



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
Tuscia



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AGRICOLTURA, LE
FORESTE, LA NATURA E L'ENERGIA**

Corso di Dottorato di Ricerca in

Ingegneria dei Sistemi Agrari e Forestali - XXVI Ciclo.

**Modello di campionamento per le biomasse residuali: il caso del nocciolo nella
provincia di Viterbo. Stima dei quantitativi di potature, caratterizzazione
chimica, fisica ed energetica della biomassa e prospettive di utilizzo**

(s.s.d. AGR/09)

Tesi di dottorato di:

Dott. Simone Di Giacinto

Coordinatore del corso

Prof. Massimo Cecchini

Firma

Tutore

Prof. Ing. Danilo Monarca

Firma

Co-tutore

Dott. Andrea Colantoni

Firma.....

23 giugno 2014

Sommario

INTRODUZIONE	5
Scopo del lavoro	9
CAPITOLO 1	10
1.1 Identità della biomassa	10
1.2 Provenienza della biomassa	11
1.3 Il comparto forestale e agroforestale	12
1.4 Il comparto agricolo	13
1.4.1 I residui agricoli	14
1.4.2 Le colture dedicate	19
1.5 Il comparto zootecnico	26
1.6 I residui delle attività industriali	28
1.6.1 L'industria del legno.....	28
1.6.2 L'industria della carta.....	30
1.6.3 L'industria agroalimentare.....	31
1.7 Caratteristiche tecnologiche delle biomasse.....	31
1.7.1 Caratteristiche chimiche.....	31
1.7.2 Caratteristiche fisiche	33
1.7.3 Caratteristiche energetiche	35
1.8 Forme commerciali	39
1.8.1 Legna da ardere.....	39
1.8.2 Il cippato	40
1.8.3 Il pellet.....	41
1.8.4 Il bricchetto.....	43
1.9 La conversione energetica – principi e metodi	44

1.9.1 La conversione termochimica	45
1.9.2 La conversione biochimica	48
CAPITOLO 2.....	52
2.1 Normativa di riferimento in materia di rifiuti.....	52
2.2 Residui colturali, rifiuti o sottoprodotti agricoli.....	53
2.3 Sottoprodotti agricoli.....	53
2.4 Il caso delle biomasse	54
2.5 Il reato di bruciatura in campo dei residui colturali.....	56
2.5.1 Un caso legale.....	58
2.6 Codice ambientale, norma di riferimento.....	59
2.7 I residui della potatura del nocciolo.....	60
CAPITOLO 3.....	63
MATERIALI E METODI.....	63
3.1 Le cultivar indagate	63
3.2 Indagini in campo.....	63
3.3 Strumentazione	66
3.4 Classi di età e densità d'impianto.....	67
3.5 Descrizione del metodo di campionamento.....	68
3.6 Caratterizzazione della biomassa	73
3.6.1 Determinazione dell'umidità	73
3.6.2 Determinazione del potere calorifico	74
3.6.3 Determinazione del contenuto di ceneri.....	74
3.6.4 Determinazione del contenuto di C, H, N	75
CAPITOLO 4.....	77

RISULTATI E DISCUSSIONE	77
4.1 La biomassa disponibile	77
4.1.1 Produzione di biomassa in funzione dell'età delle piante.....	81
4.1.2 Produzione di biomassa in funzione del sesto d'impianto	83
4.2 Composizione delle potature	90
4.3 Caratterizzazione energetica delle potature	92
4.3.1 Il ruolo dell'umidità.....	95
4.4 Potenzialità d'impiego delle potature di nocciolo	96
CAPITOLO 5.....	100
CONCLUSIONI	100
BIBLIOGRAFIA.....	104

INTRODUZIONE

Nel rapporto *World Oil Outlook 2013*, l'OPEC ha stimato una crescita della domanda di energia, per il periodo di riferimento 2010 – 2035, pari al 52%. I combustibili fossili hanno rappresentato l'82% dell'approvvigionamento energetico nel 2010 e costituiranno, secondo la previsione OPEC, l'80% del totale mondiale entro il 2035. Durante la maggior parte del periodo previsionale il petrolio manterrà la quota maggiore, tuttavia la richiesta di ciascun tipo di combustibile si attesterà su valori simili, di circa il 26 – 27% ciascuno entro il 2035 [1]. La dipendenza tanto forte dai combustibili fossili, primo fra tutti il petrolio, è legata non solo al soddisfacimento della domanda di energia, ma anche alle abitudini della vita quotidiana; il 90% di tutti i trasporti, terrestri, aerei, o marittimi, utilizzano il petrolio; il 95% dei prodotti che troviamo nei negozi richiede l'utilizzo del petrolio; il 95% dei prodotti alimentari richiede l'utilizzo del petrolio [2]. La International Energy Agency (IEA), l'organizzazione istituita dai paesi industrializzati per questioni relative al petrolio e alle altre risorse energetiche, stima che ad oggi il mondo consuma oltre 32 miliardi di barili di petrolio l'anno, circa 88 milioni di barili al giorno. In un rapporto del 2004 la IEA prevedeva un aumento del consumo giornaliero fino a 121 milioni di barili al giorno entro il 2030 [3]. Da diversi anni ormai, è in corso un'aspra diatriba tra due fazioni pensanti opposte circa le riserve di petrolio ancora disponibili. Da una parte vi sono persone convinte che nei giacimenti rimangano ancora 2000 miliardi di barili di petrolio da sfruttare e confidano nella futura e ragionevolmente prevedibile scoperta di nuove risorse; dall'altra parte ci sono invece persone che sostengono vi siano ancora solo 1000 miliardi di barili di petrolio nelle riserve. In entrambi i casi, essendo il petrolio una fonte esauribile, arriverà inevitabilmente il giorno in cui raggiungeremo la quantità massima di petrolio estraibile dopodiché, all'indomani di quel giorno, che viene spesso indicato come il picco di produzione del petrolio, comincerà un progressivo e generalizzato declino della produttività dei giacimenti [2]. D'altra parte le industrie del gas e del carbone sembrano avere vita più lunga, stando alle stime attuali. Nonostante un consumo annuo di sei miliardi di tonnellate, che coprono il

30% di tutti i consumi energetici mondiali, l'impiego del carbone è destinato a salire fino a diventare la principale fonte di energia, scalzando il petrolio dal primo posto [4]. Si tratta infatti di una risorsa largamente disponibile e geograficamente molto diversificata. Le riserve accertate di carbone garantiscono consumi per oltre due secoli e sono distribuite in un centinaio di Paesi [5]. Le riserve mondiali provate di gas naturale ammontano ad oltre 200.000 miliardi di metri cubi (dati riferiti al 31 dicembre 2012). Tali riserve sono costituite dai giacimenti attualmente conosciuti e che possono essere sfruttati con le tecnologie disponibili traendone profitto economico. In termini di volume, l'uso del gas naturale aumenta più velocemente di qualsiasi altra forma di approvvigionamento energetico [1]; stando agli attuali ritmi di consumo di questa risorsa, si stima che le riserve di gas naturale si esauriranno tra circa 60 anni [6].

L'incremento di produzione di energia ha causato inevitabilmente un aumento delle emissioni di gas ad effetto serra generate proprio dai combustibili fossili. Infatti, la produzione di CO₂ è passata da 4 milioni di tonnellate/anno a oltre 28 milioni di tonnellate/anno negli ultimi 60 anni [7]. Secondo i risultati di uno studio recentemente pubblicato da Siemens, la domanda di energia, su scala globale, è destinata ad aumentare di quasi il 3% all'anno, entro il 2030. Complessivamente, questa crescita moderata farà sì che la domanda di energia aumenti di oltre la metà rispetto ai livelli attuali tra ora e il 2030. Se, come previsto, verranno realizzati nuovi impianti di produzione di energia, le relative emissioni di CO₂ aumenterebbero di un quarto, ossia di 3.500 Mt. Il Professore Horst Wildemann, della Technical University di Monaco di Baviera e autore dello studio, afferma che "se le centrali elettriche a carbone venissero sostituite, su larga scala, da centrali a gas, entro il 2030, le emissioni di CO₂ nel settore energetico potrebbero ridursi anche del 5% rispetto ai livelli attuali. Certo, sarebbe illusorio sostituire ora tutte le centrali a carbone con quelle a gas, ma le potenzialità individuate sono davvero impressionanti". Le emissioni globali di CO₂ che ogni anno potrebbero essere eliminate interrompendo la produzione di energia dal carbone equivarrebbero così alla quasi totalità delle emissioni di CO₂ di tutti i 28 paesi dell'Unione Europea [8]. Intervenire in fretta contro

i cambiamenti climatici tagliando la CO₂, è l'ammonimento a ridurre in maniera drastica le emissioni di gas serra contenuto nell'ultimo rapporto sul clima diffuso dall'ONU, nel quale vengono indicate le economie a bassa produzione di anidride carbonica come l'unica strada efficace per ridurre il riscaldamento globale. Le misure adottate dagli Stati al momento non sarebbero quindi sufficienti a porre rimedio al riscaldamento globale, che in accordo con quanto affermato negli ultimi anni potrebbe attestarsi ben oltre i 2°C ipotizzati nel decennio scorso. Unica soluzione secondo l'ONU un incremento rapido ed esteso dell'impiego di fonti rinnovabili [9].

E' importante anzitutto porre l'enfasi su quello che si potrebbe definire un approccio "a tutto tondo" al problema dell'abbandono dei combustibili fossili. Sarebbe impensabile impiegare una sola tecnologia alternativa per soddisfare, totalmente o anche solo in parte, il fabbisogno energetico di una nazione. Però si possono combinare tra loro diverse fonti rinnovabili, perché fanno tutte parte di un'unica grande famiglia. Stando alle previsioni di alcuni studi recenti (alcuni dei quali pubblicati da note compagnie petrolifere) l'energia solare rivestirà un ruolo principe nel futuro scenario energetico mondiale; scenario plausibile se si pensa che ogni giorno la superficie terrestre è investita da una quantità di luce tale da garantire all'intera società umana un approvvigionamento energetico migliaia di volte superiore al necessario. Ma alla grande famiglia delle Rinnovabili appartengono anche l'energia eolica, l'energia idraulica, l'energia geotermica e le biomasse; queste ultime sono oggetto di studio e approfondimento di questo lavoro.

La biomassa è la forma più abbondante e versatile di energia rinnovabile in tutto il mondo. La biomassa comprende, con alcune eccezioni, qualsiasi materiale costituito da una matrice organica, come il legno vergine, le colture energetiche, i residui agricoli, i rifiuti alimentari, quelli industriali e co-prodotti. La produzione di energia da biomasse prodotte da colture legnose o colture appositamente dedicate per la produzione di energia è controversa dal momento che queste competono con le colture alimentari per la terra e il fabbisogno di acqua dolce [10]. La Commissione Europea ha recentemente avanzato una proposta di direttiva che limita drasticamente la produzione di

biocarburanti “food”, cioè estratti da materie prime commestibili come mais, cereali, zucchero e piante oleose. Se la direttiva verrà approvata senza modifiche l'attuale target del 10% di copertura dei consumi di carburanti tramite biofuel dovrà essere raggiunto almeno per metà con carburanti verdi “non food”, visto che quelli di origine alimentare potranno raggiungere solo il 5%. La Commissione, nel redigere la proposta di direttiva, ha preso in considerazione la teoria dell’“Indirect Land Use Change” (ILUC). Secondo questa visione dei biocarburanti, utilizzando la terra per fare benzina o diesel si toglie ai produttori agricoli spazio per le colture alimentari. E, siccome del cibo non si può fare a meno, i contadini saranno costretti a trasformare le superfici boscate in terreni agricoli, diminuendo l'assorbimento della CO₂ totale. Alla fine, fatti due conti, questa strategia è peggiore della situazione attuale in termini di emissioni in atmosfera. E quindi non va affatto bene. Seguendo le nuove indicazioni UE i biocarburanti da togliere di mezzo sono quelli ottenuti dalla colza, soia e palma e da altre piante oleose. Mentre si dovrebbero favorire tutti gli altri [11].

Un approccio alternativo è quello di considerare i residui agricoli o rifiuti agro-industriali come risorsa per produrre energia. La quantità dei residui agricoli dipende dagli output non alimentari lasciati in campo dalle colture agricole; dopo il raccolto tali residui potrebbero potenzialmente essere raccolti per uso energetico [12]. A volte, la stima dei residui agricoli utilizzabili è ottenuta attraverso indici empirici o fa riferimento ad aree molto estese [10][13] e non offrono così risposte esaustive e pragmatiche a fenomeni riguardanti realtà locali. Una parte di questi residui è rappresentata dalla biomassa ottenuta dalla potatura di alberi da frutto come olivo, nocciolo, castagno e molti altri [14]. L'Italia ha circa 70.500 ha coltivati a nocciole [15] quasi interamente distribuiti in sole quattro regioni che rappresentano il 98% della produzione nazionale: Campania, Lazio, Piemonte, Sicilia [16]. Viterbo è la più importante area di produzione del Lazio con circa 18.400 ha coltivati a nocciole [15] che ogni anno forniscono residui attraverso la potatura, che diventano una potenziale fonte di energia. Una tendenza recente, per quanto concerne gli impianti energetici di trasformazione delle biomasse, vede preferiti quelli di piccola taglia a quelli di grandi dimensioni (centrali da 1 MW). Negli ultimi anni molti studi sono stati

effettuati per indagare la migliore tecnologia di trattamento delle biomasse solide, ma non molti dati, circa la quantità di potatura, sono presenti nella letteratura recente.

Scopo del lavoro

Alla luce di quanto detto sopra, sembra opportuna e quanto mai inevitabile, la ricerca di nuovi modelli di approvvigionamento energetico e sostenibilità ambientale. Questo lavoro si inserisce in un contesto provinciale, quello di Viterbo, e vede come protagonista una filiera produttiva che grida già all'eccellenza, quella della nocciola Tonda Gentile Romana. La quantità di biomassa prodotta ogni anno dalla potatura delle piante di nocciolo suscita da sempre l'interesse di agricoltori, che vedrebbero incrementato il loro reddito grazie al recupero energetico dei residui prodotti, e di enti di ricerca, impegnati a trovare le soluzioni tecnologiche più confacenti alla valorizzazione di detti residui.

Questo lavoro si pone un duplice obiettivo; in primo luogo si vuole stimare la biomassa reale derivante dalla potatura del nocciolo, considerando variabili quali l'età delle piante, il numero di piante per ha ed il contenuto idrico del materiale; a tal proposito è stato sviluppato un modello per la raccolta e la quantificazione di biomassa in campo. In secondo luogo si vuole caratterizzare, dal punto di vista energetico, questa tipologia di biomassa; per tale motivo il materiale raccolto in campo è stato sottoposto a prove di laboratorio.

CAPITOLO 1

1.1 Identità della biomassa

Nel 2011 le biomasse hanno coperto il 10% circa del fabbisogno di energia nel mondo [17]. Il termine biomassa riunisce una gran quantità di materiali di natura estremamente eterogenea. Con alcune eccezioni, si può dire che è biomassa tutto ciò che ha matrice organica. Sono da escludere le plastiche di origine petrolchimica e i combustibili fossili che, pur rientrando nella chimica del carbonio, non hanno nulla a che vedere con la caratterizzazione che qui interessa i materiali organici [18].

La vegetazione che copre il nostro pianeta è un magazzino naturale di energia solare. La materia organica di cui è composta si chiama biomassa. Le biomasse si producono attraverso il processo di fotosintesi clorofilliana, durante il quale, grazie all'energia solare, l'anidride carbonica atmosferica e l'acqua del suolo si combinano per produrre gli zuccheri necessari per vivere (materia organica). Nei legami chimici di queste sostanze è immagazzinata la stessa energia solare che ha attivato la fotosintesi. Attraverso questo processo vengono asportate dall'atmosfera ben $2 \cdot 10^{11}$ tonnellate di carbonio all'anno, con un contenuto energetico dell'ordine di 70 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio, ossia dieci volte il fabbisogno energetico mondiale annuo. Bruciando le biomasse, l'ossigeno atmosferico si combina con il carbonio in esse contenuto, mentre si liberano anidride carbonica e acqua e si produce calore. L'anidride carbonica torna nell'atmosfera e da qui è nuovamente disponibile ad essere re-immessa nel processo fotosintetico per produrre nuove biomasse. Le biomasse dunque sono una fonte energetica considerata neutrale ai fini dell'incremento delle emissioni di gas a effetto serra [19].

Se opportunamente utilizzata, ovvero se il ritmo di impiego non supera la capacità di rigenerazione delle formazioni vegetali, la biomassa può essere considerata a tutti gli effetti una risorsa rinnovabile e inesauribile. Per questo motivo l'impiego a fini energetici di questa risorsa è una delle priorità di sviluppo delle politiche post Kyoto [20].

In particolare, per biomasse si intende *la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani* [21];

1.2 Provenienza della biomassa

Per semplicità le biomasse idonee alla trasformazione energetica, sia che essa avvenga utilizzando direttamente la biomassa o previa trasformazione della stessa in un combustibile solido, liquido o gassoso, possono essere suddivise per comparto di provenienza nei seguenti settori:

- comparto forestale e agroforestale: residui delle operazioni selvicolturali o delle attività agroforestali, utilizzazione di boschi cedui, ecc;
- comparto agricolo: residui colturali provenienti dall'attività agricola e dalle colture dedicate di specie lignocellulosiche, piante oleaginose, per l'estrazione di oli e la loro trasformazione in biodiesel, piante alcoligene per la produzione di bioetanolo;
- comparto zootecnico: reflui zootecnici per la produzione di biogas;
- comparto industriale: residui provenienti dalle industrie del legno o dei prodotti in legno e dell'industria della carta, nonché residui dell'industria agroalimentare;
- rifiuti urbani: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani.

Si comprende quindi che nel termine biomassa sono raggruppati materiali che possono essere anche molto diversi tra loro per caratteristiche chimiche e fisiche. Di conseguenza anche le loro utilizzazioni, a fini energetici, possono essere molteplici [22].

1.3 Il comparto forestale e agroforestale

Il principale strumento tecnico della selvicoltura naturalistica è costituito da operazioni di taglio e di eliminazione di alcune piante (alberi, ma anche arbusti) che consentano l'utilizzazione della produzione legnosa senza inficiare il processo di perpetuazione del bosco. Le operazioni che vengono eseguite contribuiscono a “regolare” la concorrenza tra piante della stessa età o di età diversa nonché di controllare la composizione, la struttura spaziale (distribuzione orizzontale e verticale) e l'evoluzione della comunità vegetale. I residui forestali, risultanti dai diversi tipi di intervento selvicolturale, vengono comunemente indicati come biomassa forestale. Le operazioni interessanti ai fini del prelievo di biomassa forestale a fini energetici comprendono sia interventi selvicolturali in boschi governati a fustaia sia interventi in boschi governati a ceduo. Nel primo caso un esempio di operazione può essere il prelievo degli assortimenti minori, comunemente lasciati in bosco, in seguito a interventi di taglio degli assortimenti forestali maggiori (diametro dei tronchi maggiore a 18 cm) per usi commerciali.

Ulteriore fonte di approvvigionamento è costituita dal materiale legnoso derivante dai tagli intercalari ovvero dagli interventi applicati alle giovani fustaie o alle fustaie in via di ricostituzione per aumentarne la stabilità, per regolamentarne la composizione specifica e per accrescerne la produzione di valore. Anche l'utilizzazione dei boschi cedui rappresenta sicuramente una fonte importante di biomassa forestale: i cedui italiani, infatti, costituiti nella quasi totalità da piante ceduate a ceppaia, sono destinati per lo più alla produzione di biomassa combustibile e di pali per uso agricolo.

Un'ulteriore fonte di approvvigionamento di biomasse legnose è rappresentata dai materiali di provenienza agroforestale, ossia dalle biomasse che derivano da attività di forestazione in ambito prettamente agricolo. Le fonti di biomassa a fini energetici, in questo caso, sono principalmente da ricondursi ai residui derivanti dalle utilizzazioni a fini commerciali di coltivazioni legnose, alle utilizzazioni delle formazioni lineari (come siepi e filari o piccoli boschetti) nonché alle utilizzazioni delle formazioni boschive dedicate realizzate su superfici agricole. Per quest'ultima si fa riferimento principalmente, alla pioppicoltura: i

residui possono derivare sia dalle potature eseguite nel corso del ciclo di crescita della pianta, sia dagli scarti delle utilizzazioni a fini commerciali (comunemente viene utilizzato il tronco, mentre le ramaglie vengono lasciate in campo).

La biomassa proveniente dal bosco viene venduta sul mercato in pezzature molto diverse per forma e grado di umidità. In taluni casi viene avviata alla produzione di forme densificate. Le pezzature più comuni sono i tronchetti di legno (l'assortimento più utilizzato negli ambienti rurali o montani, dove la raccolta della legna e il suo stoccaggio in ciocchi di opportune dimensioni è un'attività che sopravvive alle attrattive offerte dalle moderne tecnologie per il riscaldamento residenziale) e il cippato.

La superficie forestale totale in Italia è pari a 10.467.533 ha e rappresenta il 34,7% della superficie territoriale. Il bosco costituisce l'83,7% della superficie forestale, mentre le altre terre boscate corrispondono al 16,3% [23]. L'ampia disponibilità della fonte a livello nazionale rende interessante lo sfruttamento energetico delle biomasse forestali. Tuttavia il principale elemento di criticità al reperimento della biomassa in bosco può essere rappresentato dalle difficoltà logistiche e in particolare dalla presenza o meno di una viabilità forestale fruibile dai comuni mezzi di raccolta e trasporto e sufficientemente sviluppata. Soprattutto in ambito montano le formazioni boschive non sono sempre facilmente raggiungibili: in condizioni di pendenze elevate il recupero del materiale legnoso richiede una densità di strade piuttosto alta per garantire un agevole accesso dei mezzi. In alternativa spesso si rende necessaria la realizzazione di infrastrutture apposite come teleferiche o risine, utili al trasporto in condizioni orografiche accidentate con un aggravio dei costi di reperimento della biomassa

1.4 Il comparto agricolo

Il comparto agricolo svolge, e svolgerà, un ruolo sempre più preponderante nella produzione di combustibili da biomassa. Questo comparto, infatti, può fornire un'ampia gamma di materiali che possono trovare utilmente impiego a fini energetici, che comprende sia prodotti residuali di altre coltivazioni sia

materiali derivanti da coltivazioni specialistiche dedicate alla produzione di biomassa combustibile.

Una generica classificazione delle biomasse ritraibili dal comparto agricolo è riportata nello schema che segue.

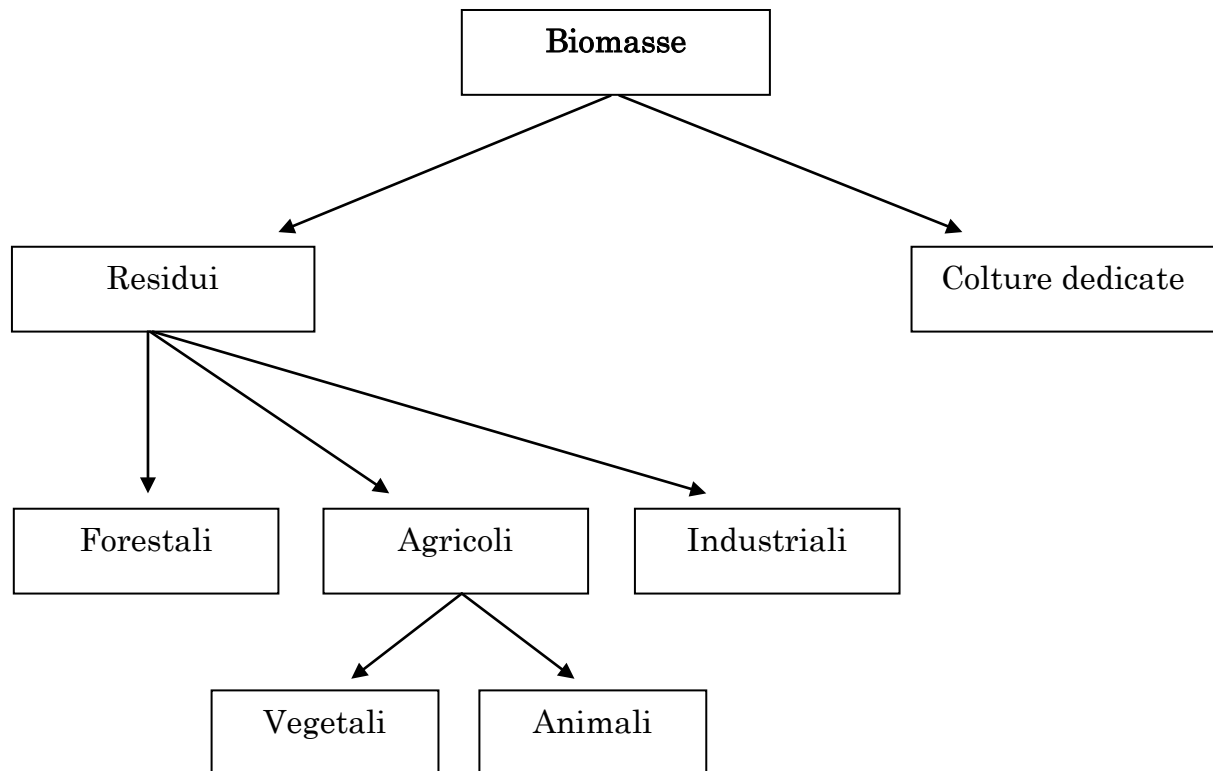


Figura 1. Classificazione delle biomasse ritraibili in campo agricolo

1.4.1 I residui agricoli

I residui agricoli comprendono l'insieme dei sottoprodotti derivanti dalla coltivazione di colture, generalmente a scopo alimentare, altrimenti non utilizzabili o con impieghi alternativi marginali. Non tutti i residui provenienti da questo comparto sono utilmente destinabili alla produzione di energia sia a causa delle loro caratteristiche fisiche ed energetiche sia a causa di barriere economiche (costi di raccolta, bassa densità per unità di superficie) che ne limitano le possibilità di impiego (tabella 1).

Tabella 1. Residui colturali comunemente impiegati per la produzione di energia e relativo periodo di produzione [24]

	Coltura	residuo	Periodo di produzione
Erbacee	Frumento tenero	Paglia	Giugno - Luglio
	Frumento duro	Paglia	Giugno - Agosto
	Orzo	Paglia	Luglio - Agosto
	Avena	Paglia	Luglio - Agosto
	Mais	Stocchi	Ottobre - Novembre
	Riso	Paglia	Ottobre - Novembre
Arboree	Vite	Potature	Novembre - Febbraio
	Olivo	Potature	Gennaio - Aprile
	Melo	Potature	Dicembre - Febbraio
	Pero	Potature	Dicembre - Febbraio
	Pesco	Potature	Dicembre-Febbraio
	mandorlo	Potature	Novembre - Dicembre
	agrumi	Potature	Febbraio - Marzo
	nocciolo	Potature	Novembre - Marzo

Le paglie dei cereali autunno-vernini

Le paglie che restano sul campo dopo la trebbiatura rappresentano il principale sottoprodotto dei cereali autunno-vernini, coltivati per la produzione di granella. Sebbene questo materiale frequentemente venga lasciato sul campo per essere interrato oppure venga raccolto e utilizzato come lettiera o, più raramente, come alimento per gli animali, può trovare utilità anche a fini energetici: la paglia è infatti caratterizzata da un p.c.i. che varia tra 3.300-4.200 kcal/kg di sostanza secca (ss) e ha un'umidità alla raccolta del 14-20%. Tuttavia la quantità disponibile, per ettaro di superficie, è piuttosto bassa e varia tra 3 e 6 t/ha anno, in proporzione alla quantità di granella raccolta. Quando è prevista la raccolta, le paglie vengono lasciate in andane (file parallele) dalla mietitrebbiatrice e, successivamente, confezionate in balle [22].

La paglia di riso

Le caratteristiche energetiche della paglia di riso sono buone: la biomassa presenta un p.c.i. di 3.700-3.800 kcal/kg di ss e un'umidità alla raccolta del 20-30%. La produttività media varia da 3 a 5 t/ha anno. La paglia di riso tuttavia è un residuo agricolo che presenta un recupero relativamente problematico. La raccolta, che deve avvenire dopo quella del prodotto principale, si effettua infatti nel periodo autunnale, caratterizzato da un'elevata piovosità, e su terreni con difficoltà di sgrondo delle acque. Attualmente la paglia di riso viene utilizzata come lettiera per animali. Il suo impiego come combustibile avviene generalmente nell'ambito dello stesso ciclo produttivo del prodotto principale e, in particolare, in fase di essiccazione dello stesso [22].

Stocchi, tutoli e brattee di mais

I sottoprodotti del mais da granella sono gli stocchi, i tutoli e le brattee di mais. I tutoli e le brattee di mais hanno un p.c.i. di 4.000-4.300 kcal/kg di ss e un'umidità alla raccolta del 30-55%. Il quantitativo complessivamente raggiungibile, raccolto direttamente dalla mietitrebbiatrice, varia tra 1,5 e 2,5 t/ha, in base alle condizioni della coltura al momento della trebbiatura e alle caratteristiche costruttive della barra di raccolta. Gli stocchi sono caratterizzati da un p.c.i. di 4.000-4.300 kcal/kg di ss e da un'umidità alla raccolta del 40-60%. La produttività è di circa 4-5 t/ha anno. Attualmente sono utilizzati per lo più come lettiera negli allevamenti ma possono trovare impiego anche a fini energetici. Possono essere recuperati successivamente alla raccolta della granella. Il periodo utile per la raccolta risulta essere indicativamente di 30-40 giorni, se tale operazione è effettuata prima dell'inverno, di 50-90 giorni se l'intervento è realizzato nella primavera successiva (nel caso del mais in monosuccessione). La raccolta tardo-autunnale generalmente comporta maggiori criticità dovute all'elevato tasso di piovosità media tipico di questo periodo che aumenta l'umidità del prodotto e quindi ne riduce la qualità (sviluppo con muffe, perdite di sostanza secca sia in pre che in post raccolta, imbrattamento con fango), oltre a generare difficoltà nella transitabilità del terreno. La raccolta meccanica degli stocchi non presenta particolari difficoltà tecnico-operative: i cantieri di lavoro attualmente

adottati prevedono la trinciatura (riduzione del materiale in piccole scaglie) e l'andanatura (disposizione del materiale in campo lungo file lineari) prima del confezionamento in balle cilindriche. In taluni casi alla trinciatura segue il trasporto diretto allo stoccaggio [22].

Sottoprodotti delle colture arboree da frutto (vite, ulivo, altri fruttiferi)

Sottoprodotti delle colture arboree da frutto derivano dalle operazioni di potatura dei frutteti che si eseguono in epoche e con cadenze variabili in funzione delle colture attuate, nel periodo di riposo vegetativo. Nella pratica, tale materiale viene allontanato dall'appezzamento per evitare lo sviluppo di possibili fitopatologie. La possibilità di recuperare i residui di potatura (sarmenti di vite, frasche di ulivo, ramaglie di frutteti) per un loro utilizzo a fini energetici è legata alla possibilità di procedere alla raccolta del materiale ed è quindi vincolata alla densità d'impianto, alle modalità di potatura e al conseguente accrescimento delle piante (la forma di allevamento) nonché alla disposizione (grado di frammentazione e pendenza) del terreno[22].

Tabella 2. Principali caratteristiche chimico-fisiche dei residui colturali [22]

Sottoprodotto agricolo	Umidità alla raccolta (%)	Produzione media (t/ha)	Rapporto C/N	Ceneri (% in peso)	p.c.i. (kcal/kg ss)
Paglia frumento tenero	14-20	3-6	120-130	7-10	4.100-4.200
Paglia frumento duro	14-20	3-5	110-130	7-10	4.100-4.200
Paglia altri cereali autunno-vernini	14-20	3-5,5	60-65	5-10	3.300-3.400
Paglia riso	20-30	3-5,5	60-65	10-15	3.700-3.800
Stocchi mais	40-60	4,5-6	40-60	5-7	4.000-4.300
Tutoli e brattee di mais	30-55	1,5-2,5	70-80	2-3	4.000-4.300
Sarmenti vite	45-55	3-4	60-70	2-5	4.300-4.400
Frasche di olivo	50-55	1-2,5	30-40	5-7	4.400-4.500
Residui fruttiferi	35-45	2-3	47-55	10-12	4.300-4.400

Sebbene i residui colturali rappresentino una fonte energetica facilmente accessibile vanno considerate alcune criticità legate allo sfruttamento degli stessi e in particolare gli impieghi alternativi del materiale, la bassa produttività per unità di superficie e la composizione chimica delle biomasse. Per quanto riguarda il primo aspetto, legato al ruolo agronomico dei residui colturali, c'è da rilevare che le pratiche agricole normalmente in uso trattano in maniera differente i diversi residui: se i residui di potatura vengono comunque raccolti e asportati dal campo, i residui colturali del mais, sono normalmente lasciati sul campo e interrati; questa operazione permette infatti l'apporto di sostanze organiche al terreno al fine di migliorarne la struttura e di mantenerne la fertilità. Sebbene

l'interramento di tale materiale sia una pratica valida in linea generale, non lo è in senso assoluto: l'interramento della paglia, ad esempio, nonostante a volte venga comunque eseguito, può alterare l'equilibrio del terreno a causa dell'elevato rapporto tra carbonio e azoto (rapporto C/N) che rende successivamente necessario l'arricchimento del terreno con composti azotati di origine chimica. La destinazione dei residui agricoli a fini energetici deve quindi essere valutata di volta in volta, tenendo presente che essa non è consigliabile quando ciò comporti dei risvolti negativi a livello agronomico. Un'approfondita conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche del terreno agricolo si rivela dunque sempre necessaria al fine di definire correttamente un equilibrato livello di asportazione. Un secondo aspetto riguarda le quantità disponibili per unità di superficie. Queste in genere sono relativamente modeste e spesso non giustificano la raccolta, l'asportazione e il trasporto della biomassa alla centrale termica. Il basso peso specifico del materiale inoltre fa aumentare il costo di trasporto per unità trasportata (il trasporto è un punto chiave della logistica) e diventa importante, quindi, anche la distribuzione sul territorio di tali residui. Per quanto attiene infine alla composizione chimica dei residui agricoli va evidenziato che un alto contenuto in cenere può comportare complicazioni in fase di impiego della biomassa: in linea generale la presenza di ceneri aumenta il pericolo della formazione di scorie e depositi a danno dei bruciatori ed aumenta le emissioni di particolato.

1.4.2 Le colture dedicate

Con il termine “colture dedicate”, o “colture energetiche”, si fa riferimento a coltivazioni allestite allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia elettrica e/o termica.

Lo sviluppo delle filiere agro-energetiche rappresenta una concreta possibilità per il comparto agricolo, anche in virtù della spiccata eterogeneità che le caratterizza, spiegabile con la disponibilità di materie prime, che possono essere sfruttate mediante un approccio strettamente connesso alle attitudini del territorio. Il modello di sviluppo si basa sulla stretta interazione tra la

produzione e la sua valorizzazione energetica e, proprio in tale settore, l'impresa agricola può esplicare le sue potenzialità valorizzando le caratteristiche ambientali e sociali presenti a livello locale. La possibilità di convertire i terreni destinati alle colture alimentari in colture energetiche dipende dalla vocazione dei territori ed è legata a fattori economici, politici e agli incentivi legislativi che la favoriscono in considerazione dell'alto prezzo dei combustibili fossili, della forte dipendenza dai Paesi produttori e soprattutto per motivazioni di carattere ambientale [25].

Le colture dedicate possono essere raggruppate in tre categorie principali:

1) colture da biomassa lignocellulosica:

- erbacee annuali;
- erbacee poliennali;
- legnose poliennali;

2) colture oleaginose:

- erbacee annuali;

3) colture alcoligene:

- erbacee annuali;
- erbacee poliennali

In tabella 3 è riportato un elenco delle suddette colture con l'indicazione del prodotto intermedio e di quello trasformato.

Tabella 3. Elenco delle più comuni specie dedicate suddivise in categorie [22]

	Specie	Ciclo di produzione	Prodotto intermedio	Prodotto trasformato
Lignocellulosiche	Kenaf	Erbacea annuale	Fibra	Legno e fibre sminuzzate (chips), Fascine di residui
	Canapa	Erbacea annuale	Fibra	
	Sorgo da fibra	Erbacea annuale	Fibra	
	Miscanto	Erbacea poliennale	Fibra	
	Canna comune	Erbacea poliennale	Fibra	
	Cardo	Erbacea poliennale	Fibra	
	Panico	Erbacea poliennale	Fibra	
	Robinia	Legnosa poliennale	Legno	
	Ginestra	Legnosa poliennale	Legno	
	Eucalitto	Legnosa poliennale	Legno	
	Salice	Legnosa poliennale	Legno	
	Pioppo	Legnosa poliennale	Legno	
Oleaginose	Colza	Erbacea annuale	Semi oleosi	Olio vegetale
	Girasole	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Soia	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Ricino	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Cartamo	Erbacea annuale	Semi oleosi	
Alcoligene	Barbabietola da zucchero	Erbacea annuale	Rizoma	Zuccheri/alcoli
	Sorgo zuccherino	Erbacea annuale	Stelo	
	Topinambur	Erbacea poliennale	Tubercolo	
	Mais	Erbacea annuale	Granella	
	Frumento	Erbacea annuale	Granella	

Le colture lignocellulosiche

Comprendono specie erbacee o legnose caratterizzate dalla produzione di biomassa costituita da sostanze solide composte principalmente da lignina e/o cellulosa. Queste colture possono essere suddivise in tre gruppi [22].

Le colture erbacee annuali comprendono specie caratterizzate da un ciclo di vita annuale. Le più interessanti si trovano nel genere dei sorghi, oltre a mais, kenaf, canapa, ecc. Queste colture offrono il vantaggio di non occupare il terreno agricolo in modo permanente, perciò si inseriscono bene nei cicli tradizionali di rotazione colturale e possono essere coltivate anche su terreni tenuti a riposo secondo il set-aside rotazionale. Tale flessibilità di coltivazione è un fattore importante per quanto riguarda l'impatto che può avere la coltivazione di specie a destinazione energetica sugli agricoltori: il fatto che il terreno non sia vincolato in modo duraturo li rende infatti più propensi alla coltivazione di specie per loro inusuali.

Le colture erbacee poliennali comprendono un elevato numero di specie atte alla produzione di biomassa lignocellulosica. Le più importanti, anche in relazione alle condizioni pedoclimatiche locali, sono la canna comune, il miscanto e il panico. Queste specie presentano un maggior impatto sull'organizzazione dell'azienda agricola in quanto occupano il suolo per diversi anni (10-15 anni) e presentano un elevato costo d'impianto. A loro vantaggio risulta invece il fatto che una volta entrata in produzione, la coltura fornisce una notevole quantità di biomassa per più anni e con bassi costi aggiuntivi (rispetto alle specie annuali). Inoltre, il loro impatto ambientale non è alto poiché queste specie sono generalmente poco esigenti: richiedono cioè aggiunte modeste di prodotti chimici quali fertilizzanti, antiparassitari, ecc. e leggere lavorazioni del terreno.

Le colture arboree sono costituite da specie selezionate per l'elevata resa in biomassa e per la capacità di rapida ricrescita in seguito al taglio. Le specie legnose coltivate a scopi energetici hanno generalmente turni di ceduzione brevi (2-3 anni) e presentano un'elevata densità d'impianto variabile dalle 6.000 alle 14.000 piante/ha. Si parla in questo caso di Short Rotation Forestry (SRF). Generalmente nelle SRF si utilizzano specifici cloni appositamente selezionati e la ceduzione delle piante, annuale o biennale, è completamente meccanizzata

mediante l'utilizzo di apposite cippatrici. Tra le colture arboree coltivabili a turno breve sono ritenuti interessanti i salici, i pioppi, la robinia, gli eucalitti e la ginestra (arbustiva). I principali parametri analitici di interesse ai fini della caratterizzazione delle specie lignocellulosiche). In tabella 4 sono sintetizzate le caratteristiche fisiche ed energetiche delle principali specie vegetali.

Tabella 4. Principali parametri produttivi ed energetici della biomassa da colture dedicate

	Produzione di sostanza fresca (t/ha anno)	Umidità alla raccolta (%)	Produzione di sostanza secca (t/ha anno)	p.c.i. (kcal/kg di ss)
Sorgo da fibra	50-100	25-40	20-30	4.000-4.050
Kenaf	70-100	25-35	10-20	3.700-3.900
Miscanto	40-70	35-45	15-30	4.200-4.250
Canna comune	45-110	35-40	15-35	3.950-4.150
Panico	25-60	35-45	10-25	4.100-4.200
Pioppo	20-30	50	10-15	4.100-4.200

Le biomasse lignocellulosiche da colture dedicate, esattamente come le biomasse di origine forestale e i residui agricoli, possono trovare impiego come combustibili nei moderni impianti di riscaldamento, autonomi o centralizzati. Più raramente vengono utilizzate per la produzione combinata di energia termica ed elettrica in impianti di cogenerazione. Per l'alimentazione di impianti automatizzati con i prodotti delle SRF e delle coltivazione erbacee poliennali, quali canna comune e miscanto, si preferisce generalmente procedere alla cippatura del materiale raccolto al fine di renderlo omogeneo per dimensioni. Le rimanenti colture sono più adatte alla densificazione in bricchetti e pellet. In generale, le biomasse di origine erbacea provenienti da colture poliennali, a parità di quantità di biomassa prodotta, sono caratterizzate da costi di produzione decisamente inferiori rispetto alle biomasse provenienti da colture legnose. Il vantaggio di costi inferiori della materia prima non compensa però una serie di ostacoli che ne limitano decisamente l'utilizzo nella produzione di

calore ed elettricità: tra i principali si riscontra la minor efficienza durante la combustione, se comparata con l'utilizzo di biomassa legnosa, ma anche il minor peso specifico, il minor potere calorifico per unità di peso e il maggiore contenuto di ceneri e di altri composti indesiderati in quanto corrosivi, quali potassio (K), fosforo (P), zolfo (S), o inquinanti quali zolfo (S), azoto (N) e cloro (Cl) [26]. Al fine di ridurre nella biomassa le concentrazioni di questi elementi, vengono utilizzate piante con ciclo fotosintetico C4 in luogo di piante con ciclo fotosintetico C3, in quanto più efficienti nell'uso della risorsa idrica (la silice, in forma di acido silicico, è infatti facilmente traslocata alla pianta mediante assorbimento dell'acqua); inoltre è stato dimostrato che la coltivazione su terreni sabbiosi piuttosto che argillosi diminuisce il contenuto di ceneri. Infine, la raccolta effettuata nel tardo inverno, ove il ciclo colturale lo rende possibile come nel caso delle colture erbacee perennanti, favorisce la traslocazione di elementi quali il potassio e il cloro dagli apparati epigei (parte aerea della pianta) agli apparati radicali, riducendo in tal modo la concentrazione di questi inquinanti nella biomassa raccolta. In definitiva la scelta della coltura da mettere a dimora, un'appropriata tecnica colturale e l'epoca di raccolta costituiscono elementi determinanti ai fini della qualità della biomassa erbacea.

Le colture oleaginose

Insieme alle colture alcoligene si differenziano dalle precedenti poiché non forniscono direttamente il biocombustibile, bensì la materia prima da cui ricavare lo stesso attraverso trasformazioni chimiche e biochimiche. Tra le colture oleaginose vanno annoverate molte specie, diffuse su scala mondiale, sia arboree (la palma da cocco), sia erbacee (il girasole, il colza e la soia). In linea generale le colture oleaginose producono semi caratterizzati da un elevato contenuto in oli: nel girasole il contenuto in oli è in media del 48% con punte del 55% mentre nel colza è in media del 41% con picchi del 50%. I semi di soia presentano delle concentrazioni inferiori comprese, in media, tra il 18 e il 21%; per tale motivo, ai fini della destinazione energetica, questa coltura risulta spesso sfavorita rispetto alle precedenti. Gli oli grezzi ottenuti dalle colture oleaginose sono caratterizzati da un elevato potere calorifico inferiore (in media di 9.400 kcal/kg), per cui

possono essere utilizzati come biocarburanti, in sostituzione del gasolio, per la produzione di energia termica ed elettrica e in cogenerazione. La loro conversione in biodiesel ne consente l'impiego anche per l'autotrazione. Le rese colturali in termini di disponibilità di biocarburante per ettaro sono riportate nella tabella 5.

Tabella 5. Rese delle colture oleaginose in termini di produzione di semi, di olio grezzo e di biodiesel [22]

Coltura oleaginosa	Rese in semi (t/ha)	Rese in olio grezzo estratto (t/ha)	Rese in biodiesel (t/ha)
Colza	2,7	1,0	0,9
Girasole	3,0	1,1	1,0

Colture alcoligene

Con il termine alcoligene ci si riferisce a quelle colture atte alla produzione di biomassa dagli elevati contenuti in carboidrati fermentescibili che possono essere destinati, mediante un processo di fermentazione, alla produzione di bioetanolo da utilizzarsi quale biocarburante in sostituzione della benzina o dei composti antidetonanti (ad esempio MTBE) (tabella 6). La materia prima da avviare alla filiera di produzione del bioetanolo può essere costituita da zuccheri semplici (in primis saccarosio e glucosio), o da zuccheri complessi (amido) ed è ottenuta, rispettivamente, dalle colture dedicate saccarifere o da quelle amilacee. Tra le colture saccarifere, quelle ritenute adatte alle condizioni del terreno e del clima in Italia, sono la barbabietola da zucchero e il sorgo zuccherino, tra le colture amilacee il frumento tenero, soprattutto nell'Italia meridionale, e il mais, in particolare nell'Italia settentrionale. Le colture saccarifere presentano un elevato contenuto in zuccheri semplici: l'estratto zuccherino fermentescibile nella barbabietola costituisce in media il 20% della biomassa secca raccolta, nel sorgo il 18%. Le colture amilacee contengono l'amido in forma di granuli e i residui di glucosio che lo compongono possono essere idrolizzati e, successivamente, fermentati a bioetanolo: il frumento tenero presenta un contenuto in amido corrispondente al 70%, il mais pari al 78%.

Tabella 6. Rese produttive delle colture alcoligene in termini di bioetanolo

Coltura	Resa in bioetanolo (t/ha)
Barbabietola da zucchero	5,5
Sorgo zuccherino	4,5
Frumento tenero	2,5
Mais	3-6

L'impiego in campo energetico delle colture dedicate suscita da sempre perplessità da parte dell'opinione pubblica. La produzione di biomassa da tali colture infatti, implica necessariamente una riduzione della superficie agricola utilizzata (SAU). A questo, molte volte vengono associati gli aumenti di prezzo dei beni primari. Studi recenti, condotti da enti di ricerca e università, hanno evidenziato come la produzione di biocarburanti su larga scala, a partire da colture agrarie, determinerebbe una contrazione cospicua dei terreni destinati alla produzione di beni primari. Assume pertanto un'importanza crescente, la possibilità di valorizzare in termini energetici i residui produttivi il cui reperimento incide in misura molto più contenuta sui costi di produzione del biocarburante. A questo scopo si prestano gli scarti della produzione ortofrutticola, che si possono avvalere delle stesse tecnologie impiegate per le materie prime derivanti dalle colture dedicate saccarifere e amilacee. Un ruolo di notevole rilievo può essere svolto anche dai residui lignocellulosici provenienti dalle lavorazioni agricole e dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani; per tali materie prime la filiera produttiva è in corso di ottimizzazione.

1.5 Il comparto zootecnico

Con il termine deiezioni zootecniche vengono definiti i prodotti di scarto (o reflui) di un allevamento, risultato della miscela di feci, urine, acqua, lettiera, peli, residui alimentari, ecc. Si parla invece di deiezioni tal quali o propriamente dette, quando ci si riferisce solamente al sottoprodotto fisiologico degli animali (feci e urine).

Le deiezioni zootecniche presentano una composizione estremamente variabile non solo in funzione dell'origine (bovina, suina, avicola, ecc.), ma anche in funzione delle modalità di allevamento e di gestione. In particolare l'apporto di acqua e quindi, all'opposto, il contenuto in sostanza secca, gioca un ruolo determinante nella scelta della modalità di trattamento/smaltimento più idonea.

In figura 2 viene illustrata la classificazione delle deiezioni zootecniche sulla base del contenuto in sostanza secca.

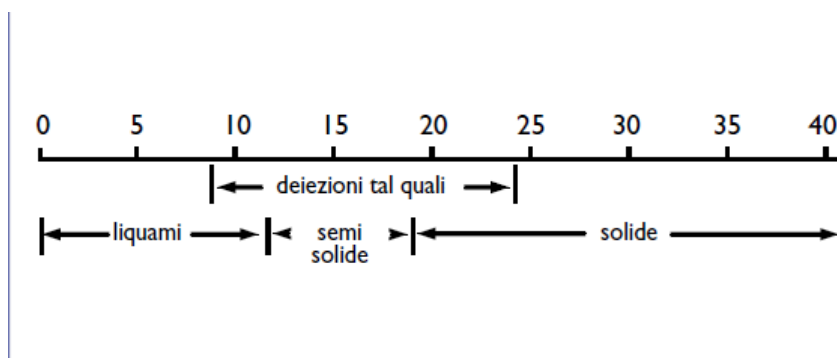


Figura 2. Classificazione delle deiezioni zootecniche in funzione del contenuto di sostanza secca [22].

Le deiezioni zootecniche, ricadenti nella definizione di liquame, sono quelle che meglio si prestano allo sfruttamento energetico mediante digestione anaerobica in quanto il loro contenuto di sostanza secca è inferiore al 10-12%. Il potenziale energetico dei liquami zootecnici è in diretto rapporto con il contenuto in sostanza organica. Infatti è proprio la sostanza organica che, attraverso il processo di fermentazione o di digestione anaerobica, dà luogo alla formazione di biogas, combustibile ad alto potere calorifico. Come si evince dai dati riportati nella tabella 7, è questo il caso dei liquami bovini e suini, caratterizzati appunto da un elevato tenore di sostanza organica (o solidi volatili).

Tabella 7. Rendimento in biogas di liquami bovini e suini

Materiale	Sostanza secca (ss) (%)	Sostanza organica (solidi volatili - sv) (% sulla ss)	Rendimento biogas (Nm ³ /kg SV)
Liquame suino	3-8	70-80	0,25-0,50
Liquame bovino	5-12	75-85	0,20-0,30

Oltre alla quantità di sostanza organica presente è altrettanto importante considerare la qualità del materiale in quanto tale aspetto può condizionare il rendimento in biogas e il contenuto in metano. I fattori di particolare rilievo sono:

- **composizione del materiale:** condiziona la velocità di degradazione (degradabilità) che, in senso decrescente, può essere così schematizzata: lignina → cellulosa → grassi → proteine → carboidrati. Un liquame bovino, a maggior contenuto di materiale cellulosico, presenta una velocità di degradazione superiore a un liquame suino più ricco in grassi che, tra l'altro, sono la sostanza che consente di ottenere maggiori rendimenti di biogas;

- **presenza di elementi essenziali:** il carbonio, l'azoto, il fosforo e lo zolfo sono elementi essenziali alla crescita dei batteri responsabili del processo di fermentazione. Il rapporto tra carbonio e azoto (C/N) non deve mai superare il valore di 35, con un ottimo di 30;

- **presenza di elementi tossici:** sono spesso micronutrienti quali sodio (Na^+), potassio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), ammonio (NH_4^+), zolfo (S^{2-}) che, se presenti in eccesso, possono indurre tossicità. Anche i metalli pesanti quali rame (Cu^{2+}), nichel (Ni^{2+}), cromo (Cr), zinco (Zn^{2+}), piombo (Pb^{2+}) possono risultare dannosi se presenti in concentrazioni superiori a 1 mg/l. Altre sostanze capaci di bloccare la digestione sono i detergenti e i composti chimici di sintesi.

1.6 I residui delle attività industriali

1.6.1 L'industria del legno

L'industria del legno produce tre tipologie di scarti di lavorazione:

- **scarti di legno vergine** provenienti da segherie, carpenterie e falegnamerie, produzione di imballaggi in legno, produzione di manufatti in legno massiccio e di pannelli di legno compensato; sono costituiti da residui di legno naturale di varia pezzatura (segatura, trucioli, cippato, ecc.);

- **scarti di legno trattato** provenienti dalla produzione di pannelli a base di legno e dalla produzione di mobili e arredi in legno costituiti da residui

con presenza di colle e/o prodotti vernicianti (compreso polverino di levigatura o sagomatura);

- **scarti di legno impregnato** provenienti dalla produzione di manufatti particolari, quali pali telefonici e traversine ferroviarie, e costituiti da residui legnosi impregnati con preservanti a base di sali.

Ai fini energetici, salvo nel caso di impianti dotati di tecnologia anti-inquinamento, possono essere utilizzati solo i residui e i sottoprodotti legnosi non trattati chimicamente (ad esempio residui da scortecciatura, taglio, pressatura, ecc.) o trattati con prodotti non contenenti metalli pesanti o composti alogenati organici (questi ultimi sono tipici del legno trattato con preservanti o con altre sostanze chimiche). Tali raccomandazioni sono dettate dalla necessità di evitare che in fase di combustione possano svilupparsi gas nocivi.

Le principali caratteristiche dei residui derivanti dal comparto dell'industria del legno sono sintetizzate nella tabella 8.

Tabella 8. Caratteristiche dei principali residui dell'industria del legno

Tipologia di lavorazione	Tipologia di scarto	Umidità	Granulometria
Segheria	Cippato	Elevata (50%)	Grossolana
	Segatura	Elevata (50%)	Fine
Falegnameria/Mobilifici	Trucioli	Bassa (15-17%)	Grossolana
	Segatura	Bassa (15-17%)	Fine
	Polverino	Bassa (15-17%)	Fine

Con l'entrata in vigore del D. Lgs. 3 aprile 2006 n.152, la normativa sui rifiuti viene completamente riformulata e viene abrogato il D. Lgs. 22/1977 (noto come "Decreto Ronchi"). La suddetta normativa, insieme ai decreti attuativi, nata con lo scopo di incrementare ed agevolare l'utilizzo dei "rifiuti", ha reso più difficile l'impiego dei residui di legno da sempre considerati equivalenti alle materie prime. Nel 1997, a seguito delle disposizioni introdotte dal Decreto Ronchi n. 22/1997, nasce il Consorzio della filiera del legno che prende il nome di Rilegno. Oggi la sua attività è disciplinata dal testo Unico ambientale D.Lgs

152/2006 e successive modifiche e più precisamente dalla parte quarta, titolo II – art.223. Rilegno deve garantire il corretto recupero e riciclo dei rifiuti di imballaggio legnosi prodotti sul territorio nazionale: a tal fine il Consorzio si adopera per avviare, implementare e consolidare una adeguata e capillare raccolta differenziata degli imballaggi, intrattenendo numerosi rapporti di collaborazione con pubbliche amministrazioni e operatori privati. La normativa vigente impone ai produttori di imballaggi, consorziati in Rilegno, l'onere dell'individuazione di appositi punti di raccolta, ove gli utilizzatori di imballaggi industriali ed i produttori di rifiuti urbani da imballaggio di legno possano conferire tali materiali di risulta senza ulteriori oneri a carico. Rilegno ha sviluppato su tutto il territorio nazionale una rete di piattaforme convenzionate a cui compete l'onere, adeguatamente remunerato dal sistema consortile, di una prima riduzione volumetrica del rifiuto legnoso ritirato, tramite pressatura, frantumazione, triturazione o cippatura. Esistono attualmente 389 piattaforme di raccolta distribuite sul territorio nazionale [27].

1.6.2 L'industria della carta

I residui di produzione dell'industria cartaria sono idonei al recupero sia di materia che di energia. Tali residui si presentano principalmente sotto forma di fanghi e sono generalmente prodotti dal processo di depurazione delle acque, sia chimico-fisico che biologico. Gli scarti di lavorazione, gli sfridi e i foglietti, sono invece riavviati direttamente in testa all'impianto e rimessi in produzione. Minore importanza hanno i rifiuti di vario genere, quali scarti di ferro, legno e plastica provenienti dalla gestione degli imballaggi, gli oli esausti e i rifiuti assimilabili agli urbani. Una menzione a parte va fatta per i residui del processo di riciclo della carta da macero. Si tratta essenzialmente di scarti di pulper (derivanti dalla separazione della fibra dalle impurità più grossolane) e fanghi di disinchiostrazione (ottenuti a seguito della separazione dell'inchiostro dalla fibra cellulosica). Negli ultimi anni si è registrato un incremento nella generazione di rifiuti dovuto, essenzialmente, al potenziamento delle capacità di trattamento

degli impianti di depurazione delle acque e all'aumentato impiego del macero, caratterizzati da un più elevato contenuto di impurità e di fibra non riutilizzabile.

1.6.3 L'industria agroalimentare

Alcuni materiali di scarto provenienti dalle lavorazioni dell'industria agroalimentare si prestano al trattamento mediante digestione anaerobica per il loro elevato carico organico e il loro alto tenore di umidità. I principali scarti dell'industria agroalimentare, che possono essere sfruttati per il recupero energetico mediante biometanazione con una produzione specifica di biogas compresa tra 0,25-0,35 m³/kg s.s., vengono di seguito riportati.

1.7 Caratteristiche tecnologiche delle biomasse

1.7.1 Caratteristiche chimiche

Come detto, le biomasse hanno origine dall'energia irradiata dal sole che, attraverso la fotosintesi clorofilliana, trasforma la struttura molecolare dell'anidride carbonica e di altri elementi e produce la materia organica delle piante. La formula chimica generale con cui vengono indicate le biomasse è $C_xH_yO_z$; [18]. I principali polimeri costituenti la biomassa legnosa sono la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina.

- **la cellulosa**, è il principale componente del legno, di cui costituisce circa il 50% del peso secco. In forma di micro fibrille, essa è costituita da una catena lineare di monomeri (molecole di glucosio) con un elevato grado di polimerizzazione. Presente nella parete cellulare primaria e, soprattutto, secondaria, conferisce resistenza al legno ed è particolarmente resistente agli agenti chimici [28]. Il suo potere calorifico è elevato, pari a circa 3.900 kcal/kg [22].
- **l'emicellulosa** è un polisaccaride a basso peso molecolare, presente nella parete cellulare delle piante negli spazi lasciati liberi dalla cellulosa; costituisce dal 10 al 30% del legno. Per idrolisi acida libera i suoi costituenti: esosi (glucosio, galattosio e mannosio) e pentosi (xilosio e arabinosio) insieme a

acido glucoronico. L'emicellulosa, come la cellulosa, è insolubile in acqua, ma al contrario di questa è solubile in soluzione acquosa alcalina [28]; ha un modesto potere calorifico.

- **la lignina**, è presente nella lamella mediana della parete cellulare e conferisce rigidità alla pianta; è presente in percentuali che variano dal 20 al 30% del peso secco e ha un alto potere calorifico (circa 6.000 kcal/kg) [22]; essa è costituita da una miscela di polimeri fenolici a basso peso molecolare, la cui unità è il fenil-propano; si caratterizza per una bassa igroscopicità e per una suscettibilità agli agenti ossidanti [28].

Oltre a i tre componenti principali, nel legno sono presenti numerosi altri composti organici, localizzati nel lume e nella parete cellulare: terpeni, resine, grassi, gomme, zuccheri non strutturali, tannini, alcaloidi, cere, ecc.. Alcune di queste sostanze possono essere separate, attraverso l'impiego di mezzi chimici e fisici, e vanno sotto il nome di estrattivi. Una frazione importante del legno è costituita dai composti organici (Sali di calcio, magnesio, sodio, potassio, silicio, ecc.), che solitamente si ritrovano, in seguito alla combustione, nelle ceneri. La percentuale dei composti inorganici varia in funzione di diversi fattori; si passa dallo 0,4% della base del tronco al 7% delle foglie e 10% della corteccia [28].

Riguardo alla sua composizione elementare, il legno è costituito quasi interamente da tre elementi: il carbonio (49-51%), l'ossigeno (41-45%) e l'idrogeno (5-7%) (tabella 9). Al contempo presenta relativamente basse quantità di azoto (0,05-0,4%), di zolfo (0,01-0,05%) e di altri elementi minerali che vanno a costituire le ceneri (0,5-1,5%) [28].

Tabella 9. Composizione chimica elementare (%) di alcune specie forestali, allo stato secco, puro e senza ceneri [28].

Specie	C	H ₂	O ₂	N ₂
Leccio	48,9	5,2	43,1	2,1
Roverella	49,4	6,1	44,5	2,0
Faggio	48,3	6,0	45,1	0,6
Betulla	48,9	6,2	43,9	1,0
Carpino	48,1	6,1	44,9	0,9
Ontano	49,2	6,2	44,6	0,7
Frassino	49,4	6,1	44,5	-
Pioppo nero	49,7	6,3	44,0	-
Tiglio	49,4	6,9	43,7	0,6
Pino silvestre	49,9	6,3	42,0	0,7
Abete rosso	50,2	6,2	41,4	0,6

1.7.2 Caratteristiche fisiche

Le caratteristiche fisiche delle biomasse legnose, rilevanti ai fini energetici, sono il tenore di umidità e la densità. Questi due fattori, accanto alla composizione chimica del materiale, incidono infatti sul potere calorifico del legno.

L'umidità viene definita dal rapporto tra la quantità d'acqua contenuta nel legno e il peso dello stesso. Questa variabile assume un'importanza significativa perché, oltre ad agire sui meccanismi di combustione, ha un'influenza sulle caratteristiche chimiche del legno e sul suo peso specifico. La quantità d'acqua contenuta nel materiale varia in funzione di diversi fattori quali la specie, l'età, la parte di pianta considerata (rami, fusti, ecc.), la stagione del taglio, ecc. In generale si hanno tenori di umidità più bassi nelle latifoglie rispetto alle conifere, nelle parti basse rispetto alle parti alte della pianta, in estate rispetto all'inverno. Per definizione, l'umidità del legno viene espressa come rapporto tra la differenza del peso del legno umido e del legno secco, diviso il peso di legno secco [29].

Umidità del legno (anidro) u (%)

Esprime la massa di acqua presente in rapporto alla massa di legno anidro:

$$u = \frac{M_{umido} - M_{anidro}}{M_{anidro}} \times 100 [\%]$$

dove M_{umido} è il peso della biomassa tal quale (umida) e M_{anidro} è il peso della biomassa allo stato anidro, ovvero della sostanza secca (materiale essiccato in stufa a 103°C fino a peso costante).

Una seconda formula viene invece usata per determinare il tenore idrico della biomassa [29]:

Contenuto idrico del legno w (%)

Essa esprime la massa di acqua presente in rapporto alla massa di legno fresco:

$$w = \frac{M_{umido} - M_{anidro}}{M_{umido}} \times 100 [\%]$$

Di seguito si riportano le formule e le tabelle per la conversione delle misure percentuali [29]:

$$u = \frac{100 * w}{100 - w} [\%]$$

$$w = \frac{100 * u}{100 + u} [\%]$$

w	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
u	11,1	17,6	25,0	33,3	42,9	53,8	66,7	81,8	100,0	122,2	150,0

u	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
w	9,1	13,0	16,7	20,0	23,1	25,9	28,6	31,0	33,3	35,5	37,5

Supponendo che la massa del legno fresco sia costituita per metà di acqua e l'altra metà di pura sostanza legnosa, si ha che il contenuto idrico del legno (w %) è pari al 50% mentre l'umidità del legno è del 100% (u %). Il valore del contenuto di umidità del legno può quindi essere superiore al 100% qualora almeno metà del peso di un campione di legno sia dovuto all'acqua in esso contenuta.

La densità è la massa per unità di volume e si misura in kg/m^3 . Può essere calcolata considerando il legno allo stato fresco o il legno allo stato secco. La densità rappresenta il più comune indicatore di qualità del combustibile legnoso perché il potere calorifico del legno è direttamente proporzionale ad essa. Anche la densità è variabile. Essa varia in funzione delle condizioni stazionali, della specie (generalmente risulta più elevata la densità delle latifoglie rispetto alle conifere), dell'età, della parte della pianta, della forma di governo del bosco. La densità del legno, in linea generale, varia tra 800 e 1.120 kg/m^3 , se riferita allo stato fresco, e tra 360 e 810 kg/m^3 , se riferita allo stato secco [22].

La densità si misura come segue:

$$D = M_{umido} / V_{umido}$$

dove M_{umido} è il peso e V_{umido} è il volume della biomassa umida.

1.7.3 Caratteristiche energetiche

Il **potere calorifico** del legno quale fonte energetica è un parametro fondamentale, che definisce la quantità di calore che si sviluppa con la combustione di un chilogrammo di sostanza secca. Del potere calorifico si distinguono due valori specifici:

- *potere calorifico superiore (p.c.s.):* “la quantità di calore che si sviluppa con la combustione completa, a pressione costante e uguale a quella atmosferica, di 1 kg di combustibile, considerando nel prodotto della combustione l'acqua allo stato liquido a 15°C” [30];

- *potere calorifico inferiore (p.c.i.)*: “la quantità di calore che si sviluppa con la combustione completa di 1 kg di combustibile, considerando l’acqua allo stato di vapore a 100°C” [30].

Tabella 10. Sintesi delle principali caratteristiche chimiche, fisiche ed energetiche delle biomasse agricole [22]

Composizione chimica	
Cellulosa	50% della ss
Emicellulosa	10-30% della ss
Lignina	20-30% della ss
Caratteristiche fisiche ed energetiche	
Umidità	25-60% sul t.q.
Densità di massa	800-1.120 kg/m ³
p.c.i. (considerando un’umidità del 12-15%)	3.600-3.800 kcal/kg

Tipicamente, nelle combustioni normali i prodotti della combustione sono rilasciati a temperatura più alta di quella di riferimento del combustibile. Così, una parte del calore teoricamente disponibile si consuma per il riscaldamento dei fumi e, soprattutto, per la vaporizzazione dell’acqua prodotta dalla combustione. L’evaporazione dell’acqua consuma 2,44 MJ ogni kg di acqua (0,68 kWh). Generalmente il potere calorifico viene misurato in kcal/kg (kJ/kg) per solidi e liquidi, mentre per i gas si esprime in kcal/m³ (kJ/m³). Quando non precisato, per “potere calorifico” si deve sempre intendere il potere calorifico inferiore; questo infatti è il valore a cui si fa usualmente riferimento quando si parla di potere calorifico di un combustibile e di rendimento di una macchina termica [29]. L’umidità del legno modifica, riducendolo, il potere calorifico del legno. Se riferito all’unità di peso, il potere calorifico del legno nelle diverse specie, a parità di contenuto idrico, varia molto poco. Tuttavia, è risaputo che il legno di latifoglie ha un potere calorifico allo stato anidro leggermente inferiore a quello delle conifere. In generale le biomasse hanno una modesta densità energetica se paragonata a quella dei combustibili tradizionali; infatti il potere calorifico riferito alla

sostanza secca è in genere compreso tra 4.000 e 4.400 kcal/kg (corrispondenti a $4,65 \div 5,11$ kWh/kg di calore) contro circa 10.000 kcal/kg del petrolio e 12.000 kcal/kg del gas naturale (tabella 12); inoltre bisogna tener conto che il tenore di umidità delle biomasse è assai elevato (dal 30 al 50% in peso), per cui, specialmente nei processi di conversione termochimica sono necessari adeguati pretrattamenti come essiccazione e densificazione per poterne sfruttare al meglio le qualità energetiche [18].

La determinazione del potere calorifico può avvenire in due modi: per via sperimentale, utilizzando la bomba calorimetrica [31] o per via analitica esprimendo, in formule, il potere calorifico inferiore come funzione dell'umidità M oltre che del contenuto di idrogeno $w(H)d$, ossigeno $w(O)d$ e azoto $w(N)d$ sulla sostanza secca [32];

$$q_{p,net,m} = \{q_{V,gr,d} - 212,2 * w(H)d - 0,8 * [w(O)d + w(N)d]\} \\ * (1 - 0,01M) - 24,43M$$

Dove $q_{p,net,m}$ è il potere calorifico inferiore a pressione costante (MJ/kg);
 $q_{V,gr,d}$ è il potere calorifico superiore a volume costante (MJ/kg);

Tabella 11. Principali fattori di conversione del calore

	kJ	kWh	kcal
1 MJ	1.000	0,28	238,85

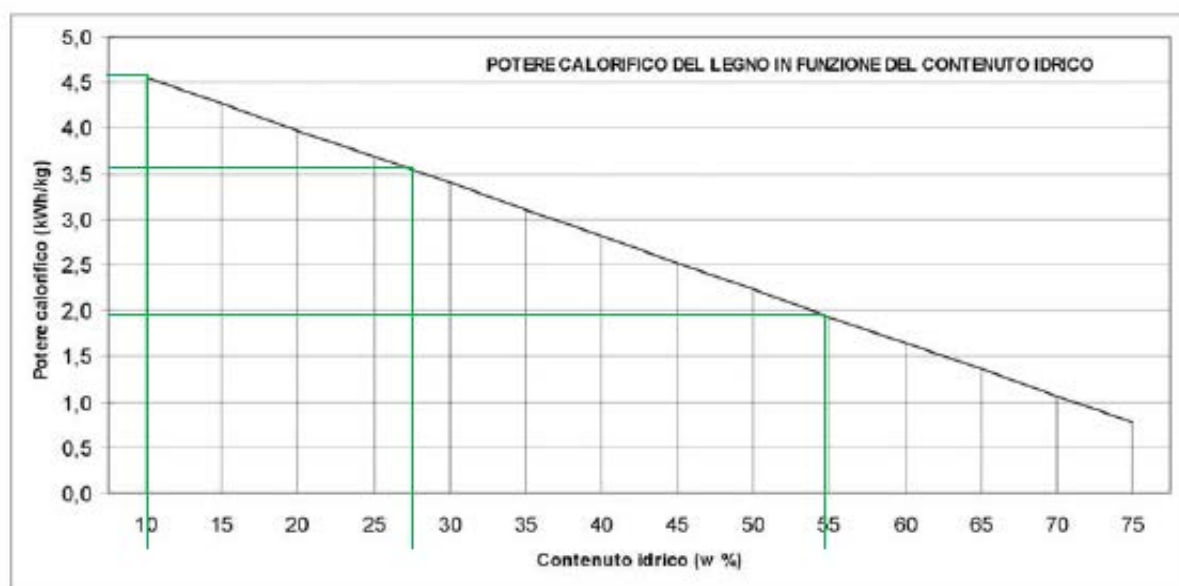


Figura 3. Relazione tra p.c.i. e contenuto idrico w% [29]

L'aumento del contenuto idrico (w) dell'1% comporta una diminuzione del potere calorifico di circa $0,21 \text{ MJ/kg} = 0,0583 \text{ kWh/kg}$

Tabella 12. Variazione del potere calorifico della biomassa in funzione del suo contenuto idrico (w %) [29].

w	0	10,7	15,3	20	25,9	33,3	42,9	50	60
p.c.i. (MJ/kg)	18,5	16,3	15,3	14,3	13,7	11,5	9,53	8,03	5,94
p.c.i. (kWh/kg)	5,14	4,53	4,25	3,98	3,81	3,20	2,65	2,23	1,65

Si può rilevare che il calo del contenuto idrico dal 50%, facilmente riscontrabile nei legni leggeri allo stato fresco, al 20% (valore medio per la legna ben stagionata in legnaia) fa aumentare il potere calorifico del 78%.

Tabella 13. Valori medi del potere calorifico di latifoglie e conifere, con due differenti valori di umidità, e delle fonti energetiche convenzionali più diffuse [28]

Fonte energetica	p.c.i. (kcal/kg)
Latifoglie (20% di umidità)	3.400
Latifoglie (secco in stufa)	4.540
Conifere (20% di umidità)	3.560
Conifere (secco in stufa)	4.780
Paglia di frumento (10% di umidità)	3.700
Carbone (10% di umidità)	6.500
Petrolio	10.500
Gasolio	10.150
Butano	10.900
Propano	11.900
Metano	12.000
Gas naturale	8.150

1.8 Forme commerciali

Le biomasse lignocellulosiche, prima di essere immesse sul mercato, subiscono generalmente un processo di trasformazione più o meno complesso volto a conferire loro caratteristiche fisiche ed energetiche idonee all'impiego nei più comuni impianti energetici. Le principali forme commerciali per tale categoria di biomasse sono: legna da ardere (in ciocchi o tronchetti), cippato, pellet e bricchetti.

1.8.1 Legna da ardere

La forma commerciale di biomassa più diffusa è da sempre la legna, venduta sotto forma di ciocchi o tronchetti, di pezzatura variabile tra 50 e 500 mm. La legna da ardere è destinata perlopiù ad un utilizzo domestico, forni di piccole dimensioni e caldaie. L'uso tradizionale di questa tipologia di biomassa, legato in primis a motivi di carattere culturale, ha visto negli ultimi anni una

forte contrazione dovuta all'ingresso sul mercato di forme densificate (e più maneggevoli) di biomasse lignocellulosiche.

1.8.2 Il cippato

Il cippato è un materiale eterogeneo, ottenuto dallo sminuzzamento della biomassa di partenza. Generalmente viene ricavato dalle essenze di minor pregio, dai residui delle potature [33], da impianti arborei a ciclo breve (SRF) dedicati a tale uso e da sottoprodotti delle industrie del legno. Il materiale di partenza viene ridotto in scaglie piuttosto grossolane, dette *chips*, con un processo meccanico di frantumazione che avviene ad opera di macchine “cippatrici” (figura 4). Il prodotto che ne esce, variabile per forma e dimensione, trova impiego nell'industria di produzione della carta, di pannelli di legno truciolare, di compost, oppure può essere bruciato in caldaie appositamente concepite [34]. Rispetto alla legna da ardere, il cippato presenta il vantaggio di poter ottenere una maggiore produttività per ettaro; infatti la cippatura consente di trasformare in chip anche i rami più piccoli che normalmente verrebbero lasciati in bosco. Infine le caldaie alimentate a cippato sono dotate di un “serbatoio” che permette di automatizzare l'alimentazione rendendone l'uso più semplice [34].



Figura 4. Macchina scippatrice in azione



Figura 5. A sinistra cippato di potatura di vite (*Vitis vinifera*); a destra cippato di legno.

1.8.3 Il pellet

Con il termine pellet si indica un tipo di biocombustibile densificato, normalmente di forma cilindrica, di diametro compreso tra 6 e 8 mm e di lunghezza pari a 1,5 – 2 cm. Si ottiene mediante macchine specifiche, dette pellettatrici, che pressano, in forma di piccoli cilindri, segatura, polvere di legno oppure legname e scarti di legno vergini precedentemente sfibrati (figura 6). Il materiale di partenza deve avere una umidità residua del 12% circa, mentre nel prodotto finale si abbassa leggermente a causa del calore liberato dalle macchine (8 – 12%) [34]. Il grande interesse che sta suscitando il pellet risiede nel fatto che esso si comporta, nella movimentazione, similmente ai fluidi. Ciò permette un elevato grado di automazione degli apparecchi e degli impianti di combustione di piccole e medie dimensioni. Questa importante proprietà del pellet è dovuta alla particolare forma, dimensione e omogeneità dei suoi elementi, che possono venir convogliati al forno di combustione per mezzo di semplici congegni meccanici (es. coclee), con tutti i vantaggi in fatto di regolazione automatica, dosatura e alimentazione continua. Ad oggi, il mercato del pellet è a esclusivo appannaggio della biomassa legnosa, in particolare di quella proveniente dai comparti di prima e seconda lavorazione del legno; tuttavia, diversi sono gli studi rivolti a sviluppare la filiera del pellet da colture erbacee o da una miscela di queste con biomasse legnose. Tuttavia la diversa qualità della biomassa di partenza,

soprattutto in termini di potere calorifico e di contenuto in ceneri, porta a una inevitabile diversa qualità finale del pellet, come diversa sarà la destinazione d'uso [22]. La densità apparente del prodotto (*bulk density*) è di 600 – 1.000 kg/m³, mentre il potere calorifico, che varia in funzione di umidità ed essenza utilizzata, varia in media tra 3.800 e 4.600 kcal/kg [34]. La mancanza di specifiche normative volte a regolamentare la produzione di pellet in Italia, è probabilmente dovuta al fatto che lo sviluppo del mercato di questo biocombustibile nel nostro Paese è recente. Le uniche norme tecniche e legislative attualmente in vigore sono atte a regolamentare il materiale d'origine e il relativo utilizzo su impianti termici generici. Il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), ha fornito, tramite raccomandazione e ora sostituita dalla UNI EN 14961-2 del 2011, una caratterizzazione del pellet mediante l'individuazione di 4 categorie distinte, definite in funzione della materia prima d'origine e delle caratteristiche fisiche e chimiche del prodotto finito. Due di queste categorie (B e C) contemplano anche l'uso di biomassa derivante da colture e residui erbacei, nonché da residui agroindustriali [35]. È da ricordare che le direttive europee n. 2000/76 e n. 2001/80 CEN/TC 335 contemplano anche l'uso di scarti dell'industria agroalimentare.



Figura 6. Pellet derivante da essenze differenti

Tabella 14. Equivalenza energetica tra pellet e combustibili fossili [22].

	Pellet (u=9%)	gasolio	gasolio	olio combust.	gas naturale	GPL	carbone
	kg	litri	kg	kg	m ³	kg	kg
1 kg di pellet u=9%	1,00	0,46	0,40	0,41	0,49	0,37	0,58
1 litro di gasolio	2,17	1,00	0,86	0,89	1,06	0,80	1,25
1 kg di gasolio	2,52	1,16	1,00	1,04	1,24	0,93	1,46
1 kg di olio combustibile	2,43	1,12	0,96	1,00	1,19	0,89	1,40
1 m ³ di gas naturale	2,04	0,94	0,81	0,84	1,00	0,75	1,18
1 kg di GPL	2,72	1,26	1,08	1,12	1,33	1,00	1,57
1 kg di carbone	1,73	0,80	0,69	0,71	0,85	0,64	1,00
p.c.i. (kWh/quantità)	4,70	10,19	11,86	11,40	9,59	12,79	8,14

1.8.4 Il bricchetto

Anche il bricchetto (o *briquette*), al pari del pellet, è un biocombustibile densificato, ottenuto da procedimenti meccanici di pressatura ad alta pressione di materiale lignocellulosico opportunamente polverizzato. Il bricchetto viene comunemente commercializzato sotto forma di cilindri di circa 10 cm di diametro e 30-40 cm di lunghezza [34]. La densificazione della biomassa in bricchetti, presenta gli stessi vantaggi e svantaggi della trasformazione in pellet: in seguito al processo di bricchettatura si ottiene infatti un miglioramento delle caratteristiche fisiche della biomassa (densità, omogeneità, ecc.), una riduzione dei volumi, una riduzione dei costi di stoccaggio e trasporto e un miglioramento del comportamento durante la combustione. Al contempo però il processo di bricchettatura, al pari della pellettizzazione, necessita di un preventivo condizionamento del materiale e in particolare dell'essiccazione della biomassa

fino a valori di umidità pari all'8-10%, al fine di ottenere bricchetti con umidità del 6-8%, condizione per la quale questi mostrano buona resistenza, non si fessurano e il processo di bricchettatura offre buone rese. È necessaria anche una fase di triturazione della biomassa, sino ad ottenere una granulometria di 6-8 mm, per raggiungere il migliore grado di compattazione del materiale e le migliori rese di bricchettatura [22].



Figura 7. Bricchetti semplici (sinistra) e forati al centro per favorire la combustione (destra)

1.9 La conversione energetica – principi e metodi

I metodi di conversione della biomassa sono molteplici. In generale, prima della trasformazione energetica, la biomassa viene processata per essere convertita nelle forme più adatte al trasporto o all'utilizzo finale. Tra le caratteristiche fisiche di cui si è parlato nel paragrafo 1.7.2 rientra il contenuto di acqua; ad un basso contenuto si adattano i processi termochimici, mentre ad alti contenuti sono adatti i processi biochimici. Altro criterio per la scelta della trasformazione più idonea si basa sulla quantità e soprattutto sul rapporto tra gli elementi costituenti la biomassa. In particolare sono molto importanti il rapporto tra idrogeno (H) e carbonio (C), e quello tra ossigeno (O) e carbonio (C), nonché le quantità di azoto e ceneri: in linea generale un alto contenuto di carbonio e idrogeno determina un alto potere calorifico, mentre elevate presenze di ossigeno, azoto e ceneri hanno un effetto opposto. I materiali con rapporto C/N superiore a

30 sono adatti alla combustione, mentre per valori minori di 30 vengono sottoposti a trattamenti biologici [18]. I processi che consentono di convertire l'energia chimica contenuta nelle biomasse in un'altra forma di energia si possono suddividere in due gruppi: processi termo-chimici e processi bio-chimici. I primi impiegano le alte temperature per trasformare le biomasse direttamente in energia termica o produrre materiali e composti chimici ricchi di energia. In questo caso il prodotto finale varia in relazione alle condizioni del processo. I processi biochimici trasformano le biomasse in composti chimici a più alta qualità energetica (principalmente biogas, alcoli e idrogeno) e comprendono la fermentazione aerobica, la fermentazione anaerobica, l'idrolisi acida e l'idrolisi enzimatica [28]. Nei paragrafi seguenti verranno descritti più dettagliatamente tali processi.

1.9.1 La conversione termochimica

Ai fini della produzione energetica è indispensabile trasformare la biomassa in prodotti più facilmente utilizzabili, ad esempio con una modifica termochimica delle sue proprietà. Il processo si basa sull'azione del calore, che permette le reazioni necessarie a trasformare l'energia chimica delle biomasse in ulteriore calore destinato all'utilizzo diretto e/o alla produzione di energia elettrica. Si applica a materiali e residui cellulosici in cui il rapporto tra la frazione massica del carbonio e quella dell'azoto (C/N) sia superiore a 30 e il cui contenuto di umidità sia inferiore al 30%. Si tratta essenzialmente di legna e tutti i suoi derivati, paglia di cereali, residui di potatura dei fruttiferi, taluni scarti di lavorazione (lolla, pula, gusci, noccioli). I processi di conversione di questo tipo sono i seguenti.

Combustione diretta

Si effettua generalmente in caldaie, con buoni rendimenti (80 ÷ 85%) se si utilizzano combustibili tradizionali quali legna derivante da bosco ceduo o piante lignee a crescita rapida e corta rotazione come l'eucalipto, la robinia, il salice, la canna comune, ecc.. Tali prodotti vengono raccolti ogni cinque – dieci anni e

sottoposti al processo di essiccazione naturale e/o artificiale. Risultano composti come riportato in tabella 15.

Tabella 15. Principali polimeri di piante lignee a crescita rapida impiegate a scopo energetico e relativo potere calorifico [18]

	% in peso	p.c.i. [kcal/kg]
cellulosa	40 ÷ 50	4.200
emicellulosa	10 ÷ 20	4.200
lignina	30 ÷ 40	3.700 ÷ 4.000

Varie sono le tecnologie di combustione ma quella per cui si raggiungono i rendimenti più elevati (>90%) ed emissioni inquinanti assai ridotte è la tecnologia a letto fluido. Molto importante è la granulometria della biomassa che deve essere molto ridotta al fine di avere un elevato rapporto superficie/volume necessario per mantenere stabile la combustione [18].

Carbonizzazione

È una trasformazione del legno in carbone, per semplificarne l'uso. Si scalda la legna in un forno in assenza di aria, prima attorno ai 165°C con emissione soprattutto di anidride carbonica, di vapore acqueo e di calore, poi a 250°C con processi di trasformazione a carico della lignina e della cellulosa. La trasformazione è accompagnata dall'emissione, in aggiunta ad anidride carbonica e vapore acqueo, di altri gas tra i quali il metano; si ha inoltre produzione di acido acetico, acetone e catrame. Il risultato finale è il carbone di legna [18].

Gassificazione

La gassificazione è un processo chimico – fisico mediante il quale si trasforma un combustibile solido (legno, scarti agricoli, rifiuti) in un combustibile gassoso composto da: H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄, C_mH_n (idrocarburi vari) e N₂. Il processo si realizza attraverso fasi ben distinte. Nella prima fase, a temperature superiori a 100°C si ha l'essiccazione della biomassa che tuttavia non subisce alcuna decomposizione; nella seconda, tra 300 e 500°C, si ha la pirolisi in cui si

verifica la decomposizione termica in assenza di ossigeno; nella terza, tra 700 e 1.000°C, i prodotti di pirolisi reagiscono con l'ossigeno (ossidazione) per produrre CO, CO₂ e infine si ha la fase di riduzione, caratterizzata da reazioni endotermiche (tra 800 e 1.100°C), in cui è fondamentale il ruolo svolto dall'acqua nella formazione dell'idrogeno H₂. Le prime due reazioni sono esotermiche e apportano l'energia termica necessaria al processo, mentre le altre sono reazioni endotermiche che aumentano la resa di CO, H₂ e di C_mH_n; pertanto maggiore è la temperatura e il tempo di permanenza del materiale nel reattore maggiore sarà il potere calorifico del gas finale [36] [18]. Il prodotto in uscita prende il nome di syngas e gli impianti per la sua produzione si dividono in tre tipologie: a letto fisso, a letto fluido, a letto trascinato. La composizione del syngas in uscita è influenzata principalmente dal tipo e dalla quantità del mezzo gassificante (aria, O₂, vapore, CO₂, loro miscele), dal tipo di fonte di calore disponibile, dall'intensità di mescolanza tra biomassa e gassificante, dal tempo di ritenzione della biomassa e del gas nel reattore, dalla temperatura e pressione del reattore, dal tipo e la forma della biomassa [37].

Pirolisi (distillazione secca)

È un processo ottenuto mediante l'applicazione di calore a temperature comprese tra 400 e 800°C in completa assenza di ossigeno, oppure in quantità molto ridotte (in tal caso si tratta di una parziale gassificazione). Si applica prevalentemente su piante lignocellulosiche; i prodotti sono sia gas ad alto potere calorifico grazie all'elevata presenza di composti organici ossigenati (catrami) allo stato di vapore, sia liquidi (Bio-oil) che solidi (il cosiddetto char, un complesso agglomerato costituito principalmente da carbonio, ceneri, composti solfurei e idrocarburi volatili), in proporzioni che dipendono dai metodi di pirolisi (veloce, lenta o convenzionale) e dai parametri di reazione [18]. In alternativa al trattamento di incenerimento è stato proposto l'impiego della pirolisi per lo smaltimento (con recupero di energia) dei rifiuti solidi urbani. Si producono un gas combustibile (contenente essenzialmente ossido di carbonio, idrogeno, metano) di facile utilizzabilità e un residuo solido, di volume e massa notevolmente ridotti rispetto al rifiuto trattato, che di solito è bruciato nello

stesso impianto di pirolisi o viene inertizzato e poi avviato a discarica. Sono stati costruiti impianti di pirolisi anche per il trattamento di rifiuti industriali.

1.9.2 La conversione biochimica

In tale processo la biomassa viene modificata chimicamente grazie all'azione di enzimi, funghi e microrganismi che si formano sotto particolari condizioni; viene applicata per quei materiali il cui già citato rapporto C/N sia inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta superiore al 30%. Sono quindi idonei a tale conversione i reflui zootecnici, alcuni scarti di lavorazione (borlande, acqua di vegetazione, ecc.) e la biomassa eterogenea immagazzinata nelle discariche controllate. Di seguito la descrizione dei processi principali [18].

Digestione anaerobica

La digestione anaerobica comporta una serie di reazioni metaboliche quali l'idrolisi, l'acidificazione, acetogenesi e metanogenesi condotte da vari gruppi di microrganismi. Il primo gruppo di microrganismi idrolizzano enzimaticamente i composti organici complessi dei monomeri (ad esempio glucosio, aminoacidi), che vengono successivamente convertiti in acidi grassi volatili superiori (VFA), H_2 e acido acetico. Poi, l'acetogenesi converte gli acidi grassi volatili superiori prodotti, es, acido propionico e acido butirrico, in H_2 , CO_2 e acido acetico. Alla fine, i batteri metanogeni convertono H_2 , CO_2 e acetato in CH_4 e CO_2 . La composizione tipica del biogas prodotto è mostrata in tabella 16 [38]. La sostanza prodotta è dunque un biogas costituito per il 50 ÷ 80% da metano e per la restante parte da CO_2 con un potere calorifico variabile da circa 18.000 [kJ/Nm³] a 28.650 [kJ/Nm³]. L'anidride carbonica può essere successivamente eliminata e il gas utilizzato come combustibile per alimentare caldaie a gas e per produrre calore e/o energia in motori a combustione interna [18]. Poiché la digestione anaerobica può essere considerata anche come un processo di trattamento di inquinanti, le condizioni operative possono essere scelte per realizzare la massima resa di depurazione o la massima resa di prodotti energetici. I vantaggi derivanti da tale processo sono quindi molteplici:

- produzione di energia da fonti rinnovabile;
- miglioramento dell'economia delle aziende zootecniche e/o agricole;
- minori emissioni gas serra, migliore qualità di fertilizzanti prodotti;
- demolizione di rifiuti agricoli industriali e civili che possono creare problemi di inquinamento e di salute pubblica;
- minore inquinamento da odori e ridotta presenza di insetti;
- miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie dell'azienda.

Tabella 16. Composizione del biogas prodotto dalla digestione anaerobica

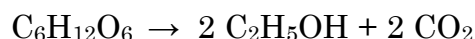
Composto	Concentrazione nel biogas
CO ₂	25 – 50
Metano	50 – 75
Acqua	6 – 6,5
O ₂	0,9 – 1,1
N ₂	3,9 – 4,1
H ₂	< 0,1 – 0,8
H ₂ S	
Ammoniaca	< 0,1 – 1

Digestione aerobica

Il processo consiste nella metabolizzazione delle sostanze organiche per opera di microrganismi, il cui sviluppo è condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi batteri convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO₂ e H₂O e producendo un elevato riscaldamento del substrato (lo strato sottostante di biomassa non ancora digerito dai batteri), proporzionale alla loro attività metabolica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido. È un processo particolarmente indicato negli impianti di depurazione degli liquami [18].

Fermentazione alcolica

È un processo di tipo micro-aerofilo che opera la trasformazione dei glucidi (carboidrati) contenuti nelle produzioni vegetali in alcool etilico (C_2H_5OH), che viene così denominato bioetanolo:



Si applica quindi per materiali zuccherini (ricchi di carboidrati) come canna da zucchero, bietola, sorgo zuccherino, taluni frutti, ecc., per materiali amidacei (ricchi di amido) come grano, mais, orzo, patata e sorgo da granella. In alternativa può essere prodotto anche da materiali lignocellulosici (ricchi di cellulosa) come paglia, stocchi del mais e scarti legnosi; in questo caso la biomassa viene idrolizzata (scissa tramite l'azione dell'acqua) per trattamento con acido solforico per produrre zuccheri, che successivamente vengono inviati alla fermentazione utilizzando flore batteriche modificate geneticamente. Il bioetanolo può essere utilizzato in motori a combustione interna come additivo della benzina fino al 15% in peso senza dover apportare modifiche al motore, o può essere combinato con isobutene per produrre l'ETBE (EtilTerButilEtere) come è avvenuto in Brasile in cui è diventato carburante unico in sostituzione della benzina [18].

Esterificazione degli oli vegetali

È un processo caratterizzato dalla reazione di trans esterificazione, chiamata anche alcoolisi, in cui un olio vegetale, ricavato dalla spremitura dei semi di piante oleaginose (girasole, colza, soia, palma, jatropha, cocco, arachidi) è fatto reagire con un eccesso di alcool metilico (metanolo), in presenza di un catalizzatore alcalino (idrossido di potassio KOH, o soda caustica NaOH). La reazione è:



Il rapporto molare tra metanolo e olio (o trigliceride) è di 3:1 ma, per spostare l'equilibrio verso la massima resa in estere, il rapporto deve essere più alto e precisamente di 6:1. Durante la transesterificazione il trigliceride è convertito in successivi passaggi a estere metilico (biodiesel) e glicerolo; sempre ai fini di massimizzare la resa in estere è opportuno allontanare la glicerina che risulta parzialmente solubile nella miscela di reazione. La glicerina espulsa possiede comunque un alto valore economico per le sue applicazioni nel campo della cosmesi e dell'industria farmaceutica. Il bilancio di massa della reazione è:

$$\begin{array}{ccccccc} 1.000 \text{ kg} & & 100 \text{ kg} & & 1.000 \text{ kg} & & 100 \text{ kg} \\ \text{olio raffinato} & + & \text{metanolo} & = & \text{biodiesel} & + & \text{glicerina} \end{array}$$

La temperatura di reazione dipende dalla natura dei reagenti e più in particolare dalla natura dei catalizzatori. Con catalizzatore alcalino (KOH o NaOH) la reazione può avvenire a temperatura ambiente, invece con catalizzatore acido (acido solforico o cloridrico) le temperature possono superare i 100°C. la catalisi alcalina è quella industrialmente più utilizzata, però è necessaria la raffinazione degli oli per eliminare gli acidi grassi e gli alcoli anidri per evitare formazione di saponi [18].

CAPITOLO 2

2.1 Normativa di riferimento in materia di rifiuti

È ormai generalmente riconosciuto il potenziale dell'agricoltura nella produzione di energia da fonti rinnovabili, tanto che vi è un dibattito acceso sulla competizione nel settore agricolo tra produzioni destinate all'alimentazione e produzioni a scopo energetico. Esiste però un secondo aspetto meno conflittuale che merita di essere approfondito, quello della valorizzazione energetica delle biomasse residuali di origine agricola, intendendo con questo termine sia i residui agricoli derivanti dalla raccolta di prodotti per uso alimentare sia i residui derivanti da processi produttivi agro-industriali.

La normativa vigente in materia di rifiuti agricoli è in continua evoluzione. La prima norma risale al 1982 (DPR n. 915) a cui ha fatto seguito il Decreto Ronchi, modificato dal D. Lgs. n. 152 del 2006 "Norme in materia ambientale", ulteriormente modificato dal D. Lgs. n. 4 del 16 gennaio 2008. Il 25 dicembre 2010 è entrato in vigore il D. Lgs. n. 205 intitolato: *"Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive"*. Il testo si compone di 39 articoli e 6 allegati, che vanno a modificare le disposizioni, contenute nel *"D. Lgs n. 152/2006 Norme in materia ambientale"*, sulla gestione dei rifiuti senza incidere però sulla bonifica dei siti inquinati. Infine, la normativa del 27 febbraio 2009 n. 13 stabilisce all'art. 8-quater che gli Accordi di Programma per la gestione dei rifiuti "possono prevedere semplificazioni amministrative" da concordare con la pubblica amministrazione. Queste norme si prestano a diverse interpretazioni, così accade che vi siano modalità di gestione dei rifiuti agricoli in Italia con differenze sostanziali già a livello locale. Per far luce su questa materia appare quanto mai utile chiarire quali siano gli obblighi prioritari per gli operatori agricoli e come districarsi nella giungla normativa, contenendo la produzione e i costi di gestione dei rifiuti, evitando gravi sanzioni penali ed amministrative.

2.2 Residui colturali, rifiuti o sottoprodotti agricoli

Per una corretta gestione di ramaglie, sarmenti o potature bisogna capire anzitutto se i residui colturali sono rifiuti o sottoprodotti agricoli. Per comprendere se una sostanza sia considerata rifiuto bisogna ricorrere alla nozione contenuta nell'art. 183 del D. Lgs. 152/06 che definisce rifiuto “*qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi*” [39]. La legge quadro in materia di rifiuti prevede però casi di esclusione per talune sostanze agricole: “*paglia, sfalci di potature, nonché altro materiale agricolo o forestale naturale non pericoloso utilizzato in agricoltura, nella selvicoltura o per la produzione di energia da tale biomassa mediante processi o metodi che non danneggino l'ambiente né mettano in pericolo la salute umana*” (c. 1, art. 185, lett f) del D. Lgs. 152/2006 e s.m.i.). detta esclusione va riferita esclusivamente ai materiali provenienti da attività agricola o forestale destinata agli utilizzi descritti dalla norma di cui all'art. 185, c. 1, lett. f) del Codice ambientale e non può essere estesa agli scarti vegetali provenienti da giardini, parchi e aree cimiteriali, in quanto classificati come rifiuti urbani.

2.3 Sottoprodotti agricoli

In virtù di quanto stabilito dall'art. 185 del Codice ambientale, affinché certe sostanze agricole non vengano considerate rifiuti devono essere rispettate contemporaneamente le seguenti condizioni (criteri di esclusione):

- uso diretto in agricoltura, nella selvicoltura (usi agronomici) ovvero la produzione di energia o calore (usi energetici):
- processi o metodi che non devono né danneggiare l'ambiente, né mettere in pericolo la salute umana.

Qualora i materiali agricoli venissero avviati a impianti di recupero di rifiuti (impianti di compostaggio) decade il principio di esclusione, proprio in virtù della nozione stessa di rifiuto, in quanto esiste da parte del soggetto interessato (l'agricoltore) “l'intenzione di disfarsene”. Allo stesso modo, qualora l'utilizzo di dette sostanze avvenga mediante processi che arrecano pregiudizio

all'ambiente o compromettano la salute umana, ciò rappresenta un'attività che fa considerare gli scarti agricoli rifiuti. Gli usi (agronomici o per la produzione di energia e calore) degli scarti agricoli sopra descritti devono essere quindi leciti, ossia consentiti dalla legge mediante, per l'appunto, processi o metodi che non danneggiano l'ambiente, né mettono in pericolo la salute umana.

2.4 Il caso delle biomasse

Per le biomasse agricole l'esclusione dal campo di applicazione dei rifiuti è condizionata all'avvio a una filiera certa di utilizzo (agronomica o agri-energetica) secondo processi o metodi stabiliti, di norma, da:

- art. 112 del D. Lgs. 152/2006 e decreto ministeriale attuativo del 17 aprile 2006 relativamente all'utilizzazione agronomica di certe sostanze agricole;
- allegato X, parte quinta del medesimo decreto 152/2006 che disciplina l'uso di combustibili (per esempio combustibili vegetali o biogas);
- D. Lgs. 75/2003 che disciplina l'immissione sul mercato dei prodotti fertilizzanti.

Di seguito si riporta la tabella indicativa, ma non esaustiva, relativa agli usi consentiti delle biomasse agricole inclusi i residui colturali e lignocellulosici [40].

Sostanze	Uso	Condizioni di utilizzo	Rifiuto o non rifiuto?
Effluenti di allevamento	Agronomico	Decreto del ministro delle politiche agricole del 17 aprile 2006 e regolamenti regionali (direttiva nitrati) in attuazione dell'art. 112 del D. Lgs. 152/2006 relativamente all'utilizzo agronomico	Esclusi dal campo di applicazione dei rifiuti, ai sensi dell'art. 185 del D. Lgs. 152/2006 e smi
Acque di vegetazione e dei frantoi oleari	Agronomico	L. 11.11. 996, n. 574 - Utilizzazione agronomica delle acque di vegetazione e di scarichi di frantoi oleari - e art. 112 del D. Lgs. 152/2006	Esclusi dal campo di applicazione dei rifiuti, ai sensi dell'art. 185 del D. Lgs. 152/2006 e smi
Acque reflue provenienti dalle aziende di cui all'art. 101, c. 7, lett. a), b) e c) del D. Lgs. 152/2006, e da piccole aziende agroalimentari	Agronomico	Regolamenti regionali (direttiva nitrati) in attuazione dell'art. 112 del D. Lgs. 152/2006 relativamente all'utilizzo agronomico	Esclusi dal campo di applicazione dei rifiuti, ai sensi dell'art. 185 del D. Lgs. 152/2006 e smi
Letame	Ammendante	Allegato 2, D. Lgs. 75/2010 disciplina in materia di fertilizzanti	Escluso dal campo di applicazione dei rifiuti, ai sensi dell'art. 185 del D. Lgs. 152/2006 e smi
Pollina	Combustibile	Sez. 4, parte II dell'all. X alla parte V del D. Lgs. 152/2006 - Condizioni di utilizzo: la conversione energetica delle biomasse può essere effettuata attraverso la combustione diretta, ovvero previa pirolisi o gassificazione nel medesimo ciclo produttivo	Sottoprodotto (non rifiuto), così come stabilito dalla legge 4 giugno 2010, n. 96
Biomasse agricole materiali vegetali, sottoprodotti di origine animale, effluenti zootecnici	Produzione biogas proveniente dalla fermentazione anaerobica metanogenica di sostanze organiche, quali per esempio effluenti di allevamento, prodotti agricoli o borlande di distillazione, purché tali sostanze non costituiscano rifiuti. In particolare non deve essere prodotto da discariche, fanghi, liquami e altri rifiuti a matrice organica	Sez. 4, parte II dell'all. X alla parte V del D. Lgs. 152/2006 - Condizioni di utilizzo: l'utilizzo del biogas è consentito nel medesimo comprensorio in cui tale biogas è prodotto	Esclusi dal campo di applicazione dei rifiuti, ai sensi dell'art. 185 del D. Lgs. 152/2006 e smi
Materiali vegetali prodotto dal trattamento esclusivamente meccanico, lavaggio con acqua o essiccazione di coltivazioni agricole non dedicate o prodotti agricoli	Combustibile vegetale	Sez. 4, parte II dell'all. X alla parte V del D. Lgs. 152/2006 - Condizioni di utilizzo: la conversione energetica delle biomasse può essere effettuata attraverso la combustione diretta, ovvero previa pirolisi o gassificazione nel medesimo ciclo produttivo	Esclusi dal campo di applicazione dei rifiuti, ai sensi dell'art. 185 del D. Lgs. 152/2006 e smi
Materiali vegetali prodotti interventi previa pirolisi o gassificazione selvicolturali, da manutenzione forestale e da potatura			
Vinacce vergini, vinacce esauste e loro componenti, bucce, vinaccioli e raspi	Combustibile	Sez. 4, parte II dell'all. X alla parte V del D. Lgs. 152/2006 - Condizioni di utilizzo: la conversione energetica delle biomasse può essere effettuata attraverso la combustione diretta, ovvero previa pirolisi o gassificazione nel medesimo ciclo produttivo	Sottoprodotti (non rifiuto), così come stabilito dalla legge 4 giugno 2010, n. 96

2.5 Il reato di bruciatura in campo dei residui colturali

Bruciare in campo residui colturali o della vegetazione (addebbiatura) è una pratica rudimentale di fertilizzazione diffusa in passato tra gli agricoltori. Le ceneri derivanti dalla combustione venivano utilizzate come ammendante del terreno in ragione della loro capacità di fornire alle piante determinati nutrienti quali calcio (Ca), sodio (Na), potassio (K), manganese (Mg), boro (B), zolfo (S), molibdeno (Mo), che coadiuvano alla crescita delle piante e regolano la condizione di carenza di nutrienti nel suolo. Tuttavia la carenza di azoto (N) e fosforo (P), che si riscontra nelle ceneri stesse, unitamente alla presenza occasionale di metalli pesanti (Ni , Pb , Cd , B , Se , Al , ecc.), crea un effetto negativo nel terreno oltre che nelle piante [41]. In alcune regioni italiane viene ancora praticata per l'eliminazione delle stoppie di cereali dopo la mietitura, dei residui di potatura nei frutteti, vigneti o oliveti e degli scarti non commerciabili degli arboreti da legno. Nonostante in alcuni casi sia stata autorizzata da provvedimenti locali (regionali, provinciali, ecc.), la bruciatura in campo è vietata dal Codice ambientale, a eccezione di specifici casi di deroga (interventi fitosanitari o gestione delle stoppie).



Figura 8. Eliminazione delle potature tramite bruciatura. I residui di biomassa vengono spinti fuori dal campo e bruciati in zone limitrofe. Questa pratica, estremamente diffusa nella provincia di Viterbo è considerata come gestione illecita di rifiuti dal D. Lgs. 152/2006 e punita ai sensi del c. 1, art. 256 del medesimo decreto.

Di norma, bruciare in campo residui colturali (sarmenti, ramaglie, sfalci di potature) non è un'attività lecita. Il decreto del MIPAAF, n. 30125 del 22 dicembre 2009, che disciplina il regime di condizionalità ai sensi del regolamento (Ce) n. 73/2009 – norma di attuazione del regolamento europeo sulla pac di carattere generale e non regolamentare – vieta infatti la bruciatura delle stoppie. Al riguardo, all'allegato 2 del citato decreto vengono stabilite le misure da adottare per la corretta gestione dei residui colturali, al fine di preservare livelli di sostanza organica presente nel suolo, nonché per garantire la tutela della fauna selvatica e la protezione dell'habitat. A norma dell'art. 22, comma 3 dello stesso decreto ministeriale, in assenza di provvedimenti delle Regioni e delle Province autonome, è previsto il divieto di bruciatura delle stoppie e delle paglie. Nel caso di ricorso alla deroga è necessario effettuare interventi alternativi di

ripristino del livello di sostanza organica del suolo tramite sovescio, letamazione o altri interventi di fertilizzazione organica.

Le deroghe alla bruciatura in campo aperto delle stoppie sono previste solo ed esclusivamente per i seguenti casi:

- superfici investite a riso;
- interventi connessi a emergenze di carattere fitosanitario prescritti dall'Autorità competente;
- norme regionali inerenti la regolamentazione della bruciatura delle stoppie e delle paglie.

2.5.1 Un caso legale

Nella sentenza del Tribunale di Trento del 6 marzo 2007 veniva condannato l'imputato alla pena di 3 mesi di arresto, ai sensi dell'art. 256, c. 1, lett. a) del D. Lgs. 152/2006, per aver bruciato in campo aperto le potature derivanti dal taglio di alberi. I giudici di merito ritenevano che il taglio di alberi, se compiuto nell'ambito della selvicoltura, costituisse attività produttiva e che lo smaltimento, mediante incenerimento delle ramaglie residue fosse illecito «non potendo essere considerato una forma di utilizzazione del prodotto nell'ambito di un'attività produttiva». Pertanto l'imputato ha svolto un'attività di smaltimento (operazione D10-incenerimento a terra) di rifiuti speciali non pericolosi, costituiti da scarti vegetali (CER 01.01.03) provenienti da operazioni di abbattimento di piante di abete rosso, effettuate dallo stesso all'interno del terreno di sua proprietà, non autorizzata. L'imputato proponeva ricorso in Cassazione, la quale confermava la sentenza del Tribunale di Trento (Sez. III n. 46213 del 16 dicembre 2008 - Ud. 4 novembre 2008). Nella sentenza della Cassazione i giudici di merito hanno quindi sancito che: «Il taglio di alberi, eseguito nell'ambito della selvicoltura, costituisce attività produttiva e quindi trova applicazione il D. Lgs. 152/2006. L'eliminazione, mediante incenerimento, dei rami degli alberi tagliati (per circa 1 m³) non usufruibili in processi produttivi non costituisce una forma di utilizzazione nell'ambito di attività produttive. Inoltre non trova riscontro nelle tecniche di coltivazione attuali l'utilizzazione delle ceneri come concimante

naturale. Tale materiale, pertanto, non può essere considerato materia prima secondaria riutilizzata in diversi settori produttivi senza pregiudizio per l'ambiente». Bruciare in campo aperto residui colturali (stoppie, sarmenti, sfalci o potature) da parte di imprenditori agricoli al solo scopo di disfarsene, per evitare metodi di trattamento più onerosi ma legali, è quindi un'attività di gestione illecita di rifiuti punita ai sensi del c. 1, art. 256 del D. Lgs. 152/2006. L'illecito è costituito da una vera e propria attività di gestione, che la norma qualifica espressamente come «attività di raccolta, trasporto, recupero, smaltimento, commercio e intermediazione di rifiuti», in assenza della prescritta autorizzazione, iscrizione o comunicazione (art. da 208-212 e da 214-216 del Codice ambientale) ed è sanzionato con la pena dell'arresto o dell'ammenda. Se si tratta di rifiuti non pericolosi l'ammenda è alternativa all'arresto (c. 1, art. 256, lett. a), mentre per i rifiuti pericolosi, l'ammenda si cumula con l'arresto, e la pena prevista dell'arresto è doppia rispetto a quella per i rifiuti non pericolosi (c. 1, art. 256, lett. b). A eccezione delle deroghe previste per legge (interventi fitosanitari e gestione delle stoppie), l'imprenditore agricolo che brucia in campo aperto residui colturali rischia quindi l'arresto da 3 mesi a 1 anno o un'ammenda da 2.600 a 26.000 euro, secondo quanto stabilito al c. 1, art. 256, let. a) del D. Lgs. n. 152 del 2006.

2.6 Codice ambientale, norma di riferimento

La pratica di bruciare in campo aperto dei residui colturali (stoppie, ramaglie, sarmenti, ecc.) risulta in Italia ancora diffusa, in quanto autorizzata da ordinanze sindacali o regolamenti regionali, in deroga al Codice ambientale. Nonostante i provvedimenti emanati da autorità locali, bruciare in campo aperto residui colturali è un reato a eccezione dei casi di deroga previsti per legge (interventi fitosanitari o gestione delle stoppie). Nel Codice ambientale (D. Lgs. 152/2006), norma di riferimento, non sembra prevista la possibilità di attribuire alle Regioni o Province autonome la facoltà di regolamentare tale pratica agricola in deroga alla norma generale. Infatti, come ribadito nella sentenza della Corte costituzionale del 14-3-2008 n. 62 «la disciplina ambientale, che scaturisce

dall'esercizio di una competenza esclusiva dello Stato», quella in materia di «tutela dell'ambiente e dell'ecosistema», cui, come precisato, pacificamente è riconducibile il settore dei rifiuti, «viene a funzionare come un limite alla disciplina che le Regioni e le Province autonome dettano in altre materie di loro competenza, per cui queste ultime non possono in alcun modo derogare o peggiorare il livello di tutela ambientale stabilito dallo Stato» (sentenza n. 378 del 2007). Norme statali o regionali, provvedimenti di autorità locali (Province o Comuni) dovrebbero adeguarsi alla legge quadro in materia di rifiuti e non possono prevedere disposizioni in deroga alla norma stessa, in quanto opererebbero fuori da ogni logica giuridica. L'ambiente è, infatti, funzione esclusiva dello Stato, che deve essere tutelato come un bene di rango costituzionale «primario» e «assoluto» e come tale inderogabile dalle altre discipline di settore. Le Regioni, ad altre autorità locali, autorizzando, in deroga alla normativa sovraordinata pongono false aspettative a coloro a cui la norma è rivolta, aumentando il rischio di contenziosi con le autorità di controllo. Pertanto, nel caso dell'imprenditore agricolo che brucia in campo residui colturali si potrebbe applicare una sanzione ai sensi dell'art. 256 del Codice ambientale, in quanto la norma regionale, dalla quale egli ritiene di essere tutelato, potrebbe essere disapplicata dal giudice, tenuto ad assicurare l'applicazione diretta del Codice ambientale, quale normativa primaria sovraordinata.

2.7 I residui della potatura del nocciolo

Nel Viterbese si concentra oltre il 90% della superficie corilicola laziale, pari a circa 18.400 ha, collocando la provincia al primo posto per importanza produttiva a livello nazionale [42][15]. L'intervento di potatura è un elemento imprescindibile per il miglioramento qualitativo delle nocciole. La potatura mira a stabilire un rapporto di equilibrio tra l'attività produttiva e quella vegetativa, limitando il fenomeno dell'alternanza e della cascola anticipata delle nocciole. L'eliminazione delle branche e dei rami in eccesso, delle parti secche e malate della pianta, permette maggiore penetrazione della luce all'interno della chioma. Il nocciolo produce su rami che si sono sviluppati l'anno precedente. I rami corti,

di 5 – 6 cm. di lunghezza, sono pressoché sterili, mentre, ai fini produttivi, i rami migliori sono quelli con una lunghezza di 15-20 cm [43]. Le operazioni di potatura sono effettuate durante l'inverno, quando le piante si trovano nella fase di riposo vegetativo, compreso tra la fine della caduta delle foglie e l'inizio della fioritura; queste riguardano l'asportazione di rami secchi o vecchi e dei polloni [44].

Si possono distinguere vari tipi di potatura:

- potatura di allevamento
- potatura di produzione
- potatura di ringiovanimento
- potatura di risanamento.

La **potatura di allevamento** ha lo scopo di formare la pianta in relazione alla forma di allevamento, scelta tra quella a cespuglio, a vaso cespugliato, ad alberello.

La **potatura di produzione** serve a mantenere la pianta equilibrata. Vengono eliminati i succhioni e la chioma viene “alleggerita” al suo interno per consentire il passaggio della radiazione solare.

Tutto ciò consente l'emissione di rametti più lunghi sui quali, l'anno successivo, si avrà maggiore fruttificazione. Nei noccioli in produzione occorre effettuare tagli di ritorno per stimolare la pianta a produrre rami nuovi.

Negli ultimi anni si sono svolte molte prove di potatura meccanica sul nocciolo, utilizzando sistemi e tecniche d'intervento diverse fra loro al fine di valutare i reali vantaggi che questa nuova tecnica di potatura potrebbe portare [45]. Sostanzialmente la potatura manuale tradizionale è sostituita da una potatura meccanica eseguita con particolari dischi montati su barre orientabili (Figura 9).



Figura 9. Potatura meccanica del nocciolo in pieno inverno (sinistra) e durante la ripresa vegetativa (destra)

Nell'ottica di una valorizzazione energetica delle biomasse lignocellulosiche, i residui di potatura del nocciolo hanno suscitato non poco interesse da parte di agricoltori e ricercatori, che ne vedono, in virtù di una buona potenzialità energetica, una realistica e fattibile applicazione come combustibili [45][46].

CAPITOLO 3

MATERIALI E METODI

3.1 Le cultivar indagate

La specie vegetale indagata in questo lavoro è il nocciolo, *Corylus avellana* L. Le cultivar considerate sono la Tonda Gentile Romana, la Tonda di Giffoni e il Nocchione. La Tonda Gentile Romana è la cultivar più rappresentata negli impianti della provincia di Viterbo, con una quota di circa il 90%, e presenta una buona adattabilità a diverse condizioni ambientali e pedoclimatiche. Le altre due cultivar, presenti sempre nella provincia, rappresentano il restante 10% degli impianti, insieme alla Tonda Gentile Trilobata (ex Tonda Gentile delle Langhe), e assolvono anche alla funzione di impollinatori.

Una seconda specie arborea è stata oggetto di questo studio, l'olivo, *Olea europaea*; tuttavia, i dati relativi alla stima del potenziale produttivo, sempre riferiti alla potatura, risultano ancora incompleti e non esaustivi. La quantità di biomassa prodotta, nel caso dell'olivo, è fortemente correlata all'invecchiamento della pianta; si denota pertanto un aumento di potatura prodotta molto più marcato di quello osservato per il nocciolo, per il quale le differenze di biomassa da pianta a pianta, subiscono variazioni molto più contenute con l'avanzare degli anni. A causa di una tale variabilità dei dati raccolti, ci è sembrato opportuno non includere questa pianta nella prima parte dei risultati, considerandone solo ed esclusivamente la caratterizzazione energetica della biomassa.

3.2 Indagini in campo

Le attività presentate in questo lavoro si riferiscono agli anni 2012 e 2014. Le aziende oggetto dello studio ricadono all'interno del comprensorio dei Monti Cimini, in provincia di Viterbo e sono rappresentative della realtà corilicola del

territorio. Oggetto di questo studio sono noccioleti disetanei e con differente sesto d'impianto (figura 10). Nell'anno 2012 sono state individuate 26 aziende ad indirizzo corilicolo per una superficie pari a circa 205 ha; nell'anno 2014 altre 26 aziende sono state selezionate per lo studio, per una superficie di circa 115 ha. In totale, nei due anni di studio sono stati campionati 320 ha.



Figura 10. Differenze morfologiche tra impianti corilicoli disetanei, 8 anni a sinistra e 50 a destra

Le indagini in campo hanno riguardato la raccolta e la pesatura di biomassa ottenuta dalla potatura, attraverso un sistema cosiddetto “a griglia” che sarà descritto dettagliatamente nel paragrafo 3.3. Le uscite in campo, finalizzate alla stima della biomassa residua, sono avvenute nel periodo di tempo compreso tra i mesi di novembre e aprile, per i rispettivi anni di indagine; la reperibilità di questo materiale, per un periodo di tempo così elevato, è legata a diversi fattori quali le condizioni meteorologiche, la disponibilità o le abitudini dell'agricoltore a eseguire la potatura, permanenza della biomassa in campo prima della sua eliminazione.

Per le operazioni di pesatura è stata realizzata una scheda di acquisizione dati, per la quale si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 14778/2011, che disciplina i metodi per la preparazione dei piani e dei certificati di campionamento e per il prelievo di campioni di biocombustibili solidi da, per esempio, aree di coltivazione della materia prima, impianti di produzione, camion o stoccaggi [47] (Figure 11 e 12). La scheda è stata adattata alle esigenze specifiche dello studio.

Piano di campionamento e certificato di campionamento (UNI EN 14778)		
campionatore	Riferimento N.	Data e ora
	Nome e cognome	Cellulare
	E-mail	Telefono
	Indirizzo	Fax
cliente	Nome e cognome	Cellulare
	Nome azienda	Telefono / fax
	Indirizzo	E-mail
lotto	Coordinate GPS del lotto	Superficie campionata (ha)
	Superficie totale (ha)	Tipo di campione raccolto
	Condizioni meteorologiche	varietà
impianto	Tipologia di potatura	Età (anni)
	Attuale utilizzo della biomassa	Irriguo
	Produzione/anno/ha	Resa sgusciato (%)
	Distanza media sulla fila (m)	Sesto d'impianto (m)
	Distanza tra le file (m)	N° piante\ha

Figura 11. Scheda di acquisizione dati – parte generale

Dati del campionamento						
	distanza sulla fila (m)	distanza tra le file (m)	n. piante	superficie (m ²)	ramaglie (kg)	polloni (kg)
sub-lotto 1						
sub-lotto 2						
sub-lotto 3						
sub-lotto 4						
sub-lotto 5						
sub-lotto 6						
TOTALE						

	biomassa\pianta (kg)	biomassa\ha (kg)	polloni sulla biomassa campionata (%)
			

Figura 12. Scheda di acquisizione dati – parte specifica

Al termine della pesatura, sono stati prelevati dal campo campioni di biomassa da analizzare in laboratorio. I campioni sono stati suddivisi in: ramaglie, polloni, foglie e brattee; per ciascuna di queste tipologie è stata eseguita una caratterizzazione sperimentale di laboratorio.

3.3 Strumentazione

La strumentazione predisposta per le indagini in campo è la seguente:

- **macchina fotografica georeferenziata.** (Coolpix av110);
- **corda** per legare in fascine le potature raccolte;
- **guanti da lavoro;**
- **dinamometro** per la pesa delle fascine;

- **scheda acquisizione dati** per l'intervista e la raccolta dei dati del nocciolo;
- **asta** per l'attacco del dinamometro durante la pesa;
- **rotella metrica** per la misurazione del sesto d'impianto;
- **barattoli in vetro** per la raccolta dei campioni;
- **etichette adesive** da applicare sul barattolo;
- **forbici da potatura** per campionamento biomassa.

3.4 Classi di età e densità d'impianto

Come detto all'inizio, gli impianti indagati si presentavano diversi tra loro sia per età che per densità d'impianto. Per ottenere un risultato più accurato possibile, nei limiti della aleatorietà, sono state individuate 6 classi di età e si è tenuto conto del numero di piante ad ettaro (Tabelle 17 e 18).

Tabella 17. Divisione dei noccioli in classe d'età

Età delle piante (anni)	da 1 a 10	da 11 a 20	da 21 a 30	da 31 a 40	da 41 a 50	oltre 50
Classe di età	A	B	C	D	E	F

Tabella 18. Metodo per il calcolo della densità d'impianto mediante la misura delle distanze tra le piante.

NUMERO DI PIANTE PER ETTARO												
Distanza tra le piante sulla fila	Distanza tra le file											
	metri	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
	2,5	1000	889	800	727	667	615	571	533	500	471	444
	3	833	741	667	606	556	513	476	444	417	392	370
	3,5	714	635	571	519	476	440	408	381	357	336	317
	4	625	556	500	455	417	385	357	333	313	294	278
	4,5	556	494	444	404	370	342	317	296	278	261	247
	5	500	444	400	364	333	308	286	267	250	235	222
	5,5	455	404	364	331	303	280	260	242	227	214	202
	6	417	370	333	303	278	256	238	222	208	196	185
	6,5	385	342	308	280	256	237	220	205	192	181	171
	7	357	317	286	260	238	220	204	190	179	168	159
	7,5	333	296	267	242	222	205	190	178	167	157	148
	8	313	278	250	227	208	192	179	167	156	147	139
	8,5	294	261	235	214	196	181	168	157	147	138	131
	9	278	247	222	202	185	171	159	148	139	131	123

3.5 Descrizione del metodo di campionamento

Le aziende corilicole esaminate, divise tra 2012 e 2014, sono riportate in Figura 13.

Come detto in precedenza, i nocioleti esaminati presentavano differenze per quanto concerne l'età delle piante, il numero di piante per ettaro e cultivar allevata.

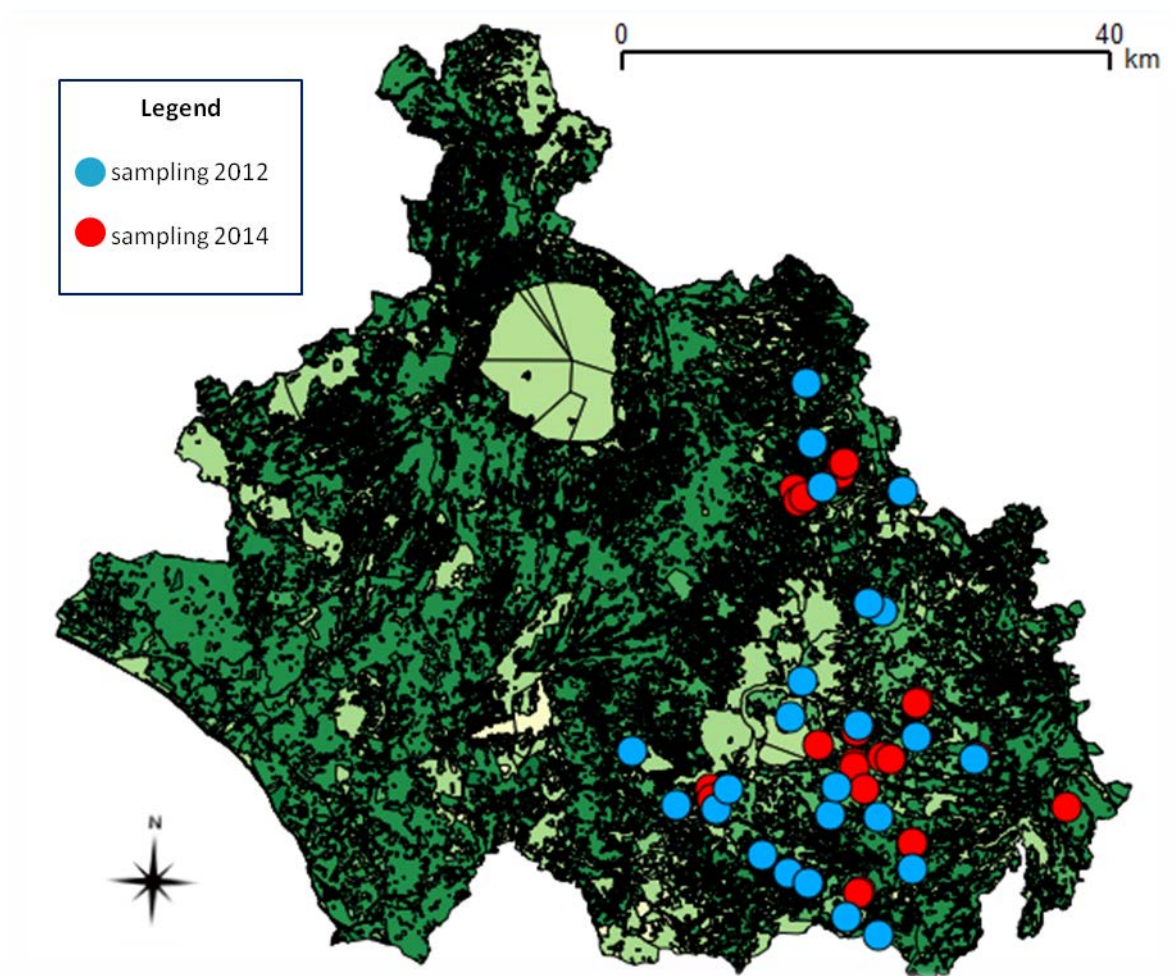


Figura 13. Aziende campionate nei due anni di rilevamenti

Generalmente, negli impianti regolari, gli agricoltori, al termine delle operazioni di potatura, dispongono le ramaglie in andane per facilitarne la rimozione o la trinciatura mediante mezzi meccanici (figura 14). In altri casi, laddove non esista una regolarità del sesto d'impianto o sussistano condizioni orografiche svantaggiose, la potatura viene lasciata a terra, in prossimità della pianta, per poi essere rimossa manualmente in un secondo momento.



Figura 14. Disposizione delle ramaglie in andane (sinistra) per consentirne la rimozione con mezzi meccanici (destra)

Nel caso di impianti regolari, le potature sono organizzate su file alterne; in presenza di quantitativi ingenti invece, queste vengono disposte su tutte le file (figura 13).

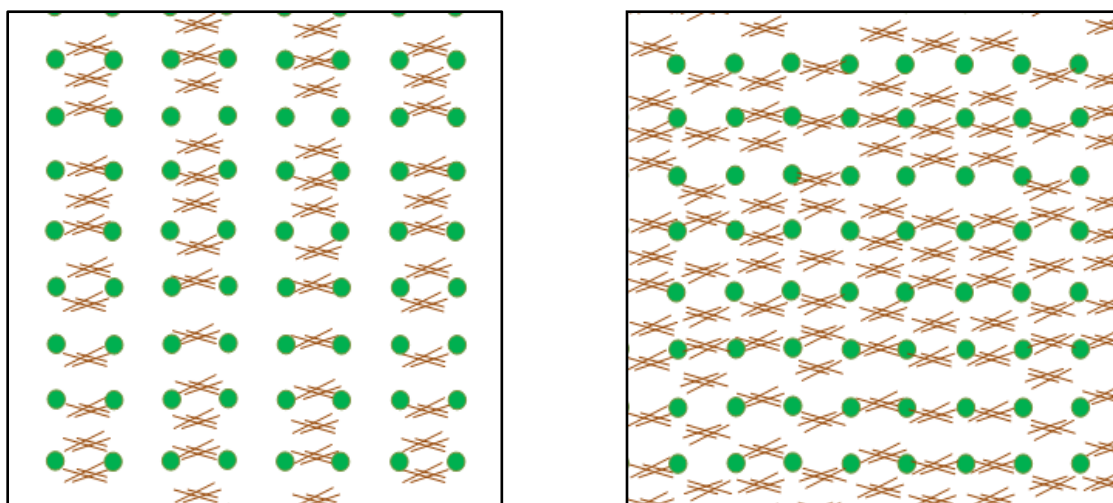


Figura 15. Disposizione delle andane su file alterne (sinistra) e su tutte le file (destra); i punti verdi (●) indicano la posizione delle piante, in marrone sono rappresentate le ramaglie (X).

In entrambi i casi, per la stima della biomassa prodotta, sono state realizzate due griglie; i punti di intersezione degli assi della griglia principale coincidono con la posizione delle piante in campo, quindi questa ha le dimensioni del sesto d'impianto esaminato (es: 4x5, 5x5, 5.5x6, ecc.); la griglia secondaria

invece, identica alla principale, è traslata verso la metà della fila sia in senso orizzontale che verticale (figura 16). In questo modo, indicando con L la larghezza tra le file e con ℓ la distanza tra le piante sulla fila, l'intera superficie è divisa in quadrilateri le cui dimensioni risultano pari a $L/2 \times \ell/2$. Ciascuna pianta proietta la superficie della propria chioma all'interno di 4 quadrilateri, ciascuno di dimensioni $L/2 \times \ell/2$. Il metodo appena descritto consente di associare, in maniera semplice e precisa, il quantitativo di potature raccolto su una certa superficie ad un determinato numero di piante.

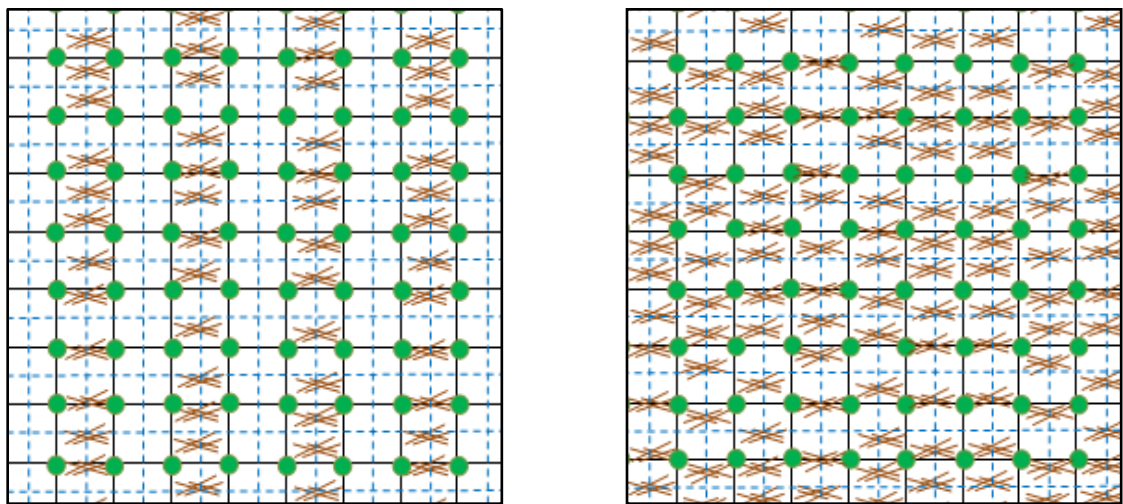


Figura 16. Applicazione di una griglia principale (—) e di una griglia secondaria (- - -). Ciascuna pianta (●) insiste su una superficie di 4 quadrilateri.

La formula utilizzata per conoscere il numero di piante campionate è la seguente:

$$\text{Numero di piante campionate} = \text{Numero di quadrilateri campionati} / \alpha$$

Dove:

1 pianta = 4 quadrilateri;

α è un coefficiente di adeguamento;

Per le potature disposte su file alterne (Fig. 16, sinistra), $\alpha = 2$;

Per le potature disposte su tutte le file (Fig. 16, destra), $\alpha = 4$.

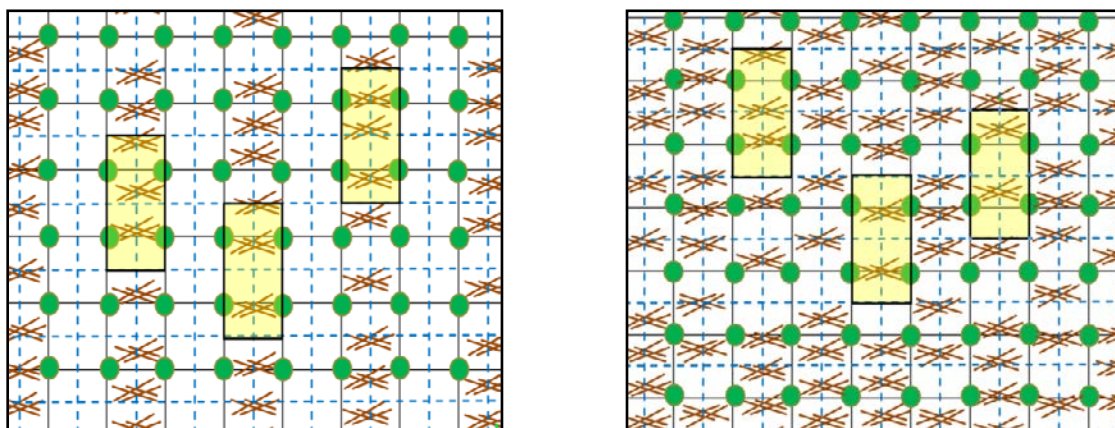


Figura 17. Esempi di superfici di campionamento per la stima della potatura, secondo il modello “a griglie”.

Per la pesatura delle ramaglie sono state individuate 6 aree di saggio per ogni nocciolo indagato. L'area di saggio è stata delimitata tenendo conto del modello sopra descritto (figura 17). Le ramaglie raccolte all'interno della superficie di campionamento sono state disposte in fascine e pesate con l'ausilio di un dinamometro (figura 18).



Figura 18. Preparazione della fascina di potature e pesatura con dinamometro.

3.6 Caratterizzazione della biomassa

A conclusione delle operazioni di pesatura, sono stati prelevati dal campo i campioni di biomassa da analizzare. Per le modalità di conservazione si è fatto riferimento alla UNI EN 15442/2011; la norma specifica i metodi per raccogliere campioni di combustibili solidi secondari, per esempio da impianti di produzione, da materiali in ingresso o da materiale immagazzinato. Essa include i metodi manuale e meccanico [48]. Come riportato nella scheda di acquisizione dati (figura 11), ciascun lotto (superficie di terreno cui appartiene la medesima popolazione di individui) è stato suddiviso in sub-lotti, ovvero in aree di saggio più piccole su cui eseguire le pesate delle potature e da cui estrarre successivamente gli incrementi, ovvero le porzioni di materiale formanti il campione. La biomassa, opportunamente divisa in polloni, ramaglie, foglie e bratee è stata conservata in barattoli di vetro a bocca larga, con chiusura ermetica onde evitare perdite di umidità prima dell'arrivo in laboratorio. Le prove per la determinazione dell'umidità della biomassa, del potere calorifico e del contenuto in ceneri sono state eseguite presso il laboratorio di certificazione energetica delle biomasse del Centro Interdipartimentale di Ricerca e Diffusione delle Energie Rinnovabili (CIRDER) di Orte. Una porzione del campione viene utilizzata per la determinazione del potere calorifico mentre la rimanente viene impiegata per determinare l'umidità e le ceneri.

3.6.1 Determinazione dell'umidità

Per la determinazione dell'umidità del campione pervenuto in laboratorio si è fatto riferimento alla UNI EN 14774-1/2009. La norma descrive il metodo per determinare l'umidità totale di un campione biocombustibile solido mediante essiccazione in stufa [49]. Per l'esecuzione della prova il campione viene posizionato in stufa a 105°C; si effettuano poi pesate ogni 1 – 6 ore fino ad arrivare ad un valore di peso costante. Il campione viene dapprima pesato con bilancia di precisione (approssimazione di 0,1 g) e poi posizionato in apposite vaschette, resistenti al calore e alla corrosione, di dimensioni tali che possano

contenere la porzione di campione nella proporzione approssimativamente di 1 g/cm². La massa della porzione di campione deve essere almeno di 300 g. Per le fasi dettagliate di preparazione dei campioni si rimanda alla normativa di riferimento citata.

3.6.2 Determinazione del potere calorifico

Per la determinazione del potere calorifico si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 14919/2010; questa definisce il metodo per la determinazione del potere calorifico superiore di un biocombustibile solido a volume costante e ad una temperatura di riferimento di 25°C in bomba calorimetrica calibrata tramite la combustione di acido benzoico certificato. Il risultato ottenuto è il valore del potere calorifico superiore del campione a volume costante con tutta l'acqua dei prodotti di combustione come acqua liquida [31]. Lo strumento utilizzato per la determinazione del potere calorifico superiore della biomassa legnosa è il calorimetro Parr, modello 6200, a bomba di combustione di ossigeno. Per l'esecuzione della prova si è proceduto anzitutto triturando il campione (mulino a coltelli) e poi setacciando il materiale. La segatura ottenuta è stata inserita in una pressa per formare un pellet di diametro e massa definiti dalla normativa di cui sopra; il pellet, è stato messo nel crogiolo e poi inserito nella bomba calorimetrica; una volta chiusa, questa viene riempita con ossigeno a pressione. La bomba calorimetrica, così preparata, è stata inserita all'interno del cestello di cui è dotato il calorimetro insieme ad un certo quantitativo di acqua. Infine, la bomba calorimetrica è stata collegata agli elettrodi. Il calorimetro ha fornito il valore del potere calorifico superiore in cal/g.

3.6.3 Determinazione del contenuto di ceneri

Per determinare il contenuto di ceneri è stata applicata la normativa di riferimento UNI EN 14775/2010 che specifica un metodo per la determinazione del contenuto di ceneri di tutti i biocombustibili solidi (UNI CEN/TS 14588) [50]. Per la determinazione del contenuto di ceneri sono stati utilizzati crogioli di

materiale inerte, come porcellana, silicio o platino, di dimensioni tali che il campione potesse essere posizionato sulla superficie di fondo in modo da non superare la massa di 0,1 g/cm²; il forno a muffola, capace di creare una temperatura uniforme, pari ai livelli e nei tempi richiesti dalla normativa. La prova è stata eseguita sui campioni, già sottoposti alla prova dell'umidità, previo sminuzzamento con mulino a coltelli e passaggio al setaccio.

3.6.4 Determinazione del contenuto di C, H, N

Le normativa di riferimento che descrive un metodo per la determinazione del carbonio totale, dell'idrogeno e dell'azoto nei combustibili solidi è la UNI EN 15104/2011 [51]. La determinazione attendibile di carbonio, idrogeno e azoto è importante per il controllo qualitativo e i risultati possono essere usati come parametri di input per i calcoli applicati alla combustione di biocarburanti solidi. L'importanza ambientale del contenuto di azoto è connessa alle emissioni di NO_x. Il contenuto di idrogeno è importante per il calcolo del potere calorifico inferiore, mentre il contenuto di carbonio è indispensabile per conoscere le emissioni di CO₂. Si ritiene che il metodo Kjeldahl sia il più affidabile per determinare il contenuto di azoto con una concentrazione inferiore allo 0,1%. Una massa nota di campione è stata bruciata in ossigeno o in una miscela di gas che veicola l'ossigeno, in condizioni tali da produrre ceneri e gas di combustione. Questi sono rappresentati principalmente da CO₂, vapore acqueo, N₂ e/o ossido di azoto, ossidi e ossiacidi degli alogenuri di zolfo e idrogeno. I prodotti della combustione sono trattati per garantire che l'idrogeno associato a zolfo o alogenuri, prodotti dalla combustione, sia liberato sotto forma di vapore acqueo. Ossidi di azoto sono ridotti ad azoto, e quei prodotti della combustione che potrebbero interferire con le successive procedure di analisi del gas vengono rimossi. CO₂, vapore acqueo e frazioni di massa di azoto del flusso di gas vengono poi determinati quantitativamente mediante adeguate procedure strumentali di gas-analisi.

INDAGINI IN CAMPO

PESATURA DELLA BIOMASSA



SCHEMA ACQUISIZIONE DATI

Prüfungsausschuss und Prüfungsausschuss (Prüfungsausschuss) 2018 bis 2019		
1	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
2	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
3	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
4	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss
	Prüfungsausschuss	Prüfungsausschuss

CAMPIONAMENTO BIOMASSA



PROVE IN LABORATORIO

UMIDITA'



POTERE CALORIFICO



CENERI



CHN



CAPITOLO 4

RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 La biomassa disponibile

Le indagini in campo hanno riguardato la stima della quantità di biomassa prodotta dalla potatura delle piante di nocciolo. Allo scopo è stato applicato il modello descritto nel paragrafo 3.5. Nelle tabelle 19 e 20 sono riportati gli esiti delle osservazioni effettuate relativi ai due anni di studio; in particolare vengono indicati il codice assegnato al nocciolo (dove le prime due cifre indicano l'anno e le ultime due il numero progressivo di campionamento), l'età dell'impianto e la relativa classe di appartenenza (si veda il paragrafo 3.4), il sesto d'impianto con relativo numero di piante per ettaro, la biomassa per ettaro calcolata e la biomassa prodotta da una singola pianta. Osservando l'ultima colonna a destra delle due tabelle, relativa al quantitativo di biomassa prodotta da una singola pianta, appare immediatamente evidente la disomogeneità dei valori, dovuta principalmente all'età delle piante e, in misura minore, all'intensità con cui viene eseguita la potatura; si passa da un valore minimo ($x_{\min}$) di 0,7 kg/pianta ad un valore massimo ($x_{\max}$) di 7,6 kg/pianta in tabella 19, mentre in tabella 20 il divario risulta più ampio, generato dalla differenza tra un valore minimo di biomassa prodotta pari a 0,7 kg/pianta ed un valore massimo di 9,3 kg/pianta. Se consideriamo invece la quantità di biomassa per ettaro (penultima colonna a destra), i valori oscillano tra 275 e 3.958 kg per l'anno 2012 e tra 289 e 4.028 kg per il 2014. Appare quindi evidente che ricondurre ad un valore medio i quantitativi di biomassa prodotti da una singola pianta o da un ettaro di superficie, induca a trarre conclusioni poco significative qualora fosse richiesto un calcolo dettagliato, con riferimento a variabili specifiche. I valori riportati nelle tabelle che seguono si riferiscono alle condizioni della biomassa nel momento in cui è stata eseguita la raccolta in campo; sono pertanto caratterizzati da un

valore di umidità variabile tra il 35 ed il 55%. In un successivo paragrafo saranno uniformati alla stessa percentuale di umidità.

Tabella 19. Risultati delle pesate in campo per l'anno 2012

Cod.	Età	Classe	Sesto (m)	N° piante/ha	Biomassa/pianta(kg)
1201	7	A	5 x 5	400	0,7
1202	7	A	5 x 5	400	1,9
1203	52	F	6,5 x 8	192	4,8
1204	30	C	5,5 x 6,5	280	4,5
1205	25	C	5 x 6	333	4,5
1206	40	D	5 x 5	400	3,2
1207	40	D	5 x 6,5	308	3,6
1208	20	B	4 x 5	500	2,4
1209	8	A	4,5 x 4,5	494	2,8
1210	26	C	5 x 5	400	2,5
1211	50	E	6 x 5	333	3,9
1212	20	B	4 x 5	500	2,8
1213	45	E	6 x 7	238	4,4
1214	45	E	6 x 7	238	5,1
1215	12	B	4 x 5	500	1,7
1216	40	D	5,5 x 5,5	331	6,0
1217	25	C	5 x 5	400	2,6
1218	50	E	6 x 6	278	5,4
1219	30	C	5 x 5,5	364	7,6
1220	15	B	4 x 4,5	556	4,4
1221	25	C	4 x 4,5	556	7,1
1222	65	F	6 x 6	400	6,4
1223	20	B	6 x 5	333	2,0
1224	10	A	5 x 5	400	1,9
1225	45	E	5 x 5	400	4,6
1226	10	A	5 x 5	400	2,4
MEDIA					3,8

Tabella 20. Risultati delle pesate in campo per l'anno 2014

Cod.	Età	Classe	Sesto (m)	N° piante/ha	Biomassa/pianta(kg)
1401	40	D	4,5 x 4,5	494	4,9
1402	13	B	5 x 4	500	1,5
1403	13	B	5 x 4	500	1,2
1404	13	B	5 x 4	500	1
1405	35	D	5 x 5	400	4,2
1406	70	F	4,5 x 4,5	494	4,1
1407	22	C	4 x 4	625	1,5
1408	6	A	2,5 x 5	800	0,8
1409	25	C	3 x 6	556	3
1410	13	B	5 x 5	400	3,8
1411	15	B	4 x 5	500	2,3
1412	15	B	4 x 5	500	2,3
1413	14	B	5 x 5	400	3,5
1414	45	E	irregolare	650	4,8
1415	7	A	5 x 5	400	1,2
1416	21	C	4 x 5	500	2,7
1417	15	B	5 x 5	400	2
1418	6	A	5 x 5	400	0,7
1419	15	B	4 x 5	500	1,7
1420	70	F	6 x 6	278	4,7
1421	45	E	7 x 7	204	9,3
1422	45	E	3,5 x 7	408	4,1
1423	15	B	4 x 5	500	2,1
1424	45	E	4,5 x 4,5	494	4,1
1425	23	C	6 x 3	556	7,3
1426	55	F	5 x 6,5	308	4,4
MEDIA					3,2

Per quanto concerne l'analisi statistica sono stati calcolati, relativamente ai dati riportati nelle tabelle 19 e 20, alcuni tra i principali indici di dispersione. I campionamenti relativi all'anno 2012 hanno fatto registrare un valore medio di

potatura per pianta pari a 3,8 kg mentre nel 2014 il valore è di 3,2 kg (tabella 21). Tuttavia, per fare una stima della variabilità della popolazione di dati è utile riferirsi alla deviazione standard, la quale esprimere appunto la dispersione dei dati intorno ad un indice di posizione che, nel caso specifico è il valore medio. Il valore di deviazione standard nel 2014 risulta più alto rispetto a quello del 2012, ad indicare una maggiore dispersione dei dati intorno alla media. La media dei risultati dei due anni di studio, riportata in tabella 21, è stata confrontata con i valori ottenuti da altri autori (tabella 22). La media della potature da noi trovata è confermata anche dai valori riportati da *Bilandzija et al.* in Croazia [14]; situazione differente si presenta invece in Piemonte, dove *Sonnati C. et al.* [45] e *Ughini V. et al.* [52] hanno ottenuto un valore medio di potatura/pianta rispettivamente di 36,3 e 12,2 kg (tabella 22).

Tabella 21. Principali indici di dispersione relativi ai dati delle pesate dei due anni di indagine

	Campo di variazione ($x_{\max} - x_{\min}$)	Media per pianta (kg)	Var	Dev Std
2012	6,9	3,8	3,14	1,77
2014	8,6	3,2	4,18	2,04
MEDIA	<i>8,6</i>	<i>3,5</i>	<i>3,7</i>	<i>1,9</i>

Tabella 22. Confronto tra valori di quantitativi di biomassa/pianta ottenuti da altri autori

	Luogo dello studio	Media potature (kg/pianta)
Valori rilevati 2012 - 2014	Viterbo	3,5
<i>Sonnati C. et al.</i> , 2009	Piemonte	36,3
<i>Ughini V. et al.</i> , 2009	Piemonte	12,2
<i>Bilandzija N. et al.</i> , 2012	Croazia	3,05

4.1.1 Produzione di biomassa in funzione dell'età delle piante

Un'analisi più precisa dei risultati può essere fatta se consideriamo le produzioni di biomassa in funzione della Classe di appartenenza degli individui. La Classe, lo ricordiamo, raggruppa gli individui secondo fasce di età, crescenti dalla lettera A alla lettera F. Una tale divisione è sembrata opportuna al fine di verificare la differenza di produzione tra individui coetanei oltre al fatto che in letteratura non è stato possibile risalire a informazioni di questo tipo. Gli individui appartenenti alle Classi A e B, quindi aventi un'età ≤ 20 anni, si posizionano al di sotto delle rispettive medie di produzione in entrambi gli anni di indagine, mentre gli appartenenti alle restanti 4 Classi si posizionano al di sopra della media di produzione. Il valore di produzione medio più alto per il 2012 è stato registrato per la Classe F, pari a 5,6 kg/pianta mentre il 2014 ha fatto registrare il valore più alto per la classe D, sempre di 5,6 kg/pianta (figura 19a e 19b). Questa differenza è ragionevolmente dovuta a fattori di carattere sia antropico che ambientale; l'intensità dell'intervento cesorio può incidere in maniera determinante sulle quantità di biomassa prodotta; si pensi ad esempio agli interventi mirati a rinnovare le piante più vecchie o quelle colpite da malattie fungine. Gli stessi agricoltori, durante le interviste dirette in campo, hanno confermato di essere costretti ad alternare potature più drastiche a interventi di "produzione" in funzione delle condizioni fitosanitarie delle piante. Il sesto d'impianto, a parità di età degli individui, può determinare un maggiore sviluppo degli alberi o, al contrario, inibirne la crescita; altro fattore che può determinare una variabilità di produzione è senz'altro quello pedoclimatico. Zone più vocate, come quelle a ridosso della caldera del lago di Vico manifestano un accrescimento degli individui più evidente di quello visibile altrove su individui coetanei. Non è del tutto esatto quindi affermare che la quantità di potature aumenti proporzionalmente all'età della pianta; ad un certo punto infatti, quando l'accrescimento dei tessuti avrà raggiunto il suo sviluppo massimo saranno soltanto interventi "eccezionali" a determinare una variabilità significativa della biomassa prodotta.

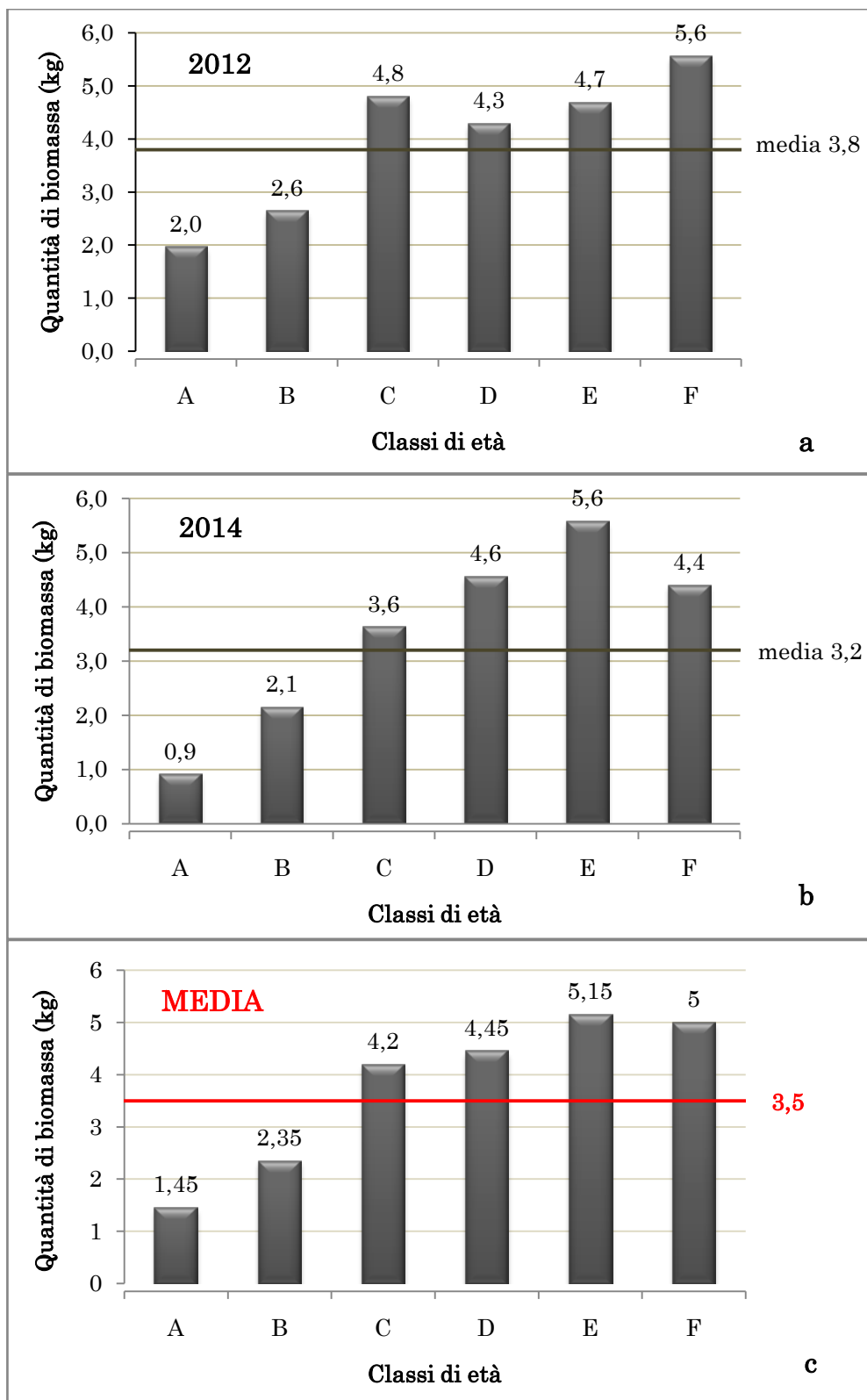


Figura 19. Produzione di biomassa in funzione delle Classi di età

In figura 19c sono riportati i valori medi delle Classi per i due anni di indagine. A conferma di quanto detto sopra, la quantità di potatura ottenuta da piante di Classe F, quindi aventi un'età > 50 anni, è pari a 5 kg/pianta, di poco inferiore alla biomassa ottenuta per gli individui di Classe E (pari a 5,15 kg/pianta). Il rapporto di dipendenza tra l'età della pianta e la quantità di biomassa prodotta è rappresentato mediante l'interpolazione dei dati in figura 20. Come si può notare R^2 , ovvero l'indice di bontà della retta di regressione, è pari 0,411.

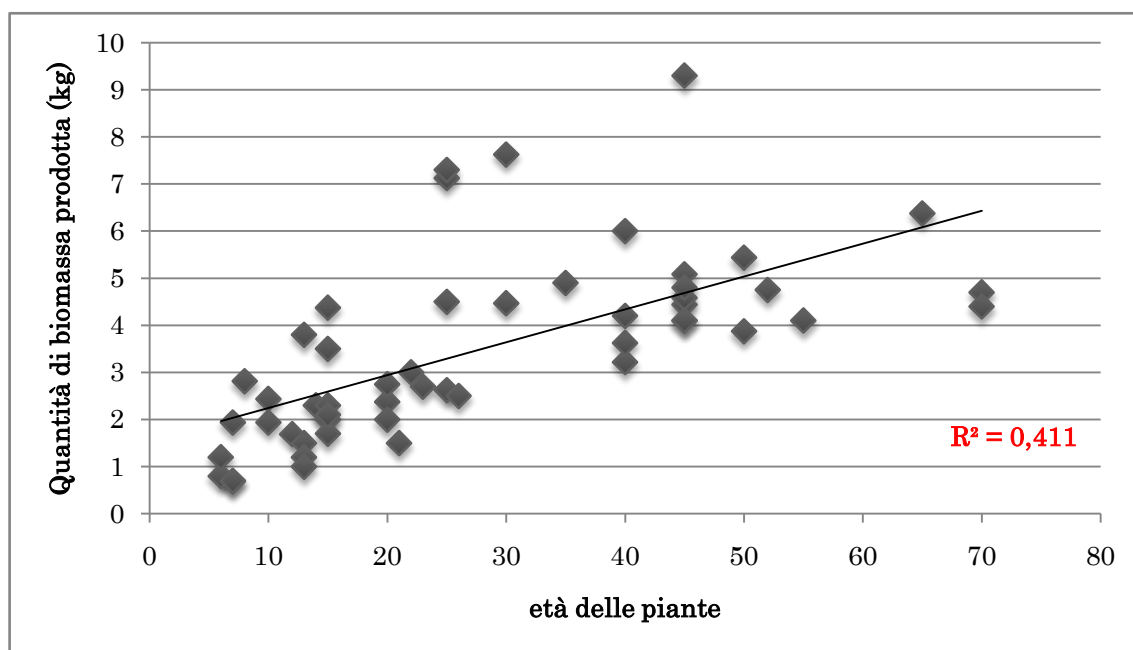


Figura 20. Relazione tra l'età delle piante e la quantità di biomassa prodotta con le potature

4.1.2 Produzione di biomassa in funzione del sesto d'impianto

Altro dato interessante, di uso comune in letteratura, è la quantità di biomassa ottenuta da un ettaro di superficie. La variabile considerata in questo caso è il numero di piante che insiste sull'unità di superficie; conoscendo il sesto d'impianto si può risalire velocemente a questo valore utilizzando la tabella 18. I dati ottenuti nei rilevamenti effettuati nei due anni di studio sono riportati in tabella 23.

Tabella 23. Produzioni di biomassa per ettaro di superficie

2012			2014		
Sesto d'impianto (m)	N° piante/ha	Biomassa/ha (kg)	Sesto d'impianto (m)	N° piante/ha	Biomassa/ha (kg)
5 x 5	400	275	4,5 x 4,5	494	2.418
5 X 5	400	775	5 x 4	500	771
6,5 X 8	192	913	5 x 4	500	583
5,5 x 6,5	280	1.250	5 x 4	500	521
5 x 6	333	1.500	5 x 5	400	1.683
5 x 5	400	1.288	4,5 x 4,5	494	2.037
5 x 6,5	308	1.115	4 x 4	625	938
4 x 5	500	1.188	2,5 x 5	800	640
4,5 x 4,5	494	1.389	3 x 6	556	1.655
5 x 5	400	1.000	5 x 5	400	1.525
6 x 5	333	1.292	4 X 5	500	1.125
4 x 5	500	1.375	4 X 5	500	1.135
6 x 7	238	1.057	5 x 5	400	1.408
6 x 7	238	1.210	irregolare	650	1.649
4 x 5	500	844	5 x 5	400	489
5,5 x 5,5	331	1.983	4 X 5	500	1.354
5 x 5	400	1.050	5 x 5	400	783
6 x 6	278	1.510	5 x 5	400	289
5 x 5,5	364	2.773	4 x 5	500	861
4 x 4,5	556	2.431	6 x 6	278	1.314
4 X 4,5	556	3.958	7 x 7	204	1.888
6 X 6	400	2.550	3,5 x 7	408	1.667
6 x 5	333	667	4 x 5	500	1.073
5 X 5	400	775	4,5 x 4,5	494	2.016
5 X 5	400	1.833	6 x 3	556	4.028
5 X 5	400	975	5 x 6,5	308	1.357
MEDIA		1.422	MEDIA		1.354

Per il 2012 la produzione media di biomassa/ha è pari a 1.422 kg/ha mentre per il 2014 il valore è di 1.354 kg/ha. La media tra i due anni risulta pari a 1.388 kg/ha (tabella 24). Anche in questo caso i valori ottenuti sono stati

confrontati con quelli proposti da altri autori (tabella 25). Il valore più alto è stato registrato da *Sonnati C. et al.*, pari a circa 7.300 kg/ha di biomassa [45], mentre *Ughini V. et al.*, ha ottenuto un valore di 4.380 kg/ha [52]. Valori di produzione più bassi e piuttosto simili tra loro, sono stati ottenuti da *Monarca D. et al.* [46] e da *Di Blasi et al.* [53], rispettivamente di 2.400 e di 2.800 kg/ha. Il dato più vicino a quello ottenuto dal presente studio è quello proposto da *Bilandzija N. et al.*, pari a 1.848 kg/ha [14].

I motivi di tali differenze, piuttosto accentuate nei primi due casi, possono essere ragionevolmente ricercati nella metodologia applicata ai suddetti studi. E' fondamentale infatti, nella fase di raccolta dati, che il campionamento segua criteri ben precisi; anzitutto, per ottenere un campione rappresentativo è fondamentale che la scelta sia fatta casualmente (o random). Se la scelta del campione non viene fatta con criteri casuali è pressoché inevitabile che il campione sia viziato e che si introduca un errore pregiudiziale che distorce l'interpretazione dei dati in maniera sistematica. In secondo luogo è importante considerare la varianza della popolazione. La varianza, lo ricordiamo, è una misura del grado di variazioni o oscillazioni presenti, relativamente al parametro che vogliamo stimare, nella popolazione. L'entità di queste variazioni può essere derivata, almeno approssimativamente, dall'esperienza, o dai risultati di altre analoghe indagini effettuate in precedenza, o dalla conoscenza del fenomeno, o da altri fattori. Una popolazione in cui il parametro da misurare presenta ampie oscillazioni ha una varianza elevata; una popolazione in cui le oscillazioni sono scarse ha una varianza bassa. La varianza è un fattore importante nel calcolo della numerosità del campione. In popolazioni a bassa varianza, lo studio di pochi individui fornisce comunque un buon quadro della "vera" caratteristica di popolazione, se la varianza è alta sono necessari molti individui, poiché ciascuno dei campioni può essere molto diverso dalla media della popolazione [54].

Nelle prove eseguite da *Ughini V. et al* e *Sonnati C. et al.*, le aziende indagate risultano 4, mentre nello studio condotto da *Monarca D. et al.*, il numero scende a 3. L'esiguità del numero di aziende campionate, soprattutto se confrontato con le 52 indagate per questo lavoro, alla luce di quanto riportato sopra, può determinare una scarsa rappresentatività del campione rispetto alla

popolazione studiata e le conclusioni tratte da questo campione potrebbero risultare “spostate” verso il valore che caratterizza i soli individui campionati ma purtroppo, non rappresentative della realtà.

Infine, nello studio presentato da *Di Blasi et al.* per il calcolo della quantità di residui agricoli, presente sul territorio nazionale, sono stati utilizzati i coefficienti indicati dal CESTAAT (Centro Studi sull'Agricoltura, l'Ambiente ed il Territorio) e confermati dal SeSIRCA (Servizio e Sperimentazione, Innovazione e Ricerca sull'Agricoltura) [55] attraverso “colloquio privato” (nota bibliografica). La mancanza di misure dirette in campo, oltre all'impossibilità di poter confermare tali coefficienti attraverso fonti liberamente accessibili, crea qualche perplessità per quanto concerne la bontà del confronto tra i dati. Lo studio condotto da *Bilandzija N. et al.*, pur confermando le stesse modalità di raccolta della biomassa utilizzate per questa indagine, non fa riferimento al numero di campioni presi in esame.

Tabella 24. Valori medi di produzione di biomassa/ha

	Campo di variazione ($x_{\max} - x_{\min}$)	Media per ha (kg)
2012	3.673	1.422
2014	3.739	1.354
MEDIA	3.743	1.388

Tabella 25. Confronto tra valori di quantitativi di biomassa/ha ottenuti da altri autori

	Luogo dello studio	Media potature (kg/ha)
Valori rilevati 2012 - 2014	Viterbo	1.388
<i>Di Blasi C. et al.</i> , 1997	Italy	2.800
<i>Monarca D. et al.</i> , 2009	Viterbo	2.400
<i>Sonnati C. et al.</i> , 2009	Piemonte	7.300
<i>Ughini V. et al.</i> , 2009	Piemonte	4.380
<i>Bilandzija N. et al.</i> , 2012	Croazia	1.848

La quantità di biomassa riferita all'unità di superficie e relativa ai due anni di campionamento, è riportata nelle Figure 22 e 23. Nei grafici appare evidente come all'aumento del numero di piante ad ettaro non corrisponda una crescita proporzionale del quantitativo di biomassa prodotto con la potatura. Questo fenomeno, come visto nel paragrafo precedente, è dovuto in primo luogo all'età degli individui; se le piante sono molto giovani infatti, anche a fronte di un'alta densità d'impianto, avremo delle produzioni di potatura contenute poiché la chioma non è ancora sviluppata; di contro, la potatura di piante adulte e del tutto sviluppate può fornire, a fronte di un ridotto numero di individui, un quantitativo notevole di biomassa/ha. In figura 24 sono riportati i valori ottenuti per entrambi gli anni di indagine e relativa media. Per completezza si riporta anche il grafico di correlazione tra il numero di piante/ha e la produzione di potatura; l'indice di bontà della retta di regressione, R^2 , è pari a 0,013; la correlazione tra queste due variabili è decisamente molto bassa (figura 21).

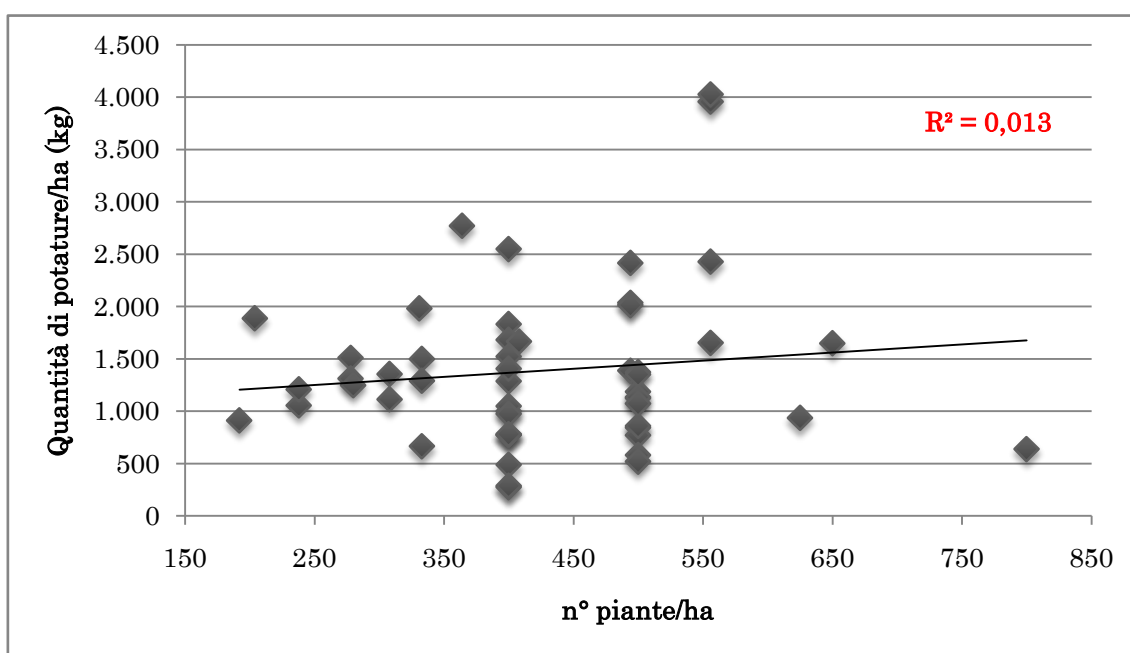


Figura 21. Relazione tra il numero di piante/ha e la produzione di potatura/ha (2012 – 2014)

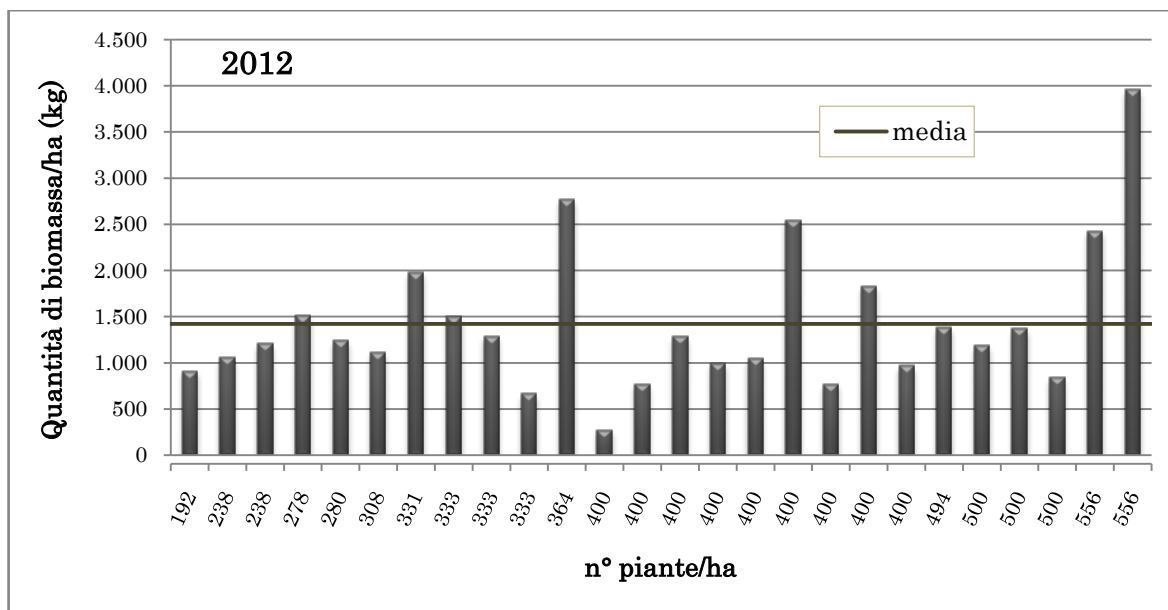


Figura 22. Quantitativi di biomassa/ha in relazione al numero delle piante

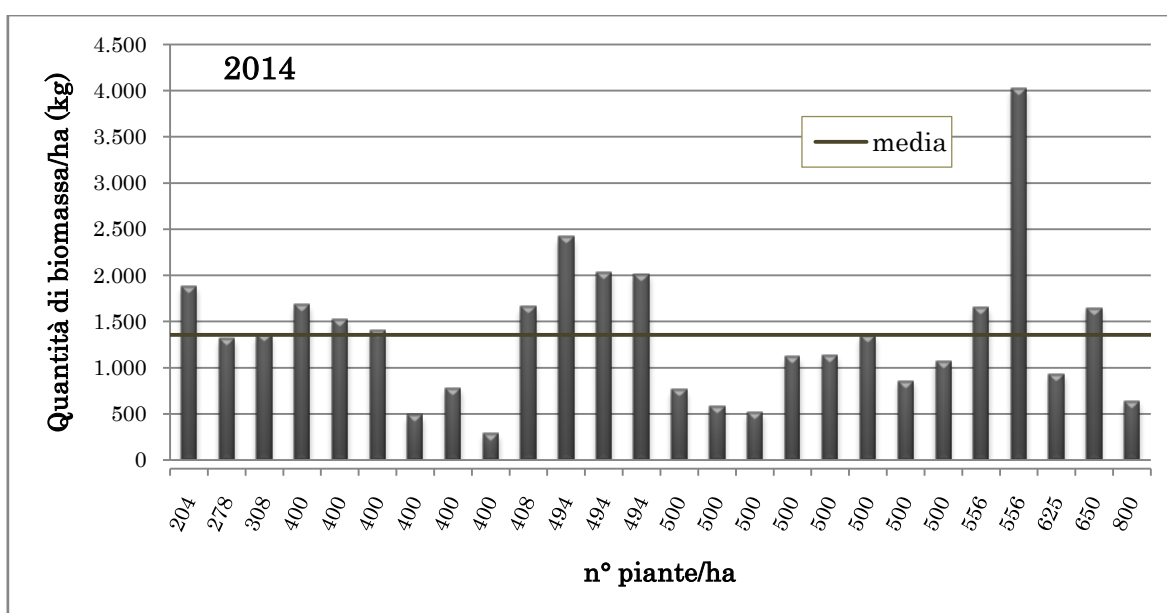


Figura 23. Quantitativi di biomassa/ha in relazione al numero di piante

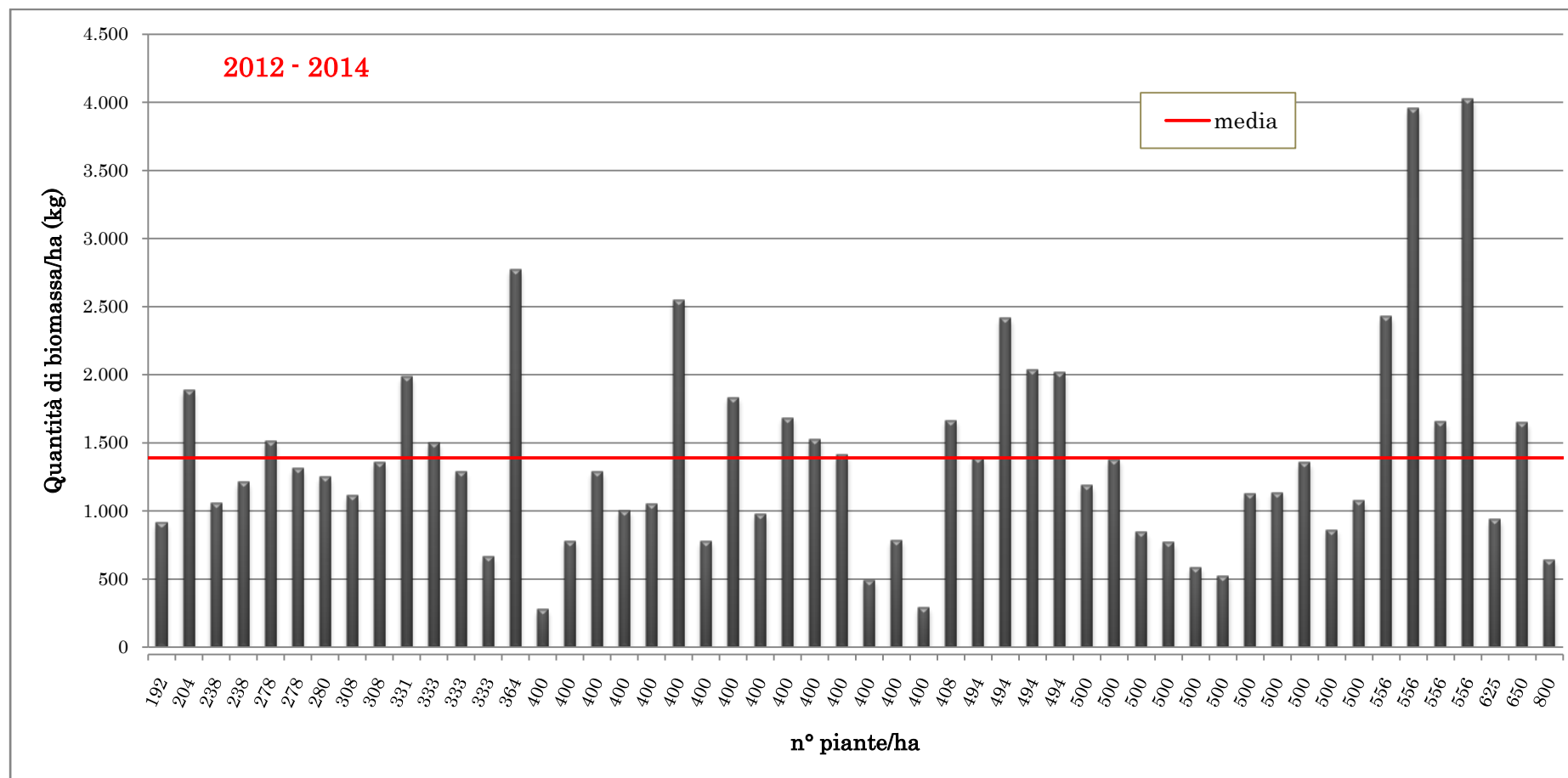


Figura 24. Quantità di biomassa/ha relativa ai due anni di indagine. La linea rossa indica il valore medio di potature/ha, calcolato come media delle quantità ottenute nei due anni.

4.2 Composizione delle potature

La potatura raccolta in campo è stata divisa in ramaglie, polloni, foglie e brattee. Dalla elaborazione dei dati emerge che i polloni rappresentano mediamente il 20% della biomassa totale, i rami circa l'80% mentre foglie e brattee sono presenti in misura trascurabile (figura 26). Come già verificato, il valore medio così espresso appare poco significativo perché è soggetto a forte variabilità percentuale sulla biomassa totale in funzione dell'età della pianta e del tipo di potatura. In figura 27 sono riportate le percentuali di rami e polloni costituenti la biomassa, suddivise per Classi di età. La percentuale più alta di polloni sulla biomassa è stata registrata per la Classe A, con un valore di poco inferiore all'80%, mentre la percentuale più bassa si è registrata per la Classe D, con un valore pressoché nullo; soprattutto nel primo dei due casi, lo scarto rispetto alla media appare molto ampio. Valori prossimi alla media sono stati ottenuti per le Classi B e C, mentre per le Classi E e F la presenza percentuale di polloni sulla biomassa si riduce a valori inferiori al 5%. Tale fenomeno è imputabile al fatto che gli interventi cesori sulla chioma delle piante molto giovani sono ridotti in ragione di uno sviluppo ancora incompleto della stessa; l'intervento è mirato, in questi individui, quasi esclusivamente alla eliminazione dei polloni [56]. Queste considerazioni forniscono un'ulteriore chiave di lettura dei risultati, offrendo indicazioni importanti ai fini di un eventuale stima del potenziale energetico di un nocciolo.



Figura 25. Ramo a sinistra e polloni a destra

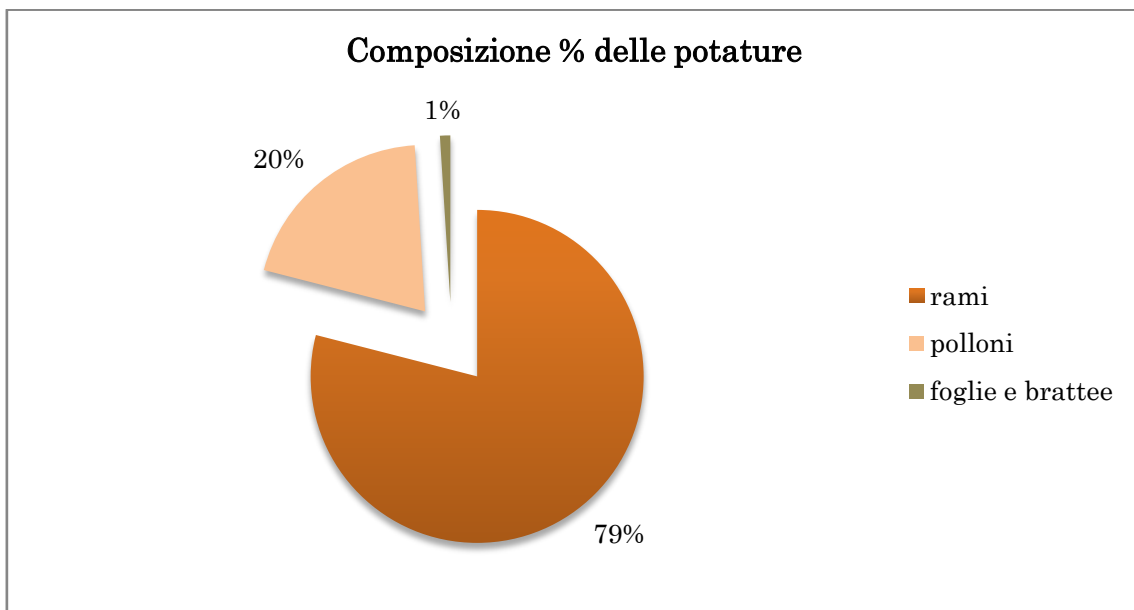


Figura 26. Composizione percentuale media delle potature raccolte.

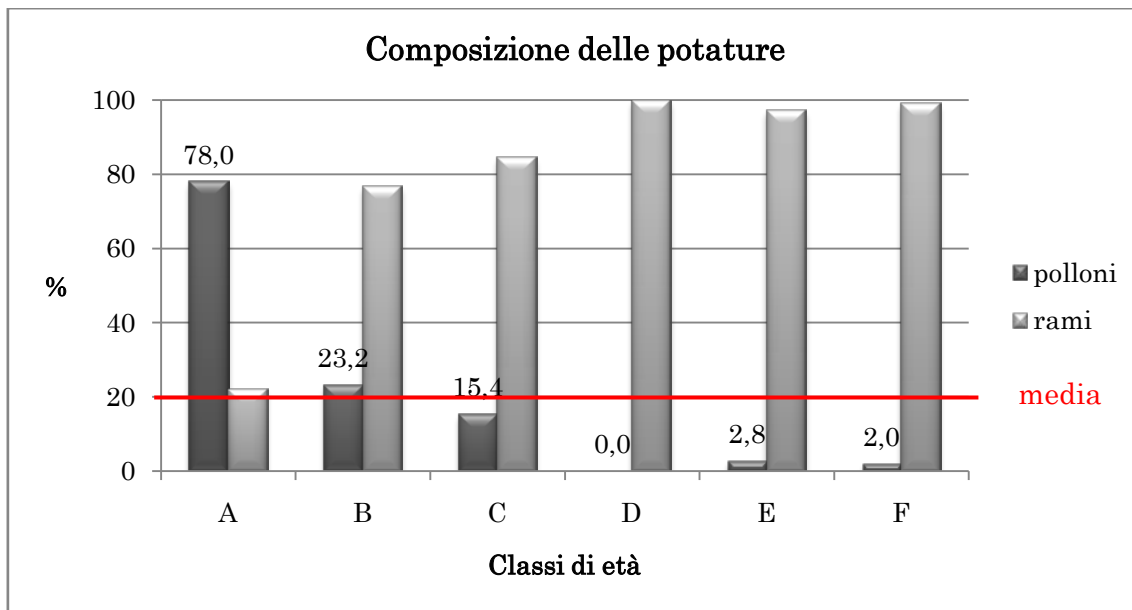


Figura 27. Composizione della biomassa in funzione della Classe di età del nocciolo

4.3 Caratterizzazione energetica delle potature

In questo paragrafo vengono riportati i risultati relativi alle prove di laboratorio eseguite sulle potature raccolto in campo. In tabella 26 sono riportati i contenuti percentuali di C, H, N, O, e S. Il contenuto di C rilevato è del 48,7%, quello di H è pari al 6,17%; l'N risulta presente in misura dell'1,09%. Se confrontiamo i valori con quelli ottenuti da altri studi, notiamo che il C da noi trovato risulta il più alto, e per quanto riguarda i contenuti di H e N è possibile rilevare lievi differenze [46] [14]. I contenuti di C, H, N, O e S mostrano che questa biomassa ha effettivamente un contenuto di carbonio molto elevato se comparato con quelli di idrogeno e ossigeno, e questo ne incrementa il valore energetico.

In tabella 27 invece sono riportati i valori medi di umidità, M_{ar} , ceneri, potere calorifico superiore, calcolato su base secca, PCS_{dry} e potere calorifico inferiore, calcolato su base secca, PCI_{dry} . Il valore M_{ar} rappresenta il valore medio dell'umidità dei campioni raccolti in campo ed è pari al 52,39% nel caso dei polloni e al 41,46% nei rami. La quantità di ceneri presente nelle foglie è del 29,39%, mentre i valori di polloni e rami sono rispettivamente di 6,9% e 6,28%; le

brattee hanno un contenuto in ceneri pari a 8,25%. Il valore del PCS_{dry} dei polloni è di 19,80 MJ/kg, quello dei rami è di 19,16 MJ/kg. Il PCI_{dry} ottenuto per i polloni è di 18,57 MJ/kg, quello dei rami è di 18,37 MJ/kg. Si può notare che le prove di laboratorio hanno evidenziato un potenziale energetico pressoché identico per rami e polloni; lo stesso non può dirsi ovviamente di foglie e brattee che invece risultano caratterizzati da una scarsa potenzialità energetica e da un residuo di ceneri piuttosto elevato. Questo fatto va tenuto in debita considerazione qualora si proceda all'impiego di materiale residuo raccolto in campo mediante macchine di tipo trincia-caricatrici (figura 28). Dai primi risultati di prove ancora in essere, sembra infatti che questa tipologia di macchine, adibite alla trinciatura dei materiali legnosi, finiscano per convogliare all'interno del cassone di carico anche foglie, brattee, erba e terra, inficiando sul potenziale energetico della biomassa. Se si escludono foglie e brattee, le potature campionate sono caratterizzate da un valore medio di umidità del 46,69%, contenuto in ceneri pari al 6,57%, PCS_{dry} di 19,7 MJ/kg e PCI_{dry} di 18,38 MJ/kg. In ultima analisi, sempre in tabella 27, si noti il confronto con i valori di potere calorifico ottenuti da altri autori; con riferimento al PCI_{dry} da noi calcolato *Monarca D. et al., 2009* e *Blandizia N. et al., 2012* hanno ottenuto valori più bassi, mentre il valore più alto viene riportato da *Cecchini M. et al., 2013* [57].



Figura 28. Raccolta delle potature con macchina trinciatrice Farma, modello Comby 200;

Tabella 26. Valori medi, calcolati sulla sostanza secca, dei principali costituenti chimici delle potature di nocciolo

		C	H	N	O	S
		%	%	%	%	%
Potature nocciolo	Nostri dati (2012 – 2014)	48,7	6,17	1,09	-	-
	<i>Monarca D. et al., 2009</i>	47,78	5,61	0,35	46,26	-
	<i>Bilandzija N. et al., 2012</i>	46,46	6,57	0,78	45,98	0,21

Tabella 27. Principali caratteristiche fisiche ed energetiche delle potature divise nelle componenti individuate. I valori medi sono confrontati con quelli di altri autori

	umidità (M_{ar})*	ceneri	PCS_{dry}	PCI_{dry}
	%	%	MJ/kg	MJ/kg
polloni	52,39	6,90	19,80	18,57
rami	41,46	6,28	19,61	18,37
foglie	46,29	29,39	8,47	7,24
brattee	18,56	8,25	9,88	8,64
MEDIA**	46,69	6,57	19,70	18,39
<i>Monarca D. et al., 2009</i>	-	<i>2,36</i>	<i>17,67</i>	<i>16,45</i>
<i>Bilandzija N. et al., 2012</i>	-	<i>3,81</i>	-	<i>17,47</i>
<i>Cecchini M. et al., 2013</i>	-	<i>4,54</i>	<i>20,7</i>	<i>19,68</i>

* il valore dell'umidità si riferisce al campione tal quale preso dal campo mentre i PC sono calcolati su base secca.

** il valori medi riportati non tengono conto di foglie e brattee (presenti in percentuale trascurabile) ma solo di rami e polloni.

In tabella 28 si riportano i valori a confronto di umidità, ceneri, PCS_{dry} e PCI_{dry} di nocciolo e olivo. Nel legno di olivo si nota una minore umidità ed un ridotto contenuto in ceneri. Il contenuto in ceneri è un aspetto importante ai fini dell'impiego del materiale in stufe domestiche; un elevato residuo in ceneri infatti, determina una frequenza di manutenzione dell'impianto più alta. In

ultima analisi, il valore del PCS_{dry} è leggermente superiore nell'olivo mentre il PCI_{dry} è maggiore nel nocciolo. Se confrontiamo il PCI di queste due tipologie di biomasse con quello del gasolio, osserviamo che il rapporto gasolio/nocciolo è pari a 2,32 mentre nel caso dell'olivo è di 2,4. Ciò significa che per ottenere l'equivalenza energetica con il gasolio sono necessari 2,32 kg di potature di nocciolo e 2,4 kg di potature di olivo (dati confermati on-line anche da alcune ditte di produzione di pellet).

Tabella 28. . Raffronto delle principali caratteristiche energetiche con le potature di olivo

	umidità (M_{ar})*	ceneri	PCS_{dry}	PCI_{dry}
	%	%	MJ/kg	MJ/kg
Potature Nocciolo	46,69	6,57	19,70	18,39
Potature Olivo	31,20	5,01	19,93	17,85
gasolio	-	-	-	42,8

** M_{ar} indica il valore medio di umidità alla raccolta*

4.3.1 Il ruolo dell'umidità

Il contenuto di umidità influenza la massa volumica del prodotto, il contenuto energetico e le possibilità di conservazione. Nel corso dei paragrafi precedenti si è parlato di come l'umidità, presente nei combustibili legnosi, influisca negativamente sul valore del potere calorifico; inoltre, il peso della biomassa è strettamente correlato alla variazione di umidità; al variare quindi dell'umidità si osserveranno variazioni di carattere fisico ed energetico della biomassa stessa. In tabella 29 sono riportati le variazioni del peso e del potenziale energetico della biomassa in funzione dell'umidità. Il valore medio di biomassa/ha, riferito ad un valore medio di umidità del 46,61%, è pari a 1.354 kg/ha. La diminuzione del contenuto idrico determina tuttavia anche una perdita di peso della biomassa; questo nuovo valore, riferito al contenuto idrico desiderato, rappresenta la disponibilità reale del combustibile utilizzabile a fini

energetici. In tabella sono riportate le quantità di biomassa relative ad una percentuale di acqua del 40%, 30%, 20% e 10% calcolate con la formula riportata nella UNI EN 14918:2010 [31]. Il peso della biomassa con un tenore di umidità del 20% è pari a 912 kg/ha, ovvero risulta una riduzione di oltre 400 kg rispetto alla biomassa tal quale misurata in campo. Sono osservabili anche variazioni del potere calorifico in relazione al contenuto di umidità. In particolare, il primo aumenta al diminuire del secondo. Sulla base delle prove del valore energetico (MJ/kg) dei campioni di potature investigati, la tabella 29 riporta il potenziale energetico (MJ/ha) mediamente attribuibile ad un ettaro di nocciolo. Da questo dato è possibile risalire al potenziale energetico dei noccioli della provincia di Viterbo.

Tabella 29. Influenza del tenore di umidità sul peso e sul potenziale energetico della biomassa di nocciolo.

	M_{ar} (= 46,61%)	M_{40%}	M_{30%}	M_{20%}	M_{10%}
Biomassa/ha (kg)	1.354*	1.216	1.042	912	811
PCI (MJ/kg)	9,44	10,9	13,1	15,3	17,5
Potenziale energetico (MJ/ha)	12.781,76	13.254,4	13.650,2	13.953,6	14.192,5
Potenziale energetico per la provincia di Viterbo (TJ)**	235,18	243,88	251,16	256,75	261,14

* Il valore medio di biomassa/ha si riferisce alle potature indagate nel 2014 (vedi Tab. 26)

** Il potenziale energetico stimato si riferisce ad una superficie di 18.400 ha (vedi par. 2.7)

4.4 Potenzialità d'impiego delle potature di nocciolo

La notevole disponibilità di biomassa derivante dalla potatura del nocciolo nella provincia di Viterbo rende questa coltura interessante da un punto di vista energetico oltre che per l'eccellente produzione di nocciole. A tal fine è bene fare delle considerazioni preliminari qualora si intenda procedere su questa strada.

Il contenuto di umidità è un fattore primario da considerare qualora si intenda predisporre un impianto di stoccaggio o si voglia conoscere la reale disponibilità energetica di una certa biomassa. Supponendo ad esempio di voler commercializzare del cippato di legno, si deve ipotizzare di raccogliere il prodotto ed organizzare lo stoccaggio in maniera efficiente, economica e funzionale. Il contenuto idrico del cippato deve essere assolutamente inferiore al 40%; infatti nelle centrali termiche di potenza piccola o media, si può utilizzare cippato con un contenuto idrico ottimale intorno al 25/30%, ma non superiore al 40, pena la perdita di efficienza della combustione e l'aumento delle emissioni, quindi contro la normativa vigente. Solo nel caso di grandi centrali, normalmente impiegate per il teleriscaldamento di numerosi fabbricati, è possibile utilizzare caldaie a griglia mobile, che consentono l'utilizzo di cippato con umidità massima del 55%, pari circa all'umidità delle potature appena raccolte [58].

Dalle potature di nocciolo si potrebbe produrre del pellet. Sono numerosi gli studi e le sperimentazioni circa l'utilizzo di biomasse di varia natura trasformate in pellet per l'utilizzo diretto nelle caldaie domestiche. Tuttavia, essi non soddisfano gli standard EN.

La mancanza di informazioni circa i vari tipi di pellet disponibili e le diverse tecnologie di combustione proposte rappresenta il principale limite alla commercializzazione di questo prodotto di recupero. Gli operatori privati o i professionisti proprietari di caldaie alimentate a pellet cercano il combustibile più economico senza considerare se la tecnologia di combustione è adeguata al prodotto. Pertanto, sono comuni i malfunzionamenti delle caldaie e l'insoddisfazione degli utenti. Generalmente, questi tipi di pellet presentano delle applicazioni industriali. Tuttavia, gli utenti non vedono il perché non dovrebbero ottenere benefici con l'uso di questo combustibile economico. Una caratteristica comune è la mancanza di un adeguato sistema di rimozione e trasporto delle ceneri dal cassetto di raccolta. Ciò in quanto tali caldaie sono progettate per combustibili legnosi di elevata qualità e con un basso contenuto in ceneri. Caldaie di media dimensione sono generalmente equipaggiate con griglie mobili che rimuovono le ceneri per spinta con il nuovo combustibile, inviandole verso il contenitore di raccolta. Questo dispositivo è capace di utilizzare combustibili di

bassa qualità. Tuttavia, gli utenti devono ancora pulire il sistema con una certa frequenza. Le caldaie con gli scambiatori orizzontali richiedono molta manutenzione rispetto alle caldaie con scambiatori verticali. La resa durante la combustione su questo dispositivo è molto bassa ed il controllo della combustione è generalmente limitato. Le grandi caldaie presentano un elevato controllo della combustione, anche se sono state progettate per combustibili con forma a pellet e a bassi contenuti in ceneri. Pertanto, combustibili con alto contenuto in ceneri possono causare riduzione dell'efficienza e richiedere lunghi periodi di fermo impianto per la manutenzione, considerando che l'accesso alle sue parti interne è molto limitato o anche impossibile. Orientación Sur

Tuttavia, i progressi tecnologici nel campo del riscaldamento domestico sembrano aver trovato l'applicazione più adatta per la combustione dei pellet di potature. L'azienda austriaca Biokompakt ha progettato una speciale caldaia che è capace di utilizzare qualsiasi tipo di combustibile solido mantenendo l'efficienza di combustione. La caldaia *AWK Biokompakt* ha testato con successo la combustione di pellet di potature di vite, pellet di colza, noccioli di frutta, cippato di legno, pellet di paglia, corteccia, ecc (figura 29). Il sistema consente una efficiente regolazione della combustione assicurando un efficiente funzionamento della caldaia e mantenendo un basso consumo del combustibile reperito localmente. I test di combustione provano che le ceneri in combustione non causano alcun problema di malfunzionamento. Tuttavia, è possibile ottimizzare il funzionamento della caldaia impostando i parametri di combustione [59].



Figura 29. Caldaia Biokompakt per la combustione di cippato, pellets provenienti da biomassa di residui agricoli e forestali

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

Questo lavoro, in accordo con gli obiettivi prefissati, ha voluto fornire l'insieme di tutte quelle informazioni utili alla progettazione di una filiera di valorizzazione energetica dei residui agricoli, nel caso specifico quelli del nocciolo; a partire dalla produzione di una singola pianta si è arrivati a stimare il potenziale energetico per l'intera provincia di Viterbo, fornendo una caratterizzazione della biomassa, indispensabile per la scelta della tecnologia di conversione energetica più adatta. Per il campionamento della biomassa residuale derivante dalla potatura del nocciolo è stato utilizzato un modello cosiddetto “a griglia”. Il modello proposto è risultato funzionale allo scopo del lavoro, poiché ha permesso di effettuare una stima precisa dei quantitativi di biomassa prodotta su 52 impianti corilicoli. La validazione del modello di campionamento è stata eseguita, confrontando i valori stimati con i valori derivati da una raccolta di controprova in campo su 1 ha di superficie.

Dai risultati si è potuto constatare che la produzione di potature varia in primo luogo in funzione dell'età della pianta e, in misura minore, in funzione del numero di piante ad ettaro. In particolare, la correlazione tra l'età delle piante e la biomassa prodotta ha dato un valore di R^2 pari a 0,411 mentre per la correlazione tra il numero di piante/ha e la produzione di biomassa si è ottenuto un valore di R^2 pari a 0,013. La divisione degli individui in Classi di età ha ben messo in evidenza come il valore medio di produzione di biomassa relativo a ciascuna Classe, si discosti, talvolta anche in maniera sensibile, dal valore medio totale.

I quantitativi di potature da noi stimati sono risultati piuttosto lontani da quelli ottenuti da altri autori; fenomeno imputabile alle differenti condizioni pedoclimatiche e alla cultivar indagata.

Appare quanto mai evidente che non è sempre possibile far riferimento ad un valore medio assoluto quando si tratta di fare una stima della biomassa

prodotta da una qualsiasi specie arborea o arbustiva. Le variabili da considerare possono influire in misura diversa da caso a caso; possono risultare simili in Paesi diversi oppure molto differenti tra regioni dello stesso Paese. La realizzazione di un ipotetico impianto di valorizzazione energetica da biomasse residuali richiede dati verificati a livello locale ancor prima che a livello nazionale, e dunque una profonda conoscenza del contesto territoriale in cui si opera, onde evitare di procedere in maniera errata. La conferma viene da numerosi studi e ricerche, volti proprio a trovare condizioni logistiche ed impiantistiche tali da consentire all'investitore di rimanere all'interno della sfera di convenienza economica. Secondo tali studi, il bacino di approvvigionamento di dette biomasse, dovrebbe ricadere all'interno di un'area distante non più di 30 km dal centro aziendale.

Si è visto come nel calcolo della quantità di biomassa destinabile alla trasformazione energetica non si possa assolutamente prescindere dal contenuto di umidità della stessa. Si è osservato infatti come la quantità d'acqua contenuta nel legno influisca sul valore del potere calorifico oltre che sul peso della biomassa. Dai risultati ottenuti emerge che il valore medio di umidità delle potature appena raccolte in campo è pari al 46,69%. La biomassa destinata alla conversione energetica o alla conservazione in siti di stoccaggio ha un'umidità mediamente compresa tra il 20 ed il 30%. Valori di umidità ancora più bassi sono invece richiesti nel caso della produzione del pellet, dove si richiede una materia prima in entrata con un tenore di umidità del 15% circa.

Sembra più che mai opportuno quindi, distinguere la quantità "apparente" di biomassa (appena raccolta dal campo) da quella realmente utilizzabile, ossia riportata ai valori di umidità (e quindi di peso) richiesti dal processo di trasformazione energetica cui si intende destinarla.

La produzione di combustibili solidi come il pellet o il cippato e il loro utilizzo locale per la produzione di calore è una reale alternativa per la creazione di lavoro nel territorio e contribuisce alla gestione dei residui dal settore agricolo, con indubbi vantaggi per l'agricoltore; come visto, il D. Lgs. 152/2006 vieta la combustione in campo dei residui agricoli e impone misure ben precise per il loro smaltimento. Il recupero "porta a porta" delle potature, organizzato a livello

locale potrebbe essere una valida alternativa alla attuale gestione dei residui. I fruitori di tale servizio infatti, eviterebbero di incorrere in sanzioni penali, previste dalla legge, per lo smaltimento illegale dei residui colturali. Inoltre, all'agricoltore che intenda disfarsi delle proprie potature, piuttosto che di altri residui, si offre l'opportunità di risparmiare anche sul costo delle operazioni di allontanamento dei residui in campo. D'altra parte, l'attività di recupero di biomasse, se realizzata in collaborazione con enti regionali o provinciali, rappresenterebbe un'opportunità concreta per la valorizzazione di un prodotto che al momento non trova una "collocazione organizzata" sul mercato. La biomassa raccolta in campo può essere rivenduta come cippato o pellet per la combustione in caldaie o stufe domestiche, laddove non trovi spazio per la produzione di compost o terriccio per vivai o serre.

Dal confronto con il combustibile normalmente utilizzato negli impianti di riscaldamento domestici, è risultato che l'equivalenza energetica con 1 kg di gasolio si raggiunge con 2,32 kg di potature di nocciolo. Se volessimo acquistare dette potature sottoforma di pellet, sosterremmo un prezzo di acquisto variabile tra 0,16 e 0,21 €/kg per il pellet misto, e tra 0,29 e 0,34 €/kg per il pellet di media-alta qualità (prezzi riferiti al mercato locale). A conti fatti, per la produzione di 1 MJ di energia, il risparmio economico rispetto al gasolio oscillerebbe tra 0,67 e 1,08 €.

Tuttavia, i combustibili prodotti con le biomasse locali non sempre soddisfano i requisiti attuali degli standard europei del mercato dei biocombustibili solidi. La definizione di uno standard dovrebbe includere qualsiasi combustibile solido che può esistere al fine di creare un mercato aperto e competitivo e offrire varie opzioni per il consumatore finale.

Il prezzo finale pagato dal consumatore per i combustibili alternativi può variare dal 15 al 35% in meno rispetto ai combustibili solidi che rispettano gli standard europei. Il pellet che è prodotto da residui rappresenta una fonte che può essere usata per risparmiare energia. In commercio ci sono tecnologie di combustione che sono pronte per il suo utilizzo.

Oltre ai risvolti positivi fin qui descritti, l'uso di questo tipo di biomassa presenta anche l'indiscusso vantaggio legato allo sfruttamento di una risorsa

energetica disponibile in loco, alla quale le stesse aziende agricole possono attingere direttamente, con la prospettiva di rendersi maggiormente indipendenti nel soddisfacimento del proprio fabbisogno energetico.

.

BIBLIOGRAFIA

- [1] OPEC - Organization of the Petroleum Exporting Countries, “World Oil Outlook,” Vienna, Austria, 2013.
- [2] J. Leggett, *Fine Corsa*. Einaudi, 2005.
- [3] IEA - International Energy Agency, “www.iea.org.”
- [4] IEA - International Energy Agency, “World Energy Outlook,” 2011.
- [5] Enel, “Le riserve - Carbone.” [Online]. Available: <http://www.enel.it/it-IT/impianti/tecnologie/carbone/riserve/>. [Accessed: 25-May-2014].
- [6] Eni, “World oil and gas review,” 2012.
- [7] L. J. R. Nunes, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, “Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models,” *Appl. Energy*, vol. 127, pp. 135–140, Aug. 2014.
- [8] H. Wildemann, “Studio Siemens: entro il 2030, sarebbe possibile ridurre le emissioni di CO₂ del settore energetico per un importo pari al totale delle emissioni annue dell’Unione Europea,” Milano.
- [9] Centro Regionale di Informazione delle Nazioni Unite, “ONU- Rapporto su Clima.” [Online]. Available: <http://www.unric.org/it/attualita/27168-onu-rapporto-su-clima>. [Accessed: 31-May-2014].
- [10] I. Valdez-Vazquez, J. a. Acevedo-Benítez, and C. Hernández-Santiago, “Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 2147–2153, Sep. 2010.
- [11] “EUROPA - Minimizzare l’impatto climatico dei biocarburanti,” 2013. [Online]. Available:

- http://ec.europa.eu/environment/news/efe/articles/2013/03/article_20130301_05_it.htm. [Accessed: 01-Jun-2014].
- [12] J. Cai, R. Liu, and C. Deng, “An assessment of biomass resources availability in Shanghai: 2005 analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 7, pp. 1997–2004, Sep. 2008.
 - [13] Y. Yanli, Z. Peidong, Z. Wenlong, T. Yongsheng, Z. Yonghong, and W. Lisheng, “Quantitative appraisal and potential analysis for primary biomass resources for energy utilization in China,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 3050–3058, Dec. 2010.
 - [14] N. Bilanzdija, N. Voca, T. Kricka, a. Martin, and V. Jurisic, “Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia,” *Spanish J. Agric. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 292–298, 2012.
 - [15] www.istat.it, “Superficie e produzione: nocciole, mandorle, pistacchi, fichi. Dettaglio per ripartizione geografica - Anno 2010 -,” 2013. [Online]. Available: <http://agri.istat.it/jsp/dawinci.jsp?q=plC190000010000011001&an=2010&ig=1&ct=270&id=21A|15A|30A>. [Accessed: 16-Apr-2014].
 - [16] M. Petriccione, L. F. Ciarmiello, P. Boccacci, A. De Luca, and P. Piccirillo, “Evaluation of ‘Tonda di Giffoni’ hazelnut (*Corylus avellana* L.) clones,” *Sci. Hort. (Amsterdam)*, vol. 124, no. 2, pp. 153–158, Mar. 2010.
 - [17] IEA - International Energy Agency, “Key World Energy Statistics,” France, 2013.
 - [18] A. Bartolazzi, *Le Energie Rinnovabili*. Hoepli, 2005, p. 262.
 - [19] <http://www.eniscuola.net/>, “Biomassa,” 2013. .
 - [20] 2002/358/CE, “Protocollo di Kyoto sui cambiamenti climatici,” 2002. [Online]. Available:

http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128060_it.htm. [Accessed: 20-May-2014].

- [21] D. Lgs. 3 marzo 2011 n. 28, “Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.” marzo 2011, 2011.
- [22] R. Gelletti, R. Jodice, G. Mauro, D. Migliardi, D. Picco, M. Pin, E. Tomasinsig, L. Tommasoni, C. E. T. A. Centro, E. Teorica, D. Chinese, G. Nardin, and P. Simeoni, “Energia dalle biomasse Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e mbientali,” Trieste, 2006.
- [23] Corpo Forestale dello Stato, “Foreste e Acqua: dati statistici.” [Online]. Available:
<http://www3.corpoforestale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/6572>. [Accessed: 16-May-2014].
- [24] V. Motola, N. Colonna, V. Alfano, M. Gaeta, S. Sasso, V. De Luca, C. De Angelis, A. Soda, and G. Braccio, “ENEA - Atlante biomasse su web-GIS,” 2009.
- [25] P. Suscace, S. Scientifico, L. Pari, L. O. Sviluppo, D. Colture, and E. In, *Lo sviluppo delle colture energetiche in italia.* .
- [26] B. Kavalov and S. D. Peteves, “Bioheat applications in the European union: an analysis and perspective for 2010.” The Netherlands, European Commission, Directorate general, Petten, 2004.
- [27] www.rilegno.org, “Programma specifico di prevenzione,” 2013. [Online]. Available:
http://www.rilegno.org/uploads/32/63/32635951c68d51dc9f2e4d7860ad14c9/PSP_2013_RILEGNO.pdf. [Accessed: 20-May-2014].

- [28] APAT Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, *LE BIOMASSE LEGNOSE. Un'indagine sulle potenzialità del settore forestale italiano nell'offerta di fonti di energia*, Rapporti 3. Roma, 2003.
- [29] V. Francescato, E. Antonini, and G. Mezzalana, "L'energia del legno," Torino, 2004.
- [30] E. Corona and A. Lo Monaco, "Caratteristiche energetiche della biomassa forestale epigea," in *Valorizzazione energetica di materiali legnosi nel Lazio*, ENEA, 1992, pp. 297–299.
- [31] UNI EN 14918, *Biocombustibili solidi - Determinazione del potere calorifico*. 2010.
- [32] T. Järvinen and D. Agar, "Experimentally determined storage and handling properties of fuel pellets made from torrefied whole-tree pine chips, logging residues and beech stem wood," *Fuel*, vol. 129, pp. 330–339, Aug. 2014.
- [33] AIEL, "Associazione italiana Energie Agroforestali," 2014.
- [34] A. Zezza, *Bioenergie: quali opportunità per l'agricoltura italiana*. INEA, 2008, pp. 229–234.
- [35] UNI EN 14961-2, *Biocombustibili solidi - Specifiche e classificazione del combustibile - Parte 2: Pellet di legno per uso non industriale*. 2011.
- [36] ENEA - Centro Ricerche Trisaia, "La gassificazione delle biomasse," 2014. [Online]. Available: <http://www.trisaia.enea.it/it/laboratori-e-impianti/hall-tecnologica-impianti-di-gassificazione>. [Accessed: 20-May-2014].
- [37] V. Francescato, "Basi tecniche del syngas." Legnano - Padova (Italy), 2013.
- [38] E. Kwietniewska and J. Tys, "Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 491–500, Jun. 2014.

- [39] D. Lgs. 3 aprile 2006 n. 152, “Norme in materia ambientale.” 2006.
- [40] R. Martino and A. Montermini, “Quando si possono bruciare i residui colturali in campo,” *L’Informatore Agrario*, vol. 39, pp. 37–40, 2013.
- [41] D. R. Chaudhary and A. Ghosh, “Bioaccumulation of nutrient elements from fly ash-amended soil in *Jatropha curcas* L.: a biofuel crop,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 185, no. 8, pp. 6705–12, Aug. 2013.
- [42] E. Rugini and V. Cristofori, “La coltura del nocciolo nel viterbese: innovazioni tecnologiche e agronomiche nel rispetto della tipicità del prodotto,” *Corylus & Co.*, Viterbo, 2011.
- [43] Ascopiemonte S. C. and Organizzazione produttori frutta a guscio, “Il nocciolo. Guida alla coltivazione,” Cuneo, 2009.
- [44] V. Cristofori, C. Cammilli, F. . Valentini, and C. Bignami, “Effect-of-different-pruning-methods-on-growth,-yield-and-quality-of-the-hazelnut-cultivar-Tonda-Gentile-Romana_2009_Acta-Horticulturae,” *Acta Hortic.*, vol. 845, pp. 315–322, 2009.
- [45] C. Sonnati, G. Facciotto, and V. Ughini, “Prune and recycle: Mechanical hazelnut pruning and energetic recovery of its biomass,” *Acta Hortic.*, vol. 845, pp. 413–418, 2009.
- [46] D. Monarca, M. Cecchini, M. Guerrieri, and A. Colantoni, “Conventional and alternative use of biomasses derived by hazelnut cultivation and processing,” *Acta Hortic.*, vol. 845, pp. 627–634, 2009.
- [47] UNI EN 14778, *Biocombustibili solidi - Campionamento*. 2011.
- [48] UNI EN 15442, *Combustibili solidi secondari - Metodi di campionamento*. 2011.

- [49] UNI EN 14774 - 1, *Biocombustibili solidi - Determinazione dell'umidità - Metodo di essiccazione in stufa - Parte 1: Umidità totale - Metodo di riferimento*. 2009.
- [50] UNI EN 14775, *Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto di ceneri*. 2010.
- [51] UNI EN 15104, *Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto totale di carbonio, idrogeno e azoto - Metodi strumentali*. 2011.
- [52] V. Ughini, G. L. Malvicini, A. Roversi, C. Sonnati, G. Facciotto, and S. Bergante, "Potatura meccanica del nocciolo e convenienza al recupero delle biomasse," *Quad. della Reg. Piemonte - Agric.*, vol. 64, 2009.
- [53] C. Di Blasi, V. Tanzi, and M. Lanzetta, "A study on the production of agricultural residues in Italy," *Biomass and Bioenergy*, vol. 12, no. 5, pp. 321–331, 1997.
- [54] <http://www.quadernodiepidemiologia.it/>, "Dimensione o numerosità del campione." [Online]. Available: <http://www.quadernodiepidemiologia.it/epi/campion/dimens.htm>. [Accessed: 28-May-2014].
- [55] "Settore SeSIRCA." [Online]. Available: <http://www.agricoltura.regione.campania.it/carta/01-funzioni.htm>. [Accessed: 28-May-2014].
- [56] V. Cristofori, "Tesi di Dottorato di Ricerca: Fattori di qualità della nocciola," Università degli Studi della Tuscia di Viterbo, 2005.
- [57] M. Cecchini, D. Monarca, A. Colantoni, S. Di Giacinto, L. Longo, and E. Allegrini, "Evaluation of Biomass Residuals by Hazelnut and Olive's Pruning in Viterbo Area," in *International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. CIOSTA XXXV Conference "From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry."*

- [58] “Lo stoccaggio del cippato.” [Online]. Available: <http://www.rinnovabili.it/storico/lo-stoccaggio-del-cippato/>. [Accessed: 30-May-2014].
- [59] “Caldaie Biokompakt.” [Online]. Available: http://www.biosol.it/documents/hackschnitzelheizung_biokompakt_italiano.pdf.