: 1099-1522
- Mezzalira, G. 1997. Siepi per la produzione di legna da ardere nella pianura veneta. *Sherwood* 21: 13-18.
- Miyata E.S. 1980. Determining fixed and operating costs of logging equipment. North Central Forest Experiment Station. USDA Forest Service. General Technical Report nc-55.
- PAEE, 2011. Piano d'azione italiano per l'efficienza energetica.
- Paletto A., De Natale F., Gasparini P., Morelli S., Tosi V. 2006. L'inventario degli Alberi Fuori Foresta (IAFF) come strumento di analisi del paesaggio e supporto alle scelte di pianificazione territoriale. *Forest@* 3(2):253-266.
- Pettenella D., Serafin S. 1999. La convenienza economica dell'impiego di biomassa a fini energetici in impianti su piccola scala. I filari a ceduo di platano. *Sherwood* 50: 23-28.
- Picchio, R., Sirna, A., Sperandio, G. Spina, R. Verani S. 2012. Mechanized harvesting of eucalypt coppice for biomass production using a high mechanization level. *Croatian Journal of Forestry Engineering* 33(1):15-24.
- Picco F., Giorcelli A., Castro G. 2007. Dichotomous key for the nursery recognition of the main poplar clones grown in the European Union . Volume II Clonal cards CRA-PLF, Research Units for Intensive Wood Production, Casale Monferrato, Italy, pp. 352.
- Puttock, D., Spinelli, R. and B. R, Hartsough. 2005 .Operational trials of cut-to-length harvesting of poplar in a mixed wood stand. *International Journal of Forestry Engineering* 16(1):39-49.
- Rebitzer G., Seuring B. 2003. Methodology and Application of Life Cycle Costing, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, n. 8. State of Alaska - Department of Education & Early Development. Alaska School Facilities Life Cycle Cost Analysis Handbook – 1st Edition.
- Rushing AS, Kneifel J.D., Lippiatt B.C. 2010. Energy price indices and discount factors for life-cycle cost analysis. Nist, u.s. dep. Of commerce technology administration. National institute of standards and technology; 64pp

Ribaudo F. 1977. Il costo di esercizio delle macchine agricole. *Macchine e Motori Agricoli*, n. 101: 101-116.

Schulze ED, Valentini R., Sanz MJ. 2002. The long way from Kyoto to Marrakesh: implication of the Kyoto protocol for global ecology. *Global Change Biology* 8:505-518

Sieglinde KF., Petersen SR. 1996. Life-cycle Costing manual for the Federal Energy Management Program. NIST Handbook 135: 222pp.

Sperandio G., Verani S., Pagano M. 2012. Con la cippatura in campo si abbattano i costi. *Terra e Vita* (53), Speciale Bioenergie, suppl. al N. 29-30:22-24.

Sperandio G., Verani S. 2012. Triturazione delle ceppaie di pioppo: analisi dei tempi e dei costi dell'operazione. *Forest@* 9: 293-300. [online 2012-12-03] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor0707-009>].

Spinelli R., Nati C., Sozzi L., Magagnotti N., Picchi G. 2011. Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. *Fuel* 90: 2198-2202.

Trossero M. 2000. The current wood energy use in Europe. Lavoro presentato alla Conferenza woody biomass as an energy source challenges in Europe. EFI, University of Joensuu, Ita Bionergy, Cost E21, Silva Network. 25-28 Settembre 2000. Joensuu, Finlandia.

Tustin J. 2000. IEA Bioenergy Annual Report 1999: ExCo 2000:01, Rotorua, New Zealand. P. 06.

Vande Walle, I., Van Camp, N., Van de Castele, L., Verheyen, K. and R. Lemeur. 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy* 31:267-275.

Verani S, Sperandio G., Picchio R, Costa C. 2013. Economic and energetic sustainability of a self-consumption wood-energy micro-chain in central Italy. *iForest – Biogeosciences and Forestry* (Submitted: marzo 2013)

Verani S, Pignatti G., Sperandio G., Civitarese V. 2006. Impiego di nuovi cloni di pioppo in cedui a breve rotazione: caratteristiche dendrometriche alla prima stagione vegetativa. *EM-Linea Ecologica*, 38(1): 45-47.

Verani S, Sperandio G. 2008. Pioppeto da biomassa a rotazione biennale. Caratteristiche e produttività dei cloni. *Sherwood* 148: 39-42.

Verani S., Sperandio G., Picchio R., Savelli S., 2009. La raccolta della biomassa forestale. Tecniche, economia e sicurezza del lavoro. Pp. 49. Ed. *Grafica Salaria*. Monterotondo (RM), Settembre 2009.

Verani S, Sperandio G., Di Matteo G., 2010a. Analisi del lavoro della Claas Jaguar 880 con testata GBE-1 nella raccolta di un pioppeto da biomassa. *Forest@*, 7: 22-27.

Verani S. Sperandio G., Picchio R., 2010b. Short rotation coppice in a self-consumption wood Energy micro-chain in center Italy, LCA analysis. XXIII IUFRO World Congress “Forest for the future: Sustaining Society and the Environment”. Korea, August 23-28th. Poster.

Whalley J., Walsh S. 2008. Bringing the Copenhagen global climate change negotiations to conclusion. CESIFO Working paper: 2458

Wold S., Sjöström M., Eriksson L. 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 58 (2): 109-130.