DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

UTILIZZO DI BIOMASSE LIGNOCELLULOSICHE PER LA PRODUZIONE DI PELLET AD USO ALIMENTARE

THE USE OF LIGNOCELLULOSIC MASSES FOR THE PRODUCTION OF FOOD-GRADE LEATHER

TIPO TESI: compilativa

Studente:
MATTEO NARDI

Relatore:
DOTT. ALESSIO ILARI

Correlatore:
PROF. DANIELE DUCA

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

SOMMARIO

SOMMARIO 3

ELENCO DELLE TABELLE 5

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI 8

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI 10

CAPITOLO 1 MATERIALI E METODI: 16

1.1 Criteri di selezione e analisi statistica delle colture. 16

1.2 Dalle colture ai residui: identificazione e mappatura dei sottoprodotti 18

1.2.1 Introduzione 18

1.2.2 Biomasse erbacee 21

1.2.3 Biomasse arboree e forestali 24

CAPITOLO 2 FILIERA DI PRODUZIONE E VALORIZZAZIONE DEL PELLET 39

2.1 Processo di pellettizzazione 39

2.1.1 Raccolta materie prime e gestione forestale 39

2.1.2 Cippatura 40

2.1.3 Triturazione 41

2.1.4 Trasporto 41

2.1.5 Stoccaggio e lavorazione principale 42

2.1.6 Processo di pellettizzazione 46

2.2 Parametri da valutare 48

CAPITOLO 3 RISULTATI ANALISI E COMPARAZIONE DEI VARI PARAMETRI DI QUALITÀ DEL PELLET 50

3.1 Preambolo 50

3.2 Parametri della UNI EN ISO 17225 50

3.3 Parametri del pellet di quercia 51

3.4 Parametri pellet di paglia 51

3.5 Parametri pellet di residui di girasole 52

3.6 Parametri pellet di residui di mais 52

3.7 Parametri pellet di melo 53
3.8 Parametri pellet di pero 53
3.9 Parametri pellet di vite 53
3.10 Parametri pellet di ulivo 54
3.11 Parametri pellet di ciliegio 54
3.12 Parametri pellet di nocciolo 54
CAPITOLO 4 DISCUSSIONI COMPARAZIONE E INDIVIDUAZIONE DELLE BIOMASSE 56
4.1 Descrizione elementi dannosi per la carne. 56
4.1.1 Idrocarburi policiclici aromatici. 56
4.1.2 Metalli pesanti 57
4.2 Comparazione biomassa-norma e biomassa di riferimento 58
4.2.1 Pellet di paglia 59
4.2.2 Pellet di stocchi di girasole 60
4.2.3 Pellet di stocchi di mais 62
4.2.4 Pellet di residui del melo 63
4.2.5 Pellet di residui del pero 64
4.2.6 Pellet di residui della vite 65
4.2.7 Pellet di residui di ulivo 66
4.2.8 Pellet di residui di ciliegio 68
4.2.9 Pellet di residui di nocciolo 69
4.3 Comparazione biomasse secondo i parametri 70
4.3.1 Ceneri 70
4.3.2 durabilità meccanica 71
4.3.3 polveri 71
4.3.4 potere calorifico inferiore 72
4.3.5 densità apparente 73
4.3.6 azoto totale 74
4.3.7 zolfo totale 74
4.3.8 cloro totale 75
4.3.9 Rame problemi che può causare 76
4.4 Comparazione totale tra le biomasse e individuazione di quelle migliori 76
CONCLUSIONI 78
BIBLIOGRAFIA 82

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 0–1 tabella valori soglia per parametri principali della norma UNI EN ISO 17225-2. [7] 13

Tabella 0–2 valori soia per parametri principali della norma UNI EN ISO 17225-6.[11] 14

Tabella 1–1 valori ISTAT superfici e produzioni. [14] 18

Tabella 1–2 tipologie di scarti delle colture agricole. [15](A. M. Mancini, C. M. Berton, C. L. D. Apote, C. L. Pari, E. Sandro, and S. D. Andrea, "Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei biocombustibili," 2008). 19

Tabella 1–3 attuale destinazione dei residui delle principali colture arboree ed erbacee. [15](A. M. Mancini, C. M. Berton, C. L. D. Apote, C. L. Pari, E. Sandro, and S. D. Andrea, "Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei biocombustibili," 2008). 20

Tabella 1–4: rapporti residuo-seme e umidità delle biomasse per la produzione di pellet. [16](modificato da Nicolae Scarlat, Milan Martinov, Jean-François Dallemand. 2010)..... 21

Tabella 1–5 Soil management strategies consequent to the average score assigned to soil quality conditions. [37]A. Libutti, A. R. B. Cammerino, and M. Monteleone, "Management of residues from fruit tree pruning: A trade-off between soil quality and energy use," Agronomy, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.3390/agronomy11020236. 28

Tabella 4–1 Tabella di confronto del pellet di paglia di cereali, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 59

Tabella 4–2 Tabella di confronto del pellet di paglia di cereali, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 59

Tabella 4–3 Tabella di confronto del pellet di stocchi di girasole, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 60

Tabella 4–4 Tabella di confronto del pellet di stocchi di girasole, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 61

Tabella 4–5 Tabella di confronto del pellet da residui di mais, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 62

Tabella 4–6 Tabella di confronto del pellet da residui di mais, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 62

Tabella 4–7 Tabella di confronto del pellet da residui del melo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 63
Tabella 4–8 Tabella di confronto del pellet da residui del melo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 63
Tabella 4–9 Tabella di confronto del pellet da residui del pero, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 64
Tabella 4–10 Tabella di confronto del pellet da residui del pero, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 64
Tabella 4–11 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui della vite, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 65
Tabella 4–12 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui della vite, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 65
Tabella 4–13 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ulivo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 66
Tabella 4–14 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ulivo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 67
1Tabella 4–15 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ciliegio, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 68
Tabella 4–16. Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ciliegio, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 68
Tabella 4–17 Tabella di confronto del pellet da residui di nocciolo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 69
Tabella 4–18. Tabella di confronto del pellet da residui di nocciolo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 69
Tabella 4–19 Tabella di confronto del contenuto di ceneri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 70
Tabella 4–20 Tabella di confronto del contenuto di ceneri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 70
Tabella 4–21 Tabella di confronto della durabilità meccanica delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 71
Tabella 4–22 Tabella di confronto della durabilità meccanica delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 71
Tabella 4–23 Tabella di confronto del contenuto di polveri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 71

Tabella 4–24 Tabella di confronto del contenuto di polveri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 72
Tabella 4–25 Tabella di confronto del potere calorifico inferiore delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 72
Tabella 4–26 Tabella di confronto del potere calorifico inferiore delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 72
Tabella 4–27 Tabella di confronto della densità apparente delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 73
Tabella 4–28 Tabella di confronto della densità apparente delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca 73
Tabella 4–29 Tabella di confronto del contenuto di azoto delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 74
Tabella 4–30 Tabella di confronto del contenuto di azoto delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 74
Tabella 4–31 Tabella di confronto del contenuto di zolfo delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 74
Tabella 4–32 Tabella di confronto del contenuto di zolfo delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 74
Tabella 4–33 Confronto del contenuto di cloro delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 75
Tabella 4–34 Confronto del contenuto di cloro delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 75
Tabella 4–35 tabella di confronto del contenuto di rame delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 76
Tabella 4–36 Comparazione complessiva delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca. 77

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

SIGLA 1 ISO	Internactional organization for standardization (organizzazione interna)
SIGLA 2 CEN	Comitato europeo di normalizzazione.
SIGLA 3 UNI	Ente nazionale italiano di unificazione.
SIGLA 4 IPA	Idrocarburi policiclici aromatici
SIGLA 5 ISTAT	Istituto Nazionale di Statistica
SIGLA 6 t/ha	Tonnellate ad ettaro.
SIGLA 7 EFSA	European food safety authority (autorità europea per la sicurezza alimentare)
SIGLA 8 NOx	Ossidi di azoto
SIGLA 9 SOx	Ossidi di zolfo
SIGLA 10 HCl	Acido cloridrico
SIGLA 11 KCl	Cloruro di potassio
SIGLA 12 HTC	Carbonizzazione idrotermale
SIGLA 13 SSA	Sistema di allevamento a fusetto modificato
SIGLA 14 DU	Durabilità meccanica
SIGLA 15 AG	Iniziali di AG Andersson, ideatore del pellet (1912)
SIGLA 16 N/D	Non disponibile
SIGLA 17 Mt/anno	Milioni di tonnellate all'anno
SIGLA 18 D.O.P.	Denominazione origine protetta
SIGLA 19 MJ	Megajoule
SIGLA 20 g/kg	Milligrammi per chilo

SIGLA 21 M	Umidità
SIGLA 22 D	Diametro
SIGLA 23 L	Lunghezza
SIGLA 24 A	Ceneri
SIGLA 25 A1, A2,	Classi di qualità del pellet
SIGLA 26 w-%	Percentuale di peso (sul secco/sul tal quale)
SIGLA 27 Gruppi 2, 3, 4, 5	Categorie di biomasse non legnose
SIGLA 28 ISO 18134-1/-2	Norma di metodo per l'umidità
SIGLA 29 ISO17829	Norma di metodo per diametro e lunghezza
SIGLA 30 ISO18122	Norma di metodo per le ceneri
SIGLA 31 UNI EN ISO 17225-1/-2/-6	Norme di classificazione del pellet
SIGLA 32 NOMb	Nitrosomioglobina

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'oggetto centrale del presente lavoro è il pellet, un biocombustibile solido densificato di forma cilindrica e omogeneo, ottenuto per via meccanica e privo di additivi chimici. Il processo di produzione è basato sulla compressione ad alta pressione di particelle di biomassa sminuzzata all'interno di una trafila: la combinazione di calore, pressione ed umidità fa attivare i polimeri naturali intrinseci della materia prima (come lignina ed emicellulose) i quali agiscono da leganti termoplastici garantendo coesione e stabilità al prodotto finale.

Rispettivamente alla biomassa iniziale il pellet si caratterizza per aver un volume significativamente ridotto e una densità energetica e massica nettamente superiore, ottimizzando la logistica, stoccaggio e movimentazione[1]

La prima forma di pellet è stata ideata da AG Andersson in Svezia nel 1912. Lo scopo era di andare in contro all'industria mineraria andando a densificare le polveri umide metalliche, ottenendo sfere che andavano successivamente essiccate e cotte.[2] Parallelamente la pellettizzazione trovavano applicazione in ambito zootecnico per aumentare di valore i mangimi. Dopo sperimentazioni nel 1920 circa si iniziarono ad applicare in maniera più diffusa evolvendosi negli anni seguenti.[3]. La pellettizzazione si è diffusa anche al settore energetico grazie alla crisi nel 1970. Per trovare un'alternativa ai combustibili fossili ci si è spostati verso i pellet di legno.[4] Da allora fino ad oggi il pellet si è diffuso molto e trova applicazione in usi energetici e non, racchiudendo in ognuno di essi vari processi e utilizzi. In questo studio di andrà ad approfondire la tipologia di pellet ad uso energetico dove troviamo processi di termovalorizzazione all'interno di caldaie singole o accoppiate a cogeneratori (per la produzione di calore e di elettricità), un altro processo simile è il teleriscaldamento (uso di calore prodotto dalle caldaie per il riscaldamento) singolo o accoppiato ad altri processi di combustione per recuperare il calore residuo. Troviamo anche processi di torrefazione e trattamento idrotermico (processo di nobilitazione delle biomasse solide e liquide), il pellet può anche essere avviato a processi di pirolisi (trattamento termico in assenza di ossigeno per produrre bio-olio, syngas, biochar/carbone vegetale) e gasificazione (trattamento termico con limitata presenza di ossigeno, che produce principalmente syngas).

Tra i processi non energetici troviamo applicazioni in diversi settori:

- Agronomico: l'uso del pellet come vettore per i fertilizzanti e ammendanti, associando la biomassa (letami o compost) a componenti minerali.
- Ambientale: lo sfruttamento della composizione e della forma del pellet per la rimozione di inquinanti, metalli pesanti e idrocarburi policiclici aromatici (IPA) da acqua o acque reflue, oltre all'impiego della pellettizzazione per la stabilizzazione e la valorizzazione dei rifiuti.
- Biologico: l'utilizzo del pellet come substrato di crescita per microrganismi e funghi, oppure come vettore di essi.
- Materiali: l'impiego come materia prima per composti, biofiller e materiali da costruzione.
- Zootecnico: la pellettizzazione è la forma più utilizzata per la produzione di mangimi

Una panoramica sulle applicazioni non energetiche mostra che il pellet può rappresentare molto più di una semplice fonte di carburante alternativa. La sua utilità può derivare dalla sua geometria controllata, dalla capacità di combinare componenti differenti, dalle proprietà di sorbimento, dalla ritenzione idrica, dalla suscettibilità alla colonizzazione microbica o dalla compatibilità con matrici composite. Però bisogna essere cauti nella visione dei risultati perché le caratteristiche che si ricercano in un'applicazione possono essere indesiderate in un'altra. [5], [6]

Nel tempo questi prodotti hanno riscontrato una diffusione e commercializzazione sempre più crescenti. Per tale ragione, al fine di garantire all'acquirente standard di sicurezza e qualità più elevati, tali prodotti vengono sottoposti a processi di certificazione su base volontaria. A tal proposito, la normazione di riferimento è stata redatta ed emanata dall'ente internazionale di standardizzazione ISO (international organization for standardization) e poi recepito a livello europeo dal CEN (comitato europeo di normazione) e in Italia dall'UNI (ente nazionale italiano di unificazione). Questi enti operano attraverso comitati tecnici o di valutazione della conformità che, dopo aver analizzato e sviluppato vari standard, sono giunti alla stipulazione della norma UNI EN ISO 17225. Quest'ultima definisce i requisiti generali, le specifiche tecniche e le classi di qualità dei biocombustibili solidi ad uso residenziale, commerciale e industriale, fissando parametri oggettivi per identificare l'origine del materiale, dimensioni, umidità, contenuto di ceneri, potere calorifico ed eventuali elementi chimici o additivi. Tale norma racchiude un'altra serie di altre specifiche tecniche per approfondire le caratteristiche dei singoli prodotti. Nell'ambito del presente elaborato ci si concentrerà sugli standard di qualità e sicurezza del pellet, disciplinati dalle norme UNI EN ISO 17225-2 e UNI EN ISO 17225-6. Definiscono rispettivamente parametri per pellet ad uso domestico e commerciale e pellet prodotti a partire da biomasse erbacee.

La UNI EN ISO 17225-2 definisce le classi di qualità e le relative specifiche dei pellet di legno classificati per uso non industriale e industriale. Questa sezione della norma riguarda solo i pellet di legno ricavati dalle seguenti materie prime: legno vergine proveniente da foreste, piantagioni e altro legno, sottoprodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno privi di trattamenti chimici. La classificazione distingue i prodotti in base all'ambito di destinazione: per uso commerciale e residenziale si utilizzano le classi A1, A2 e B (dove le prime 2 escludono l'utilizzo di legno usato, mentre la classe B ammette l'impiego di legno già destinato ad altri impieghi ma non trattato chimicamente), mentre per l'uso industriale le classi di riferimento sono I1, I2, I3 (con la classe I3 che contempla uso di biomasse usate ma non trattate chimicamente). Nel contesto del presente elaborato, l'attenzione è rivolta specificamente alle classi per uso commerciale e residenziale, per le quali vengono analizzati i seguenti parametri: origine e fonte della biomassa, diametro e lunghezza, umidità contenuto di ceneri, durabilità meccanica, polveri, potere calorifico inferiore, densità apparente, azoto, zolfo, cloro, temperatura di fusione (ceneri), ceneri, arsenico, cadmio, cromo, rame, piombo, mercurio, nichel, zinco.

Parametro	Unità	ENplus A1	ENplus A2	ENplus B	Metodica standard [10]
Diametro	mm	6 ± 1 or 8 ± 1			ISO 17829
Lunghezza	mm	3,15 < L ≤ 40 [4]			ISO 17829
Contenuto idrico	w% [2]	≤ 10			ISO 18134
Ceneri	w% [3]	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Durabilità meccanica	w% [2]	≥ 98,0 [5]	≥ 97,5 [5]		ISO 17831-1
Polveri (< 3,15 mm)	w% [2]	≤ 1,0 [6] (≤ 0,5 [7])			ISO 18846
Potere calorifico inferiore	kWh/kg [2]	≥ 4,6 [8]			ISO 18125
Densità apparente	kg/m^3 [2]	600 ≤ BD ≤ 750			ISO 17828
Azoto	w% [3]	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	ISO 16948
Zolfo	w% [3]	≤ 0,04	≤ 0,05		ISO 16994
Cloro	w% [3]	≤ 0,02		≤0,03	ISO 16994
Temperatura di rammollimento ceneri[1]	°C	≥ 1200	≥ 1100		CEN/TC 15370-1
Arsenico	mg/kg [3]	≤1			ISO 16968
Cadmio	mg/kg [3]	≤ 0,5			ISO 16968
Cromo	mg/kg [3]	≤10			ISO 16968
Rame	mg/kg [3]	≤10			ISO 16968
Piombo	mg/kg [3]	≤10			ISO 16968
Mercurio	mg/kg [3]	≤ 0,1			ISO 16968
Nickel	mg/kg [3]	≤10			ISO 16968
Zinco	mg/kg [3]	≤100			ISO 16968
Parametri non soggetti ad analisi di Laboratorio accreditato					
Temperatura del pellet	°C	≤ 40			-
Additivi	w% [2]	≤ 2 [9]			-

Tabella 0–1 tabella valori soglia per parametri principali della norma UNI EN ISO 17225-2. [7]

I parametri principali per determinare un pellet di qualità sono:

- Contenuto di ceneri: indica la percentuale di residuo incombustibile, che dipende dalla materia prima e la sua gestione nella filiera.
- Potere calorifico inferiore: calore sprigionato per unità di massa, escludendo quello recuperabile dalla condensazione del vapore acqueo nei fumi di scarico.
- Umidità: valutato in percentuale su peso fresco e raramente sul secco, influenza in negativo il potere calorifico, la combustione, l'integrità fisica e lo stoccaggio.
- Durabilità meccanica: meno polveri fini e omogenea combustione.
- Polveri fini: altera il funzionamento di impianto e combustione.

- Diametro e lunghezza: uniformità di grandezza rende omogenea la combustione. [8], [9], [10]

La norma UNI EN ISO 17225-6 definisce le classi di qualità e specifiche tecniche esclusivamente per i pellet prodotti da biomasse non legnose. Tali materiali comprendono le biomasse erbacee (piante fusto non legnoso che disseccano al termine della stagione vegetativa), i sottoprodotti e i residui derivanti dalla lavorazione ortofrutticola, le biomasse di origine vegetale acquatica, miscelazioni e blend (ottenuti dalle combinazioni intenzionali o fortuita tra le diverse categorie di biomasse, incluse quelle legnose). Ai fini della classificazione normativa queste biomasse (UNI EN ISO 17225-1) sono definite in gruppi: rispettivamente il gruppo 2, gruppo 3, gruppo 4, gruppo 5

I parametri valutati sono i medesimi della norma UNI EN ISO 17225-2 differendo tuttavia per l'origine delle biomasse impiegate e per i range di valori ammessi per ogni classe, identificate in questo caso con le lettere A e B.

	Unità di misura	**A**	**B**
Origine e provenienza, prospetto 1 della ISO 17225-1		2 Biomassa erbacea	2 Biomassa erbacea
		3 Biomassa da frutti	3 Biomassa da frutti
		4 Biomassa acquatica	4 Biomassa acquatica
		5 Miscele e miscugli	5 Miscele e miscugli
Diametro, D **e Lunghezza** L, ISO 17829	mm	Da D06 a D25, D ± 1; 3,15<L≤40 (da D06 a D10) 3,15<L≤50 (da D12 a D25)	Da D06 a D25, D ± 1;3,15<L≤40 (da D06 a D10) 3,15<L≤50 (da D12 a D25)
Umidità, M, ISO 18134-1, ISO 1834-2	w-% del tal quale, su base umida	M12≤12	M15≤15
Ceneri, A, ISO 18122	w-% sul secco	A6.0 ≤ 6	A10 ≤ 10
Durabilità meccanica, DU	w-% sul tal quale	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.0 ≥ 96,0

Tabella 0–2 valori soia per parametri principali della norma UNI EN ISO 17225-6.[11]

La norma conferisce limiti molto stringenti alle varie classi di qualità del pellet, specialmente a quello ad uso domestico. Per rientrare in queste categorie si predilige del legno piuttosto di altri. I più utilizzati e versatili sono quelli provenienti da gimnosperme, dotati generalmente di un maggiore contenuto di lignina rispetto alle latifoglie. La lignina è il composto che funge da legante naturale per produrre il pellet e una sua carenza porta a minor qualità di prodotto. Le latifoglie generalmente presentano caratteristiche lontane da quelle delle gimnosperme, a meno che non vengano effettuati pretrattamenti industriali o utilizzati additivi e leganti, migliorando i punti carenti di queste biomasse: densità, contenuto di ceneri e potere calorifico. All'interno della specie latifoglie troviamo il faggio che può soddisfare i requisiti richiesti

dalle classi di qualità, al contrario di specie come quercia e pioppo che rendono difficile l'applicazione da sole. [12]

Dall'analisi delle categorie di biomassa disciplinate e ammesse delle norme UNI EN ISO 17225-2 e UNI EN ISO 17225-6 emergono matrici che, nell'ambiente temperato mediterraneo, vengono spesso gestite in modo non ottimale, scarsamente sfruttate e talvolta trattate come scarti agricoli o forestali se non perfino rifiuti. Questa criticità solleva problematiche connesse allo smaltimento e alla gestione, oltre a rappresentare una potenziale fonte di inquinamento. Tali svantaggi possono essere superati trasformando alcuni di questi prodotti, i più sicuri, in food pellet, creando così un bene utile e una nuova fonte di reddito a partire da materiali che in origine risultavano improduttivi o persino onerosi dal punto di vista della gestione. I food pellet costituiscono una categoria di biocombustibile che si distacca dalla tradizionale destinazione energetica per trovare applicazione nell'ambito alimentare umano, ad esempio nei processi di cottura e affumicatura al barbecue e affumicatori. Attualmente tali prodotti non presentano caratteristiche che li differenziano strutturalmente da un pellet per il riscaldamento poiché non esistono ancora norme e parametri specifici dedicati ai pellet ad uso alimentare. Le aziende produttrici tendono ad autocertificare l'elevata qualità del prodotto; tuttavia, questa prassi spesso non fornisce informazioni dettagliate sui parametri di qualità fisica, chimica e petrografica (fondamentale per verificare l'assenza di impurità). Un' analisi di questi parametri risulta di elevata importanza, in quanto la presenza di eventuali contaminanti nelle biomasse può influire negativamente sul gusto e salubrità della carne.[13]

Lo scopo di questo elaborato sarà quello di valutare attraverso bibliografia le caratteristiche fisiche, chimiche ed energetiche di alcune biomasse rappresentative del panorama agricolo e forestale italiano in ottica di produzione di pellet alimentari.

Capitolo 1

MATERIALI E METODI:

In questo capitolo si identificheranno le colture più rappresentative nel settore agrario e forestale, per poi analizzarne le principali caratteristiche.

1.1 **Criteri di selezione e analisi statistica delle colture.**

Per individuare le biomasse facilmente reperibili in Italia ai fini di produrre food pellet, l'analisi è partita dai dati ufficiali dell'ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) relativi alle coltivazioni agricole e forestali. L'esame dei dati statistici ha consentito di mappare la disponibilità complessiva delle matrici vegetali sul territorio nazionale, suddividendole tra colture erbacee e colture arboree. Tale classificazione è essenziale per evidenziare la diversa natura fisica, chimica e strutturale dei residui derivati dalle varie filiere.

Territorio	Italia		
Frequenza	Annuale		
Tempo	2026		
Tipo di coltivazione	**Superficie totale - ettari**	**Superficie in produzione - ettari**	**Produzione totale - quintali**
COLTURE ERBACEE			
Frumento tenero (*)	531.743	..	29.723.768
Frumento duro (*)	1.123.500	..	39.513.628
Mais	530.296		54.837.817
Miscele di segale e cereali invernali (*)	3.502	..	107.116
Orzo (*)	230.670	..	9.435.804
Miscele di avena e cereali primaverili (grano misto diverso dal maslin) (*)	91.289	..	2.209.421
Pisello proteico (*)	8.340	..	251.486
Cece (*)	19.002	..	332.910
Colza (*)	21.203	..	633.474
Girasole (*)	123.183	..	3.446.724
Soia (*)	291.260	..	9.609.301
COLTURE ARBOREE			
Mela (*)	55.012	53.794	24.112.030
Mele per il consumo fresco (*)	52.603	51.429	22.831.764
Mele destinate alla trasformazione (*)	2.409	2.365	1.280.266
Pera (*)	19.732	19.219	3.915.580
Pere per il consumo fresco (*)	17.851	17.394	3.545.815
Pere destinate alla trasformazione (*)	1.881	1.825	369.765
Pesca (*)	36.744	36.299	7.511.355
Pesche destinate a consumo (*)	35.102	34.725	7.165.514
Pesche destinate alla trasformazione (*)	1.642	1.574	345.841
Nettarina (pesca noce) (*)	16.154	15.822	3.538.414
Nettarine destinate a consumo (*)	15.105	14.829	3.305.177
Nettarine destinate alla trasformazione (*)	1.049	993	233.237
Albicocca (*)	17.350	16.653	2.454.015
Amarene (*)	218	206	14.656
Ciliegie dolci (*)	29.387	29.027	1.361.229
Susina/prugna (*)	11.712	11.325	1.815.200
Kiwi (*)	24.651	23.278	4.800.486
Mandorla (*)	55.215	54.280	863.342
Nocciola (*)	95.698	91.958	1.629.744
Uva da vino (*)	681.842	658.620	72.319.222
Uva da tavola (*)	40.790	40.421	9.446.006
Olive da tavola e da olio (*)	1.109.392	1.072.229	27.601.314
Arancia (*)	84.127	83.432	20.384.156
Limoni e lime acidi (*)	26.573	24.933	5.114.101

Tabella 1–1 valori ISTAT superfici e produzioni. [14]

Secondo i dati ISTAT, le colture erbacee più diffuse in Italia risultano essere il frumento (tenero e duro), con 1.655.243 ettari, il mais, con 530.296 ettari, la soia, con 291.260 ettari, l'orzo, con 230670 ettari e il girasole, con 123.183 ettari.

Per quanto riguarda le colture arboree, le più diffuse sul territorio nazionale sono l'ulivo (da tavola e da olio), con 1.109.392 ettari, la vite (uva da tavola e da vino), con 722.632 ettari, il nocciolo, con 95.698 ettari, l'arancio, con 84.127 ettari, il mandorlo, con 55.215 ettari e il melo, con 55.015 ettari.

Sebbene i dati ISTAT evidenziano come il panorama agricolo italiano sia dominato da colture orientate alla produzione alimentare primaria (cereali da granella, frutta fresca ecc.), l'interesse di questo studio non è rivolto al prodotto edibile principale, bensì ai residui agro-industriali e colturali generati lungo la filiera.

1.2 **Dalle colture ai residui: identificazione e mappatura dei sottoprodotti**

1.2.1 *Introduzione*

La coltivazione di queste specie comporta la produzione di ingenti quantità di biomassa di scarto (paglie, stocchi, sarmenti di potatura, gusci e noccioli) che, nella maggior parte dei casi, rimane in campo, gestiti come residui a basso valore aggiunto e talvolta bruciata. Quindi il collegamento tra diffusione della coltura e la scelta della biomassa da destinare alla pellettizzazione dipende anche dalla disponibilità territoriale e nella continuità di approvvigionamento: una maggiore superficie coltivata corrisponde ad una maggiore presenza di residui.

Spostando l'attenzione dal prodotto edibile al sottoprodotto di scarto effettivamente recuperabile dalle biomasse precedentemente elencate, è possibile suddividerlo in:

- Biomasse erbacee: residui delle colture cerealicole, quali al paglia (prodotta da colture che lasciano in campo i culmi, come frumento e orzo) e gli stocchi (residui del fusto di mais e girasole).
- Biomasse arboree: residui derivati da potature annuali (come i sarmenti di vite, le potature di ulivo e dei fruttiferi maggiori), ai quali si aggiungono i gusci e i residui della lavorazione della frutta (come il nocciolo)

Erbacee		Legnose	
Coltura	Residuo	Coltura	Residuo
Frumento tenero e duro	Paglia	Vite	Sarmenti
Segale	Paglia	Olivo	Legna e rami
Orzo	Paglia	Melo	Legna e rami
Avena	Paglia	Pero	Legna e rami
Riso	Paglia	Pesco	Legna e rami
Mais	Stocchi e Tutoli	Agrumi	Legna e rami
Girasole	Stocchi	Mandorlo	Legna e rami
		Nocciolo	Legna e rami
		Albicocco	Legna e rami
		Actinidia (kiwi)	Potature

Tabella 1–2 tipologie di scarti delle colture agricole. [15](A. M. Mancini, C. M. Berton, C. L. D. Apote, C. L. Pari, E. Sandro, and S. D. Andrea, "Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei biocombustibili," 2008).

I residui elencati in tabella possono trovare impiego, all'interno dell'azienda, in diversi ambiti. Un esempio è rappresentato dalla paglia, caratterizzata da un'elevata polivalenza di utilizzo.

Coltura	Residuo	Utilizzo	Percentuale di utilizzo/inutilizzo
Frumento tenero e duro	Paglia	• Lettiera per ricovero animali • Alimentazione animale • Industria cartaria e varie • Bruciata in campo	40-50 % 5-10 % 5-10 % 30-50 %
Orzo	Paglia	• Lettiera per ricovero animali • Bruciata in campo	40-50 % 50-60 %
Avena	Paglia	• Alimentazione animale • Bruciata in campo	40-60 % 40-60 %
Riso	Paglia	• Lettiera per ricovero animali • Bruciata in campo	20-30 % 70-80 %
Mais da granella	Stocchi (steli); Tutoli (assi delle spighe)	• Lettiera per ricovero animali (stocchi) • Alimentazione animale (stocchi) • Interramento (tutoli)	40-50 % 10-20 % 70-80 %
Barbabietola da zucchero	Foglie	• Alimentazione animale • Interramento	10-20 % 90-80 %
Tabacco	Steli	• Interramento	100 %
Girasole	Steli	• Interramento	100 %
Vite da vino e da tavola	Sarmenti (rami)	• Interramento • Bruciati a bordo campo • Fascine da ardere	30-40 % 30-40 % 20-40 %
Olivo	Legna, rami, frasche	• Energia (legna) • Bruciati in campo (rami)	90-100 % 90-100 %
Fruttiferi (melo, pero, pesco, ecc.)	Rami	• Interrati (solo in pianura) • Bruciati in campo	10-20 % 80-90 %
Agrumi (arancio, limone, ecc.)	Rami	• Bruciati in campo	90-100 %
Fruttiferi a guscio (mandorlo, nocciolo, noce)	Rami	• Bruciati in campo	90-100 %

Tabella 1–3 attuale destinazione dei residui delle principali colture arboree ed erbacee. [15](A. M. Mancini, C. M. Berton, C. L. D. Apote, C. L. Pari, E. Sandro, and S. D. Andrea, "Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei biocombustibili," 2008).

Come si evince dalla tabella 1-3, una quota significativa di questi residui colturali è spesso destinata alla bruciatura in campo. Tale pratica, oltre a rappresentare un'inefficienza energetica e un fattore di inquinamento atmosferico, comporta anche un notevole spreco di risorsa lignocellulosica.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è la meccanizzazione delle operazioni di raccolta, carico, trasporto, scarico e immagazzinamento dei diversi tipi di materiale. A tal proposito, bisogna considerare che, pur disponendo di soluzioni meccaniche adeguate, queste non sempre risultano sufficienti a causa delle condizioni strutturali aziendali anomale (eccessiva polverizzazione fondiaria e frammentazione aziendale) e dell'eccessiva distanza tra gli appezzamenti e i centri di raccolta e utilizzazione. Ciò comporta un aumento dei costi, elemento che disincentiva molti agricoltori.

Per valorizzare prodotti generalmente considerati scarto, tali residui vengono sottoposti a densificazione sotto forma di pellet e in questo studio andremo ad approfondire l'argomento

dei food pellet ad uso alimentare umano. Però è necessario, in via preliminare, definire le matrici selezionate, suddivise in erbacee ed arboree

1.2.2 *Biomasse erbacee*

Queste biomasse, essendo sottoprodotti della produzione di granella, possono variare, al pari di quest'ultima, in funzione della stazione, dell'appezzamento e della varietà scelta. È possibile, tuttavia, definire dei range del rapporto residui-seme, che variano in base alla tipologia di coltura considerata: cereali o oleaginose. Nel secondo caso, grazie alla morfologia delle piante, si registra una produzione di residui significativamente superiori.

Coltura	Rapporto residuo-seme	Disponibilità [%]	Umidità del seme [%]	Umidità del residuo [%]
Frumento	0.8-1.6	40	15	15
Segale	0.9-1.6	40	15	15
Orzo	0.8-1.3	40	15	15
Avena	0.9-1.4	40	15	15
Mais	0.9-1.2	50	15	30
Riso	1.2-2.2	50	20	25
Colza	1.4-2.0	50	15	40
Girasole	2.2-3.2	50	15	40

Tabella 1–4: rapporti residuo-seme e umidità delle biomasse per la produzione di pellet. [16](modificato da Nicolae Scarlat, Milan Martinov, Jean-François Dallemand. 2010)

La conoscenza di questi rapporti risulta fondamentale ai fini della stima della disponibilità di biomassa a livello territoriale, da destinare a scopi energetici.

1.2.2.1 Cereali e paglia

All'interno delle filiere cerealicole la produzione primaria è incentrata sulla raccolta della granella. Tuttavia, il processo produttivo genera una rilevante quantità di biomassa residua epigea, nota come paglia, principale residuo lignocellulosico dell'ambito cerealicolo.

La raccolta della granella avviene tramite trebbiatura, operazione che si svolge generalmente tra giugno e luglio; ad essa può seguire l'eventuale raccolta della paglia, effettuata secondo tre metodi principali: raccoglimballatrici, che producono balle parallelepipede di piccole dimensioni (15-18 kg), le rotoimballatrici, che producono balle

cilindriche di medie-grandi dimensioni (250-400 kg) e le imballatrici, che producono balle parallelepipede di grandi dimensioni (250-400 kg).

La versatilità di questo prodotto rappresenta un fattore molto importante ai fini della valutazione condotta, poiché la paglia non viene sempre considerata un semplice rifiuto: si stima infatti che venga reimpiegata tra il 40 e il 60%. Gli usi principali riguardano l'ambito zootecnico, fungendo da lettiera per il ricovero degli animali, oltre all'impiego per l'alimentazione animale e nell'industria cartaria. L'utilizzo della paglia come biocombustibile per la produzione di energia necessita di impianti di grandi dimensioni, a causa dell'elevato contenuto di silice, che ad alte temperature forma ceneri basso-fondenti; queste in presenza di cloro, possono combinarsi con il vapore acqueo generando acido cloridrico (HCl), altamente corrosivo per l'impianto. [15]

La paglia presa in considerazione differisce a seconda della tipologia di biomassa d'origine: la paglia di riso, ad esempio, risulta molto più ricca di silice rispetto a quella degli altri cereali, con conseguenze sulle proprietà meccaniche e sulla fusione delle ceneri.

La paglia è un materiale lignocellulosico, ovvero che è composto da lignina, cellulosa, emicellulosa e le ceneri. [17]

Come già detto il problema principale della paglia è l'elevata presenza di ceneri, dovute non solo alla tipologia di biomassa, ma anche alle modalità del suo prelievo in campo, dal momento che la paglia rimane nel terreno per diversi giorni prima di essere imballata. Un'ulteriore criticità è l'elevata presenza di cloro, azoto, zolfo, potassio e silicio, elementi che compongono le ceneri. Tale problema può essere contrastato andando a dilavare la biomassa con acqua o con una soluzione al 10% di acido acetico, che consente di ridurre sensibilmente il contenuto di ceneri. [18]

1.2.2.2 Colture a fusto/seme

1.2.2.2.1 Mais

Il mais è una coltura annuale che viene generalmente raccolta intorno al mese di settembre: più precocemente se si intende raccogliere un'intera pianta, altrimenti più tardi qualora si voglia raccogliere la sola granella. Ai fini del presente lavoro interessa quest'ultima modalità, poiché è quella che lascia in campo la maggior quantità di residui. La quantità di scarti dipende da diversi fattori, quali sistemi di raccolta, varietà e condizioni ambientali. Per il mais si considera generalmente un rapporto residuo/granella di circa 0,9-1,2:1, come riportato in tabella 1-4.

Il residuo viene tradizionalmente lasciato sul terreno e trinciato meccanicamente per essere incorporato nel suolo. Per ottenere la paglia è invece necessario recuperarla dal terreno, il quale

rappresenta una fonte di potenziali contaminanti in grado di innalzare il contenuto di ceneri, anche a causa della permanenza in campo per diversi giorni. Una possibile soluzione consiste nel raccoglierla direttamente dalla mietitrebbia, evitando così il contatto con il terreno.

Analisi della paglia

I costituenti principali della paglia sono cellulosa, emicellulosa e lignina. [19], [20]

Dal punto di vista morfologico, la paglia è costituita da foglie per il 28%, tutoli per il 15% (parte interna spugnosa della spiga di mais), steli per il 48% e brattee per l'8% (foglie modificate che avvolgono la pannocchia). [20]

Questa biomassa rappresenta un ottimo combustibile, grazie all'elevato contenuto di sostanze volatili. Un altro aspetto da considerare è l'umidità presente al momento della raccolta, pari a circa il 15%, valore favorevole ai fini della pellettizzazione in quanto consente di eliminare la fase di essiccazione, riducendo conseguentemente i costi. L'unico aspetto critico è rappresentato dai contaminanti, che provenendo dal terreno, possono inquinare la biomassa e innalzare il contenuto di ceneri. [19]

La paglia di mais è composta per il 70% da carboidrati, quali cellulosa ed emicellulosa, e per il 15-20% da lignina; la restante parte è formata da altre sostanze. [20].

È stato osservato che la paglia con una maggiore quantità di tutolo presenta minori quantità di ceneri e caratteristiche migliori ai fini della pirolisi. Per la combustione, invece, la componente con le migliori caratteristiche è rappresentata dallo stelo, il cui vantaggio risulta tuttavia vanificato con l'alto rischio di contaminazione di ceneri. [19]

Si osserva inoltre che la paglia, a differenza della granella, presenta un livello più elevato di potassio, tale da incidere significativamente sul bilancio di questo elemento nel terreno; per questo è necessario effettuare una gestione equilibrata dei residui, al fine di preservare la fertilità del terreno. [20]

1.2.2.2.2 Girasole

Il girasole è una delle colture agrarie più diffuse, coltivata su vaste aree per la produzione di semi oleosi. La variabilità morfologica del girasole è simile a quella del mais, per via della duplice attitudine produttiva, destinabili sia alla produzione di seme sia all'insilamento. [21]

Le biomasse derivate dal girasole rientrano nelle matrici lignocellulosiche, essendo costituite principalmente da lignina, cellulosa ed emicellulosa; tale composizione risulta rilevante per le analisi delle caratteristiche termochimiche. [22]

La raccolta del girasole avviene quando il 20-25% dei capolini si presenta ancora di colore giallo o giallo-bruno, mentre il resto risulta secco e di colore marrone. In questa fase, l'umidità nei semi è compresa tra l'11 e il 13%, nei capolini (teste) tra il 69 e il 75%, e negli steli (gambi)

tra il 60 e il 70%. La raccolta ricade solitamente nei mesi di agosto-settembre mediante mietitrebbie dotate di apposite barre di taglio o adattatori, che consentono di asportare solo il capolino con i semi, effettuando un taglio a circa 20-25cm al di sotto di esso; ciò comporta l'abbandono in campo di una notevole quantità di sottoprodotti. La frazione di residui maggiormente presente è costituita da steli e fusti, mentre i capolini e la pula rappresentano la frazione leggera di scarto.

La raccolta della paglia di girasole può avvenire subito dopo la trebbiatura, oppure, qualora venga lasciata in campo andrebbe ad essiccarsi, riducendo i processi e i costi di lavorazione. [21].

Tradizionalmente, i residui del girasole vengono triturati al fine di reintegrare la sostanza organica nel terreno; talvolta, tuttavia, sono sottoposti a pratiche non ecosostenibili, come la bruciatura in campo. [23]

La polifunzionalità del girasole rappresenta una delle caratteristiche che ne sta determinando l'incremento della produzione lorda. Questo prodotto viene valorizzato attraverso l'inserimento in diverse filiere, tra cui quella dei biocarburanti solidi, che sfrutta le componenti lignocellulosiche adatte alla combustione e alla produzione di energia. Un'ulteriore filiera, che si discosta da quella classica destinata alla produzione di olio, è quella della conversione biochimica gassosa, finalizzata alla produzione di biogas e bioetanolo. [21], [23], [24]

1.2.3 *Biomasse arboree e forestali*

Le biomasse arboree e forestali rappresentano una risorsa strategica fondamentale nella transizione energetica e nella gestione sostenibile dei rifiuti. I residui legnosi risultano vantaggiosi per l'abbondanza delle risorse naturali disponibili, la loro rinnovabilità, il basso costo di approvvigionamento e i modesti requisiti energetici necessari per la loro conversione. [25]

Le biomasse arboree comprendono una vasta gamma di matrici: nell'ambito forestale e agroforestale si trovano ramaglie e foglie di specie arboree, specie legnose invasive e arbusti forestali, mentre nell'ambito agricolo si fa riferimento principalmente ai sottoprodotti delle colture arboree, quali potature di fruttiferi (agrumi, mandorli, castagni, olivi, viti, fruttiferi maggiori).

Dal punto di vista chimico-fisico ed energetico, le biomasse legnose presentano parametri variabili in base alla specie e allo stato di conservazione. Alcune matrici energetiche risultano più vocate alla combustione rispetto ad altre; generalmente, tuttavia, i residui forestali e arborei allo stato grezzo presentano maggiori limitazioni logistiche e quantitative, quali la bassa

densità energetica apparente, un'elevata eterogeneità, tassi di umidità compresi tra 30 e 50% e un basso potere calorifico inferiore, prima dei trattamenti di stagionatura ed essiccazione. [26]

La disponibilità media annuale dei residui delle principali coltivazioni arboree si aggira tra le 0,37 e 3,46 Mt/anno.[27]

Uno studio sulla disponibilità delle biomasse residuali, forestali e di potatura nelle regioni centrali del Portogallo, in aree montane e rurali, ha riscontrato quantità considerevoli di residui potenzialmente recuperabili per fini energetici e industriali. È stato inoltre osservato come l'impiego pianificato di questi residui legnosi locali sostenga impianti di generazione energetica e autoproduzione a livello locale, rispondendo agli obiettivi di decarbonizzazione: strategie e traguardi finalizzati alla riduzione progressiva delle emissioni di gas serra derivati dalle attività umane, basati sulla produzione dell'indipendenza energetica, sulla sostenibilità delle risorse e sull'innovazione dell'economia circolare. [28], [29]

Nel panorama italiano, i residui di potature di ulivo e vite rappresentano una grande quantità di biomassa; essi presentano tuttavia dei limiti in densità apparente ed energetica, che influenzano le fasi di raccolta e logistica, condizionando la sostenibilità energetica e ambientale del processo. Per superare tali limiti e rendere il combustibile più idoneo, si è pensato di sottoporre questi residui a pellettizzazione, pratica che comporta diversi vantaggi: aumenti della densità energetica, riduzione dell'umidità, dei costi di trasporto e di stoccaggio, una maggiore omogeneità dimensionale e strutturale, nonché l'automatizzazione del processo di standardizzazione del combustibile. In questo modo, i residui, anziché essere bruciati in campo con conseguente impatto inquinante, vengono valorizzati, in linea con gli obiettivi di economia circolare del settore agricolo. [30]

1.2.3.1 Melo

Il melo è una delle colture arboree più diffuse; per il ciclo produttivo e la relativa gestione risultano fondamentali per garantire la qualità e la quantità dei frutti. La gestione della chioma viene effettuata mediante la potatura, intervento fondamentale per il mantenimento dell'equilibrio tra attività vegetativa e produttività.

La potatura del melo viene eseguita durante il periodo di riposo vegetativo, corrispondente all'inizio dell'anno. Le tecniche di potatura variano in base al sistema di allevamento adottato, influenzando la quantità e le caratteristiche fisiche dei residui prodotti. [31], [32]

Il sistema di allevamento tradizionale (come il fusetto) è caratterizzato da una maggiore vigoria delle piante, producendo rami con diametri superiori. Il sistema a crescita libera

produce invece una minore quantità di biomassa legnosa, costituita da rami più sottili e meno numerosi. [31]

Oltre al sesto d'impianto, la quantità di residui prodotta è influenzata anche dall'età delle piante. Nei giovani fruttiferi, la quantità di biomassa legnosa raccolta nella potatura invernale varia tra 0,5 e 0,6 t/ha, mentre i meleti di sei anni invece producono dalle 1,9 t/ha alle 5 t/ha. Altre stime indicano una media di potatura su base secca pari a 1,15 t/ha, con un'umidità del 56,7%, oppure a 1,03 t/ha, con umidità del 51% (dati riferiti a frutteti del Nord Italia). Per i meleti, la biomassa legnosa prodotta è calcolata intorno a 3,5 t/(ha*anno). [33], [34]

I residui prodotti da questi impianti spesso sono considerati un rifiuto e, come tali, gestiti attraverso pratiche poco sostenibili, come l'abbruciamento in campo, con conseguente rischio di incendi, infestazioni parassitarie e un aumento dei costi di gestione nel lungo periodo. Per ovviare a tali pratiche, si occorre al riutilizzo di questi scarti per la produzione di biomassa solida ai fini energetici, sia densificata che no. [31], [32], [35]

La qualità delle biomasse residuali dipende dalla relativa composizione chimica: esse sono formate principalmente da cellulosa, emicellulosa, lignina e sostanze estraibili. Queste ultime due rappresentano i componenti di nostro maggiore interesse, in quanto influenzano il potere calorifico delle biomasse: maggiore è il contenuto di lignina, tanto più elevato il potere calorifico. [32], [35]

Importante è considerare il contenuto di ceneri, che vanno ad influenzare l'utilizzo della biomassa. Nel melo si attestano intorno al 2,53-3,25% e la presenza di composti indesiderati risulta in linea o inferiore alla media. Si riscontra un rischio di presenza leggermente superiore, rispetto a legno vergine, di azoto e metalli pesanti, riconducibile alla fertilizzazione. L'unico elemento presente in concentrazioni elevate è il rame, impiegato nei trattamenti fitosanitari. [34], [36]

Tramite la densificazione si aumenterebbe la densità energetica a circa 3,35, con conseguente riduzione del tempo di permanenza nei sistemi di combustione. L'unico problema si riscontra con la concentrazione di ceneri che rimane sempre elevata su pellet prodotti esclusivamente da residui di melo, che risultano pertanto adatti solo a impianti predisposti; qualora vengano miscelati con altre biomasse di maggiore qualità, è possibile ridurre le problematiche legate al contenuto di ceneri. [33]

1.2.3.2 Pero

Il pero (Pyrus communis L.) viene coltivato con l'obiettivo di produrre frutti. Il ciclo produttivo è influenzato dall'interazione tra portainnesto, sistema di allevamento, clima e gestione agronomica. Negli ultimi anni si sta assistendo a una progressiva riduzione della vita

economica degli impianti, unitamente alla necessità di anticipare l'entrata in produzione. Sono stati inoltre adottati sesti d'impianto innovativi, volti a soddisfare le esigenze crescenti di produttività, orientandosi sempre più verso un sistema intensivo. Tale cambiamento ha influenzato anche la gestione agronomica, in particolare la potatura, la quale risulta caratteristica per ciascun sesto d'impianto e condiziona, di conseguenza, anche la quantità di residui prodotti.

La gestione di questi residui può prevedere la loro rimozione dal campo e successiva conversione in energia rinnovabile, con conseguente possibilità di generare un ritorno economico e ammortizzare i costi di gestione degli scarti. Un altro metodo consiste nel non rimuovere tali residui, trinciandoli direttamente sul terreno per utilizzarli come pacciamatura o per incorporarli nel suolo: in questo modo la fertilità viene mantenuta o addirittura migliorata.

Entrambe le pratiche risultano vantaggiose dal punto di vista ambientale ed ecologico; tuttavia, non sempre vengono adottate, e spesso questi residui vanno incontro alla combustione in campo, con conseguente rischio di incendi e inquinamento. [37], [38]

La rimozione dei residui non è sempre praticabile: per valutare le diverse soluzioni è stato sviluppato un modello basato su quattro indicatori (contenuto di sostanza organica del suolo, tessitura, pendenza e condizioni climatiche) che consentono di definire i seguenti range di valori:

- >2.5: condizioni ottimali, la rimozione dei residui per fini energetici è possibile;
- 1.5-2.5: condizioni non ottimali, la rimozione è possibile solo se abbinata a pratiche agronomiche per il mantenimento della sostanza organica;
- <1.5: condizioni critiche, la rimozione non è praticabile, a meno di interventi drastici di miglioramento. [37]

>2.5	**"Green Light"** *Soil conditions are good or even optimal* ⇒ full possibility to remove pruning from the soil, ⇒ no specific adjustment of soil management practices are needed, *although* . . . ⇒ a set of *maintenance options* of soil quality should be assured
≤2.5 >1.5	**"Yellow Light"** *Soil conditions are not optimal but still good; surely not critical* ⇒ pruning can be removed from the soil, *but* . . . ⇒ specific soil management strategy are requested, ⇒ an *integration strategy* of soil management should be applied, i.e., a mix of (at least) three "increasing" and other two "maintenance" options
≤1.5	**"Red Light"** *Soil conditions are bad or very bad* ⇒ no possibilities to remove pruning from the soil, *unless* . . . ⇒ a strong readjustment of soil management practices is applied, ⇒ a set of *increasing options* of soil quality should be assured

Tabella 1–5 Soil management strategies consequent to the average score assigned to soil quality conditions. [37] A. Libutti, A. R. B. Cammerino, and M. Monteleone, "Management of residues from fruit tree pruning: A trade-off between soil quality and energy use," Agronomy, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.3390/agronomy11020236.

La composizione delle biomasse residuali lignocellulosiche risulta variabile per via dell'eterogeneità degli scarti, che possono comprendere rami di diversa dimensione, foglie e porzioni di tronco. L'analisi elementare di questi materiali evidenzia come costituente principale il carbonio (50-53%), seguito dall'ossigeno (40-43%) e dall'idrogeno (5,8-6%); sono inoltre presenti altri composti in quantità minori. È da evidenziare il contenuto di azoto, particolarmente basso (0,3-0,7%), aspetto rilevante in quanto contribuisce a ridurre le emissioni di ossidi di azoto durante la combustione e la pirolisi.

I residui freschi di potatura presentano un'elevata quantità di umidità (40,91-44,86%) e un elevato contenuto di sostanze volatili, a fronte di un contenuto di ceneri contenuto rispetto ad altre specie arboree, pari a circa l'1,33% sulla materia prima.

Dal punto di vista della composizione chimico-strutturale, la biomassa è costituita per il 70-80% da cellulosa ed emicellulosa e per il 20-30% da lignina. Tale ripartizione può variare all'interno della stessa pianta: nei rami laterali si riscontra un maggiore contenuto di cellulosa ed emicellulosa a discapito della lignina, mentre nei rami centrali si verifica la condizione opposta. [39], [40]

1.2.3.3 Vite

Coltivazione molto sviluppata: i maggiori produttori sono Italia e Francia, che insieme rappresentano quasi il 70% della produzione mondiale. Una parte del mercato europeo si basa

sul sistema delle D.O.P (denominazione di origine protetta), che garantisce le qualità del prodotto legata anche al territorio e a fattori naturali o umani.

La vite, come ogni coltura arborea, può essere coltivata in regime di agricoltura biologica o convenzionale. La prima ha come obiettivo la sostenibilità ambientale, riducendo l'impiego di prodotti dannosi e sostituendoli con alternative naturali o meno impattanti. La seconda si avvale di metodi tradizionali, anche mediante l'uso di prodotti dannosi per l'ecosistema. Tra i die metodi si riscontra una differenza di produzione tra il 10 e il 30% , a discapito del biologico. [41]

Durante il ciclo produttivo si susseguono diverse fasi, la cui conoscenza consente di individuare il momento più opportuno per eseguire le varie pratiche agronomiche finalizzate a incrementare la produzione. Il presente studio si concentra sulla fase di potatura, analizzando i residui da essa generati e i loro utilizzi.[42], [43] La biomassa prodotta dalla vite, insieme a quella dell'ulivo, costituisce oltre il 60% della biomassa legnosa residuale complessiva; i residui prodotti dalla potatura della vite ammontano a circa 2,67 milioni di tonnellate/anno.[30]

I dati relativi alla biomassa prodotta variano in base al sesto d'impianto adottato. È necessario innanzitutto distinguere tra due tipologie di vigneto; quelli destinati all'uva da tavola e quelli destinati all'uva da vino, che, pur condividendo alcuni sesti d'impianto, presentano caratteristiche differenti:

Uva da tavola

- Pergola/spalliera orizzontale: 4,84kg di biomassa fresca per albero, pari a 4,22 t/ha di biomassa secca.
- Spalliera alta a Y: 1,38 kg di biomassa fresca per albero, pari a 2,52 t/ha di biomassa secca
- Spalliera standard: prodotti 1,53 kg di biomassa fresca per albero, pari a 2,36 t/ha di biomassa secca

Uva da vino.

- Albero/vaso: prodotti 1,41 kg di biomassa fresca per albero, pari a 1,72 t/ha di biomassa secca
- Spalliera standard: prodotti 1,28 kg di biomassa fresca per albero, pari a 2,15 t/ha di biomassa secca.

Le differenze riscontrate tra i vari sesti d'impianto sono riconducibili principalmente alla densità di impianto. Un ulteriore fattore rilevante è la disponibilità idrica, che può incrementare la produzione di biomassa del 42%. [44]

I destini più comuni dei sarmenti (i residui legnosi della potatura della vite) sono la bruciatura o l'interramento dopo trinciatura. Entrambi i metodi comportano un impatto

negativo sull'ambiente: la bruciatura, in primo luogo, mentre l'interramento arreca un danno poiché favorisce la diffusione di inoculi patogeni potenzialmente in grado di contaminare le piante sane. Il presente lavoro si propone di analizzare l'idoneità di questi residui per fini energetici, con l'obiettivo di evitare i costi di smaltimento e lavorazione e generare, al contempo, un'entrata economica aggiuntiva per gli agricoltori. È importante precisare che nella vite viene fatta la cosiddetta potatura verde. [42], [43]

La raccolta dei sarmenti può avvenire secondo le seguenti metodologie:

- Rastrello e imballatrice parallelepipeidea: il rastrello sposta i sarmenti a bordo filare, facilitandone la raccolta da parte dell'imballatrice.
- Trinciacaricatrice: macchina semiportata che preleva trincia e carica i sarmenti sul carrello, senza tuttavia riuscire a recuperarli integralmente; si stima una perdita di circa il 40%.
- Rotoimballatrice leggera senza accumulatore: crea rotoballe a cuore tenero, che ne favoriscono l'asciugatura.
- Rotoimballatrice leggera con accumulatore: crea anch'essa rotoballe a cuore tenero favorendone l'asciugatura, ed è dotata di una rastrelliera accumulatrice. [42]

Per quanto riguarda le caratteristiche della biomassa residuale derivata dalla potatura di vite, si riscontrano i seguenti valori:

- Umidità: circa il 40%; per raggiungere il contenuto minimo di umidità impiega 25 giorni in essiccazione all'aperto, contro i 5 giorni richiesti in stufa a 105°C
- Ceneri: circa il 4,4%. [30]

Nella composizione chimica della biomassa ricavata dalla potatura della vite possono essere presenti degli elementi preoccupanti, quali nitrati, la cui concentrazione è legata alle pratiche di fertilizzazione e alla fase fenologica. I picchi di concentrazione si registrano nei periodi di ripresa vegetativa e di invaiatura: la biomassa ricavata tali periodi potrebbe pertanto essere destinata, in particolare, al mantenimento della fertilità chimica del suolo, anziché alla conversione energetica. [45]

Tuttavia, l'analisi della biomassa non può limitarsi alla componente azotata: occorre considerare anche altre sostanze, quali metalli pesanti che, derivanti dai trattamenti fitosanitari, poiché influenzano le proprietà chimiche e il potenziale di utilizzo energetico del materiale. Da uno studio è emerso che i residui di potatura della vite presentano caratteristiche specifiche in termini di concentrazione dei metalli e di parametri energetici, influenzate dai trattamenti fitosanitari effettuati:

- Concentrazione di rame: nel legno di potatura senza impurità, la concentrazione varia tra 8,5 mg/kg, nei campioni a basso contenuto di rame, e 19,2 mg/kg nei campioni trattati con prodotti a base di rame. È inoltre rilevante considerare l'incidenza della contaminazione del suolo, che comporta un incremento di circa 1 mg di rame per kg di biomassa per ogni punto percentuale di suolo presente;

- Concentrazione di zinco: l'accumulo di questo elemento è variabile in funzione dei trattamenti effettuati; il valore massimo registrato è pari a 15,5 mg/kg a seguito del trattato con poltiglia bordolese, sensibilmente superiore al valore di 5,4 mg/kg del gruppo di controllo e a quello di 7,3 mg/kg registrato nell'applicazione aziendale. [46]

Oltre a questi elementi, ai fini dell'utilizzo energetico della biomassa è fondamentale considerare la composizione strutturale, poiché essa influenza in misura significativa la resa energetica e, di conseguenza, il ritorno economico. I composti principali sono lignina, cellulosa ed emicellulosa, cui si aggiungono altri composti in minori, quali antiossidanti e nutrienti:

- Cellulosa: 32,9-39,9%
- Emicellulosa: 5,8-27%
- Lignina: 26,7-46,8[47]

È opportuno evidenziare l'elevato contenuto di lignina, tale da giustificare l'appellativo di ''lignin-rich feedstocks''.[48]

Per queste biomasse è necessario effettuare diversi pretrattamenti:

- Fisici: riduzione dimensione, ultrasuoni, estrusione;
- Chimici: impiego di acidi per convertire l'emicellulosa in zuccheri semplici o basi, applicati anche per la lignina, così da permettere gli enzimi di attaccare la cellulosa;
- Fisico-chimici: trattamenti termici con acqua calda, autoidrolisi;
- Trattamenti biologici: uso di funghi o enzimi per degradare selettivamente lignina, preservando la cellulosa.

Tali pretrattamenti risultano specifici per in base al prodotto e all'utilizzo previsto per i residui.[47]

Uno studio ha analizzato le caratteristiche energetiche delle foglie di vite, comparando i diversi portainnesti. I risultati mostrano un contenuto di carbonio simile a quello di altri residui legnosi, inversamente proporzionale al contenuto di umidità e ceneri. L'azoto presenta valori in linea con quelli di altri residui, mentre lo zolfo nelle foglie di vite risulta significativamente più elevato rispetto a quanto registrato in altre masse: come già evidenziato, un contenuto elevato di questo elemento può influenzare negativamente le emissioni durante la combustione. Il contenuto di ceneri misurato è il risultato elevato, ma in linea con quello rilevato nelle foglie di altre culture arboree. Per ciascun parametro analizzato è stata riscontrata una discrepanza più o meno accentuata tra i valori relativi ai diversi porta innesti, a dimostrazione del fatto che, per alcuni parametri il portainnesto costituisce un fattore significativo ai fini dell'utilizzo della biomassa nel sistema di combustione. [49]

1.2.3.4 Ulivo

Una delle colture più diffuse a livello mondiale, con una superficie coltivata di 11 milioni di ettari e una produzione annua che supera i 20 milioni di tonnellate di olive. Il bacino Mediterraneo rappresenta l'area di maggiore diffusione, sebbene questa coltura si stia sviluppando in misura crescente anche in altre aree del mondo, come Cina e America.

La diffusione di questa coltura comporta anche una notevole quantità di residui, la cui gestione risulta pertanto necessaria. Per ogni ettaro vengono prodotte oltre 5 tonnellate di sottoprodotti tra potature, noccioli e sanse, spesso gestite in maniera non adeguata rispetto alla natura di questi prodotti.[50]

Questa pianta è caratterizzata da un notevole vigore vegetativo, variabile in base alla varietà, tale da portare alcune cultivar a produrre quantità significative di biomassa. Data la longevità di questa coltura, si osserva che le piante anziane presentano una minore produzione di olive, a favore di una maggiore produzione di residui, rispetto a piante più giovani.

Le coltivazioni di ulivo sono caratterizzate da un elevato fabbisogno di manodopera manuale, non sempre agevolata dai sistemi produttivi tradizionali (in volume: vaso policonico, ecc.); per questo motivo si tende sempre più alla modernizzazione degli impianti. [51]

Grazie alla diffusione di questa coltura, sono state infatti sperimentate e applicate tecniche di allevamento super-intensive, caratterizzate da avere densità d'impianto elevate, comprese tra da 1200 a 2200 piante per ettaro, disposte in filari regolari così da facilitare la meccanizzazione. Risultano inoltre di grande rilevanza le pratiche agronomiche applicate quali irrigazione, fertilizzazione, uso di trattamenti fitosanitari e meccanizzazione delle operazioni colturali, dalla piantagione alla raccolta. L'obiettivo di tali pratiche è l'incremento delle rese rispetto ai normali impianti in volume, con risultati compresi tra 12000-14000 kg di olive per ettaro.[52], [53]

Il sistema tradizionale è invece un sistema produttivo a bassa densità di piante, compresa tra 50 e 100 alberi per ettaro, con coltivazioni in asciutto. La produttività di questi uliveti risulta relativamente contenuta, con rese tra 500 e 600 kg di olive per ettaro. Le operazioni culturali si basano su lavorazioni manuali e su una gestione minima del suolo, con input contenuti (fertilizzazione, trattamenti fitosanitari). [52]

La produzione di residui in questi sistemi è comunque notevole, soprattutto per effetto della vigoria delle piante; risultano pertanto fondamentali le pratiche di potatura, generalmente seguite nei periodi di riposo vegetativo (febbraio-marzo).

Negli impianti tradizionali è possibile effettuare anche potature biennali, che consentano di ridurre i costi rispetto alla potatura annuale, influenzando di conseguenza anche la quantità di residui prodotti. Gli impieghi di tali residui riguardano principalmente la produzione di energia

(sotto forma di biocombustibili solidi, liquidi o gassosi) oppure l'industria del legno, offrendo così un beneficio economico aggiuntivo e semplificativo, al contempo, la gestione dei residui stessi. Attualmente questi materiali vengono per lo più eliminati in capo tramite bruciatura o cippatura, senza generare alcun ritorno economico; la pratica dell'interramento, invece, rifornisce al terreno nutrienti quali il carbonio organico, contribuendo al mantenimento della fertilità del suolo. [54], [55]

Negli impianti intensivi le tecniche di controllo e lo sviluppo vegetativo vengono realizzate mediante interventi sia manuali sia meccanici, con risorse differenti in termini di riduzione della chioma a seconda della cultivar. Tale riduzione è applicata anche per regolare la penetrazione della luce all'interno della chioma. [56]

La biomassa è prodotta con la potatura, può essere prelevata, quantificata e gestita logisticamente mediante specifici macchinari (come le raccogli-cippatrici), che tuttavia comportano spesso costi elevati.

Ai fini dell'utilizzo in caldaia, è necessario definire diverse caratteristiche della biomassa: chimiche, fisiche e quantitative. Il peso del materiale, prima dell'essiccazione, è costituito per il 48% da foglie con un'umidità media del 40,79%; l'umidità target del 20% viene raggiunta in circa 25 giorni mediante l'essiccazione all'aperto, oppure in 5 giorni in stufa a 105 °C.

La quantità di biomassa prodotta varia, in funzione della varietà della pianta, dall'andamento climatico dell'annata, delle pratiche agronomiche adottate, dall'irrigazione all'età della pianta, dallo spazio di crescita disponibile, dall'entità della produzione di frutti, nonché del tipo e dello scopo della potatura.

Con la potatura annuale, la biomassa media prodotta è pari a 1,31 t/ha di biomassa secca e a 2,31 t/ha di legno umido; Con quella biennale tali valori salgono in media a 3,02 t/ha di biomassa secca e a 4,52 t/ha di legno umido.

Anche la varietà influisce in misura significativa sulla produzione di biomassa: in base a ciò, lo studio citato classifica le cultivar ad alta o a bassa produttività, con una produzione media di biomassa secca per piante rispettivamente pari a 10,5 kg e 3,5 kg. Tali dati sono stati rilevati su piante annuali e potature effettuate con cadenza biennale tendono invece a presentare valori simili. [54]

Questa biomassa residuale è costituita da cellulosa ed emicellulosa substrato, ideale per i processi di bioraffinazione e fermentazione, ma anche la lignina, elemento che ostacola l'eccesso degli enzimi idrolitici, rendendo tale biomassa difficilmente utilizzabile senza trattamenti specifici.

La composizione chimica iniziale dei residui lignocellulosici si ripartisce come segue:

- Lignina: circa 38%;
- Cellulosa: circa 22,08%;
- Emicellulosa: circa 14,63%;
- Estrattivi: circa 15,5%;
- Proteine: circa 1,75%; [57]

Un ulteriore studio incentrato sulle problematiche legate alla gestione degli scarti dell'industria olearia e, in particolare, sulle foglie di ulivo, riporta i seguenti dati relativi alla composizione chimica di quest'ultime, calcolati su sostanza secca:

- Cellulosa: 5,7%
- Emicellulosa 3,8%;
- Lignina: 39,6%; [58]

Per quanto riguarda il contenuto di ceneri, questo può variare sensibilmente anche in funzione dei diversi organi della pianta considerati, di natura eterogenea. Secondo uno studio condotto su diverse varietà, rametti e foglie presentano un contenuto di ceneri compreso tra 4,79 e il 6,27%, mentre l'apparato radicale mostra valori compresi tra 1,76 e il 2,99%. Un elevato contenuto di ceneri può essere inoltre attribuibile alla prolungata permanenza dei residui sul terreno. [51]

1.2.3.5 Nocciolo

Il nocciolo europeo è una specie legnosa pollonifera, generalmente coltivata come arbusto cespuglioso a più fusti. Questa specie predilige climi miti, con temperature medie comprese tra 8 e 15 °C, e suoli profondi e ben drenati, dotati di elevate quantità di sostanza organica, con un pH variabile da leggermente acido e leggermente alcalino.

Il principale produttore di nocciole è la Turchia, con 700.000 tonnellate di nocciole in guscio, seguita dall'Italia sia in termini di superficie coltivata sia di produzione. La superficie destinata a questa coltura è aumentata e continua ad aumentare, anche in ragione della crescente domanda da parte dell'industria dolciaria. Tale diffusione ha favorito l'evoluzione dei sistemi di allevamento verso impianti intensivi e sostenibili, con conseguenti modifiche alle pratiche agronomiche quali l'aumento della densità di impianto, nuovi metodi di gestione della chioma e nuovi approcci alla potatura meccanica.

Gli impianti tradizionali gestiscono la pianta selezionando determinati polloni legnificati con l'obiettivo di ottenere un arbusto a più fusti, mantenendo al contempo la possibilità di rinnovare i fusti attraverso la selezione di quelli più giovani. I metodi moderni ricorrono invece maggiormente alla meccanizzazione, adattando la pianta a tali interventi mediante forme a tronco singolo; questi impianti risultano tuttavia adatti solo a piante non eccessivamente vigorose.

Gestione della chioma

Le pratiche adottate comprendono un diradamento, il taglio di ritorno, l'allevamento e il ringiovanimento, con l'obiettivo di migliorare la penetrazione della luce e la circolazione dell'aria, influendo così sulla quantità e sulla qualità del prodotto finale.

La produzione del nocciolo europeo è influenzata dallo sviluppo dei rami di un anno, portatori di gemme miste o fertili; di conseguenza una potatura non ottimale può ridurne il vigore e lo sviluppo, con una conseguente riduzione della resa. Per questo motivo la potatura annuale è fortemente raccomandata, spesso affiancata dalla rimozione degli eventuali polloni nel periodo estivo.

Negli alberi maturi la potatura viene eseguita nel periodo invernale e si concentra tra rimozione dei polloni, rami vecchi o morti, malati o male orientati. Trattandosi di un'operazione che richiede un elevato impiego di manodopera e tempo, le pratiche di potatura vengono spesso trascurate; una prolungata assenza di interventi può tuttavia comportare un'eccessiva crescita vegetativa, con conseguenti sovrapposizioni e ombreggiamenti.

Le pratiche di potatura variano in funzione del sistema di allevamento adottato, che può prevedere forme ad arbusto a più fusti, a vaso a tronco singolo o ad ombrello a tronco singolo. Nelle pratiche comuni di impianto si rimuove generalmente circa il 20% del legno della pianta all'anno.

I residui delle frequenti potature possono costituire una fonte di inoculo per patogeni e ostacolare le pratiche agronomiche; spesso vengono gestiti in modo non corretto con pratiche come la bruciatura, fonte di inquinamento. Un'alternativa è rappresentata dalla produzione di energia mediante i dispositivi di combustione. Tra i vari sistemi di allenamento, l'alberello a tronco singolo produce quantità elevate di residui nei primi anni, destinate poi a stabilizzarsi nel tempo. [59], [60]

Uno studio sull'influenza della potatura meccanica del nocciolo europeo su resa, qualità e potenziale sfruttamento del prodotto ha analizzato anche i residui generati da questa coltura, misurando il quantitativo di biomassa prodotto in relazione a due tipologie di potatura, meccanica, due pareggiature laterali ed una superiore (taglio apicale con taglia e siepi), e due pareggiature meccaniche laterali.

Nel primo caso sono stati misurati 5,42 kg di biomassa per albero, nel secondo 3,47 kg. Ipotizzando un impianto con una densità di 500 piante ettaro, i risultati corrisponderebbero rispettivamente a 2,71 e a 1,74 t/ha.

I residui prodotti dal nocciolo presentano una bassa massa volumica apparente, ossia un peso ridotto a fronte di un volume maggiore: caratteristiche svantaggiose per una biomassa

residuale destinata allo smaltimento. A tali criticità è possibile ovviare mediante la pellettizzazione. [61]

Prima di individuare i possibili impieghi di queste biomasse è necessario definire le caratteristiche chimico-fisiche. Secondo uno studio sulla sostenibilità ambientale della produzione di nocciole, l'umidità presente nei residui di potatura risulta compresa tra 10 e il 15%. [62]

Il contenuto di ceneri dei gusci si attesta invece intorno al 5%.[63]

Un'ulteriore analisi condotta su diversi studi definisce un contenuto di ceneri pari a circa il 2,5%, valore influenzato dal periodo di permanenza dei residui nel terreno. [64]

L'analisi della composizione delle biomasse residuali del nocciolo deve considerare due categorie distinte: i residui di potatura e i gusci. I primi presentano un contenuto di cellulosa del 40-55%, di emicellulosa del 25-40% e di lignina del 15-20%. I secondi presentano un contenuto di lignina di circa 30-40%, di cellulosa di circa 25-30% di emicellulosa di circa il 25-30% di tannini pari al 18,2% e di proteine pari al 6,7%.[63], [65]

1.2.3.6 Ciliegio

È una pianta autoctona in gran parte dell'Europa, di elevato valore paesaggistico, grazie alle gradevoli fioriture. Questa coltura viene ampliamente utilizzata per la produzione di ciliegie, ma trova impiego frequentemente anche per la produzione di legname. [66]

Il ciliegio selvatico è un albero deciduo di medie dimensioni, caratterizzato da una crescita rapida e da una longevità contenuta. Si adatta a diverse condizioni ambientali, pur risultando molto esigente in termini di luminosità. In natura si presenta generalmente di piccole dimensioni, in piccoli gruppi o come esemplare isolato per via della sua scarsa competitività. Il terreno è più favorevole alla crescita di questa pianta, è profondo, leggero, limoso, fertile, caratterizzato da una buona disponibilità idrica. La pianta risulta resistente al freddo invernale mentre i fiori non resistono alle gelate tardive primaverili. [67]

La versatilità di questa pianta ne consente l'impiego in diversi ambiti: come l'ornamento, nei coloranti, nel legname, nell'affumicatura degli alimenti, nelle gomme da masticare e nei medicinali, per quanto riguarda il legno; i frutti vengono invece utilizzati a scopo alimentare, oltre che farmacologico, insieme alla corteccia e al picciolo, in virtù del contenuto di prunasina. Sostanze in grado di attenuare i sintomi influenzali, la tosse, il raffreddore e la bronchite; trova inoltre applicazioni anche nel trattamento dell'irritabilità nervosa e della dispepsia nervosa. I piccioli possono inoltre essere impiegati come blando diuretico a scopo terapeutico. [68]

Di interesse per il presente studio sono in particolare i residui derivati dagli impianti destinati alla produzione di frutta, la cui quantità può essere influenzata da fattori quali il porto innesto e la varietà, oltre che l'ambiente e la gestione agronomica.

I sistemi di allevamento si classificano in bassa, media, media-alta e alta densità, ciascuno associato a portainnesti specifici, e si distinguono in sistemi a parete o informa libera. Per la bassa densità i sistemi di allevamento più diffusi sono il vaso e la palmetta. Per la medio alta densità si ricorre invece al fusetto e alle relative varianti, che possono raggiungere densità comprese tra 2000 e 6000 alberi per ettaro.

La potatura del ciliegio viene effettuata nel periodo invernale corrispondente al riposo vegetativo, mediante una tecnica denominata "short-prunning'': si tratta di una potatura leggera che prevede l'accorciamento dei rami a poche gemme fruttifere e vegetative.

Uno studio condotto su un periodo di 5 anni ha misurato i residui di potatura di impianti ad alta densità allevati con sistemi a fusetto modificato: Spindle, SSA, V-System; valutando anche l'influenza di due diversi portainnesti, Gisella 5 e Giselda 6.

Con il portainnesto Gisela 5 l'impianto Spindle ha prodotto 3kg di biomassa per albero. L'SSA 1,9 kg per albero e il V-System 2 kg per albero. Con il portinnesto Giselda 6 l'impianto Spindle ha prodotto 6,9 kg di biomassa per albero, l'SSA 5,3 kg per albero e il V-System 5,2 kg per albero.

I risultati evidenziano quindi come tra i sistemi analizzati, lo Spindle sia quello che produce la maggior quantità di residui per albero, considerando tuttavia il dato per ettaro, i risultati si invertono poiché i sistemi V-System e SSA sono caratterizzati da densità di impianto maggiori.

Con il Portinnesto Giselda da 5 l'impianto Spindle ha prodotto 8,5 t/ha di biomassa, l'SSA 11 t/ha, il V-system 11,5 t/ha. Con il Portinnesto Giselda 6 l'impianto Spindle ha prodotto 13,1 t/ha di biomassa, l'SSA 18,7 t/ha e il V-system 19,1 t/ha. [69]

Per le forme in volume la potatura viene eseguita nello stesso periodo di quella riservata alle forme in parete, ma con risultati differenti. Uno studio ha inoltre valutato i risultati relativi a due tipologie di portinnesto vigoroso e analizzato: il portinnesto vigoroso ha fatto registrare 10,2 kg di biomassa per albero contro i soli 2,2 kg per albero del portainnesto nanizzante. [70]

Dei residui ottenuti risulta fondamentale ricavare informazioni sulla relativa composizione. I principali componenti sono cellulosa, emicellulosa, lignina e composti estraibili; uno studio è registrato, per il legno, i seguenti risultati.

- Cellulosa: circa 37,5%;
- Emicellulosa: circa 17%;
- Lignina: circa 21-23%;
- Sostanze estrattive: circa 4,61%;[71]

- Umidità: circa 40%; [72]

I residui prodotti da una pianta di ciliegio non si limitano solo gli scarti di potatura, ma comprendono anche i semi (noccioli). L'analisi di questi ultimi, condotta dall'ambito di un'indagine sulle caratteristiche sopra descritte, ha riportato i seguenti dati:

- Ceneri: 1,31%;
- Lignina: 32,94%;
- Cellulosa: 23,10%;
- Emicellulosa: 37,96%;
- Estrattivi: 4,69%; [12]

È infine fondamentale considerare il contenuto di ceneri, il quale può recare seri danni agli impianti di valorizzazione energetica: uno studio riporta per il legno, corteccia e rami valori rispettivamente pari a 0,6%, 5,3% e 1,4%. [34]

Capitolo 2

FILIERA DI PRODUZIONE E VALORIZZAZIONE DEL PELLET

2.1 **Processo di pellettizzazione**

L'incremento del ricorso alle bioenergie, unito all'esigenza di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili, ha orientato la ricerca verso lo studio di biomasse alternative destinate alla produzione di pellet combustibile.

Le biomasse di origine agricola e legnose rientrano nella categoria delle biomasse lignocellulosiche, costituite principalmente da cellulosa, emicellulosa, lignina e sostanze estrattive. Va evidenziato come tali biomasse vengono considerate carbon-neutral, in quanto l'anidride carbonica rilasciata durante la combustione viene successivamente riassorbita dalle piante tramite il processo fotosintetico.

Il processo di pellettizzazione consente di densificare e standardizzare la biomassa, superando le criticità tipiche del materiale grezzo (in particolare la bassa densità di massa volumica ed elevata umidità) e permettendo così una significativa riduzione dei costi legati al trasporto, movimentazione e stoccaggio.

I pellet possono derivare da miscele di biomasse diverse; a seconda delle caratteristiche del materiale di partenza, il prodotto risultante può presentare un grado più o meno elevato di fragilità, con conseguente formazione di particelle più fini, fenomeno che può essere accentuato anche dall'assorbimento di umidità. La produzione di polveri sottili costituisce un potenziale rischio di esplosione qualora queste si accumulino su superfici calde.

Il processo di densificazione si articola nelle seguenti fasi: raccolta biomassa, essiccazione, riduzione dimensionale delle particelle, pretrattamento, formulazione, pellettizzazione (per estrusione) e raffreddamento/stoccaggio. [73], [74]

2.1.1 *Raccolta materie prime e gestione forestale*

Questa filiera richiede che tutti i processi tra loro siano interconnessi in maniera efficiente. [75]

Questo processo riguarda solitamente le colture destinate specificamente alla produzione di pellet, per le quali si adottano metodi di raccolta differenti rispetto a quelli impiegati per i materiali residuali, con un'influenza spesso legata anche alla qualità delle biomasse.

La raccolta avviene generalmente nel periodo invernale, in corrispondenza della fase di riposo vegetativo e in assenza di fogliame.

Uno studio suddivide i processi per la raccolta delle piante coltivate a scopo energetico in due principali metodologie:

- Single pass cut and chip: consiste nel taglio e nella cippatura della coltura in un'unica passata, mediante l'impiego di macchine agricole dedicate o opportunamente modificate. I trucioli ottenuti vengono raccolti in rimorchi, autotrainati dalla macchina stessa oppure trainati da trattori. Questa tecnica viene generalmente utilizzata per colture a ceduo (tagliate per stimolare la ricrescita di nuovi fusti)
- Whole stem: prevede il taglio degli steli della ceppaia, che vengono mantenuti interi anziché essere cippati immediatamente. La raccolta può essere effettuata con macchine semoventi oppure con raccoglitrici trainate, in grado di eseguire solo il taglio oppure anche il carico. È importante considerare che, in questo caso, sarà necessaria una successiva fase di trinciatura.[76]

Oltre a questi due sistemi principali, se ne possono individuare altri:

- Biobaler: impiegato per la raccolta della biomassa legnosa, che viene compressa sotto forma di balle rotonde.[77]
- Raccolta manuale: effettuata mediante motoseghe, con l'abbattimento degli alberi e successivo trasporto in un secondo momento.
- Raccolta con harvester su braccio: macchina tipicamente impiegata in terreni montani, adatta anche ad alberi di dimensioni elevate. È dotata di una gru a parallelogramma, alla cui estremità è posizionata la testa abbattitrice-sramatrice Quest'ultima è provvista di pinze o rulli laterali che serrano il tronco alla base, per poi procedere al taglio tramite sega a catena o a cesoia. Essendo mobile, la testa consente di direzionare la caduta dell'albero. A questa fase segue l'eventuale sramatura, un'operazione aggressiva durante la quale il tronco scorre attraverso la testa, provocando la rottura dei rami contro di essa. Qualora la testa ne abbia la capacità, è inoltre possibile procedere direttamente alla sezionatura dei tronchi.[78], [79]

2.1.2 *Cippatura*

Cippatura: processo di riduzione dimensionale della biomassa legnosa forestale, realizzato tramite macchine dotate di coltelli che tranciano il legno producendo cippato, un materiale uniforme, liscio e facile da movimentare. Le macchine impiegate per questa operazione sono dette cippatrici e si classificano in base all'organo di taglio in cippatrici a disco, a tamburo e a vite conica. Tali macchine sono in grado di produrre sezioni di dimensioni variabili a seconda delle esigenze specifiche.

Questa fase viene svolta più comunemente nel luogo stesso di raccolta, sebbene possa essere effettuata anche presso il sito di stoccaggio o direttamente nell'impianto. L'impiego di queste macchine riguarda principalmente biomasse come tronchi e piante di piccole dimensioni, mentre risulta meno efficace nella cippatura di residui forestali quali rami, cimali e ramaglia: essendo materiali eterogenei, costituiti da elementi di forma e orientamento irregolari, la produttività effettiva della macchina risulta ridotta.

Per ovviare a tale limite sono state ideate cippatrici a tamburo dotate, oltre ai tradizionali coltelli tangenziali, anche quelli radiali, in grado di lavorare i rami orientati parallelamente al tamburo. Un ulteriore adattamento è rappresentato dal sistema di re-immissione, reso possibile da un dispositivo di vagliatura posto a valle, che reimmette i rami nel ciclo di lavorazione.

Queste macchine possono essere di tipo mobile o stazionario, rispettivamente impiegate direttamente in campo o all'interno degli impianti.

2.1.3 *Triturazione*

Triturazione: processo realizzato da macchine dotate di martelli che, rompendo il legno, producendo un materiale più grossolano e disomogeneo rispetto al cippato.

I martelli possono essere affilati oppure non richiedere l'affilatura. Si tratta di macchine meno sensibili delle cippatrici, alla presenza di contaminanti nel materiale, aspetto particolarmente rilevante nel caso delle biomasse residuali, spesso contaminate da elementi esterni, solitamente provenienti dal terreno.

Queste macchine si classificano in base al sistema di alimentazione, può essere a caricamento orizzontale o verticale. Rientrano in questa categoria anche gli shredder, trituratrici dotate di rotori smussati che operano a velocità relativamente basse.

Le biomasse maggiormente vocate all'impiego di queste macchine sono quelle residuali, grazie alla robustezza della macchina stessa; inoltre, rispetto alle cippatrici, tali macchine presentano una potenza maggiore. [80], [81]

2.1.4 *Trasporto*

Questa fase riveste una notevole importanza dal punto di vista economico, in quanto incide dal 10 al 30% sul costo complessivo del legno consegnato. Per tale ragione è necessario tener conto di diversi fattori, quali la distanza tra il luogo di raccolta e quello di consegna, l'eventuale frammentazione dell'azienda e la quantità di biomassa trasportata.

La dimensione, la forma e l'omogeneità delle biomasse rendono complesso il trasporto, specialmente su strada: per questo motivo si tende a privilegiare biomasse di dimensioni

ridotte ed omogenee, piuttosto che il trasporto di sezioni di tronco o di rami, poiché quest'ultime aumentano gli spazi vuoti all'interno del cassone del camion. Inoltre, dimensioni disomogenee ed elevate possono comportare un aumento del numero di viaggi necessari al trasporto, con conseguente incremento dei costi e dell'inquinamento.[82]

2.1.5 *Stoccaggio e lavorazione principale*

Una volta giunte in sede di lavorazione, le biomasse legnose possono essere sottoposte a diversi processi: quelle non ancora ridotte di dimensione possono essere cippate o triturate secondo i metodi sopra descritti, operazioni che possono avvenire sia prima, sia dopo la fase di stoccaggio. Prima di procedere al processo di produzione del pellet, tuttavia, è fondamentale ridurre il contenuto di umidità di tali biomasse attraverso processi di essiccazione.

Uno studio evidenzia come i residui forestali debbano essere stoccati in un'area separata per un periodo di circa 5-7 mesi prima della cippatura, al fine di ottenere un'umidità inferiore al 30% e incrementare il potere calorifico del materiale. Durante il periodo di stoccaggio, tuttavia, intervengono diversi fattori che possono aumentare la quantità di materiale perso: la temperatura ambientale, le precipitazioni, l'estensione dell'area e la durata dello stoccaggio, oltre all'umidità e alla forma della biomassa, influenzano infatti la degradazione fisico-chimica e biologica, con una riduzione del valore energetico che può arrivare fino al 55%.[83]

Il comportamento delle biomasse durante lo stoccaggio varia in base alla tipologia: forestali, composti dalla biomassa della chioma, subiscono un elevato riscaldamento dovuto all'intensa attività microbica, con conseguenti perdite di sostanza secca; il cippato ottenuto da legname tondo, ricavato da fusti sottili, presenta invece un minor contenuto di polveri fini, una migliore aerazione, un riscaldamento inferiore e perdite di materia secca più contenute. Il legname non cippato, infine, va incontro a una decomposizione più lenta rispetto al cippato, risultando pertanto ideale per stoccaggi prolungati, in quanto limita il rischio di contaminazione da ceneri [84]

Tipi di stoccaggio:

- Stoccaggio all'aperto: secondo uno studio, può essere realizzato in campo con tronchi e rami di piccolo calibro, formando dei cumuli direttamente sul terreno. Le biomasse destinate a questo tipo stoccaggio presentano inizialmente un'umidità di circa il 50%; dopo una permanenza all'esterno di 30 giorni, l'umidità si riduce a circa il 45%. Qualora però la permanenza all'esterno venga prolunga senza l'impiego di coperture, gli eventi atmosferici tenderanno ad aumentare nuovamente l'umidità delle biomasse, in misura variabile anche in base alla stagione.
  Lo stesso studio evidenzia inoltre un innalzamento delle ceneri nel tempo: se dopo i primi 30 giorni tale contenuto risultava pari allo 0,9%, a 180 giorni si registra un

aumento fino al 12,1%, riconducibile alla contaminazione proveniente dal terreno o dalla polvere presente in campo.
Lo stoccaggio della legna da ardere in ciocchi avviene invece in cumuli o cataste all'interno di contenitori metallici a maglie larghe, con l'obiettivo di portare l'umidità tra il 20 e il 30%.
A questi metodi è possibile applicare teli antipioggia, in modo da proteggere il materiale dalle precipitazioni e trattenere il calore, aumentando così la capacità essiccante con il tempo. [84], [85], [86]

- Stoccaggio al chiuso: può essere effettuato con materiale cippato, disposto in cumuli tali da favorire la ventilazione naturale. Secondo uno studio, una permanenza al chiuso di 60 giorni consente di raggiungere un'umidità inferiore al 40%. Il contenuto di ceneri misurato con questo metodo di stoccaggio risulta stabile e costante per tutta la durata del periodo, mantenendosi tra l'1,5% e il 2,9%.[85]

Per quanto riguarda l'essiccazione, questa può avvenire anche durante lo stoccaggio, in maniera passiva. Tale fase risulta necessaria, prima della pellettizzazione, per le biomasse grezze che presentano un'umidità compresa tra il 30% e il 60%, portando infine a valori tra il 10% e il 15%. L'essiccazione è un processo ad alta intensità energetica, che sfrutta il principio del trasferimento simultaneo di calore e massa per rimuovere l'umidità dal prodotto. [87]

- Essiccazione passiva: si basa sull'accatastamento del materiale e sulla sua esposizione alla temperatura e alla ventilazione ambientale. Il processo può articolarsi in due fasi: nella prima si verifica un'evaporazione a velocità costante dell'acqua presente sulla superficie esterna del materiale, mentre nella seconda fase la velocità diventa decrescente, poiché l'acqua deve evaporare procedendo dal centro verso l'esterno, seguendo un gradiente di concentrazione.
  L'aria che attraversa il cumulo essicca dapprima le porzioni esterne e successivamente quelle interne; tuttavia, affinché l'umidità venga effettivamente rimossa, è necessario che ci sia l'aria in uscita si trovi ad una pressione sufficiente a espellerla. [88]
- Essiccazione semi passiva: si tratta di un processo intermedio tra l'essiccazione passiva e quella attiva, in quanto ne combina le caratteristiche, sfruttando sia l'esposizione alla radiazione solare sia l'apporto di aria calda da un collettore.
  Un tipico processo di essiccazione semi-passiva viene generalmente applicato a strutture a tunnel/serra, all'interno delle quali un flusso d'aria attraversa il materiale in regime naturale o leggermente assistito. Il processo sfrutta l'innalzamento della temperatura all'interno della serra per favorire l'essiccazione del cumulo, eventualmente supportata da sistemi di movimentazione dell'aria.
  Un ulteriore caratteristica delle strutture a tunnel/serra riguarda la loro capacità di preservare l'umidità del prodotto in misura maggiore rispetto a sistemi di essiccazioni naturali. [89], [90]
- Essiccazione attiva: processo che sfrutta un flusso d'aria forzato per rimuovere l'umidità dai cumuli. Può avvalersi di ventole che muovono l'aria ambiente, oppure aria riscaldata tramite scambiatori solari, caldaia o ancora del calore di scarto proveniente da eventuali sistemi di termovalorizzazione, riciclando così un prodotto che andrebbe altrimenti perso e rendendo il processo di essiccazione più efficiente e rapido.

Uno studio ha sperimentato un sistema di ventilazione ad aria fredda su cippato di pioppo, articolato in due programmi consecutivi: inizialmente si applica un piano di raffreddamento nelle settimane successive alla raccolta delle biomasse, con lo scopo di evitare il riscaldamento del cumulo; segue una seconda fase, corrispondente al vero e proprio processo di essiccazione, avviata quando le condizioni atmosferiche diventano più favorevoli per l'applicazione di un sistema di ventilazione classico. I risultati dello studio evidenziano come, con questo metodo, non si verifica il riscaldamento iniziale della biomassa, preservandone così la qualità. La seconda fase di essiccazione ha una durata di 194 ore di funzionamento, nel corso delle quali l'umidità si riduce dal 51,5% all'11,9%.
In linea con questo studio, un'altra ricerca utilizza il calore residuo di centrali idroelettriche per essiccare cippato all'interno di container e di rimorchi agricoli, sfruttando un ventilatore centrifugo. In questo caso l'umidità passa da un valore iniziale de 52-66% a un valore finale del 7-10%, con un notevole incremento molto del potere calorifico netto.
Va tuttavia considerato che i processi di essiccazione attiva, a differenza di quelli che sfruttano il calore di scarto (caratterizzati da costi minori), comportano generalmente costi elevati; risulta pertanto opportuno applicarli a biomasse di alta qualità, poiché altrimenti il processo risulterebbe economicamente sconveniente. [88], [91], [92]
Esistono diverse tipologie di essiccatori, differenziate in base a vari parametri: la modalità operativa, può essere continua o intermittente; il tipo di apporto di calore può avvenire per convezione, conduzione o irraggiamento; il mezzo di essiccazione può essere costituito da aria, gas di combustione o vapore surriscaldato; la fonte energetica disponibile può essere solare, da biomassa o elettrica; infine, la modalità di riscaldamento può realizzarsi tramite essiccatoio diretto o indiretto.
Gli essiccatoi principali sono a

- A tamburo rotante: Consiste in un grande tamburo cilindrico, leggermente inclinato, che ruota attorno al proprio asse. È dotato di palette interne che sollevano e disperdono il materiale, mentre il gas caldo viene immesso nel tamburo tramite un sistema meccanico azionato elettronicamente. La velocità in rotazione, l'inclinazione, la portata e la temperatura del gas influenzano l'efficacia della rimozione dell'umidità.
- Pneumatico/flash: Il materiale solido viene iniettato in un flusso d'aria calda ad alta velocità con l'ausilio di una coclea. I gas caldi fungono da vettori per il trasporto dell'umidità dal materiale ai gas stessi. Il prodotto essiccato viene successivamente separato dal flusso d'aria mediante cicloni e filtri a maniche.
- Ad anello: analogo al precedente, in questo caso il materiale viene distribuito uniformemente e trasportato all'interno di un flusso d'aria calda. Un classificatore centrifugo consente la ricircolazione interna limitata dei solidi semi secchi, prolungando il tempo di permanenza delle di dimensioni maggiori. Le particelle più fini abbandonano il serbatoio con l'aria di scarico, mentre le più particelle piccole vengono allontanate mediante apposite palette
- A letto fluido: rappresenta il metodo di essiccazione più economico ed efficiente per materiali umidi che non tendono ad aggregarsi o a formare grumi. L'aria calda attraversa il letto tramite una piastra distributrice con una velocità sufficientemente elevata da mantenere le particelle in stato

fluidizzato. Il tempo di permanenza delle particelle all'interno della camera è compreso tra 30 e 120 secondi per la rimozione dell'umidità superficiale. Questo sistema consente inoltre di miscelare uniformemente i solidi e distribuire la temperatura in modo omogeneo.

- A spruzzo: Trasforma un materiale in soluzione in polvere tramite atomizzatori fini, che lo spruzzano all'interno di una camera di essiccazione dove la polvere viene poi raccolta. Le goccioline atomizzate si asciugano formando piccole particelle, che vengono raccolte alla base della camera. Affinché questo processo possa essere applicato, è necessario che il materiale abbia un elevato grado di fluidità.[93]

Esistono ulteriori trattamenti volti a migliorare le caratteristiche delle biomasse grezze, in particolare per superare criticità quali la scarsa durabilità meccanica, l'elevata affinità per l'umidità e i problemi legati a scorie e incrostazioni. A tale scopo si ricorre a pretrattamenti termo-chimici preliminari, tra cui la Carbonizzazione Idrotermale (HTC): Un processo che simula la carbonizzazione naturale in ambiente acquoso, a temperatura controllata e pressione autogena, degradando la struttura originaria della biomassa e riducendone il contenuto di ceneri. [87], [94]

Qualora non sia già stata effettuata prima dell'essiccazione, la fase successiva del processo prevede la vagliatura, operazione di fondamentale importanza per l'influenza che esercita sulla movimentazione e sulla combustione delle biomasse, oltre che sulle relative proprietà di stoccaggio e ventilazione. Uno studio ha messo a confronto tre principi di misura: la vagliatura orizzontale, la vagliatura rotante e l'analisi di immagine, utilizzando come riferimento il metodo stereometrico, basato su una misurazione manuale di un campione di particelle mediante calibro digitale.

Vagliatura orizzontale: comunemente applicata ai cippati combustibili, può essere effettuata in modalità meccanica o manuale. Il sistema si compone di setacci sovrapposti, disposti a torre, con diametro decrescente dall'alto verso il basso.

Vagliatura rotante: costituita da 5 cilindri di vagliatura, uniti tra loro a formare un tamburo rotante. A differenza del sistema precedente, la disposizione è inversa, con diametri che si sviluppano in maniera crescente; grazie all'inclinazione del tamburo, il materiale tende a spostarsi verso i diametri maggiori.

Analisi d'immagine: Si tratta di un sistema di classificazione ottico fotografico dinamico. Le biomasse da un contenitore vengono coinvolgiate su un canale di alimentazione vibrante a decadere su un nastro trasportatore che provvede a singolarizzarle. Prima di raggiungere il nastro, le particelle attraversano una sorgente di luce lineare, dove vengono rilevate da una telecamera e calcola quindi le dimensioni delle particelle a partire dalle ombre proiettate, assumendo una velocità costante delle stesse nel piano di misura. [95]

2.1.6 *Processo di pellettizzazione*

2.1.6.1 Macinazione.

Processo volto a ridurre le dimensioni della biomassa: quanto più tanto maggiore è la densità ottenuta. Per la macinazione viene generalmente impiegato un mulino a martelli, che riduce la biomassa a dimensioni non superiori al diametro del pellet finale. Segue una fase di setacciatura, finalizzata a omogeneizzare le diverse particelle. È stato osservato che l'impiego delle particelle più fini non solo determina un aumento della densità, ma incrementa anche la pressione generata durante il processo[1], [96], [97]

2.1.6.2 Condizionamento.

Si tratta di un processo facoltativo, che consiste in un trattamento con vapore a temperature superiori ai 100°C. Tale trattamento ammorbidisce il legno e rende il materiale meno abrasivo nei confronti dell'attrezzatura impiegata.[1]

2.1.6.3 Pellettizzazione.

Rappresenta il processo di densificazione vero e proprio: la biomassa, precedentemente macinata e condizionata, viene compattata meccanicamente in piccoli cilindri attraverso un'estrusione forzata all'interno di una matrice forata. La pressione esercitata dall'organo compattante contro la matrice genera attrito e un conseguente innalzamento della temperatura, che ammorbidisce la lignina (il legante naturale delle biomasse lignocellulosiche) favorendone la ripolimerizzazione e consolidando così la struttura definitiva del pellet. [1], [74]

Il processo si articola in tre stadi successivi

1. Riarrangiamento delle particelle e riempimento volumetrico a bassa pressione, con dissipazione di energia dovuta all'attrito tra le particelle stesse e tra le particelle e la parete.
2. Deformazione visco-elastico-plastica, caratterizzata dalla plasticizzazione dei composti chimici condensati (lignina, proteine, carboidrati) e dal fissaggio meccanico della cellulosa, che rimane invece inalterata all'aumentare della pressione.
3. Consolidamento strutturale, con una leggera espansione al momento del rilascio della pressione. [96]

Le macchine pellettizzatrici si suddividono in due principali configurazioni costruttive, in base all'orientamento e al movimento della matrice: trafila piana (a matrice orizzontale) e ad anello (con matrice verticale/anulare) [1], [96]

Macchine a trafila piana (orizzontale): la matrice è disposta orizzontalmente e il materiale viene pressato dall'alto verso il basso attraverso i fori della matrice stessa, per mezzo di uno o più rulli che ruotano sulla sua superficie. È opportuno evidenziare come i fori presentino una sorta di imbuto, che facilita l'ingresso del material. Si tratta generalmente di macchine meno energivore e di costruzione più semplice, adatte a produzioni su piccola scala; questa

configurazione comporta tuttavia una densità apparente e una durabilità meccanica inferiori, criticità particolarmente evidenti nei pellet ottenuti da biomasse residuali o alternative.[1], [74]

Macchine a trafila ad anello (verticali/rotanti): dotate di due o più rulli di pressatura che spingono il materiale verso l'interno di una matrice anulare, dove il pellet estruso viene successivamente tagliato a misura da una lama. Il loro impiego riguarda prevalentemente il settore industriale su larga scala. [1], [96]

Queste macchine risultano personalizzabili in base alle esigenze produttive: la matrice determina infatti il diametro, la lunghezza e il rapporto tra diametro e lunghezza dei canali di pressatura, oltre alla forma e all'angolo di imbocco e alla profondità dei canali stessi. Anche il numero e la disposizione dei canali sono variabili, influenzando sia la qualità del pellet sia le prestazioni complessive del dispositivo. La superficie della matrice può essere concettualmente suddivisa in tre aree: attive, di transizione e inattive, definite in funzione dell'interazione tra il materiale e la parete.

Il rullo, pur non influenzando direttamente le caratteristiche del pellet, incide invece sulla resistenza all'usura del sistema. Risulta inoltre importante il gap tra rullo e matrice, generalmente compreso tra 0,1 e 0,3 mm: un gap troppo stretto provoca un'usura precoce dei componenti, mentre uno eccessivamente ampio determina pellet di scarsa qualità.

La ricerca ha sviluppato un nuovo metodo volto a migliorare la sperimentazione sulle macchine a trafila ad anello, riducendone costi e difficoltà d'uso. È stata così ideata la pressa monopellet da laboratorio, uno strumento che riproduce in scala ridotta il comportamento del canale di una trafila ad anello, mediante la pressione sequenziale di strati di biomassa all'interno di un canale cilindrico. [96]

Parametri di processo comuni alle due configurazioni, indipendentemente dalla tipologia di trafila utilizzata.

- Temperatura: rappresenta il parametro con il maggiore impatto sulla resistenza meccanica e sulla densità del pellet. Ciò è dovuto alla necessità che la lignina superi la propria temperatura di transizione vetrosa (50-140°C), in modo da ammorbidirsi e successivamente ripolimerizzare in fase di raffreddamento. Nella pellettizzazione industriale la temperatura si attesta generalmente intorno ai 120-130°C, per effetto dell'attrito generato nel canale, arrivando anche a 135°C in prossimità del rullo; nella parte finale del processo si registra invece la temperatura più bassa. Si osserva inoltre come la pressione tenda a diminuire all'aumentare della temperatura della matrice, fenomeno riconducibile alla migrazione sulle superfici di estrattivi idrofobici (cere, resine), che agiscono da lubrificanti naturali. Le temperature ritenute più idonee per questo processo si collocano complessivamente in un intervallo compreso tra 60 e 160°C. [1], [96]

- Pressione: risulta influenzata dalla resistenza tra materiale, rullo e canali della matrice, generata dall'interazione tra attrito interno ed esterno. I valori ottimali si attestano generalmente tra 100 e 150 MPa, in funzione della tipologia di biomassa impiegata.
- Umidità: svolge la funzione di legante naturale e di lubrificante, contribuendo, durante la fase di condizionamento, a denaturare le proteine, gelatinizzare gli amidi e solubilizzare le fibre. L'intervallo ottimale si colloca intorno al 5-15%; un'umidità eccessiva tende invece a indebolire la struttura del pellet, a causa dell'espansione subita dall'acqua con l'aumento della temperatura. [1], [97]
- Dimensioni delle particelle: particelle di dimensioni fini aumentano la superficie di contatto, ma con essa anche l'attrito generato nel canale, con conseguente incremento della pressione e possibile rischio di intasamento delle pellettizzartici. L'obiettivo è pertanto mantenere un adeguato equilibrio tra particelle fini e particelle di dimensioni medie.[97]

2.2 **Parametri da valutare**

I parametri valutati per definire un pellet di qualità sono descritti dalla norma europea UNI-EN 17225, successivamente rielaborata in Italia dalla ISO. In questo paragrafo l'attenzione non sarà rivolta ai limiti che definiscono un pellet di qualità, già trattati in precedenza, bensì all'effetto che tali parametri esercitano sul processo di combustione.

- Umidità: influisce direttamente sul processo di densificazione, nonché sulla pressione e sulla temperatura di pellettizzazione, pur rimanendo un elemento fondamentale per ottenere un buon prodotto. Nel processo di combustione rappresenta tuttavia un fattore limitante, poiché l'evaporazione dell'acqua presente nel pellet costituisce un processo fortemente endotermico, con conseguente riduzione del potere calorifico effettivo. Un elevato contenuto di umidità comporta inoltre un aumento della produzione di monossido di carbonio e di altri prodotti derivanti da una combustione incompleta.
- Contenuto di ceneri: le ceneri riducono il potere calorifico della biomassa, poiché la frazione inorganica non contribuisce al rilascio di calore. Nelle biomasse con elevato contenuto di ceneri e silice, inoltre, la combinazione con i metalli alcalini genera silicati a basso punto di fusione, responsabili di fenomeni di scoriazione, imbrattamento e sinterizzazione.
- Potere calorifico: determina il contenuto energetico del biocombustibile, corrispondente all'energia liberata dall'ossidazione completa di 1 kg di biomassa ed è strettamente legato all'efficienza dell'utilizzo termico.
- Durabilità meccanica: definisce la resistenza del pellet alla rottura. Una durabilità ridotta comporta la formazione di particelle fini, che possono interferire con i sistemi di alimentazione automatica e con la regolazione degli impianti di riscaldamento; tali particelle, inoltre, bruciano rapidamente determinando un forte innalzamento della temperatura, che favorisce la fusibilità delle ceneri.
- Densità apparente: indica una grandezza fisica che misura la massa di pellet contenuta in un determinato volume. Una densità apparente bassa favorisce il

trasporto della biomassa, riducendo i costi, migliorando l'alimentazione e limitando la produzione di polveri.

- Diametro e lunghezza: costituiscono le dimensioni fisiche del pellet, elementi fondamentali nei sistemi energetici caratterizzati da alimentazione continua, in quanto consentono la standardizzazione del processo e ne migliorano l'efficienza complessiva. Una lunghezza eccessiva o un diametro ridotto tendono tuttavia a indebolire il pellet, favorendo rotture e la conseguente formazione di particelle fini e prodotti non omogenei.
- Azoto: rappresenta il precursore dell'ossido di azoto, che si forma alle alte temperature; tuttavia, poiché negli impianti moderni le temperature di esercizio risultano relativamente basse, gli ossidi di azoto prodotti possono essere considerati trascurabili. È stato inoltre osservato come, all'aumentare del contenuto di azoto nella biomassa iniziale, la produzione di NOx tenda a diminuire.
- Cloro: svolge un ruolo nella mobilità dei composti inorganici, facilitando la volatilizzazione del potassio. Agisce inoltre come vettore per il deposito dei metalli alcalini sulle superfici di scambio termico, accelerando e causando i processi di corrosione. Il cloro tende inoltre a ritardare la propagazione della fiamma, attraverso la riduzione dei radicali liberi.
- Zolfo: durante la combustione reagisce con i metalli alcalini e alcalino-terrosi, formando solfati che si condensano sulle superfici di scambio termico, favorendo così imbrattamento e scoriazione. La sua ossidazione produce inoltre anidride solforosa e altri ossidi di zolfo, i quali contribuiscono direttamente all'inquinamento atmosferico, causando anche il fenomeno delle piogge acide.[98], [99], [100]

Capitolo 3
RISULTATI
ANALISI E COMPARAZIONE DEI VARI PARAMETRI DI QUALITÀ DEL PELLET

3.1 **Preambolo**

In questo capitolo verranno analizzati i valori dei parametri di qualità per ciascuna tipologia di pellet ottenuto dalle biomasse esaminate in precedenza, confrontandoli successivamente con la norma UNI EN ISO e con le caratteristiche tipiche di un food pellet.

Come pellet specifico è stato preso in considerazione quello prodotto con legno di quercia, che viene impiegato sia in purezza sia in miscela, e che riveste un ruolo rilevante nella produzione di pellet per barbecue.

È importante evidenziare come i dati riportati provengano da studi differenti, con conseguente eterogeneità nei parametri quali umidità, dimensioni e quantità dei diversi organi vegetali considerati; elementi che possono influenzare i valori valutati nel presente studio.

3.2 **Parametri della UNI EN ISO 17225**

Inizialmente, la norma valuta la provenienza del materiale di origine del pellet, definendo le classi A1, A2 e B per il pellet destinato a uso domestico, e le classi I1, I2 e I3 per quello destinato a uso industriale.

Per rientrare nella classe A1, la biomassa può essere costituita da tronco di legno o da legno residuale non trattato chimicamente.

Per la classe A2, la biomassa può essere costituita da albero intero privo di radice, tronco di legno, legno residuo in pezzi o legno residuo non trattato chimicamente.

Per la classe B, la biomassa può essere costituita da piante forestali e legni vergini, sottoprodotti e residui della lavorazione del legno, oppure residuo legnoso non trattato chimicamente. [13], [100]

In seguito, verranno elencati i parametri, specificando le relative classi di qualità.

- Diametro: 6-8mm (A1, A2, B)
- Lunghezza: 3,15-40mm (A1, A2, B)
- Umidità: <10% (A1, A2, B)
- Ceneri: <0,7%(A1) <1,2% (A2), <2% (B)
- Durabilità meccanica: >97,5% (A1, A2), 96,5% (B)
- Polveri: <1% (A1, A2, B)
- Potere calorifico inferiore: >16,5 MJ/kg (A1, A2, B)
- Densità apparente: 600kg/m^3 (A1, A2, B)
- Azoto: <0,3% (A1), <0.5% (A2), <1% (B)
- Zolfo: <0,04% (A1), <0,05% (A2, B)
- Cloro: <0,02% (A1, A2) <0,03% (B). [10]

3.3 **Parametri del pellet di quercia**

Secondo l'analisi della composizione della materia prima, sono state riscontrate le seguenti percentuali: lignina 24,44%, cellulosa 21,94%, emicellulosa 36,44%.

Per quanto riguarda gli altri parametri:

- Ceneri: 3,1%-0,36%, media: 1,15%
- Durabilità meccanica: 95%-99,12%, media: 97,60%
- Densità apparente: 700-1005 kg/m^3, media: 852,5 kg/m^3
- Potere calorifico inferiore: intorno a 17,52 MJ/kg all'8% di umidità, 19,6 MJ/kg. 16,49 MJ/kg, media: 17,87 MJ/kg
- Polveri: 3,75%
- Azoto totale: <0,04%-0,17% media: 0,105%
- Cloro totale: 0,017%
- Zolfo totale: 0,013%. [101], [102], [103], [104], [105], [106]

3.4 **Parametri pellet di paglia**

- Ceneri: 4,8%, 5%-9,9%, media: 6,6%
- Durabilità meccanica: 89-95% media 92%
- Densità apparente: 587,5 kg/m^3, 406-645 kg/m^3, 1151 kg/m^3, media 697,4 kg/m^3
- Potere calorifico superiore: 17,58 MJ/kg, 16,72 e 18,80 MJ/kg, media: 17,7 MJ/kg
- Potere calorifico inferiore: 17,3 MJ/kg
- Polveri: 8,58%
- Azoto totale: 0,52%, 0,74%, media: 0,63%
- Cloro totale: 0,4%, 0,0017%, media: 0,2%
- Zolfo totale: 0,001%. [107], [108], [109], [110], [111]

3.5 **Parametri pellet di residui di girasole**

- Ceneri: 3,1% (guscio), 7,6 -16,1 (stelo), media: 8,93%
- Durabilità meccanica: 94,6%- 96,5% (guscio) 88,9 (fusto), media: 93,3%
- Densità apparente: 560 kg/m^3
- Densità del pellet: 1177,31 kg/m^3
- Potere calorifico inferiore: 21 MJ/kg (gusci), 7,4-18,2 MJ/kg, 20,1 MJ/kg, media: 16,77 MJ/kg
- Polveri: 0,77- 1,61%, media 1,19%
- Azoto totale: 0,665%
- Cloro totale: 0,117%
- Zolfo totale:0,041%

È importante evidenziare come, per questa tipologia di prodotto, si sia cercato di reperire in bibliografia valori relativi a pellet ottenuti da residui colturali della pianta, quali gli steli, e non da residui della lavorazione dei semi (i gusci), che presentano caratteristiche nettamente differenti rispetto agli steli stessi. È inoltre possibile considerare la miscelazione dei gusci con gli steli, al fine di migliorare le caratteristiche di questi ultimi.

[23], [112], [113], [114], [115], [116]

3.6 **Parametri pellet di residui di mais**

- Ceneri: 1,9% (tutolo) e 2,7%, media: 2,30%
- Durabilità meccanica: 96,5% (tutolo) e 97,9%, media: 97,20%
- Densità apparente: 360-624 kg/m^3, media: 492 kg/m^3
- Densità del pellet: 1360,21 kg/m^3 (tutolo), 529-842 kg/m^3, 1285 kg/m^3, media: 1004,05 kg/m^3
- Polveri: N/D
- Potere calorifico inferiore: 10,21 MJ/kg (tutolo) e 15,6 MJ/kg media 12,91 MJ/kg.
- Potere calorifico superiore: 17,1 MJ/kg (tutolo), media: 17,1 MJ/kg
- Azoto totale: 0,5% (tutolo) e 0,194%, media: 0,35%
- Cloro totale: 0,01%
- Zolfo totale: 0,1% (tutolo) e 0,028%, media: 0,06%

Per il mais è stata effettuata la stessa valutazione applicata in precedenza al girasole, prendendo in considerazione una biomassa equamente distribuita e cercando, a partire dai dati reperiti, di elaborare valori plausibili. [112], [115], [117], [118]

3.7 **Parametri pellet di melo**

- Ceneri: 5,3%, 2,27%, 3,25, media: 3,61%
- Durabilità meccanica: 98,1%
- Densità apparente: 670kg/m^3, 506 kg/m^3, media: 588 kg/m^3
- Densità del pellet: 1230 kg/m^3
- Potere calorifico inferiore: 10,01 MJ/kg, 15,48 MJ/kg, 15,9 MJ/kg, media: 13,8
- Potere calorifico superiore: 17,41 MJ/kg, 18,94 MJ/kg, 17,5 MJ/kg, media: 17,95
- Polveri: 1,45, 0,42%, media: 0,93%
- Azoto totale: 0,89%, 0,55%, 0,22%, 0,5%, media: 0,54%
- Cloro totale: 0,015%
- Zolfo totale: 0,044%, 0,31, <0,01, media: 0,12%. [33], [34], [115], [119], [120], [121]

3.8 **Parametri pellet di pero**

- Ceneri: 1,47%
- Durabilità meccanica: 97,9%
- Densità apparente: 674 kg/m^3
- Densità del pellet
- Potere calorifico inferiore: 17,31 MJ/kg
- Polveri fini: 0,44%
- Azoto totale: 0,26%
- Cloro totale: 0,03%
- Zolfo totale: 0,03%. [121]

3.9 **Parametri pellet di vite**

- Ceneri: 4,3%, 2,6%, 1,42%, media: 2,77%
- Durabilità meccanica: 98,3%
- Polveri fini: 0,66%
- Densità apparente: 732,2 kg/m^3, 700 kg/m^3, media: 716,1 kg/m^3
- Densità del pellet
- Potere calorifico inferiore: 17,8 MJ/kg, 16,6 MJ/kg, media 17,2 MJ/kg.
- Azoto totale: 0,59%, 0,53%, media: 0,56%
- Cloro totale: 0,05%, 0,0005%, media: 0,025%
- Zolfo totale: 0,03% 0,0185%, media: 0,024%
- Rame: 17,2mg/kg, 24,93 mg/kg, media: 21,07 mg/kg [121], [122], [123]

È stato inserito anche il valore del contenuto di rame per via dei comuni trattamenti rameici che interessano questa coltura.

3.10 **Parametri pellet di ulivo**

- Ceneri: 2,9%, 2,5%, 3,31%, 4,47%, con tante foglie può aumentare di molto, media: 3,29%
- Durabilità meccanica: 98,5% (più presenza di foglie, meno durabilità presenta)
- Densità apparente 670 kg/m³, 581 kg/m^3, media: 625,5 kg/m^3
- Densità del pellet: n/d.
- Potere calorifico inferiore: 18,01 MJ/kg (foglie), 16,55 MJ/kg, 16,06 MJ/kg 16,17 MJ/kg, media: 16,7 MJ/kg
- Potere calorifico superiore: 16,7 MJ/kg, 19,8 MJ/kg, 18,92 MJ/kg, 19,87 MJ/kg, media: 18,82 MJ/kg.
- Polveri fini: n/d.
- Azoto totale: 0,32%, 1,56%, media: 0,940%
- Cloro totale: 0,02%, 0,013%, media: 0,017%
- Zolfo totale: 0%, 0,05%, 0,11% (foglie), media: 0,053%

È importante considerare la percentuale delle diverse porzioni della pianta che compongono la miscela, dal momento che un elevato contenuto di foglie può determinare un innalzamento del contenuto di ceneri fino al 14%. [124], [125], [126], [127], [128]

3.11 **Parametri pellet di ciliegio**

- Ceneri: 1,11%, 1,42%, 0,6%, media: 1,04%
- Durabilità meccanica: 98%
- Polveri fini: 0,51%
- Densità apparente: 682 kg/m^3, 561 kg/m^3, media: 621,5 kg/m^3
- Densità del pellet: n/d
- Potere calorifico inferiore: 17,1 MJ/kg, 18 MJ/kg, 19,46 MJ/kg, 20,71 MJ/kg, media: 18,82 MJ/kg
- Potere calorifico superiore: 20,81 MJ/kg, 22,06 MJ/kg, media: 21,44 MJ/kg
- Azoto totale: 0,3%, 0,27%, media: 0,285%
- Cloro totale: 0,03%
- Zolfo totale: 0,03%[121], [129]

3.12 **Parametri pellet di nocciolo**

- Ceneri: 3,2%, 3,5%, media: 3,35%
- Durabilità meccanica: 98%
- Densità apparente: 581,3 kg/m^3
- Densità del pellet: n/d
- Potere calorifico inferiore: 17,21 MJ/kg, 16,18 MJ/kg, media: 16,7 MJ/kg.
- Potere calorifico superiore: 18,22 MJ/kg, 20,08 MJ/kg, media: 19,15 MJ/kg
- Azoto totale: 0,77%, 0,64%, media: 0,705%
- Cloro totale: 0,2%, 0,09%

- Zolfo totale:0,076% [126], [130], [131], [132]

Per questa biomassa sono stati analizzati valori relativi sia agli scarti di potatura sia ai gusci, con l'obiettivo di ottenere valori medi il più possibile rappresentativi della realtà.

Capitolo 4
DISCUSSIONI
COMPARAZIONE E INDIVIDUAZIONE DELLE BIOMASSE

4.1 **Descrizione elementi dannosi per la carne.**

La combustione di biomasse legnose e di pellet può generare composti e particelle potenzialmente pericolosi quando i fumi entrano in contatto diretto o indiretto con gli alimenti. Il rischio dipende dalla composizione del combustibile, dalla presenza di impurità, dal contenuto di ceneri e di elementi minerali, dalla temperatura di combustione, dal rapporto aria-combustibile e dal grado di completezza della combustione. Nei pellet utilizzati per la cottura, questi aspetti risultano essere particolarmente importanti, poiché i prodotti della combustione possono depositarsi sulla superficie dell'alimento.

È necessario distinguere i contaminanti effettivamente misurati sull'alimento da quelli determinati nei fumi, nel particolato o nelle ceneri.

Per quanto riguarda i metalli pesanti, le valutazioni relative alla contaminazione degli alimenti devono essere considerate principalmente come una stima del potenziale rischio di deposizione e non come una misura diretta del contenuto di tali elementi nell'alimento.

4.1.1 *Idrocarburi policiclici aromatici.*

Gli idrocarburi policiclici aromatici, indicati con la sigla IPA, rappresentano una delle principali categorie di contaminanti derivati dalla combustione incompleta della materia organica. La loro formazione è favorita soprattutto quando la temperatura, l'apporto di ossigeno e il rapporto aria-combustibile non sono adeguatamente controllati. Gli IPA sono associati a processi di cottura ad alta temperatura, come la grigliatura, la tostatura e l'affumicatura degli alimenti.

Anche il contatto tra la fiamma, i grassi e i succhi della carne può favorire la formazione di fumi ricchi di IPA. Quando il grasso cade su una superficie calda o direttamente sulla fiamma, può generare fumi che, successivamente, si depositano sulla superficie della carne.

Tra gli IPA di maggiore interesse tossicologico rientrano il benzo(a)pirene, benzo(a)antracene, crisene, benzo(b)fluorantene, benzo(k)fluorantene, indeno(a,2,3-cd)pirene e dicenzo(a,h)antracene. L'EFSA, ovvero l'autorità europea per la sicurezza alimentare, ha individuato la somma di quattro composti, benzo(a)pirene, crisene, benzo(a)antracene e benzo(b)fluorantene, come parametro più rappresentativo della presenza di IPA cancerogeni negli alimenti. [133]

Gli IPA sono presenti in diverse frazioni nei fumi. Quelli più leggeri tendono a trovarsi nella fase gassosa, mentre quelli più pesanti e tossicologicamente più rilevanti sono maggiormente associati al particolato. Questi ultimi possono essere trasportati e depositarsi sulla superficie degli alimenti insieme alle particelle di fuliggine e cenere. Di conseguenza il rischio può riguardare non solo la via inalatoria, ma anche quella alimentare. [134]

4.1.2 *Metalli pesanti.*

I metalli pesanti possono essere presenti nella biomassa originaria, nelle impurità raccolte durante la fase di approvvigionamento e negli eventuali additivi o materiali estranei presenti nel pellet.

Durante la combustione, una parte di questi elementi rimane concentrata nelle ceneri, mentre un'altra parte può associarsi alle particelle fini e, quindi, essere trasportate dai fumi.

Uno studio condotto sulle ceneri di dieci campioni commerciali di pellet ha determinato la presenza di cadmio, cobalto, cromo, rame, ferro, manganese, nichel, piombo e zinco. La concentrazione complessiva dei metalli pesanti può variare in funzione alla composizione del pellet e delle condizioni della combustione. Nello studio sono stati rilevati valori compresi tra un minimo di 80,39 mg/kg di sostanza secca e un massimo di 638,17 mg/kg di sostanza secca. I metalli potenzialmente tossici presenti nei biocombustibili comprendono cadmio, mercurio, piombo, cromo, nichel e arsenico, che possono produrre effetti avversi anche a basse concentrazioni. Risulta pertanto necessaria l'analisi sia delle ceneri sia del pellet. [135]

È importante specificare che la presenza di questi metalli nelle ceneri non equivale automaticamente alla loro presenza sull'alimento. Il possibile trasferimento dipende dalla volatilità del metallo, dalla granulometria delle particelle, dalla distanza tra combustibile e l'alimento, dalla presenza di grasso e dalla modalità di cottura. [136]

Oltre ai metalli pesanti, nelle ceneri e del particolato sono presenti altri elementi d'interesse, tra cui azoto, zolfo e cloro. L'azoto e lo zolfo sono principalmente associati alla formazione dei rispettivi ossidi, mentre il cloro può contribuire alla formazione di composti corrosivi e fenomeni di deposizione. Questi fenomeni sono particolarmente rilevanti nei

sistemi di termovalorizzazione, poiché possono provocare il danneggiamento degli impianti. Gli elementi metallici rappresentano inoltre, indicatori della qualità della biomassa e del possibile arricchimento delle ceneri e delle polveri.

È opportuno evidenziare che questi elementi si trovano nelle ceneri e nel particolato. Non sono tuttavia da considerare, in modo automatico, come contaminanti che si trasferiscono direttamente agli alimenti, la loro contaminazione può essere facilitata in biomasse con elevate quantità di particolato emesso, dalla presenza di metalli e dalla possibilità che le particelle si depositino sull'alimento.

Nella combustione domestica delle biomasse, i principali inquinanti atmosferici comprendono il particolato e gli ossidi di zolfo e azoto. Questi ultimi derivano prevalentemente dall'azoto presente nel combustibile, che durante la combustione può essere convertito in specie intermedie come ammoniaca, acido cianidrico e, successivamente, in ossidi di azoto.

È fondamentale evidenziare che i prodotti derivati dall'azoto, indicati come NOx e dallo zolfo indicati come SOx, non sono considerati, nel presente lavoro, contaminanti caratteristici degli alimenti al pari degli IPA. Essi rappresentano principalmente indicatori della qualità del combustibile e della composizione del pellet. [137]

Il contenuto di cloro deve essere valutato con particolare attenzione a causa della sua volatilizzazione alle alte temperature. Durante la combustione, il cloro può formare specie come HCl e KCl, che risultano fortemente corrosive per impianti termici. Inoltre, può contribuire alla formazione di diossine e furani. Questi composti possono essere trasportati dal fumo e depositarsi sulla superficie degli alimenti esposti, soprattutto sulle parti grasse. L'esposizione può inoltre avvenire per inalazione.[138], [139], [140]

Il rame tende a rimanere prevalentemente nelle ceneri e, pertanto non determina necessariamente una contaminazione diretta dell'alimento. Tuttavia, il rischio non può essere considerato nullo in assoluto, poiché una parte degli elementi può associarsi al particolato fine e venire trasportata dai fumi.

4.2 **Comparazione biomassa-norma e biomassa di riferimento**

È necessario specificare che i dati riportati di seguito sono stati ricavati da studi differenti. Questa condizione può influenzare il valore finale dei parametri, così come possono influire le variabili associate al processo di pellettizzazione e alle condizioni di coltivazione delle biomasse.

4.2.1 *Pellet di paglia*

Tra le biomasse erbacee analizzate in questo lavoro, la paglia rappresenta una delle frazioni più abbondanti e disponibili sul territorio nazionale. Tuttavia, il confronto tra i dati sperimentali relativi al pellet di paglia da cereali, i valori soglia previsti dalla norma UNI EN ISO 17225-2 e la biomassa di riferimento, rappresentata dalla quercia, evidenzia un quadro disomogeneo.

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Paglia da cereali		6,60%	92,00%	8,58%	17,3 MJ/kg	17,7 MJ/kg

Tabella 4–1 Tabella di confronto del pellet di paglia di cereali, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Paglia da cereali	697,4 kg/m³	n/d	0,63%	0,00%	0,20%	n/d

Tabella 4–2 Tabella di confronto del pellet di paglia di cereali, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Dalla tabella 4-01 e dalla tabella 4-02 emerge che il potere calorifico inferiore, pari a 17,3 MJ/kg, e la densità apparente, pari a 697,4 kg/m^3, soddisfano ampiamente i requisiti della norma e risultano comparabili con i valori della biomassa legnosa di riferimento. Ciò conferma l'idoneità della paglia come combustibile dal punto di vista strettamente energetico.

Le principali criticità emergono invece sul piano chimico-fisico. il contenuto di ceneri, paria al 6,6%, supera di oltre tre volte la soglia massima ammessa anche per la classe B (<2%), collocando la paglia fuori da qualsiasi classe qualitativa prevista dalla norma per questo parametro. Analogamente, la durabilità meccanica, pari al 92%, non raggiunge il valore minimo richiesto dalla classe B (>96,5%). Anche la percentuale di polveri fini, pari all'8,58%, risulta nettamente superiore al limite normativo (<1%).

Questi tre parametri, tra loro collegati, riflettono la struttura fibrosa e l'elevato contenuto di silice tipici della paglia. Tali caratteristiche possono compromettere la coesione del materiale durante la pellettizzazione e la stabilità meccanica del pellet prodotto.

Anche azoto e zolfo, rispettivamente pari allo 0,63% e allo 0,2%, si discostano significativamente dai valori della biomassa di riferimento, con possibili implicazioni sulle emissioni durante la combustione, in particolare per la formazione di NOx e SOx. Il cloro, al contrario, mantiene livelli contenuti, escludendo, sulla base dei dati riportati, criticità rilevanti legate alla corrosione ad alta temperatura. [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111]

4.2.2 *Pellet di stocchi di girasole*

Il confronto tra i dati sperimentali relativi al pellet di stocchi di girasole e i valori soglia della UNI EN ISO 17225-2, riportati nella tabella 4-3 e nella tabella 4-4, evidenziano un quadro fortemente critico.

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Girasole		8,93%	93,30%	1,19%	16,77 MJ/kg	n/d

Tabella 4–3 Tabella di confronto del pellet di stocchi di girasole, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Girasole	560 kg/m³	1177,3 kg/m³	0,67%	0,04%	0,12%	n/d

Tabella 4–4 Tabella di confronto del pellet di stocchi di girasole, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il potere calorifico inferiore, pari a 17,77 MJ/kg, rispetta il requisito normativo minimo (>16,5 MJ/kg) e, sulla base dei valori riportati, risulta inferiore a quello della biomassa di riferimento, indicato come 17,87 MJ/kg. La percentuale di polveri fini, pari all'1,19%, è leggermente superiore al limite normativo, ma rimane inferiore al valore della biomassa di riferimento, pari al 3,75%. La densità apparente, pari a 560 kg/m^3, è invece inferiore alla soglia richiesta per tutte le classi (>600 kg/m^3) e anche al valore della quercia, pari a 852,5 kg/m^3.

Sul piano chimico-fisico, le criticità sono più marcate. Il contenuto di ceneri, pari all'8,93%, supera di oltre quattro volte il limite massimo ammesso anche dalla classe B (<2%) ed è quasi otto volte superiore a quello della quercia (1,15%). la durabilità meccanica, pari al 93,3%, non raggiunge la soglia minima prevista neanche per la classe B (>96,5%).

Il contenuto di cloro, pari allo 0,12%, risulta particolarmente elevato, nettamente superiore ai limiti normativi (<0,02-0,03%) e circa sette volte superiore a quello della quercia (0,017%). Tale valore è rilevante soprattutto in relazione al rischio di corrosione alle alte. L'azoto è presente allo 0,67%, mentre lo zolfo è pari allo 0,014%; entrambi rientrano parzialmente nelle soglie più permissive della norma. [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [112], [113], [114], [115], [116]

4.2.3 *Pellet di stocchi di mais*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Mais		2,30%	97,20%	n/d	12,91 MJ/kg	17,1 MJ/kg

Tabella 4–5 Tabella di confronto del pellet da residui di mais, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Mais	492 kg/m³	1004,05 kg/m³	0,35%	0,06%	0,01%	n/d

Tabella 4–6 Tabella di confronto del pellet da residui di mais, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il Pellet di mais rappresenta il potere calorifico inferiore più basso tra le biomasse esaminate, pari a 12,91 MJ/kg, Un valore nettamente inferiore sia alla soglia normativa (>16,5 MJ/kg) sia quello di quercia (17,87 MJ/kg). Anche la densità apparente risulta insufficiente rispetto al requisito minimo (>600 kg/m^3) e sensibilmente inferiore a quella della biomassa di riferimento (852,5 kg/m^3). Questi due parametri indicano una scarsa idoneità energetica del mais rispetto alle altre biomasse considerate.

Anche i parametri chimico-fisici mostrano criticità. Il contenuto di ceneri, pari al 2,3%, supera lievemente la soglia prevista dalla classe B (<2%), ed è circa il doppio rispetto a quello della quercia (1,15%), la durabilità meccanica del 97,2% rientra invece nella classe B (>96,5%).

Il tenore di zolfo, pari allo 0,06%, supera il limite massimo previsto da tutte le classi normative (0,05%) e risulta quasi cinque volte superiore a quello della quercia (0,013%). Il

cloro, con un valore di 0,01%, si mantiene su livelli contenuti, in linea con i requisiti più stringenti della norma e inferiore al valore della quercia. [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [112], [115], [117], [118]

4.2.4 *Pellet di residui del melo*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Melo		3,61%	98,10%	0,93%	13,8 MJ/kg	17,95 MJ/kg

Tabella 4–7 Tabella di confronto del pellet da residui del melo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Melo	588 kg/m³	1230 kg/m³	0,54%	0,12%	0,02%	n/d

Tabella 4–8 Tabella di confronto del pellet da residui del melo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il pellet di melo presenta un potere calorifico inferiore di 13,8 MJ/kg, inferiore sia alla soglia normativa (>16,5MJ/kg) sia al valore della quercia (17,87 MJ/kg). Anche la densità apparente, pari al 588 kg/m^3, non raggiunge il minimo previsto dalla norma, pari a 600 kg/m^3 della norma. Il profilo energetico del melo risulta per tanto tra i meno favorevoli del confronto.

Diversamente da altre biomasse, la durabilità meccanica, pari al 98,1%, e la percentuale di polveri, pari allo 0,93%, risultano pienamente conformi alle classi più stringenti della norma (rispettivamente >97,5% e <1%). I valori risultano inoltre migliori rispetto a quelli della quercia (rispettivamente 97,6% e 3,75%).

Il tenore di ceneri, pari al 3,61%, è nettamente superiore al limite massimo previsto dalla classe B (<2%) e risulta più del triplo rispetto a quello della quercia (1,15%).

Il contenuto di zolfo, pari allo 0,12%, è nettamente superiore a tutte le soglie normative (<0,05%) ed è quasi dieci volte superiore a quello della quercia (0,013%).

L'azoto, pari allo 0,54% rientra invece nella classe B (<1%), mentre il cloro, pari allo 0,015%, rientra nei limiti più stringenti della norma. [10], [34], [36], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [115], [119], [120], [121]

4.2.5 *Pellet di residui del pero*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Pero		1,47%	97,90%	0,44%	17,31 MJ/kg	nd

Tabella 4–9 Tabella di confronto del pellet da residui del pero, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Pero	670 kg/m³	n/d	0,26%	0,03%	0,03%	n/d

Tabella 4–10 Tabella di confronto del pellet da residui del pero, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il pellet del pero mostra un profilo energetico complessivamente favorevole. Il potere calorifico inferiore, pari a 17,31 MJ/kg, rispetta la soglia normativa e si avvicina al valore della quercia (17,87 MJ/kg). La densità apparente, pari a 674 kg/m^3, supera il requisito minimo (>600 kg/m^3), pur rimanendo inferiore a quello della biomassa di riferimento (852,5 kg/m^3)

Anche i parametri chimico-fisici risultano generalmente favorevoli. La durabilità meccanica, pari al 97,9% e le polveri, pari allo 0,44% soddisfano i requisiti delle classi più stringenti (A1/A2). Il contenuto di polveri è inoltre nettamente inferiore a quello della quercia (3,75%).

L'azoto, pari allo 0,26% e lo zolfo, pari allo 0,03% rientrano entrambi nella classe A1, pur risultando leggermente superiori ai corrispondenti valori della quercia (0,105% e 0,013%). Il tenore di ceneri, pari all'1,47% supera leggermente le soglie A1 e A2 (<0,7% e <1,2%), rientrando quindi nella classe B (<2%). Il cloro, pari allo 0,03% si colloca al limite della classe B. (<0,03%). [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [121]

4.2.6 *Pellet di residui della vite*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Vite		2,77%	98,30%	0,66%	17,2 MJ/kg	n/d

Tabella 4–11 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui della vite, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Vite	716,1 kg/m^2	n/d	0,56%	0,02%	0,03%	21,07 mg/kg

Tabella 4–12 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui della vite, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il pellet di vite presenta un potere calorifico inferiore di 17,2 MJ/kg, conforme alla norma e simile a quello della quercia (17,87 MJ/kg). La densità apparente della vite, pari a 716,1 kg/m^3 è superiore al requisito minimo, pur risultando inferiore a quella della biomassa di riferimento (852,5 kg/m^3).

Sul piano chimico-fisico, la durabilità meccanica, pari al 98,3%, e il contenuto di polveri, pari allo 0,66%, rientrano ampiamente negli standard più stringenti della norma. Il contenuto di polveri risulta inoltre nettamente inferiore a quello di quercia (3,75%).

Il tenore di ceneri, pari al 2,77%, è superiore anche della soglia prevista dalla classe B (<2%) e risulta più del doppio rispetto a quello della quercia (0,105%). Il contenuto di rame contenuto in questa biomassa è pari a 21,07 mg/kg, valore nettamente superiore al limite normativo previsto da tutte le classi (<10 mg/kg).

Zolfo, azoto e cloro presentano rispettivamente valori pari allo 0,024%, allo 0,56% e allo 0,025%. Lo zolfo rientra nella classe A1, mentre l'azoto e il cloro si collocano al limite della classe B e il cloro si colloca. [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [121], [122], [123]

4.2.7 *Pellet di residui di ulivo*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
ulivo		3,29%	98,50%	n/d	16,17 MJ/kg	18,82 MJ/kg

Tabella 4–13 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ulivo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
ulivo	625 kg/m³	n/d	0,94%	0,05%	0,02%	n/d

Tabella 4–14 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ulivo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il pellet di ulivo mostra un potere calorifico inferiore di 16,17 MJ/kg, leggermente inferiore alla soglia normativa (>16,5 MJ/kg) e al valore della quercia (17,87 MJ/kg). La densità apparente, pari a 625 kg/m^3, rispetta il requisito minimo, pur restando inferiore a quella della massa di riferimento.

La durabilità meccanica, pari al 98,5% rappresenta il valore più elevato tra tutte le biomasse esaminate, superando anche quello della quercia, pari al 97,6% e soddisfacendo pienamente le classi più stringenti della norma. Il tenore di cenere, pari al 3,29%, supera tuttavia la soglia della classe B (<2%) e risulta quasi triplo rispetto alla quercia.

Il dato più critico riguarda l'azoto, pari allo 0,94%, circa nove volte superiori a quello della quercia (0,105%) e prossimo a limite della classe B (<1%). Anche lo zolfo, pari allo 0,053%, supera il limite previsto da tutte le classi normative (<0,05%).

Il cloro, pari allo 0,017%, risulta invece pressoché identico al valore della quercia, rientrando entro i limiti più stringenti della norma.[10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [124], [125], [126], [127], [128]

4.2.8 *Pellet di residui di ciliegio*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Ciliegio		1,04%	98,00%	0,51%	18,82 MJ/kg	21,44 MJ/kg

1Tabella 4–15 Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ciliegio, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Ciliegio	621,5 kg/m³	n/d	0,29%	0,03%	0,03%	n/d

Tabella 4–16. Tabella di confronto del pellet prodotto da residui di ciliegio, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il ciliegio presenta il potere calorifico inferiore più elevato tra tutte le biomasse considerate, pari a 18,82 MJ/kg, superiore persino al valore della quercia, pari al 17,87 MJ/kg. La densità apparente, pari al 621,5 kg/m^3, rispetta il requisito normativo, pur rimanendo inferiore a quella della biomassa di riferimento.

Anche i restanti parametri risultano generalmente favorevoli. Il ciliegio presenta una durabilità meccanica del 98% e contenuto di polveri dello 0,51%, valori che soddisfano i requisiti delle classi più stringenti della norma. Il contenuto di polveri è inoltre nettamente inferiore rispetto a quello della quercia (3,75%).

Il contenuto di azoto, pari allo 0,285%, mentre quello dello zolfo, pari allo 0,03%; entrambi rientranti nella classe A1, pur rimanendo leggermente superiori ai valori della quercia. Il tenore delle ceneri del ciliegio, pari all'1,04%, è superiore alla soglia prevista per la classe A1 (<0,7%), ma rientra nella classe A2 (<1,2%), risultando comunque prossimo al valore della quercia (1,15%). Il cloro, pari allo 0,03% si colloca al limite della Classe B. [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [121], [129]

4.2.9 *Pellet di residui di nocciolo*

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg	
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	
Nocciolo		3,35%	98,00%	n/d	16,7 MJ/kg	19,15 MJ/kg

Tabella 4–17 Tabella di confronto del pellet da residui di nocciolo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2						
Classe A1	>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia	852,5 kg/m³		0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Nocciolo	581,3 kg/m³	n/d	0,71%	0,08%	0,15%	n/d

Tabella 4–18. Tabella di confronto del pellet da residui di nocciolo, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il potere calorifico inferiore, pari a 16,7 MJ/kg, leggermente superiore alla soglia normativa (>16,5 MJ/kg) e inferiore al valore della quercia (17,87 MJ/kg). La densità apparente, pari a 581,3 kg/m^3 non raggiunge requisito minimo della norma (600 kg/m^3), risultando inferiore anche a quella della quercia.

Sul piano chimico-fisico la durabilità meccanica è del 98%, la quale soddisfa le classi più stringenti della norma, superando il valore della quercia, pari al 97,6%. Il tenore di ceneri, pari al 3,35%, supera invece ampiamente la soglia della Classe B (2%). I dati più critici riguardano tuttavia azoto e soprattutto lo zolfo, rispettivamente 0,705%, che risulta sette volte superiore a quella della quercia (0,105%), e lo zolfo presenta una concentrazione di 0,067%, valore superiore a quello normativo (pari allo 0,05%). Il cloro con 0,15% risulta nettamente superiore ai limiti normativi e al valore della quercia dello 0,02%.

[10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [126], [130], [131], [132]

4.3 **Comparazione biomasse secondo i parametri**

In questo sottocapitolo si confronteranno le biomasse secondo i parametri valutati, cercando di definire i migliori e i peggiori.

4.3.1 *Ceneri*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Ceneri %	<0,7%	<1,2%	<2%	1,15%	6,60%	8,93%

Tabella 4–19 Tabella di confronto del contenuto di ceneri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Ceneri %	2,30%	3,61%	1,47%	2,77%	3,29%	1,04%	3,35%

Tabella 4–20 Tabella di confronto del contenuto di ceneri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il contenuto di ceneri esprime la quantità di residuo minerale inorganico presente dopo la combustione. Un valore elevato può influire negativamente sul potere calorifico effettivo e sulla manutenzione degli impianti. Tra le biomasse esaminate, il ciliegio presenta il comportamento migliore, con un contenuto di ceneri pari all'1,04%, che rientra nella Classe A2 (<1,2%). E risulta molto vicino a quello della quercia di riferimento (1,15%). Un'altra biomassa che rientra in una delle classi previste dalla norma è il pero, con un contenuto di ceneri pari all'1,47% corrispondente alla classe B (<2%).

Le restanti biomasse presentano tutte eccessive quantità di ceneri rispetto alle classi di riferimento della norma**.**

Il valore più critico è stato rilevato nel girasole, con un contenuto di ceneri dell'8,93%, oltre quattro volte superiori al limite previsto dalla classe B, circa otto volte il valore della biomassa di riferimento, risultato quindi la biomassa meno idonea sotto questo profilo.

4.3.2 *durabilità meccanica*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Durabilità meccanica %	>97,5%	>97,5%	>96,5%	97,60%	92,00%	93,30%

Tabella 4–21 Tabella di confronto della durabilità meccanica delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Durabilità meccanica %	97,20%	98,10%	97,90%	98,30%	98,50%	98,00%	98,00%

Tabella 4–22 Tabella di confronto della durabilità meccanica delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

La durabilità meccanica misura la resistenza del pellet alla frammentazione durante le fasi di trasporto e movimentazione ed è quindi un indicatore di qualità fisica dal prodotto finito.

In questo caso, l'ulivo si distingue come biomassa migliore, con un valore del 98,5% che supera persino quello della quercia di riferimento (97,6%) e rientra ampiamente nei requisiti delle classi A1/A2.

La paglia di cereali, al contrario, si conferma la più critica anche sotto questo aspetto, con durabilità del (92%), insufficiente a soddisfare anche il requisito meno stringente della Classe B (96,5%). Tale risultato è coerente con la scarsa coesione delle fibre paglierine già discusse nel capitolo dedicato.

Oltre al pellet da paglia di cereali, anche il girasole presenta un valore insufficiente, pari al 93,30%. Il mais, con una durabilità del 97,3%, rientra nella Classe B, le restanti biomasse rientrano nelle classi A1/A2.

4.3.3 *polveri*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Polveri %	<1%	<1%	<1%	3,75%	8,58%	1,19%

Tabella 4–23 Tabella di confronto del contenuto di polveri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Polveri %	n/d	0,93%	0,44%	0,66%	n/d	0,51%	n/d

Tabella 4–24 Tabella di confronto del contenuto di polveri delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il contenuto di polveri è strettamente collegato alla durabilità meccanica e deriva principalmente dai fenomeni di abrasione e urto a cui il pellet è sottoposto. Questo parametro è rilevante non solo dal punto di vista qualitativo, ma anche per i rischi di dispersione, inalazione e, in caso di accumulo su superfici calde, esplosione. Il pero rappresenta la biomassa con il valore migliore, pari allo 0,44%, nettamente al di sotto della soglia unica prevista da tutte le classi normative (<1%). Il valore più critico è quello della paglia di cereali pari all'8,58%, quasi 9 volte superiore al limite della norma e più del doppio rispetto al valore della quercia di riferimento (3,75%). La paglia di cereali si conferma pertanto la biomassa più fragile tra quelle analizzate.

Anche la quercia (biomassa di riferimento) e il girasole presentano valori non conformi o prossimi al limite con il girasole lievemente superiore alla soglia prevista. Il Pellet prodotto da residui di melo, pero, vite, ciliegio risulta invece conforme per quanto riguarda la percentuale di polveri prevista dalla norma.

4.3.4 *potere calorifico inferiore*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Potere calorifico inferiore MJ/kg	>16,5 MJ/kg	>16,5 MJ/kg	>16,5 MJ/kg	17,87 MJ/kg	17,3 MJ/kg	16,77 MJ/kg

Tabella 4–25 Tabella di confronto del potere calorifico inferiore delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Potere calorifico inferiore MJ/k	12,91 MJ/kg	13,8 MJ/kg	17,31 MJ/kg	17,2 MJ/kg	16,17 MJ/kg	18,82 MJ/k	16,7 MJ/k

Tabella 4–26 Tabella di confronto del potere calorifico inferiore delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il potere calorifico inferiore rappresenta l'energia effettivamente disponibile per unità di massa al netto del calore di condensazione del vapore acqueo prodotto durante la combustione.

In base al valore riportato in questa sezione, il ciliegio risulta la biomassa più performante, con un potere calorifico pari a 18,2 MJ/kg. Tale valore supera positivamente la soglia normativa (>16,5 MJ/kg) e il potere calorifico della quercia (17,87 MJ/kg)

La biomassa peggiore è il mais, con 12,91 MJ/kg, che non riesce a raggiungere le soglie minime di nessuna classe normativa, tantomeno la biomassa di riferimento. Anche il melo e l'ulivo non rientrano nelle classi normative; Per l'ulivo il valore è tuttavia solo leggermente inferiore alla soglia minima, probabilmente a causa dell'eccessiva quantità di foglie presente nella miscela. Le biomasse restanti, ovvero la paglia di cereali, girasole, pero, vite e nocciolo, rientrano nelle classi previste dalla norma.

4.3.5 *densità apparente*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Densità apparente kg/m³	>600 kg/m³	>600 kg/m³	>600 kg/m³	852,5 kg/m³	697,4 kg/m³	560 kg/m³

Tabella 4–27 Tabella di confronto della densità apparente delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Densità apparente kg/m³	492 kg/m³	588 kg/m³	674 kg/m³	716,1 kg/m³	625 kg/m³	621,5 kg/m³	581,3 kg/m³

Tabella 4–28 Tabella di confronto della densità apparente delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca

La densità apparente esprime la densità della biomassa alla rinfusa prima della pellettizzazione e condiziona il trasporto, lo stoccaggio e in parte la resa del processo di pellettizzazione. La vite risulta la biomassa migliore con 716,1 kg/m^3. tale valore rispetta la soglia normativa (>600 kg/m^3) ed è il più vicino, tra quelli delle biomasse esaminate, a quello della quercia di riferimento 852,5 kg/m^3.

La biomassa meno performante è il mais, con 492 kg/m^3, il che non raggiunge la soglia limite della norma e nettamente inferiore al valore della quercia, non raggiungono il valore sufficiente anche il nocciolo, il melo e il girasole. Le rimanenti biomasse (paglia di cereali, pero, ulivo, ciliegio) rientrano tutte all'interno del limite normativo (>600 kg/m^2), seppur al disotto della quercia (852,5 kg/m^3)

4.3.6 *azoto totale*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Azoto %	<0,3%	<0,5%	<1%	0,11%	0,63%	0,67%

Tabella 4–29 Tabella di confronto del contenuto di azoto delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Azoto %	0,35%	0,54%	0,26%	0,56%	0,94%	0,29%	0,71%

Tabella 4–30 Tabella di confronto del contenuto di azoto delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il contenuto di azoto influisce sulla formazione degli ossidi di azoto durante la combustione. Il pero presenta il valore più basso, pari allo 0,26%, che rientra addirittura nella classe A1 (<0,3%), dove è presente anche il ciliegio quasi con il valore limite.

All'estremo opposto si colloca l'ulivo, con lo 0,94%, un valore che rispetta a stento la soglia della Classe B (<1%), ma che risulta molto lontano da quello della quercia di riferimento, (0,105%).

All'interno cella classe B si colloca anche il nocciolo, il girasole, il melo, la vite e la paglia da cereali. L'unica biomassa a rientrare nella classe A2 (<0,5%) è il mais, con 0,35%.

4.3.7 *zolfo totale*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Zolfo %	<0,04%	<0,05%	<0,05%	0,01%	0,00%	0,04%

Tabella 4–31 Tabella di confronto del contenuto di zolfo delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Zolfo %	0,06%	0,12%	0,03%	0,02%	0,05%	0,03%	0,08%

Tabella 4–32 Tabella di confronto del contenuto di zolfo delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Responsabile della formazione di ossidi di zolfo e correlato ai fenomeni di corrosione a bassa temperatura degli impianti.

Il quadro risulta simile a quello dell'azoto. La vite si distingue come la biomassa migliore con lo 0,024%, un valore che rientra nella classe A1 (< 0,04%) ed è il più vicino a quello della quercia di riferimento (0,013%).

Tra le biomasse idonee alla classe A1 rientrano anche il girasole, il pero, il ciliegio e il nocciolo. L'unica biomassa idonea alla classe A2 e B (<0,05%) è l'ulivo, con 0,05%.

La paglia di cereali presente invece il valore più elevato tra le biomasse esaminate, pari allo 0,145%, risultando nettamente fuori norma. Anche il mais, il melo e il nocciolo risultano fuori norma sulla base dei dati riportati.

4.3.8 *cloro totale*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Paglia da cereali	Girasole
Cloro %	<0,02%	<0,02%	<0,03%	0,02%	0,20%	0,12%

Tabella 4–33 Confronto del contenuto di cloro delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Norma UNI ISO EN 17225-2	Mais	Melo	Pero	Vite	ulivo	Ciliegio	Nocciolo
Cloro %	0,01%	0,02%	0,03%	0,03%	0,02%	0,03%	0,15%

Tabella 4–34 Confronto del contenuto di cloro delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il cloro è un elemento particolarmente critico poiché può contribuire alla corrosione ad alta temperatura e alla formazione di ceneri a basso punto di fusione. La biomassa peggiore da questo punto di vista, come già si aspettava, è la paglia con lo 0,2%. Valore estremamente elevato che decuplica il valore minimo della soglia A1/A2 (<0,02%) e della biomassa di riferimento (0,02%), non rientrando, inoltre, neanche nella Classe B (<0,03%). Anche il girasole e il nocciolo presentano contenuti di cloro non conformi. Nella Classe B (<0,03%) rientrano invece il pero, la vite e il ciliegio.

Il mais presenta il contenuto di cloro più basso tra le biomasse analizzate con 0,01%, e rientra nelle classi A1/A2, ne rientrano anche il melo, il nocciolo e la biomassa di riferimento.

4.3.9 *Rame problemi che può causare*

Norma UNI ISO EN 17225-2	Classe A1	Classe A2	Classe B	Biomassa di riferimento quercia	Vite
Rame mg/kg	<10 mg/kg	<10 mg/kg	<10 mg/kg	n/d	21,07 mg/kg

Tabella 4–35 tabella di confronto del contenuto di rame delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

Il rame è un elemento appartenente al gruppo dei metalli pesanti e risulta presente principalmente nelle ceneri, che costituiscono un sito di deposito dei metalli pesanti.

Il pericolo può manifestarsi in caso di ingestione o inalazione delle ceneri, oppure quando le particelle contenenti rame vengono trasportate dai fumi e depositate sulle superfici. La presenza di rame nella biomassa non determina quindi automaticamente la contaminazione dell'alimento.

Il contenuto di rame della vite è di 21,07 mg/kg, valore nettamente superiore a tutte le classi normative (<10mg/kg). [10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132]

4.4 **Comparazione totale tra le biomasse e individuazione di quelle migliori**

Prima di definire quale biomassa presenti le caratteristiche complessivamente migliori, è necessario considerare che alcuni dei parametri valutati non determinano un danno diretto all'alimento, ma rappresentano piuttosto un potenziale fattore di rischio.

Poiché il pellet analizzato viene utilizzato come combustibile per la cottura, le ceneri devono essere considerate soprattutto come un potenziale rischio alla salute, fino a che non si verifichi il contatto con l'alimento o l'inalazione.

Rimane però il problema dello spreco energetico dovuto all'elevate quantità di ceneri e, nei pellet ricchi di tale elemento, si può presentare la necessità di allontanare le ceneri durante la cottura. Potrebbero però avere anche effetti riducenti della temperatura e dello sviluppo di fiamme, positivi o negativi a seconda dello scopo.

È comunque necessario evitare qualsiasi contatto diretto tra le ceneri e l'alimento. [133], [134], [135], [141].

	Umidità %	Ceneri %	Durabilità meccanica %	Polveri %	Potere calorifico inferiore MJ/kg	Potere calorifico superiore MJ/kg	Densità apparente kg/m³	Densità del pellet kg/m³	Azoto %	Zolfo %	Cloro %	Rame mg/kg
Norna UNI EN ISO 17225-2												
Classe A1	<10%	<0,7%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg		>600 kg/m³		<0,3%	<0,04%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe A2	<10%	<1,2%	>97,5%	<1%	>16,5 MJ/kg		>600 kg/m³		<0,5%	<0,05%	<0,02%	<10 mg/kg
Classe B	<10%	<2%	>96,5%	<1%	>16,5 MJ/kg		>600 kg/m³		<1%	<0,05%	<0,03%	<10 mg/kg
Biomassa di riferimento quercia		1,15%	97,60%	3,75%	17,87 MJ/kg	n/d	852,5 kg/m³	n/d	0,11%	0,01%	0,02%	n/d
Paglia da cereali		6,60%	92,00%	8,58%	17,3 MJ/kg	17,7 MJ/kg	697,4 kg/m³	n/d	0,63%	0,20%	0,20%	n/d
Girasole		8,93%	93,30%	1,19%	16,77 MJ/kg	n/d	560 kg/m³	1177,3 kg/m³	0,67%	0,04%	0,12%	n/d
Mais		2,30%	97,20%	n/d	12,91 MJ/kg	17,1 MJ/kg	492 kg/m³	1004,05 kg/m³	0,35%	0,06%	0,01%	n/d
Melo		3,61%	98,10%	0,93%	13,8 MJ/kg	17,95 MJ/kg	588 kg/m³	1230 kg/m³	0,54%	0,12%	0,02%	n/d
Pero		1,47%	97,90%	0,44%	17,31 MJ/kg	nd	674 kg/m³	n/d	0,26%	0,03%	0,03%	n/d
Vite		2,77%	98,30%	0,66%	17,2 MJ/kg	n/d	716,1 kg/m³	n/d	0,56%	0,02%	0,03%	21,07 mg/kg
ulivo		3,29%	98,50%	n/d	16,17 MJ/kg	18,82 MJ/kg	625 kg/m³	n/d	0,94%	0,05%	0,02%	n/d
Ciliegio		1,04%	98,00%	0,51%	18,82 MJ/kg	21,44 MJ/kg	621,5 kg/m³	n/d	0,29%	0,03%	0,03%	n/d
Nocciolo		3,35%	98,00%	n/d	16,7 MJ/kg	19,15 MJ/kg	581,3 kg/m³	n/d	0,71%	0,08%	0,15%	n/d

Tabella 4–36 Comparazione complessiva delle biomasse, densità e polveri valutati sul tal quale e gli altri parametri su sostanza secca.

[10], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132]

Verde: valore che rientra nella classe A1;

Giallo: valore che rientra nella classe A2;

Arancione: valore che rientra nella classe B;

Rosso: valore che non rientra in nessuna classe normativa.

Sulla base dei dati riportati nei sottocapitoli precedenti e di quelli raccolti nella tabella 4-36, considerando i parametri più influenti per un food pellet si è arrivati alla conclusione che, la biomassa più idonea alla pellettizzazione e alla cottura è il ciliegio. Esso risulta conforme alle classi più elevante per la maggior parte dei parametri valutati, fanno eccezione per il contenuto delle ceneri che rientra nella classe A2 e il contenuto di cloro che rientra nella classe B.

Considerate le problematiche associate al cloro, si potrebbe valutare la possibilità di ridurne il contenuto miscelando il ciliegio con un'altra biomassa che presenti caratteristiche simili per gli altri parametri, ma un minore contenuto di cloro.

Risultati simili a quelli del ciliegio sono stati osservati anche per il pero e l'ulivo.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro si è posto l'obiettivo di valutare, attraverso analisi bibliografica, le caratteristiche fisiche, chimiche ed energetiche di alcune biomasse residuali rappresentative del panorama agricolo e forestale italiano, in vista di un loro possibile impiego nella produzione di pellet destinato alla cottura diretta di alimenti.

Questa esigenza nasce dal fatto che, ad oggi, non esiste una normativa tecnica specificamente dedicata al pellet per uso alimentare: i produttori si limitano a un'autocertificazione della qualità del prodotto, spesso priva di dati verificabili sui parametri chimico-fisici e petrografici del combustibile. [13] Per questo motivo il confronto è stato condotto utilizzando come riferimento le soglie previste dalla UNI EN ISO 17225-2 e UNI EN ISO 17225-6, sviluppate per il pellet a uso energetico ma qui impiegate come parametro sostitutivo di qualità. [7], [8], [9], [10], [11]

Dall'analisi comparativa condotta sulle dieci biomasse selezionate è emerso un quadro eterogeneo, in cui nessuna delle matrici analizzate soddisfa integralmente tutti i parametri previsti dalla norma. Sul piano energetico, il ciliegio si è distinto per il miglior potere calorifico inferiore (18,2 MJ/kg, superiore anche alla quercia di riferimento). Il mais ha mostrato le maggiori criticità in tal senso, non raggiungendo le soglie minime di nessuna classe.

Per quanto riguarda il contenuto di ceneri, il ciliegio si è confermato la biomassa più performante, seguito dal pero, mentre il girasole ha presentato il valore più critico, quasi otto volte superiore a quello della quercia.

La durabilità meccanica ha evidenziato l'ulivo come pellet con il miglior risultato, superiore persino alla biomassa di riferimento, a fronte della paglia di cereali, risultata la più fragile sia in questo parametro sia nel contenuto di polveri fini.

La densità apparente più elevata è stata riscontrata nella vite, la più vicina al valore della quercia, mentre il mais si è confermato anche in questo caso il meno idoneo. [10]**,** [101], [132]

Per quanto riguarda gli elementi chimici correlati alle emissioni, problemi tecnici e di salute, ovvero, azoto, zolfo, cloro, e metalli pesanti, è emerso che tali elementi possono distribuirsi tra la fase gassosa (NOx e SOx), le ceneri e il particolato atmosferico.

Il contenuto di azoto e zolfo può essere considerato principalmente relazionato alle emissioni atmosferiche, poiché durante la combustione tali elementi possono essere convertiti in composti gassosi, soprattutto NOx e SOx. Nel presente lavoro questi composti non sono considerati contaminanti caratteristici della carne, al pari degli IPA. È comunque necessario evitare di interpretare questa osservazione come assenza assoluta di rischio. Poiché il possibile trasferimento dipende dalle condizioni di combustione e dall'esposizione dell'alimento ai fumi.

Tra le biomasse analizzate l'ulivo presenta il contenuto più elevato di azoto, forse dovuto alla grande quantità di parti verdi, mentre la paglia presenta il contenuto più elevato di zolfo. I valori più favorevoli sono stati rilevati nel pero e nel ciliegio per quanto riguarda l'azoto, e nella vite per quanto riguarda lo zolfo.

Durante la combustione del pellet, l'azoto contenuto nella biomassa viene convertito in specie intermedie e successivamente in ossidi di azoto. Una frazione di questi composti può essere trasportata dal fumo e, in condizioni di affumicatura o cottura prolungata, venire a contatto con la superficie dell'alimento.

La mioglobina, pigmento ematico responsabile del colore rosso della carne, è in grado di legare l'ossido di azoto (NO), formando la nitrosomioglobina (NOMb), pigmento responsabile della caratteristica colorazione rosa delle carni salate. Durante la cottura, la NOMb si trasforma in nitrosoemocromina, un composto stabile al calore che mantiene la colorazione rosea tipica dei prodotti cotti (es. prosciutto cotto, wurstel).

Nei prodotti affumicati, l'azoto presente nel fumo, sotto forma di NOx, nitriti e nitrati che si depositano sulla superficie della carne, migra progressivamente verso gli strati più interni. Questo fenomeno contribuisce sia alla fissazione del colore superficiale, sia allo sviluppo del caratteristico "smoke ring" (anello di affumicatura), molto apprezzato perché conferisce peculiari caratteristiche organolettiche al prodotto.

L'azoto svolge inoltre un'azione da agente nitrosante: proprio per questa sua funzione, il suo impiego è correlato al rischio di formazione di nitrosammine, composti potenzialmente cancerogeni che si possono generare in particolari condizioni (ad esempio ad alte temperature, come nella cottura o frittura di carni trattate con nitriti).

Il contenuto di cloro richiede invece una valutazione specifica sia per elevato potenziale corrosivo negli impianti di termovalorizzazione, sia perché, in presenza in condizioni di combustione favorevoli può contribuire alla formazione di diossine e furani. Questi composti possono essere trasportati dal fumo e depositarsi sulla superficie dell'alimenti esposti, In particolare sulle frazioni grasse. Possono inoltre costituire un rischio per inalazione. [135], [136], [137], [138], [139], [140]

Va inoltre sottolineato che, un certo contenuto di ceneri può contribuire a moderare i picchi di temperatura e a limitare lo sviluppo di fiamme indesiderate[133], [134], [135], [141]

Sulla base dell'insieme dei parametri considerati, le biomasse che hanno mostrato il profilo più equilibrato tra resa energetica, qualità fisico-meccaniche e contenuto di elementi critici sono risultate il ciliegio, il pero e, con alcune riserve legate al contenuto di rame, la vite. Al contrario, la paglia di cereali, il girasole e il mais si sono confermati i materiali meno idonei.

La paglia è stata penalizzata dalla bassa durabilità e dall'elevato contenuto di ceneri, il girasole dall'elevatissimo contenuto di ceneri e il mais dallo scarso potere calorifico associato a una bassa densità.

È necessario, tuttavia, evidenziare alcuni limiti intrinseci al presente lavoro. Trattandosi di una tesi compilativa, i valori confrontati provengono da studi sperimentali differenti, condotti con metodologie, condizioni di coltivazione e processi di pellettizzazione non standardizzati tra loro. Questa eterogeneità delle fonti introduce una variabilità che si somma a quella naturale delle biomasse e riduce la possibilità di effettuare una comparazione assoluta dei dati.

Inoltre, l'assenza di una norma tecnica dedicata al pellet destinato alla cottura alimentare ha reso necessario l'adattamento di soglie concepite per un contesto energetico. Tali soglie potrebbero non essere pienamente rappresentative delle esigenze specifiche della cottura alimentare.

Alla luce di quanto emerso, appare auspicabile lo sviluppo futuro di una normativa tecnica specifica per il pellet destinato alla cottura alimentare. Tale normativa dovrebbe considerare non solo dei parametri energetici e di durabilità già normati, ma anche comportamento effettivo dei contaminanti durante la cottura diretta degli alimenti.

Sarebbe inoltre opportuno, affiancare all'analisi bibliografica condotta in questo lavoro studi sperimentali mirati a quantificare il trasferimento effettivo di metalli pesanti, IPA e altri composti dalle ceneri e dal particolato alla superficie dell'alimento, in funzione delle diverse

condizioni di cottura. Ciò permetterebbe di verificare direttamente le ipotesi discusse nel presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

[1] A. Jagtap and S. Kalbande, "Pelletization Process for the Production of Fuel Pellets from Various Surplus Biomass: A Review," *Int. J. Environ. Clim. Chang.*, vol. 13, no. 7, pp. 200–208, 2023, doi: 10.9734/ijecc/2023/v13i71868.

[2] S. L. de Moraes, J. R. B. de Lima, and T. R. Ribeiro, "Iron Ore Pelletizing Process: An Overview," *Iron Ores Iron Oxide Mater.*, 2018, doi: 10.5772/intechopen.73164.

[3] D. Castaldo, C. Stark, C. Jones, and A. Fahrenholz, "History of pelleting," *Feed Pelleting Ref. Guid.*, 2014.

[4] M. Peksa-Blanchard *et al.*, "Global wood pellets markets and industry: policy drivers, market status and raw material potential," *IEA Bioenergy Task 40*, no. November, p. 120, 2007.

[5] P. Filipowicz and B. Saletnik, "Multifunctional Densified Biomass Materials: Combustion and Non-Combustion Applications of Pellets and Briquettes in Agro-Environmental and Material Systems," *Energies*, vol. 19, no. 12, 2026, doi: 10.3390/en19122838.

[6] F. Peng, R. Xiang, F. Fang, and D. Liu, "Analysis of feed pelleting characteristics based on a single pellet press device," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 65–70, 2022, doi: 10.25165/j.ijabe.20221504.6155.

[7] "Parte 3 - Requisiti di qualità del pellet | Pelletit.it." Accessed: Jul. 30, 2026. [Online]. Available: https://www.pelletit.it/manuale-enplus/requisiti-qualita-pellet/

[8] G. Toscano, "La nuova normativa tecnica del pellet UNI EN ISO 17225-2," 2015.

[9] D. Studi, D. I. Padova, S. A. Corso, and T. Forestali, "Analisi della qualità di pellet prodotti da legname delle utilizzazioni forestali," 2013.

[10] "UNI EN ISO 17225-2:2021 - UNI Ente Italiano di Normazione." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://store.uni.com/uni-en-iso-17225-2-2021

[11] "UNI EN ISO 17225-6:2021 - UNI Ente Italiano di Normazione." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://store.uni.com/uni-en-iso-17225-6-2021

[12] R. Picchio, R. Venanzi, V. Civitarese, A. Bonaudo, A. Lo Monaco, and F. Latterini, "Energetic Features of Hardwood Pellet Evaluated by Effect Size Summarisation,"

Forests, vol. 15, no. 7, 2024, doi: 10.3390/f15071259.

[13] Z. Jelonek, A. Drobniak, M. Mastalerz, and I. Jelonek, "Emissions during grilling with wood pellets and chips," *Atmos. Environ. X*, vol. 12, p. 100140, 2021, doi: 10.1016/j.aeaoa.2021.100140.

[14] "Superfici e produzione - dati in complesso." Accessed: Aug. 04, 2026. [Online]. Available: https://esploradati.istat.it/databrowser/#/it/dw/categories/IT1,Z1000AGR,1.0/AGR_CRP/DCSP_COLTIVAZIONI/IT1,101_1015_DF_DCSP_COLTIVAZIONI_1,1.0

[15] A. M. Mancini, C. M. Berton, C. L. D. Apote, C. L. Pari, E. Sandro, and S. D. Andrea, "Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei biocombustibili," 2008.

[16] N. Scarlat, M. Martinov, and J. F. Dallemand, "Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 10, pp. 1889–1897, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.04.016.

[17] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Some Chemical and Morphological Properties of Wheat Straw," *Middle-East J. Sci. Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 823–825, 2011.

[18] M. M. Zhovmir, J. Moško, J. Farták, I. Jiříček, and M. Pohořelý, "Complex Study of Straw Suitability for the Production of Nonindustrial Straw Pellets," *ACS Omega*, vol. 8, no. 49, pp. 47100–47112, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c07057.

[19] M. T. Miranda, R. García-Mateos, J. I. Arranz, F. J. Sepúlveda, P. Romero, and A. Botet-Jiménez, "Selective use of corn crop residues: Energy viability," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 7, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/app11073284.

[20] A. Amotoe-Bondzie, I. Slaven, K. J. Best, and N. Hugo, "Corn Stover: Revisiting of the Opportunities and Barriers of Its Composition, Bioenergy Applications, and Sustainability," *Agric. Rural Stud.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–17, 2026, doi: 10.59978/ar04020007.

[21] G. Geletukha, S. Drahniev, T. Zheliezna, and A. Bashtovyi, "Prospects of Sunflower Residues Use for Energy," *Bioenergy*, vol. 25, no. 15, pp. 1–35, 2020, [Online]. Available: www.uabio.org

[22] D. Grippi, R. Clemente, and M. P. Bernal, "Chemical and bioenergetic characterization of biofuels from plant biomass: Perspectives for southern europe," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, pp. 1–28, 2020, doi: 10.3390/app10103571.

[23] E. Indicators, "Sunflower Residues-Based Biorefinery : Circular Economy Indicators," pp. 1–14, 2023.

[24] J. Kluska, K. Matej-Łukowicz, and N. Nawrot, “Characterization of Sunflower Waste Carbonization: Energy Balance and Water Holding Properties,” *Sustain.*, vol. 16, no. 24, 2024, doi: 10.3390/su162411234.

[25] X. Zhang, H. Li, J. T. Harvey, A. A. Butt, M. Jia, and J. Liu, “A review of converting woody biomass waste into useful and eco-friendly road materials,” *Transp. Saf. Environ.*, vol. 4, no. 1, 2022, doi: 10.1093/tse/tdab031.

[26] M. Morales-Máximo *et al.*, “Characterization of Residual Woody Biomass for the Production of Densified Solid Biofuels and Their Local Utilization,” *Fuels*, vol. 7, no. 2, pp. 1–20, 2026, doi: 10.3390/fuels7020023.

[27] G. Cavalaglio, G. Fabbrizi, F. Cardelli, L. Lorenzi, M. Angrisano, and A. Nicolini, “Lignocellulosic Residues from Fruit Trees: Availability, Characterization, and Energetic Potential Valorization,” *Energies* , vol. 17, no. 11, pp. 1–14, 2024, doi: 10.3390/en17112611.

[28] R. Ch and C. Mauracher, “Corso di laurea magistrale in Marketing e Comunicazione Tesi di laurea Economia Circolare e innovazione nel settore agroalimentare : u n ’ analisi qualitativa delle strategie aziendali per,” 2023.

[29] L. J. R. Nunes, M. Casau, J. C. O. Matias, and M. F. Dias, “Assessment of Woody Residual Biomass Generation Capacity in the Central Region of Portugal: Analysis of the Power Production Potential,” *Land*, vol. 11, no. 10, 2022, doi: 10.3390/land11101722.

[30] D. Duca, V. Maceratesi, S. Fabrizi, and G. Toscano, “Valorising Agricultural Residues through Pelletisation,” *Processes*, vol. 10, no. 2, 2022, doi: 10.3390/pr10020232.

[31] M. Grella, M. Manzone, F. Gioelli, and P. Balsari, “Harvesting orchard pruning residues in southern Piedmont: A first evaluation of biomass production and harvest loss,” *J. Agric. Eng.*, vol. 44, no. 3, pp. 97–102, 2013, doi: 10.4081/jae.2013.e14.

[32] D. Bove, C. Moliner, M. Baratieri, B. Bosio, and E. Arato, “Kinetic characterization of the residues from the pruning of apple trees for their use as energy vectors,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 50, pp. 1–6, 2016, doi: 10.3303/CET1650001.

[33] M. A. Brand and R. C. Jacinto, “Apple pruning residues: Potential for burning in boiler systems and pellet production,” *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 458–466, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.037.

[34] W. Cichy, M. Witczak, and M. Walkowiak, “Fuel properties of woody biomass from pruning operations in fruit orchards,” *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 6458–6470, 2017, doi: 10.15376/biores.12.3.6458-6470.

[35] F. Ciolacu *et al.*, “A Qualitative Assessment of the Specific Woody Biomass of Fruit Trees,” *Forests*, vol. 13, no. 3, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/f13030405.

[36] K. Ekinci, “Utilization of apple pruning residues as a source of biomass energy: A case study in Isparta province,” *Energy Explor. Exploit.*, vol. 29, no. 1, pp. 87–107, 2011, doi: 10.1260/0144-5987.29.1.87.

[37] A. Libutti, A. R. B. Cammerino, and M. Monteleone, “Management of residues from fruit tree pruning: A trade-off between soil quality and energy use,” *Agronomy*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.3390/agronomy11020236.

[38] S. Musacchi, I. Iglesias, and D. Neri, “Training systems and sustainable orchard management for european pear (Pyrus communis l.) in the mediterranean area: A review,” *Agronomy*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/agronomy11091765.

[39] P. Kazimierski *et al.*, “Pyrolysis of pruning residues from various types of orchards and pretreatment for energetic use of biochar,” *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 11, 2021, doi: 10.3390/ma14112969.

[40] “Ba5803779Bce2568B1C579410B3Dc9Fbb329.”

[41] M. Volanti, C. Cubillas Martínez, D. Cespi, E. Lopez-Baeza, I. Vassura, and F. Passarini, “Environmental sustainability assessment of organic vineyard practices from a life cycle perspective,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 4645–4658, 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03688-2.

[42] I. V Biomasse, “IV. Biomasse residuali”.

[43] I. Manzoor *et al.*, “WITHDRAWN: Phenological stages of growth in grapevine (Vitis vinifera L.) via codes and details as per BBCH scale,” pp. 1–20, 2023, [Online]. Available: https://www.researchsquare.com/article/rs-3187930/v1

[44] B. Velázquez-Martí, E. Fernández-González, I. López-Cortés, and D. M. Salazar-Hernández, “Quantification of the residual biomass obtained from pruning of vineyards in Mediterranean area,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 8, pp. 3453–3464, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.009.

[45] A. Pisciotta *et al.*, “Cover crop and pruning residue management to reduce nitrogen mineral fertilization in mediterranean vineyards,” *Agronomy*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.3390/agronomy11010164.

[46] D. Duca *et al.*, “Evaluation of the characteristics of vineyard pruning residues for energy applications: Effect of different copper-based treatments,” *J. Agric. Eng.*, vol. 47, no. 1, pp. 22–27, 2016, doi: 10.4081/jae.2016.497.

[47] M. Jesus, A. Romaní, F. Mata, and L. Domingues, “Current Options in the Valorisation

of Vine Pruning Residue for the Production of Biofuels, Biopolymers, Antioxidants, and Bio-Composites following the Concept of Biorefinery: A Review," *Polymers (Basel).*, vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/polym14091640.

[48] D. Anđelini *et al.*, "Biochar from Grapevine-Pruning Residues Is Affected by Grapevine Rootstock and Pyrolysis Temperature," *Sustain.* , vol. 15, no. 6, 2023, doi: 10.3390/su15064851.

[49] M. Kapłan, G. Maj, and K. E. Klimek, "The analysis of energy potential in vine leaves of the 'Regent' cultivar as bio-waste depending on the year of cultivation and the type of rootstock used," *J. Water L. Dev.*, no. 58, pp. 171–177, 2023, doi: 10.24425/jwld.2023.146609.

[50] J. F. García Martín, M. Cuevas, C. Feng, P. Á. Mateos, and M. Torres, "Energetic Valorisation of Olive Biomass : Olive-Tree," *Processes*, vol. 8, no. 511, pp. 1–38, 2020.

[51] G. Sala *et al.*, "Study of energetic properties of different tree organs in six Olea europaea L. cultivars," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-96436-y.

[52] J. Rato-Nunes *et al.*, "Hedgerow Olive Orchards versus Traditional Olive Orchards: Impact on Selected Soil Chemical Properties," *Agric.*, vol. 14, no. 2, 2024, doi: 10.3390/agriculture14020251.

[53] M. Ghonimy, "Innovative Mechanical Pruning for Sustainable Precision Olive Orchard Management : Machine Performance , Canopy Management , and Soil Sustainability," pp. 1–37, 2026.

[54] B. Velázquez-Martí, E. Fernández-González, I. López-Cortés, and D. M. Salazar-Hernández, "Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean olive groves," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 3208–3217, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.042.

[55] B. Gómez-Muñoz, J. D. Valero-Valenzuela, M. B. Hinojosa, and R. García-Ruiz, "Management of tree pruning residues to improve soil organic carbon in olive groves," *Eur. J. Soil Biol.*, vol. 74, pp. 104–113, 2016, doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.03.010.

[56] S. Landi *et al.*, "Super high-density olive orchard system affects the main olive crop pests," *Ital. J. Agron.*, vol. 19, no. 1, p. 100004, 2024, doi: 10.4081/ija.2024.2220.

[57] F. Antoniou, I. Apostolopoulos, A. G. Tekerlekopoulou, and G. Antonopoulou, "Methane Production Using Olive Tree Pruning Biomass Under H2O2 Pretreatment Enhanced with UV and Alkali," *Molecules*, vol. 30, no. 22, pp. 1–17, 2025, doi:

10.3390/molecules30224379.

[58] J. Espeso *et al.*, “Olive Leaf Waste Management,” *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 5, no. May, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3389/fsufs.2021.660582.

[59] G. Coppola, M. Costantini, A. Fusi, L. Ruiz-Garcia, and J. Bacenetti, “Comparative life cycle assessment of conventional and organic hazelnuts production systems in Central Italy,” *Sci. Total Environ.*, vol. 826, p. 154107, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154107.

[60] A. Pacchiarelli, R. Cristofori, C. Silvestri, and V. Cristofori, “European Hazelnut: Plant Training, Planting Layouts and Pruning Innovations,” *Agronomy*, vol. 16, no. 5, 2026, doi: 10.3390/agronomy16050511.

[61] “bibbliografia 57 potatura nocc pot calorifico.pdf.”

[62] I. Di, “PRODUZIONE DI NOCCIOLE Environmental sustainability of hazelnut production,” pp. 1–140, 2026.

[63] L. P. C. Lopes, J. Martins, B. Esteves, and L. T. D. E. Lemos, “New Products From Hazelnut Shell,” *ECOWOOD 2012-5th Int. Conf. Environ. For. Prod.*, no. 1983, pp. 83–90, 2012.

[64] A. Borkowska, G. Maj, K. E. Klimek, and M. Kapłan, “The Determination of Woody Biomass Resources and Their Energy Potential from Hazelnut Tree Cultivation,” *Energies*, vol. 17, no. 18, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3390/en17184536.

[65] D. Schiavi *et al.*, “Circular Hazelnut Protection by Lignocellulosic Waste Valorization for Nanopesticides Development,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 5, 2022, doi: 10.3390/app12052604.

[66] M. Nocetti, “Produzione legnosa e miglioramento genetico: variabilità delle caratteristiche del legno in cloni di ciliegio (Prunus avium L.)”.

[67] L. L. Prunus, “Guide line s for ge netic monitor ing of European beech (Fagus sylvatica L .) Manual for Forest Genetic Monitoring”.

[68] S. Hussain *et al.*, “Prunus Avium,” vol. 8, no. 4, pp. 307–314, 2021.

[69] S. Musacchi, F. Gagliardi, and S. Serra, “New training systems for high-density planting of sweet cherry,” *HortScience*, vol. 50, no. 1, pp. 59–67, 2015, doi: 10.21273/hortsci.50.1.59.

[70] R. Sleja, “Jaunā veidolā , ar jaunām vēsmām turpinām žurnāla izdošanu !,” 2022.

[71] T. Makaveckas, A. Šimonėlienė, and V. Šipailaitė-Ramoškienė, “Lignin Valorization from Lignocellulosic Biomass: Extraction, Depolymerization, and Applications in the Circular Bioeconomy,” *Sustain.*, vol. 17, no. 21, pp. 1–26, 2025, doi:

10.3390/su17219913.

[72] H. Unal and K. Alibas, “Agricultural residues as biomass energy,” *Energy Sources, Part B Econ. Plan. Policy*, vol. 2, no. 2, pp. 123–140, 2007, doi: 10.1080/15567240600629401.

[73] T. R. Sarker, S. Nanda, V. Meda, and A. K. Dalai, *Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review*, vol. 21, no. 1. Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/s10311-022-01510-0.

[74] R. Picchio *et al.*, “Pellet Production from Pruning and Alternative Forest Biomass: A Review of the Most Recent Research Findings,” *Materials (Basel).*, vol. 16, no. 13, 2023, doi: 10.3390/ma16134689.

[75] M. Olkiewicz, M. Dudek, J. A. Dyczkowska, K. Łyp-Wrońska, and B. Šarkan, “Pellet Supply Chain Management: Analysis of Changes,” *Energies*, vol. 18, no. 23, pp. 1–23, 2025, doi: 10.3390/en18236329.

[76] C. P. Mitchell, E. A. Stevens, and M. P. Watters, “Short-rotation forestry - Operations, productivity and costs based on experience gained in the UK,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 121, no. 1–2, pp. 123–136, 1999, doi: 10.1016/S0378-1127(98)00561-1.

[77] E. Santangelo *et al.*, “Harvesting systems for poplar short rotation coppice,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 75, pp. 85–92, 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.07.013.

[78] S. P. P. Vanbeveren, J. Schweier, G. Berhongaray, and R. Ceulemans, “Operational short rotation woody crop plantations: Manual or mechanised harvesting?,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 72, pp. 8–18, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2014.11.019.

[79] “Meccanizzazione avanzata nei boschi di latifoglie,” pp. 35–39, 2010.

[80] D. Bergström and F. Di Fulvio, “Review of efficiencies in comminuting forest fuels,” *Int. J. For. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 45–55, 2019, doi: 10.1080/14942119.2019.1550314.

[81] T. Moskalik and A. Gendek, “Production of chips from logging residues and their quality for energy: A review of European literature,” *Forests*, vol. 10, no. 3, p. 262, 2019, doi: 10.3390/f10030262.

[82] Z. Stanula, M. Wieruszewski, A. Zydroń, and K. Adamowicz, “Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review,” *Energies*, vol. 16, no. 24, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/en16247997.

[83] M. Wieruszewski, A. Górna, Z. Stanula, and K. Adamowicz, “Energy Use of Woody Biomass in Poland: Its Resources and Harvesting Form,” *Energies*, vol. 15, no. 18, pp. 1–21, 2022, doi: 10.3390/en15186812.

[84] N. Hofmann, T. Mendel, F. Schulmeyer, D. Kuptz, H. Borchert, and H. Hartmann, "Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions," *Biomass and Bioenergy*, vol. 111, pp. 196–205, 2018, doi: 10.1016/j.biombioe.2017.03.022.

[85] R. B. Lima, R. L. C. Ferreira, J. A. A. Silva, F. T. Alves Júnior, C. P. Oliveira, and G. F. da Silva, "Diameter structure in a community of shrub-tree Caatinga, municipality of Floresta, state of Pernambuco, Brazil," *Floresta*, vol. 48, no. 1, pp. 133–142, 2018, doi: 10.5380/rf.v48.

[86] filiera per le Bioenergie, "S ' b i," vol. 2013, pp. 1–108, 2014.

[87] J. Selivanovs, D. Blumberga, J. Ziemele, A. Blumberga, and A. Barisa, "Research of woody biomass drying process in pellet production," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 46–50, 2012, doi: 10.2478/v10145-012-0017-7.

[88] M. Price, "Woodchip Drying," *Cent. For. Resour. Manag. Proj. Rep.*, no. April, pp. 1–11, 2011.

[89] R. Patil and R. Gawande, "A review on solar tunnel greenhouse drying system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 196–214, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.057.

[90] A. J. Perea-Moreno, A. Juaidi, and F. Manzano-Agugliaro, "Solar greenhouse dryer system for wood chips improvement as biofuel," *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1233–1241, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.036.

[91] C. Lühr, R. Pecenka, H. Lenz, and T. Hoffmann, "Cold air ventilation for cooling and drying of poplar wood chips from short rotation coppice in outdoor storage piles in Germany," *Biomass and Bioenergy*, vol. 146, no. February, p. 105976, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.105976.

[92] E. Nordhagen, "Drying of wood chips with surplus heat from TWO hydroelectric plants in," pp. 1–6, 2011.

[93] P. Murugan, S. Dhanushkodi, K. Sudhakar, and V. H. Wilson, "Industrial and small-scale biomass dryers: An overview," *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 118, no. 3, pp. 435–446, 2021, doi: 10.32604/EE.2021.013491.

[94] Z. Liu, A. Quek, and R. Balasubramanian, "Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1315–1322, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.087.

[95] H. Hartmann, T. Böhm, P. Daugbjerg Jensen, M. Temmerman, F. Rabier, and M. Golser, "Methods for size classification of wood chips," *Biomass and Bioenergy*, vol.

30, no. 11, pp. 944–953, 2006, doi: 10.1016/j.biombioe.2006.06.010.

[96] H. He, Y. Wang, Y. Sun, W. Sun, and K. Wu, “From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 186, no. April, p. 107271, 2024, doi: 10.1016/j.biombioe.2024.107271.

[97] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, “Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions,” *Fuel*, vol. 90, no. 11, pp. 3285–3290, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.05.011.

[98] A. García-Maraver, V. Popov, and M. Zamorano, “A review of European standards for pellet quality,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 12, pp. 3537–3540, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.05.013.

[99] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Miles, and T. R. Miles, “Combustion properties of biomass,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 54, no. 1–3, pp. 17–46, 1998, doi: 10.1016/S0378-3820(97)00059-3.

[100] Alessandro Magnanini, Giuseppe Toscano, and Manuela Mancini, “Indagine sulle proprietà dei biocombustibili solidi forestali utilizzati per l’alimentazione delle centrali termoelettriche,” 2018.

[101] J. M. Castellano, M. Gómez, M. Fernández, L. S. Esteban, and J. E. Carrasco, “Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses,” *Fuel*, vol. 139, pp. 629–636, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.033.

[102] B. Materials, B. Saletnik, A. Saletnik, and G. Zaguła, “The Use of Wood Pellets in the Production of High Quality,” 2022.

[103] M. J. Stolarski, “Wood pellet quality depending on dendromass species,” vol. 199, no. April, pp. 498–508, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.08.015.

[104] M. Molenda *et al.*, “Mechanical and Combustion Properties of Agglomerates of Wood of Popular Eastern European Species,” 2021.

[105] V. D. Núñez-retana and R. Rosales-serna, “Improving the physical , mechanical and energetic properties of Quercus spp . wood pellets by adding pine sawdust,” pp. 1–20, 2020, doi: 10.7717/peerj.9766.

[106] J. Horabik *et al.*, “Breakage strength of wood sawdust pellets: Measurements and modelling,” *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 12, 2021, doi: 10.3390/ma14123273.

[107] B. Nath, G. Chen, L. Bowtell, and R. Ahmed, “Assessment of densified fuel quality parameters : A case study for wheat straw pellet,” vol. 8, no. October 2022, pp. 45–58,

2023, doi: 10.1016/j.jobab.2022.10.001.

[108] D. Picco and E. Teorica, “on co m m er ci al us e on l y on er al,” vol. 8, 2013.

[109] V. Kamperidou, C. Lykidis, and P. Barmpoutis, “com Assessment of the Thermal Characteristics of Pellets Made of Agricultural Crop Residues Mixed with Wood,” vol. 12, no. Cloud 2009, pp. 9263–9272, 2017.

[110] F. Gievers, M. Walz, K. Loewe, and A. Loewen, “Pelletized Straw for Biogas Production — Substrate Characterization and Methane Formation Potential,” 2024.

[111] A. Swietochowski, M. Dabrowska, and A. Lisowski, “Friction properties of pellets made of wood and straw,” pp. 1815–1820, 2018, doi: 10.22616/ERDev2018.17.N391.

[112] E. Krugly *et al.*, “Characterization of Gaseous- and Particle-Phase Emissions from the Combustion of Biomass-Residue-Derived Fuels in a Small Residential Boiler,” 2014.

[113] S. Islamova, A. Tartygasheva, J. Karaeva, and V. Panchenko, “A Comprehensive Study on the Combustion of Sunflower Husk Pellets by Thermogravimetric and Kinetic Analysis , Kriging Method,” 2023.

[114] A. Reix *et al.*, “Valorization of sunflower bark in agropellets To cite this version : HAL Id : hal-04578735,” no. May 2021, 2024.

[115] X. Cui, J. Yang, and Z. Wang, “Biomass and Bioenergy A multi-parameter optimization of the bio-pellet manufacturing process : Effect of different parameters and different feedstocks on pellet characteristics,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 155, no. October, p. 106299, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106299.

[116] P. Vikt, “MECHANICAL AND ENERGY EXAMINATION OF DIFFERENT,” vol. 13, no. 1, pp. 40–47, 2019, doi: 10.14232/analecta.2019.1.40-47.

[117] J. Shankar, E. Fillerup, J. J. Kane, D. Murray, and I. Falls, “Chemical Engineering Research and Design Advanced imaging techniques to understand the impact of process variables on the particle morphology in a corn stover pellet,” vol. 1, pp. 130–145, 2020.

[118] K. Theerarattananoon *et al.*, “Physical properties of pellets made from sorghum stalk , corn stover , wheat straw , and big bluestem,” vol. 33, pp. 325–332, 2011, doi: 10.1016/j.indcrop.2010.11.014.

[119] F. Latterini *et al.*, “Quality of Pellets Obtained from Whole Trees Harvested from Plantations , Coppice Forests and Regular Thinnings,” pp. 1–15, 2022.

[120] V. Sharma, R. Kumar, A. Dheeraj, and K. Kunwar, “Briquette and biochar production from apple - pruned residue for energy recovery , soil fertility and water purification,” 2025.

[121] G. Marian *et al.*, “QUALITY OF PELLETS PRODUCED FROM AGRICULTURAL WOOD RESIDUES SPECIFIC TO THE PRUT RIVER BASIN,” vol. 1, no. 109, pp. 84–93, 2021, doi: 10.31521/2313-092X/2021-1(109).

[122] M. Technology, “Pelleting Vineyard Pruning at Low Cost with a Mobile Technology,” pp. 1–17, 2018, doi: 10.3390/en11092477.

[123] E. Certification, “Energy Recovery of Agricultural Residues : Incorporation of Vine Pruning in the Production of Biomass Pellets with,” 2021.

[124] A. Garcia-maraver, M. L. Rodriguez, F. Serrano-bernardo, L. F. Diaz, and M. Zamorano, “Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 129, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.08.018.

[125] A. Zafeiroudis, V. Kamperidou, and I. Barboutis, “Utilization of olive tree pruning residues in wood pellets,” pp. 1713–1724, 2024.

[126] O. T. Pruning, “Qualitative Characterization of the Pellet Obtained from Hazelnut and Olive Tree Pruning,” pp. 1–15, 2021.

[127] V. Lo Giudice *et al.*, “Olive Trees By-Products as Sources of Bioactive and Other Industrially Useful Compounds : A Systematic Review,” 2021.

[128] J. Matías, J. Gonzalez, J. Matías, L. Royano, and J. González, “Solid biofuels: pellets and chips. Fuel specifications and use in Extremadura biomass WALEVA Life project View project MESOCEX View project SOLID BIOFUELS: PELLETS AND CHIPS. FUEL SPECIFICATIONS AND USE IN EXTREMADURA BIOMASS,” no. May 2013, pp. 7–10, 2013, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/288629497

[129] G. Marian *et al.*, “Calorific Value of Pellets Produced From Raw Material Collected From Both Sides of the River Prut,” *J. Eng. Sci.*, vol. 29, no. 4, pp. 126–137, 2023, doi: 10.52326/jes.utm.2022.29(4).10.

[130] P. Costa, P. P. Dell’Omo, and S. La Froscia, “Multistage milling and classification for improving both pellet quality and biogas production from hazelnut and olive pruning,” *Ann. Chim. Sci. des Mater.*, vol. 42, no. 4, pp. 471–487, 2018, doi: 10.3166/ACSM.42.471-487.

[131] L. Bianchini, P. Costa, P. P. Dell’omo, A. Colantoni, M. Cecchini, and D. Monarca, “An industrial scale, mechanical process for improving pellet quality and biogas production from Hazelnut and Olive pruning,” *Energies*, vol. 14, no. 6, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/en14061600.

[132] A. Solís *et al.*, “Preliminary assessment of hazelnut shell biomass as a raw material for pellet production,” *Fuel*, vol. 333, no. November 2022, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126517.

[133] A. J. Badyda *et al.*, “Inhalation risk to PAHs and BTEX during barbecuing: The role of fuel/food type and route of exposure,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 440, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129635.

[134] G. Riva, E. F. Pedretti, G. Toscano, D. Duca, and A. Pizzi, “Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in domestic pellet stove emissions,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 10, pp. 4261–4267, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.07.014.

[135] M. Pazalja *et al.*, “Heavy metals content in ashes of wood pellets and the health risk assessment related to their presence in the environment,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-97305-4.

[136] Z. Jelonek, A. Drobniak, M. Mastalerz, and I. Jelonek, “Environmental implications of the quality of charcoal briquettes and lump charcoal used for grilling,” *Sci. Total Environ.*, vol. 747, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141267.

[137] S. Ozgen, S. Cernuschi, and S. Caserini, “An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110113.

[138] P. Fermo *et al.*, “MSWI fly ash native carbon thermal degradation: A TG-FTIR study,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 20, pp. 4370–4375, 2000, doi: 10.1021/es000062p.

[139] X. Yang, W. Chen, J. Jin, and J. Hu, “Levels, enrichment characteristics and dietary intake risk of polychlorinated dibenzo-p-dioxin/furans in traditional smoked pork,” *Environ. Pollut.*, vol. 328, no. February, p. 121657, 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121657.

[140] J. N. Knudsen, P. A. Jensen, and K. Dam-Johansen, “Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass,” *Energy and Fuels*, vol. 18, no. 5, pp. 1385–1399, 2004, doi: 10.1021/ef049944q.

[141] A. Perosa, M. Selva, V. Lucchini, M. Fabris, and M. Noè, “Kinetic parameter estimation of solvent-free reactions monitored by 13C NMR spectroscopy, a case study: Mono- and di-(hydroxy)ethylation of aniline with ethylene carbonate,” *Int. J. Chem. Kinet.*, vol. 43, no. 3, pp. 154–160, 2011, doi: 10.1002/kin.