

ENERGIA

La filiera delle bioenergie per la
produzione di energia elettrica e calore in
Italia - Stato dell'arte





ENERGIA

La filiera delle bioenergie per la
produzione di energia elettrica e calore
in Italia - Stato dell'arte

Autori:

Amalia Zucaro, Gabriella Fiorentino, Giuliana Ansanelli, Silvia Scaffoni, Tiziana Beltrani,
Simona Scalbi

Revisione critica:

ENEA - Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Data di redazione: Febbraio 2021

Data di pubblicazione: Luglio 2025

Indice

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Scopo del documento..... | 3 |
| 2 | Introduzione | 3 |
| 3 | Bioenergie in Italia..... | 5 |
| 4 | Diffusione e disponibilità delle biomasse sul territorio italiano | 7 |
| 4.1 | Biomasse dedicate | 7 |
| 4.2 | Biomasse di scarto | 9 |
| 5 | Principali processi di conversione della biomassa | 11 |
| 5.1 | Conversioni meccaniche e fisiche..... | 12 |
| 5.2 | Conversioni chimiche..... | 12 |
| 5.3 | Conversioni termochimiche..... | 12 |
| 5.4 | Conversioni biologiche | 13 |
| 6 | Definizione delle filiere delle bioenergie | 14 |
| 7 | Raccolta dati per la costruzione della banca dati italiana LCA | 15 |
| 7.1 | Panoramica sulla filiera BIOGAS | 15 |
| 7.2 | Panoramica sulla filiera Biomasse solide..... | 17 |
| 7.3 | Panoramica sulla filiera dei bioliquidi..... | 19 |
| 7.4 | Preparazione degli inventari per le filiere biomasse solide, biogas e bioliquidi | 22 |
| 8 | Conclusioni | 23 |

1 Scopo del documento

Il seguente rapporto è stato realizzato nell'ambito del progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA, finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020, come output dell'Azione 5 "Analisi e raccolta dati per la costituzione della banca dati".

Il progetto Arcadia prevede:

- l'approccio di ciclo di vita negli appalti pubblici e acquisti verdi e il rafforzamento delle competenze delle Pubbliche Amministrazioni (PA) in questo ambito;
- la realizzazione di una banca dati italiana LCA (Life Cycle Assessment) (BDI-LCA) relativa a 15 filiere che potrà essere uno strumento di supporto alle PA nella preparazione dei bandi e nella valutazione delle offerte e fonte di dati rappresentativi del contesto italiano per le aziende che intendano sviluppare studi di LCA dei loro prodotti.

Questo rapporto rientra nella sotto azione A5.1 "Individuazione di prodotti, servizi, attività e filiere produttive prioritarie" e la descrizione preliminare della filiera per la produzione di energia da biomasse con un fuoco particolare sull'energia elettrica e produzione di calore.

2 Introduzione

La società in cui viviamo è caratterizzata da una forte dipendenza dalle materie prime di origine fossile per la produzione di energia. Tale dipendenza comporta diversi problemi ambientali che vanno dall'inquinamento al consumo di risorse non rinnovabili. Pertanto, negli ultimi anni, è diventata via via più urgente la necessità di implementare soluzioni energetiche alternative più sostenibili, che prevedano il ricorso a fonti di energia rinnovabili e a basso impatto ambientale. Tra le possibili soluzioni attualmente disponibili, si annovera lo sfruttamento delle biomasse per la produzione di energia (bioenergie) e di carburanti (biocarburanti).

La biomassa è definita come la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (sia sostanze vegetali sia animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani (Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011). L'utilizzo di biomasse a fini energetici riguarda tutti quei materiali organici che possono essere impiegati direttamente come combustibili ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. In particolare il Biogas viene definito "gas costituito prevalentemente da metano e da anidride carbonica prodotto mediante digestione anaerobica della biomassa" (Regolamento UE 147/2013). Mentre i bioliquidi sono definiti "combustibili liquidi per scopi energetici diversi dal trasporto, compresi l'elettricità, il riscaldamento e il raffreddamento, prodotti dalla biomassa" (Decreto Legislativo 28/2011).

Nella transizione verso un sistema energetico decarbonizzato, la produzione di bioenergia è aumentata notevolmente e si prevede che continuerà a crescere (<https://www.iea.org/>). Già da tempo, le politiche energetiche dell'Unione europea (UE) (Directive 2009/28/EC) hanno

promosso la sostituzione del 20% di combustibili fossili con biocarburanti e la produzione del 10% di elettricità dell'UE da biomassa, entro il 2020.

Tale obiettivo è stato inoltre declinato in obiettivi nazionali vincolanti per gli Stati membri. Ciascuno Stato dovrà raggiungere il proprio obiettivo di produzione di energia da fonti rinnovabili sul totale dei consumi, comprensivo di produzione di energia elettrica, termica e ed impiego delle rinnovabili nel settore dei trasporti. In quest'ultimo settore inoltre, cioè quello dei trasporti, a prescindere dal citato obiettivo cumulativo, differenziato per paese, tutti gli Stati membri dovranno conseguire un target comune del 10% di energia da fonti rinnovabili. Questo porterà ad una sostituzione di 50 miliardi di litri di combustibili fossili nel settore dei trasporti. Le fonti rinnovabili di energia che potranno contribuire al raggiungimento di questi obiettivi comprendono, tra le altre, la biomassa solida, il biogas e i bioliquidi; questi ultimi, però, potranno essere conteggiati solo se rispettano i requisiti in materia di sostenibilità.

Ad introdurre il principio della sostenibilità dei bioliquidi è la direttiva 2009/28/CE sulle fonti rinnovabili. I medesimi principi di sostenibilità sono inoltre ripresi, in termini equivalenti, dalla direttiva 2009/30/CE, in materia di combustibili. Secondo quanto stabilito dalle menzionate direttive, indipendentemente dal fatto che la materia prima utilizzata per produrre bioliquidi sia stata coltivata all'esterno o all'interno del territorio dell'Europa, o che provenga dall'uno o dall'altro Stato Membro, l'energia prodotta da tali bioliquidi potrà essere presa in considerazione per il raggiungimento degli obiettivi al 2020 (17% FER sul totale dei consumi nazionali italiani) e 10% nel settore dei trasporti) solo se rispetta i seguenti requisiti:

- Garantisce una riduzione delle emissioni di gas a effetto serra lungo tutto il ciclo di vita del bioliquido (dalla coltivazione del seme alla produzione di energia).
- Non è ottenuta da materie prime provenienti da terreni che presentano un elevato valore in termini di biodiversità o un elevato stock di carbonio.

Secondo l'Agenzia Internazionale per le Energie Rinnovabili (IRENA), per raggiungere l'obiettivo Energia sostenibile per tutti (SE4All), l'energia da biomasse, nel 2030, dovrà arrivare a 108 EJ/anno, ossia dovrà raddoppiare rispetto al quantitativo (58,5 EJ/anno) generato nel 2014 (REN21, 2015; Nakada, 2014). Inoltre, il Global Energy Assessment prevede un ampio uso di materiale lignocellulosico e residui agricoli che porterà ad una crescita significativa della bioenergia, fino a 140 EJ, entro il 2050. Infine, il Gruppo Intergovernativo di esperti sui Cambiamenti Climatici (IPCC) ha delineato un aumento equivalente della quota di bioenergia, in linea con gli obiettivi climatici e le strategie politiche adottate per il loro raggiungimento (Bruckner et al., 2014).

Considerando tale contesto di incentivazione all'uso delle biomasse lignocellulosiche e di scarto e in virtù del ruolo rilevante delle bioenergie nella produzione elettrica da fonti energetiche rinnovabili (FER), questo rapporto si incentrerà sulla filiera delle biomasse a conversione energetica in ambito italiano.

3 Bioenergie in Italia

In Italia, le biomasse rappresentano una risorsa strategica per il Paese, in quanto possono essere sfruttate a fini energetici nei settori Elettrico, Termico e dei Trasporti. Negli anni scorsi, sono stati registrati contributi crescenti delle bioenergie in tutti e tre i settori, grazie alla disponibilità di una pluralità di materie prime e di tecnologie mature e affidabili. Infatti, secondo l'ultimo rapporto statistico sulle FER del GSE (GSE, 2019), tra il 2004 e il 2018, l'elettricità generata con le biomasse è cresciuta in media dell'11% l'anno, passando da 4.499 GWh a 19.153 GWh, quantità che corrisponde al 16,7% della produzione elettrica totale da fonti rinnovabili e al 5,8% della produzione complessiva italiana di energia elettrica. In dettaglio, nel 2018, il 43,3% (8299,6 GWh) delle bioenergie del settore elettrico italiano proviene dal biogas, il 34,3% (6562,3 GWh) dalle biomasse solide ed il 22,4% (4290,7 GWh) dai bioliquidi.

La fotografia della situazione italiana al 2018 mostra che la produzione dell'energia elettrica da biomasse avviene principalmente nel settentrione e, in particolare in Lombardia (23,3%), Emilia Romagna (14,6%), Veneto (10,8%), Piemonte (9,0%) e Friuli Venezia Giulia (4,5%). Contributi significativi vengono anche da Puglia (7,8%), Calabria (6,7%) e Campania (6,2%), mentre le altre regioni hanno una produzione molto più limitata.

Per quanto riguarda il parco impianti, a fine 2018, risultano installati, in Italia, 2924 impianti di produzione elettrica alimentati da biomasse, con una potenza efficiente lorda di quasi 4200 MW. La maggior parte (73%) di tali impianti è a biogas, mentre i rimanenti si suddividono equamente fra la tipologia funzionante con biomasse solide e quella basata sui bioliquidi. La regione con più impianti è la Lombardia (730 impianti), con una potenza complessiva di 931,4 MW, seguita da Veneto (393 impianti, 369 MW), Emilia Romagna (334 impianti, 651,3 MW) e Piemonte (316 impianti, 358,1 MW), mentre le regioni del Centro-Sud contano un numero di impianti molto inferiore, che va dai 153 della Toscana (164,6 MW) ai 10 del Molise (45,4 MW).

In termini di potenza installata in Italia nel 2018, la maggior parte degli impianti a biogas e a bioliquidi ricadono nella fascia compresa fra 200 kW e 1 MW, mentre la taglia degli impianti a biomasse solide è distribuita su un intervallo più ampio, che va da 50 kW a 1 MW, con una leggera preponderanza degli impianti di taglia più piccola (50-200 kW). Inoltre, risultano non trascurabili (i) la percentuale di impianti a biomasse solide (>10%) e a biogas (ca. 5%) con una potenza compresa fra 1 e 10 MW e (ii) quella dei soli impianti a biomasse solide (>10%) di taglia maggiore di 10 MW. Ciò spiega come mai, nonostante gli impianti più numerosi siano quelli a biogas, essi rappresentino solo il 34,6% della potenza complessiva installata, mentre la quota maggiore (41,3%) è associata agli impianti a biomasse solide.

In termini di capacità produttiva, il 42,8% dell'energia elettrica da biomasse è prodotto in impianti di potenza superiore a 10 MW, il 42,5% in quelli di potenza inferiore a 1 MW e il restante 14,7% in impianti appartenenti alla fascia intermedia, tra 1 e 10 MW.

Il rapporto GSE, riferito all'anno 2018, riporta che per ottenere energia elettrica, la risorsa più sfruttata, nel Centro-Nord, è il biogas mentre, al Sud e nelle Isole, la fonte principale è

rappresentata dai bioliquidi o dalle biomasse solide. In particolare, la Lombardia si caratterizza per la maggiore produzione (34,4%, 2850,7 GWh) di energia elettrica da biogas, a livello nazionale, seguita da Veneto (14,9%), Emilia Romagna (14,6%) e Piemonte (12,2%), mentre nelle altre regioni la produzione da biogas è molto inferiore. La Lombardia è anche la regione che genera i maggiori quantitativi di energia elettrica (922,6 GWh) dalla Frazione Biodegradabile dei Rifiuti urbani (FORSU); seguono, a notevole distanza, Emilia Romagna (359,8 GWh) e Campania (334,1 GWh), mentre la Calabria primeggia, a livello nazionale, per la produzione di energia elettrica da biomasse solide diverse da FORSU (1171,7 GWh). Infine, per quanto riguarda l'elettricità da bioliquidi, i quantitativi maggiori si ottengono in Puglia (952,1 GWh), Campania (743,3 GWh) ed Emilia Romagna (652 GWh).

Il contributo delle bioenergie nel settore termico è maggiore che in quello elettrico. Infatti, nel 2018, (GSE, 2019) il calore ottenuto attraverso lo sfruttamento delle biomasse (322885 TJ) rappresenta il 72% del calore generato da FER ed il 14% del calore totale consumato in Italia. Il contributo predominante (91%) viene dalla combustione delle biomasse solide che sono costituite essenzialmente da legna da ardere, pellet e carbone vegetale. Un ruolo decisamente secondario è, invece, giocato dalla frazione biodegradabile dei rifiuti (FORSU), dal biogas e dai bioliquidi che, nel 2018, hanno generato quantitativi di calore pari, rispettivamente, al 5,3%, 3,5% e 0,7% dell'energia termica totale prodotta da biomasse.

Inoltre, il rapporto del GSE (2019) riporta che, nel 2018, l'88% del calore da biomasse è consumato in modo diretto da famiglie e imprese (es. in caldaie individuali, stufe ecc.) e solo il 12% è costituito da calore derivato (*derived heat*), ossia destinato al consumo da parte di terzi (es. attraverso reti di teleriscaldamento). Quest'ultimo è prodotto per l'88% da impianti di cogenerazione (impianti CHP – Combined Heat and Power) e per il resto da impianti di sola produzione termica. Il calore derivato è ottenuto da biomasse solide per il 56,5%, da biogas per il 23% e da FORSU per il 15%, mentre il contributo dai bioliquidi è pari a 5,5%. In particolare per gli impianti alimentati da bioliquidi, il calore derivato prodotto in cogenerazione, rilevato da Terna, ammonta a 2.134 TJ considerando la totalità dei bioliquidi e a 2.046TJ considerando solo i bioliquidi sostenibili.

D'altra parte, alla produzione del calore diretto contribuiscono soprattutto (95,2%) le biomasse solide e, in misura molto minore, la FORSU (4%) e il biogas (0,8%). Per quanto riguarda invece l'impiego dei bioliquidi per la produzione di energia termica, il rapporto del GSE mostra come dalla ricognizione sugli impianti appartenenti al settore industriale, terziario, agricolo o residenziale che utilizzano bioliquidi in modo diretto per la sola produzione termica non siano emersi risultati significativi; pertanto il consumo diretto di bioliquidi nel 2018 è assunto pari a zero.

Nel 2018, la classifica italiana per consumi diretti di biomassa solida, nel settore residenziale, è guidata dalla regione Piemonte, con una percentuale pari a 10,2%; seguono Veneto (9,9%), Lombardia (9,2%) e Campania (8,7%), mentre i consumi minori si registrano in Valle d'Aosta (0,6%) e in Molise (1,3%). Appare chiaro, comunque, che il riscaldamento domestico mediante biomasse solide è un fenomeno che riguarda tutte le regioni.

Relativamente al riscaldamento nel settore non residenziale, mediante biomasse solide (legna, pellet e carbone vegetale), si osserva una situazione un po' diversa, con i consumi maggiori nelle regioni in cui sono presenti impianti industriali di dimensioni medio-grandi. In particolare, nel 2018, il primato spetta al Trentino-Alto Adige che, da solo, concentra quasi il 29% della produzione complessiva italiana di energia termica da biomasse solide; seguono Lombardia (16,2 %), Veneto (10,6 %) e Piemonte (10,3 %), mentre, complessivamente, sia al Centro sia al Sud, i consumi di calore si attestano intorno al 15%.

Inoltre, in base al rapporto del GSE (2019), il consumo diretto di energia termica prodotta da FORSU è localizzato essenzialmente (>80%) in tre regioni del Nord (Lombardia, Friuli-Venezia Giulia e Veneto) e riguarda unicamente il settore industriale.

Infine, il documento prodotto dal GSE (2019) indica che, nel 2018, i consumi diretti di biogas si concentrano (quasi il 70%) nell'Italia settentrionale e, in particolare, in Lombardia che, da sola, consuma il 42% dell'energia termica totale da biogas. Consumi ben più contenuti (18%) si registrano nel Centro Italia, con il Lazio (8,5%) in testa, e ancora più bassi al Sud e nelle isole (0.4%-3.9%). Il calore da biogas viene sfruttato in modo diretto nei settori dell'industria (45%), del commercio e dei servizi (55%), mentre non ne è stato rilevato l'utilizzo nel settore residenziale.

4 Diffusione e disponibilità delle biomasse sul territorio italiano

4.1 Biomasse dedicate

L'Agenzia internazionale per le energie rinnovabili (IRENA) indica la conversione delle biomasse come una delle strategie da adottare al fine di raggiungere l'obiettivo energetico previsto per 2030 (IRENA, 2015). L'uso della biomassa come FER si è evoluto negli ultimi anni. In una prima fase, le materie prime generalmente utilizzate per la produzione di energia e biocarburanti (etanolo in particolare) erano principalmente colture zuccherine ed amilacee, come mais, grano, barbabietola da zucchero, manioca, sorgo dolce, canna da zucchero etc., mentre il biodiesel veniva tradizionalmente prodotto da oli vegetali (soia, olio di palma, girasole, colza, cocco e arachidi) (de Vries et al., 2010). Queste cosiddette colture di prima generazione sono cresciute in tutto il mondo principalmente grazie alle politiche di incentivazione a sostegno delle produzioni di biocarburanti per il trasporto (Lamers et al., 2011; Giampietro et al., 1997). Ciononostante, le colture dedicate di prima generazione sono state fortemente criticate per la concorrenza con la produzione alimentare (ricadute sociali) e per la dimostrazione di un loro basso ritorno energetico (rapporto tra costi energetici in input e benefici energetici in output). Ulteriori valutazioni integrate sull'efficienza energetica e sul metabolismo sociale hanno messo in luce i limiti delle bioenergie di prima generazione come possibile vettore energetico sostenibile per le società industriali (COM 15 final, 2014). Di conseguenza, sembra che la proliferazione delle politiche di sovvenzione abbia persino peggiorato il quadro globale, incentivando le mono-colture e promuovendo così un grave

rischio agro-ecologico, tanto da spingere le Nazioni Unite a bollare l'uso a fini energetici di colture alimentari come "crimine contro l'umanità" (Nazioni Unite, 2007).

L'impiego di coltivazioni dedicate di seconda (non alimentari) e terza generazione (alghe) è stato pertanto individuato come mezzo per superare sia i conflitti di natura sociale sia quelli economico-ambientali (Kan et al., 2016) (Figura 1).

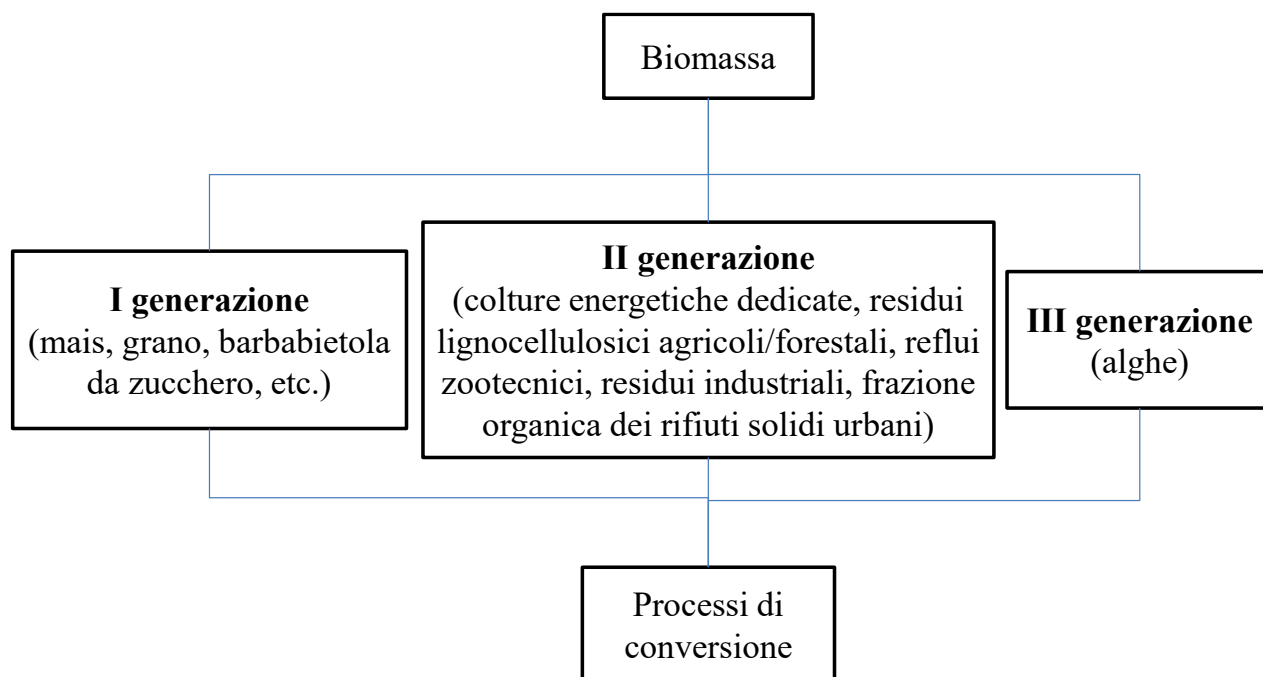


Figura 1. Tipologie di biomassa dedicata nella filiera energetica.

Nel quadro della UE e delle politiche nazionali e internazionali, l'impiego di biomasse di seconda e terza generazione è stato fortemente incoraggiato, al fine di ridurre il cambiamento nell'uso del suolo, garantire la sicurezza alimentare e compensare le emissioni di gas ad effetto serra (Direttiva 2009/28/UE; Yousuf, 2012).

Le materie prime di seconda generazione sono costituite da specie non commestibili, come i semi oleosi (tra gli altri, jatropha, semi di lino, semi di cotone), per la produzione di bioliquidi, e piante a rapida crescita (es. miscanto, canna comune, bosco ceduo di salice ecc.) che fungono da fonte di biomassa lignocellulosica. La biomassa lignocellulosica è stata identificata come materia prima promettente, non solo per le bioenergie, ma in un quadro più ampio di bioraffineria integrata e sistemica (Cherubini e Jungmeier 2010; Fiorentino et al., 2017; Zucaro et al., 2020). Le coltivazioni dedicate lignocellulosiche sono caratterizzate da bassi input di coltivazione e sono realizzabili anche su terre marginali (aree non proficuamente coltivabili ai fini alimentari). Le colture dedicate lignocellulosiche si differenziano in (i) colture annuali, come il sorgo, la colza e le brassicacee (es. *Brassica carinata*); (ii) colture poliennali, quali la canna comune (*Arundo donax*), il cardo e il miscanto, e (iii) Short Rotation Forestry (SRF), come la robinia, il pioppo e l'eucalipto. Tutte le colture lignocellulosiche dedicate sono considerate di grande interesse, specialmente per il bacino

del Mediterraneo, grazie alla loro alta produttività in condizioni di siccità (Fazio & Monti 2011; Fiorentino et al., 2014; Zucaro et al., 2015).

Nel complesso, le biomasse dedicate rappresentano un'importante fonte di approvvigionamento energetico, in quanto consentono di utilizzare in maniera vantaggiosa aree agricole abbandonate, di realizzare una diversificazione colturale di settori in crisi (barbabietola da zucchero, tabacco, etc.) e di creare nuove opportunità di mercato. Lo sviluppo di filiere agro-energetiche deve avvenire tenendo conto non solo delle innovazioni tecnologiche, ma anche delle realtà territoriali, delle dimensioni dei bacini di produzione agricola e del fatto che le scelte colturali, oltre che da specifiche vocazioni, sono influenzate dai nuovi indirizzi di agricoltura ecosostenibile. L'adozione di determinate filiere e tecnologie di processo dovrebbe essere effettuata sulla base della loro reale fattibilità e capacità di rispondere concretamente ai requisiti di resa, costi e facilità di impiego.

La produzione di biomasse a scopi energetici consta di (i) una fase agricola, in cui la biomassa è coltivata e raccolta, (ii) una fase di trasporto all'impianto di conversione (es. bioraffineria), e (iii) una fase di trasformazione in bioenergia e bioprodotto, aventi i requisiti essenziali, in termini ambientali (bassi impatti ambientali) ed economici (costi di produzione competitivi), per l'immissione sul mercato.

4.2 Biomasse di scarto

L'utilizzo di residui o biomasse di scarto, ad oggi è considerato dall'Unione Europea come una priorità al fine di: (i) ridurre la percentuale di rifiuti da smaltire in discarica al di sotto del 25%, entro il 2025, (ii) rispettare precisi target di gestione per i rifiuti riciclabili e biodegradabili (tal quali), e (iii) azzerare lo smaltimento in discarica, entro il 2030. Tali obiettivi rappresentano una sfida per gli Stati Membri, ma anche una grande opportunità per la green economy, vista la tendenza al riuso e al riciclo di prodotti quali: scarti urbani, agricoli e agroindustriali, forestali e zootecnici, che sono al contempo risorse e base di partenza di processi di economia circolare.

Fra le biomasse di scarto si annoverano i residui agricoli e zootecnici, gli scarti e i residui di industrie agroalimentari e di altro tipo (es. cartiera, lavorazione del legno ecc.), i rifiuti forestali (manutenzione del bosco, scarti di segherie ecc.) e la frazione organica dei rifiuti urbani.

Di particolare interesse, a livello locale, sono le biomasse residuali di origine agricola, che comprendono le paglie di cereali quali frumento, avena, orzo, segale e riso, il trinciato di mais (foglie e gambi dopo il raccolto), le pannocchie di mais, i sarmenti di vite e le potature di ulivo e di alberi da frutto. Rivestono un ruolo importante, ai fini di un impiego energetico, anche gli scarti agroindustriali quali i gusci di frutta, le vinacce, le sanse, la bagassa (polpa secca polverosa che rimane dopo l'estrazione del succo dalla canna da zucchero), la melassa (sciropo denso e scuro proveniente dalla lavorazione della canna da zucchero o barbabietola da zucchero) e, in particolare, i reflui dell'industria olearia che potrebbero

costituire una materia prima per la produzione di energia da biogas, poiché contengono una notevole quantità di zuccheri fermentescibili.

Anche le deiezioni zootecniche hanno notevoli potenzialità, in Italia, che possono essere sfruttate tenendo conto che la loro composizione varia a seconda del tipo di apparato digerente e della dieta a cui sono soggetti gli animali. Di conseguenza, il digestato (ossia il residuo ottenuto dalla digestione anaerobica delle deiezioni) necessita sempre di una caratterizzazione per stabilirne gli impieghi più idonei. Per esempio, previa opportuna correzione dei parametri chimico-fisici (in particolare il rapporto carbonio/azoto), il digestato può essere impiegato come substrato per la crescita di microalghe. La gestione sostenibile ed innovativa delle deiezioni zootecniche è una strategia alternativa per superare la criticità ambientale legata al loro elevato contenuto di azoto che ne limita l'uso come fertilizzanti. Infatti, la normativa, al fine di ridurre i rischi di lisciviazione dei nitrati nelle acque sotterranee, ha fissato dei limiti per l'azoto nei fertilizzanti che sono più bassi delle concentrazioni normalmente rilevate negli escrementi animali. Di conseguenza, la maggior parte delle deiezioni non trova un impiego come concime e le aziende zootecniche sono costrette a caricarsi i costi del loro smaltimento.

Recentemente, anche gli oli usati o non commestibili (olio da cucina, olio per friggere e olio di sansa) nonché i grassi animali (strutto di maiale, grassi e sottoprodotti dell'olio di pesce) hanno guadagnato un'attenzione significativa per la produzione di biodiesel di seconda generazione (Kumar et al., 2017; Sheldon, 2011; Ripa et al., 2014).

L'aspetto positivo della natura non commestibile della biomassa di scarto è rappresentato dal superamento delle preoccupazioni relative ai prezzi e alla scarsa disponibilità di cibo in alcuni paesi in via di sviluppo. Un altro vantaggio è costituito dall'abbondante disponibilità, a prezzi bassi, delle biomasse di scarto agricolo e dai rifiuti urbani e industriali (Bentsen et al., 2017). Bisogna, però, tenere conto che alcune biomasse, essendo prodotte solo in determinate stagioni (vinacce, paglie, sansa, ecc.), sono caratterizzate da una variazione stagionale del prezzo, che può renderle non sempre economicamente convenienti.

In conclusione, le biomasse residuali rappresentano una fonte di energia rinnovabile abbondante, economica e prontamente disponibile. Inoltre, la loro conversione in bioenergie contribuisce a risolverne il problema dello smaltimento, in linea con i principi dell'economia circolare.

Sebbene le catene di valore a base biologica rivestano un grande potenziale dato dall'utilizzo della biomassa di scarto come materia prima seconda, numerosi ostacoli pratici si riscontrano ancora oggi. In particolare, lo sfruttamento molto limitato delle biomasse residuali è dovuto a molteplici fattori che vanno da una mancanza di conoscenza delle buone pratiche e di capacità di gestione (dalla raccolta alla conservazione ed alla trasformazione in energia) ad una legislazione talvolta non adeguata. Si pensi, ad esempio ai complicati iter autorizzativi per la costruzione di nuovi impianti oppure alla difficoltà di riutilizzo di alcune biomasse di scarto, in quanto non riconosciute come sottoprodotti. Anche l'inadeguatezza delle biomasse all'impianto di trattamento può costituire un ostacolo al loro impiego. Infatti,

la combustione delle biomasse, rispetto ai combustibili tradizionali, comporta maggiori emissioni di ceneri e di inquinanti tossici e/o corrosivi. In particolare, il tipo e la quantità di ceneri e inquinanti dipende sia dalla qualità della biomassa sia dalla tecnologia adottata, per cui si rendono spesso necessari costosi sistemi di abbattimento che, senza incentivi pubblici, non è sempre possibile installare. Il problema dei costi elevati riguarda anche le reti di teleriscaldamento che sono deputate a trasportare e distribuire il calore generato al settore residenziale. A tutto ciò va aggiunta la questione del trasporto delle biomasse dai siti di stoccaggio a quelli di trasformazione, che risulta poco sostenibile, dal punto di vista ambientale ed economico, sulle lunghe distanze.

Ciò evidenzia la necessità di creare filiere locali organizzate in modo tale da sfruttare al meglio le risorse del territorio, riducendo drasticamente i trasporti e favorendo la collaborazione tra gli attori coinvolti (Giampietro et al., 1997; Giampietro and Ulgiati, 2005, Zucaro et al., 2018; Gomiero, 2018).

5 Principali processi di conversione della biomassa

Le modalità di conversione delle biomasse variano a seconda del substrato di partenza e del prodotto energetico o chimico che si vuole ottenere (Figura 2). Ciò che accomuna tutti i percorsi di conversione è la necessità di un pre-trattamento di natura meccanica o fisica, allo scopo di ridurre le dimensioni della biomassa di partenza o di separarne i principali componenti, senza modificare lo stato o la composizione (Fiorentino et al., 2017).

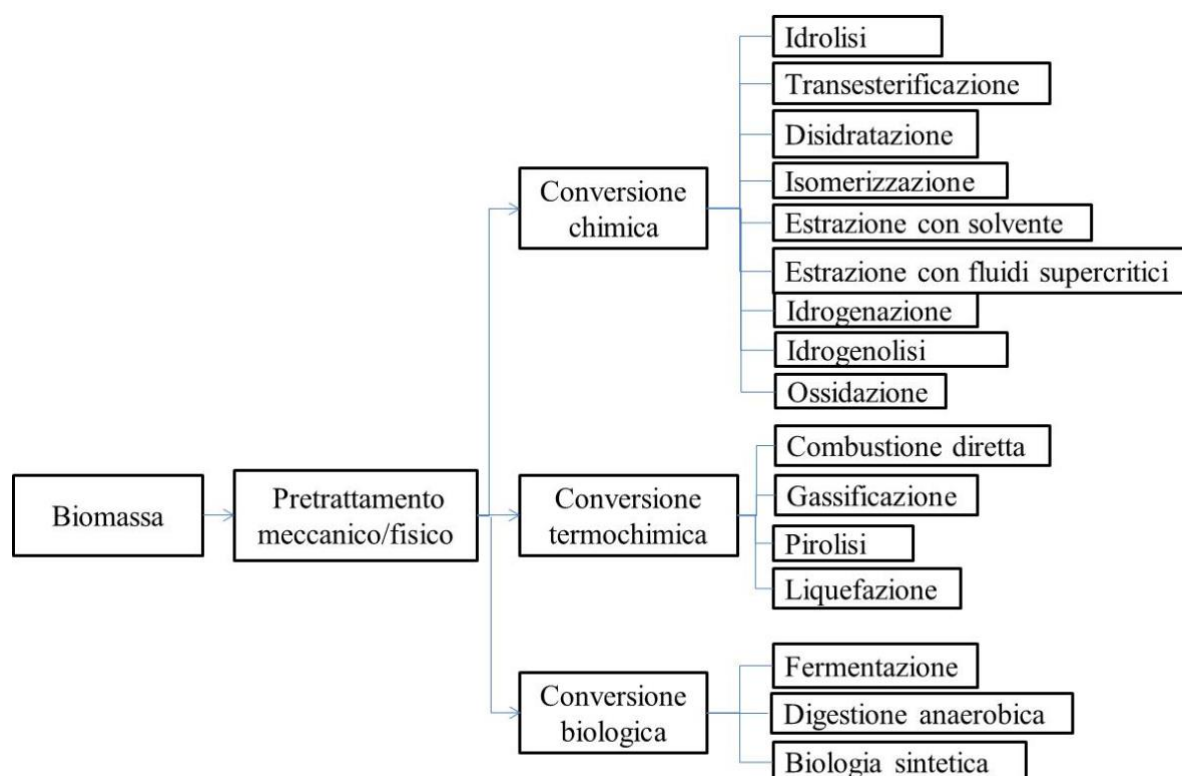


Figura 2. Percorsi di conversione della biomassa.

5.1 Conversioni meccaniche e fisiche

Processi meccanici e fisici, quali fresatura, irradiazione con raggi gamma, fascio di elettroni o microonde, estrusione ed esplosione di vapore, sono spesso usati come pre-trattamento della biomassa. Inoltre, vengono utilizzati comunemente per produrre biodiesel, attraverso un procedimento meccanico detto spremitura, ossia l'estrazione dai semi oleosi per mezzo di una pressa a vite che consente di recuperare e concentrare i trigliceridi da un substrato sfuso e disomogeneo, quale le piante ed i residui oleaginosi con umidità inferiore al 35% e un rapporto C/N maggiore di 30. Gli oli combustibili così estratti vengono poi convertiti per via chimica (Russo et al., 2012).

5.2 Conversioni chimiche

Le conversioni chimiche si riferiscono a processi come l'idrolisi, la transesterificazione, la disidratazione, l'isomerizzazione, l'estrazione con solventi, l'estrazione in fluidi supercritici, l'idrogenazione, l'idrogenolisi e l'ossidazione, che convertono direttamente la biomassa in prodotti chimici, cambiando la struttura chimica del substrato, a temperatura e pressione relativamente miti e in presenza di un catalizzatore. Le conversioni chimiche sono coinvolte sia nel pretrattamento della biomassa che nelle fasi di lavorazione a valle per convertire i prodotti chimici intermedi, derivanti da conversioni termochimiche o biologiche, nei prodotti chimici finali. L'idrolisi, per esempio, utilizza acidi, alcali o enzimi per scindere i legami di polisaccaridi e proteine e ottenere i monomeri (ad esempio il glucosio dalla cellulosa) o altri derivati chimici, come l'acido levulinico dal glucosio (Sun & Cheng, 2002).

Il ruolo dei catalizzatori in questi percorsi di conversione è cruciale e molti sforzi nell'ambito della ricerca si stanno ora concentrando sull'ottimizzazione dell'efficienza dei catalizzatori e sulla progettazione di catalizzatori eterogenei che possano essere applicati in un'ampia gamma di condizioni di reazione e che possano essere facilmente recuperati dalla miscela di reazione e riutilizzati (Wettstein et al., 2012).

5.3 Conversioni termochimiche

Le conversioni termochimiche sono generalmente applicate a biomasse lignocellulosiche (umidità relativa inferiore al 50% e rapporto C/N superiore a 30) e comprendono la combustione diretta, la gassificazione, la pirolisi o la liquefazione, che coinvolgono principalmente il trattamento della biomassa in condizioni di temperatura e/o pressione più spinte rispetto alle conversioni chimiche (Goyal et al., 2008). La combustione diretta è la combustione della biomassa in un ambiente ricco di ossigeno principalmente per la produzione di calore, mentre la gassificazione consiste nel trattamento della biomassa ad alta temperatura (> 700 °C) con bassi livelli di ossigeno per produrre il cosiddetto syngas, ossia una miscela di H₂, CO, CO₂ e CH₄, che può essere utilizzato direttamente come biocombustibile o come prodotto chimico intermedio per la produzione di combustibili o

prodotti chimici, attraverso la sintesi di Fischer-Tropsch. La pirolisi, invece, utilizza temperature intermedie (300–600 °C) in assenza di ossigeno per convertire la biomassa in una miscela di composti aromatici e alifatici, il cosiddetto olio pirolitico liquido (o bio-olio), carbone solido (o char) e gas leggeri simili al syngas. La biomassa può essere convertita anche in un prodotto liquido per mezzo del processo di liquefazione termochimica che, a differenza della pirolisi, richiede la presenza di un catalizzatore e opera in condizioni umide.

5.4 Conversioni biologiche

Le conversioni biologiche, come la fermentazione e la digestione anaerobica, sono tra le tecnologie più “verdi” in quanto comportano l'utilizzo di enzimi o organismi viventi per catalizzare la conversione della biomassa rispettivamente in etanolo e biogas. Spesso si definiscono processi biocatalitici o biotecnologia bianca e si applicano tanto a piante e residui cellulosici, amidacei e zuccherini quanto a piante e residui fermentescibili, reflui animali e alla frazione organica dei rifiuti solidi urbani, caratterizzati da un valore di umidità maggiore del 50% ed un rapporto C/N all'incirca pari a 25-30 (Schmid et al., 2001).

Negli ultimi decenni, i bioprocessi hanno trovato applicazione nella produzione di prodotti ad alto valore come i prodotti farmaceutici (e i loro intermedi) e, in anni più recenti, anche di prodotti di chimica fine o di base ed i carburanti.

Sin dai primi anni '70, è stata ampiamente studiata l'idrolisi della cellulosa in zuccheri monomerici mediante enzimi cellulolitici, come cellulasi ed emicellulasi, con l'obiettivo di sviluppare un metodo per la produzione di etanolo e si tratta attualmente di un processo consolidato (Sánchez & Cardona, 2008). I processi di fermentazione con lieviti e batteri sono comunemente usati per produrre etanolo in particolare, ma anche altri prodotti chimici commerciali, come acido lattico, acido citrico e acetone-butanolo. I substrati più frequentemente utilizzati per la fermentazione sono gli esosi, principalmente il glucosio, mentre i pentosi, il glicerolo ed altri idrocarburi richiedono lo sviluppo di organismi modificati per la fermentazione e la conversione in etanolo. In effetti, i recenti progressi nelle tecnologie di fermentazione, come l'ingegneria enzimatica e metabolica o la biologia sintetica, offrono nuove opportunità per migliorare i bioprocessi ed ampliare la gamma di prodotti che si possono ottenere, ottimizzando le vie metaboliche attraverso modificazioni genetiche volte a manipolare le capacità metaboliche dei microorganismi. Alta resa e selettività, così come flussi minimi di rifiuti, rendono le conversioni biologiche dei percorsi ottimali per trasformare la biomassa in sostanze chimiche a valore più elevato. Tuttavia, ci sono ancora miglioramenti da adottare per aumentare l'efficienza della fermentazione e delle biocatalisi basate su microorganismi ed enzimi e per ridurre i consumi energetici di queste tecnologie. Da un'attenta analisi della letteratura scientifica risulta chiaro l'alto livello di criticità della lavorazione della biomassa e, in particolare, delle fasi di pre-trattamento: i processi di pre-trattamento fisico, fisico-chimico, chimico e biologico, o le loro combinazioni, sono cruciali per facilitare la solubilizzazione o la separazione dei principali componenti della biomassa, ovvero cellulosa, emicellulosa e lignina, nel caso della biomassa lignocellulosica.

Una volta pretrattata, la biomassa può essere processata utilizzando diverse configurazioni di processo come idrolisi e fermentazione separate (SHF), saccarificazione e fermentazione simultanee (SSF), saccarificazione e co-fermentazione simultanee (SSCF) e trattamento della biomassa consolidato (CBP) (Menon & Rao, 2012).

La digestione anaerobica (AD), d'altro canto, sembra essere un altrettanto valido metodo per produrre energia rinnovabile sotto forma di biogas, risolvendo al tempo stesso la gestione dei rifiuti. Il termine AD si riferisce a un complesso processo di biodegradazione anaerobica condotto da una varietà di specie diverse provenienti da due regni biologici completamente diversi (batteri e Archea). Il prodotto principale di questo processo di bioconversione è il biogas, una miscela che consiste principalmente di metano (CH_4) e anidride carbonica (CO_2), ma contenente anche diverse impurità. Di solito, il biogas prodotto viene bruciato in unità di cogenerazione in loco per produrre simultaneamente calore ed elettricità, per consumi interni dell'impianto di AD, con l'immissione del surplus di elettricità nella rete nazionale. In alternativa, il biogas può essere purificato per aumentare il suo contenuto di CH_4 , fornendo un promettente vettore energetico, vale a dire il biometano (bioCH_4), che può essere utilizzato come carburante per veicoli o iniettato nella rete del gas naturale, analogamente al CH_4 a base fossile (Florio et al., 2019).

Al fine di rendere i prodotti ottenuti (bioetanolo e biogas) competitivi, in termini di qualità e prezzo, rispetto ai prodotti ottenuti per via tradizionale dai combustibili fossili, sono richiesti processi efficienti che si adattino alla struttura molecolare della biomassa altamente funzionalizzata, quali ad esempio: (i) processi catalitici flessibili, necessari per far fronte alle variazioni nella disponibilità e nella struttura molecolare delle materie prime, (ii) catalizzatori robusti e che si rigenerano facilmente, perché le materie prime naturali possono contenere impurità che potrebbero alterarne la selettività e diminuirne l'attività, (iii) nuovi mezzi di reazione, come i fluidi supercritici ed i liquidi ionici, e nuovi sistemi di attivazione, come ultrasuoni o microonde.

6 Definizione delle filiere delle bioenergie

Il presente studio sarà focalizzato sulle filiere delle bioenergie utilizzate per la produzione di energetica elettrica che andranno a comporre il mix elettrico italiano. Figura 3 mostra i diagrammi di flusso delle filiere energetiche, che saranno oggetto dell'analisi del ciclo di vita (LCA), secondo le norme ISO 14040-44 (ISO, 2006 a, b).

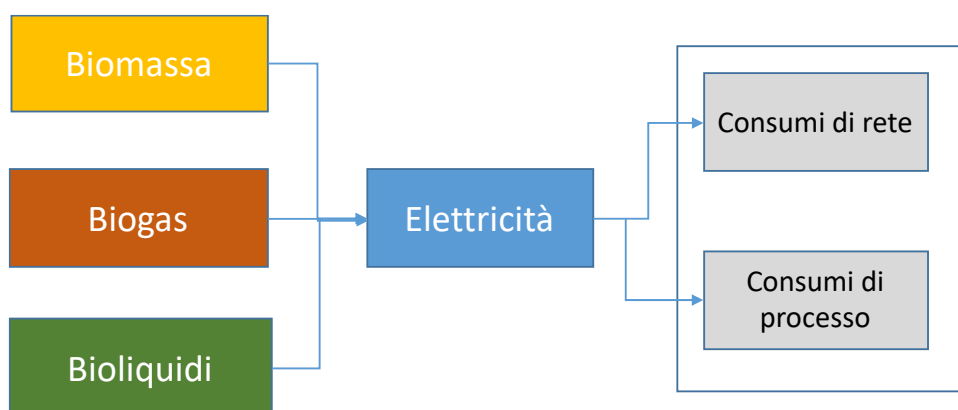


Figura 3. Confini del sistema delle filiere delle bioenergie per la produzione di energia elettrica

Verrà applicata una LCA di tipo attribuzionale e in presenza di coprodotti gli impatti relativi saranno allocati in funzione delle caratteristiche fisiche dei prodotti. In presenza di vettori energetici differenti si prediligerà un'allocazione di tipo energetico.

L'unità funzionale (FU) è la produzione di 1kwh di energia elettrica da bioenergie di cui nel 2018, il 43,3% (8299,6 GWh) proviene dal biogas, il 34,3% (6562,3 GWh) dalle biomasse solide ed il 22,4% (4290,7 GWh) dai bioliquidi. Di seguito verranno analizzate le tre filiere biogas, biomassa solida e bioliquidi.

7 Raccolta dati per la costruzione della banca dati italiana LCA

Di seguito, si riportano i primi risultati della ricerca dati sulle filiere italiane di conversione di biomasse solide, biogas e bioliquidi in energia elettrica. I dati relativi alla produzione di calore, invece, sono stati esclusi da questa prima fase della raccolta.

Le ricerche sono state condotte, scegliendo come riferimento temporale l'anno 2018 e suddividendo i dati per macro-aree (Nord, Centro e Sud Italia) o per Regioni. In primo luogo, sono stati consultati i documenti del Gestore dei Servizi Energetici (GSE), di Terna e di Eurobserv'er, per ottenere informazioni sulla dimensione media degli impianti e sulla loro numerosità e distribuzione sul territorio italiano. Queste informazioni sono servite per determinare le dimensioni tipiche di un impianto per ciascuna tipologia di filiera e per capire quali regioni/macro-aree italiane sono maggiormente interessate dalle attività delle filiere indagate.

7.1 Panoramica sulla filiera BIOGAS

In Figura 4, sono riportate le principali fasi della filiera biogas e quelle che sono state escluse da questo studio (relative alla produzione di calore) sono coperte da un rettangolo grigio.

Filiera Biogas

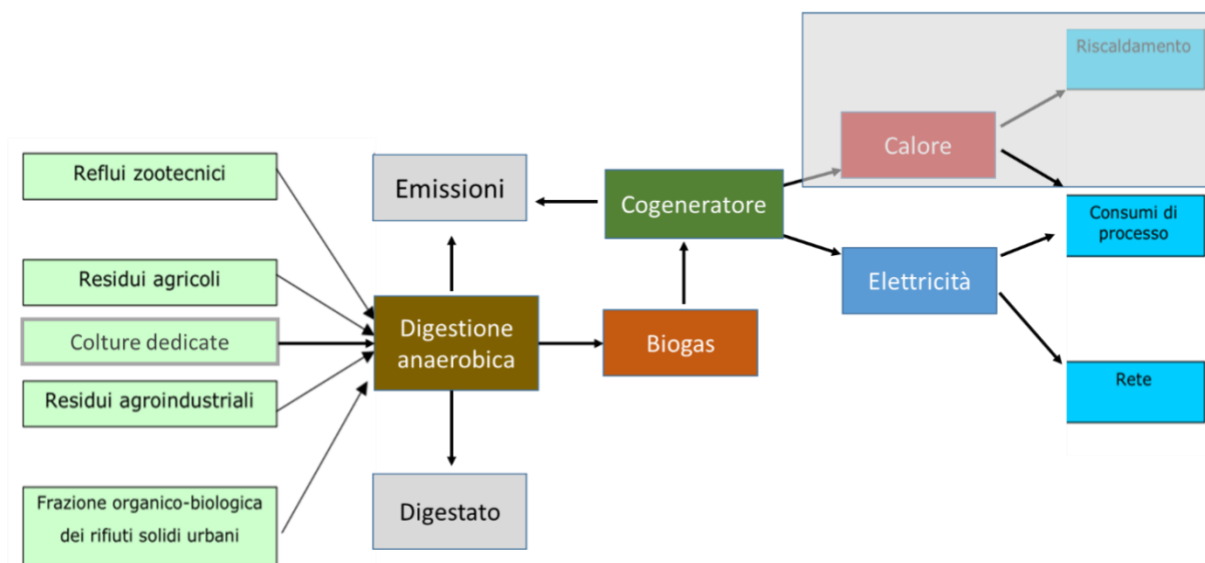


Figura 4. Fasi della filiera biogas. Le parti coperte dal rettangolo grigio sono escluse dallo studio.

Per restringere il campo di ricerca dati, si è cercato di stabilire, innanzitutto, se esistono delle zone in cui la filiera biogas è più sviluppata. L'analisi dell'ultimo rapporto GSE (2019) ha rivelato che la maggior parte degli impianti a biogas è localizzata nel Nord Italia (Fig. 5) e, quindi, questa macro-area può essere considerata rappresentativa del contesto italiano per quanto riguarda la produzione di energia elettrica da biogas.

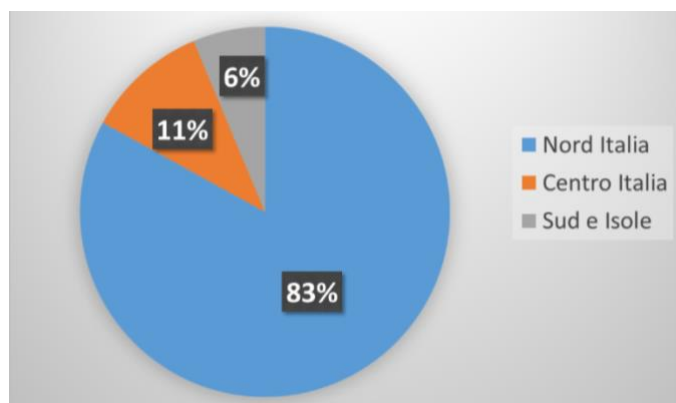


Figura 5. Produzione territoriale di energia elettrica da biogas

Inoltre, al fine di raffinare ulteriormente la ricerca dati, sono stati elaborati i dati GSE (2019) relativi alla tipologia di biomassa impiegata ed alla potenza degli impianti. I risultati ottenuti (Fig. 6.e Tabella 1) mostrano che la maggior parte degli impianti ha una potenza media pari a 0.7 MW ed è alimentata con biomasse provenienti dalle attività agricole e forestali.

Tabella 1. Numerosità e potenza impianti italiani a biogas, anno 2018

| | n. | Prot. Tot (MW) | Prot. Media (MW) |
|--------------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|
| Rifiuti | 403 | 405.4 | 1.01 |
| Fanghi | 79 | 44.1 | 0.56 |
| Deiezioni animali | 615 | 238.5 | 0.39 |
| Attività agricole e forestali | 1039 | 760 | 0.73 |

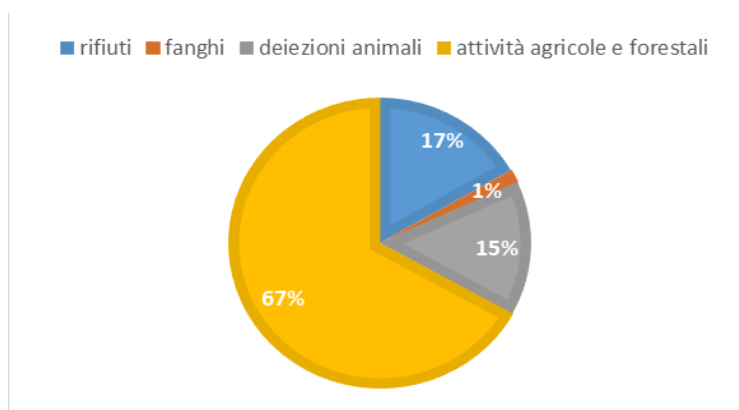


Figura 6. Energia elettrica (GWh) da biogas nel 2018.

7.2 Panoramica sulla filiera Biomasse solide

In Figura 7 sono riportate tutte le fasi della filiera Biomasse solide. Le fasi relative alla produzione di calore che, in questo lavoro, non sono oggetto di studio, sono evidenziate da un rettangolo grigio.

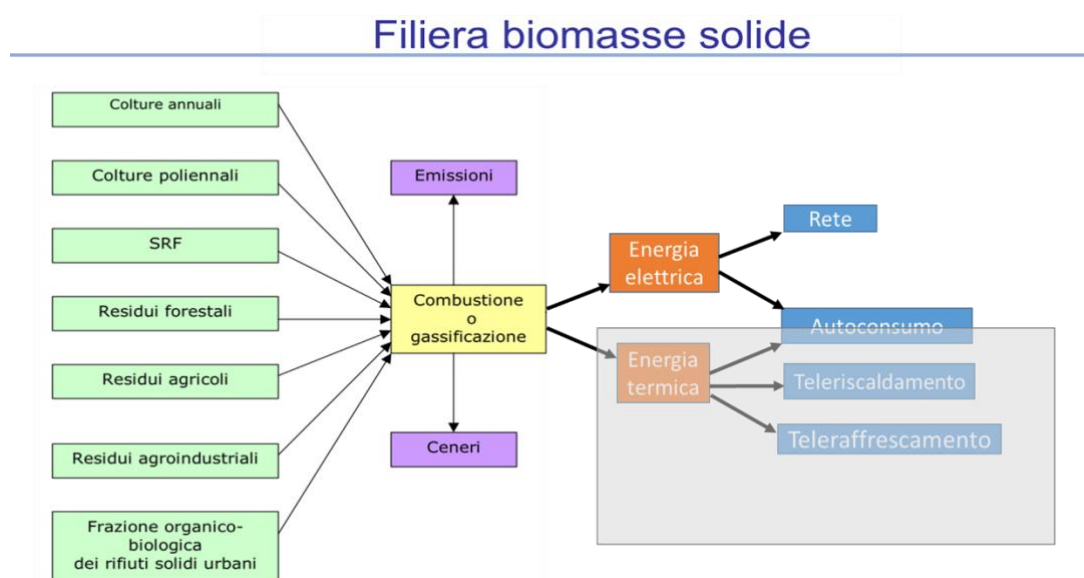


Figura 7. Fasi della filiera Biomasse solide. Le fasi escluse dall'analisi sono coperte con un rettangolo grigio.

I dati GSE, pur indicando un utilizzo significativo della frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU) per la produzione elettrica, evidenziano che il principale contributo alla produzione

proviene da altre biomasse non meglio specificate (Figure 8 e tabella 2). Sarà, quindi, necessario ricorrere ad altre fonti per conoscere la natura delle biomasse utilizzate, al fine di definire i flussi elementari.

Relativamente alla potenza media degli impianti, appare chiaro che quelli alimentati da FORSU sono generalmente molto più grandi (14 MW, Fig. 8) di quelli che bruciano altre tipologie di biomasse solide (1,92 MW, Fig. 8)

Tabella 2. Numerosità e potenza impianti italiani a biomasse solide, anno 2018

| | n. | (MW) | Prot.Media |
|------------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| FORSU | 65 | 938.8 | 14,44 |
| Altre biomasse solide | 410 | 786,6 | 1,92 |

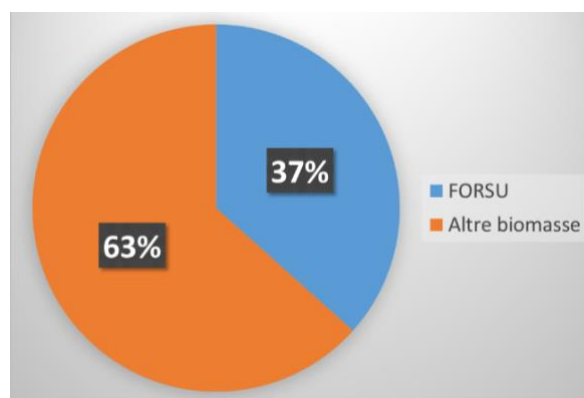


Figura 8. Energia elettrica (GWh) da biomasse solide, prodotta nel 2018.

Infine, il rapporto GSE (2019) mostra che la produzione di energia elettrica da FORSU avviene principalmente nel Nord Italia (68%), mentre quella tramite le altre biomasse solide risulta diffusa sia al Nord che al Sud, con la Calabria prima in classifica (28.2%), seguita da quattro regioni del Nord (Emilia - Romagna, Veneto, Piemonte e Lombardia) con capacità produttiva simile (10%) (Tab. 3).

Tabella 3. Produzione percentuale regionale di energia elettrica (GWh) da FORSU e altre biomasse solide, nel 2018.

| FORSU (tot. 2404 GWh) | Altre biomasse (tot. 4158,3 GWh) |
|---------------------------|--|
| Lombardia: 38,4% | Calabria: 28,2 % |
| Emilia Romagna: 13,9 % | Emilia Romagna: 13,6 % |
| Campania: 13,9 % | Veneto: 10,9 % |
| Piemonte: 8,3 % | Piemonte: 10,7 % |
| Lazio: 6,4 % | Lombardia: 10,3 % |
| Puglia: 4% | Puglia: 8,6 % |
| Veneto: 3% | Sicilia: 3,7% |
| Toscana: 2,7% | Sardegna: 2,5 % |
| Friuli V.G.: 2,4 % | Lazio: 2,4 % |
| (Trentino) Alto Adige: 2% | Alto Adige: 2,3 % + 0,6 (Trentino) |
| Molise: 1,9% | Umbria: 2,2 % |
| Calabria: 0,9 % | Molise: 2,1 % |
| Sardegna: 0,8 % | Friuli V. G.: 0,8 % |
| Basilicata: 0,3 % | Toscana: 0,6 % |
| Marche: 0,1 % | Abruzzo = Basilicata = Campania: 0,2 % |

Sulla base di queste osservazioni, appare chiaro che la “filiera FORSU” e quella che impiega altri tipi di biomasse solide risultano due realtà abbastanza distinte che andrebbero trattate separatamente.

7.3 Panoramica sulla filiera dei bioliquidi

In Figura 9 sono riportate tutte le fasi della filiera dei biocombustibili liquidi. Le fasi relative alla produzione di calore che, in questo lavoro, non sono oggetto di studio, sono evidenziate da un rettangolo grigio.

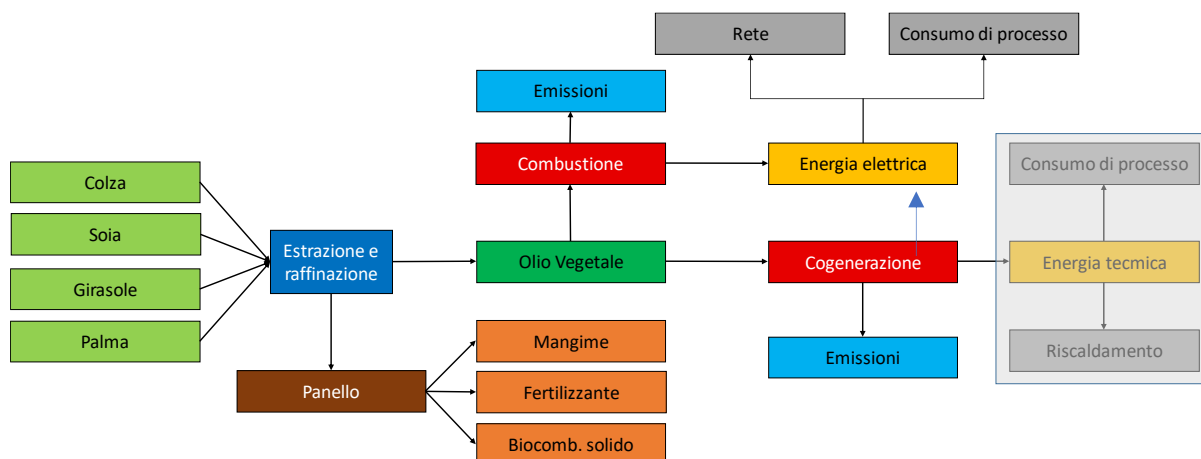


Figura 9. Fasi della filiera dei biocombustibili liquidi. Le fasi escluse dall’analisi sono coperte con un rettangolo grigio.

I dati GSE indicano un consumo complessivo di 937.763 tonnellate di bioliquidi sostenibili per la produzione di energia elettrica in Italia; il 60% di questi è rappresentato dall’olio di palma, seguito da oli e grassi animali (15%) e poi da altri oli di origine vegetale, quali olio di soia, olio di colza, derivati da oli vegetali e olio di girasole (Fig. 10).

Circa il 60% dei bioliquidi impiegati in Italia viene lavorato nel Sud-est asiatico (Indonesia e Malesi) da materie prime locali. Il 31,6% dei bioliquidi viene lavorato in Italia, e ha generalmente origine in Italia. Una quota inferiore al 10% proviene da altri Paesi extra UE.

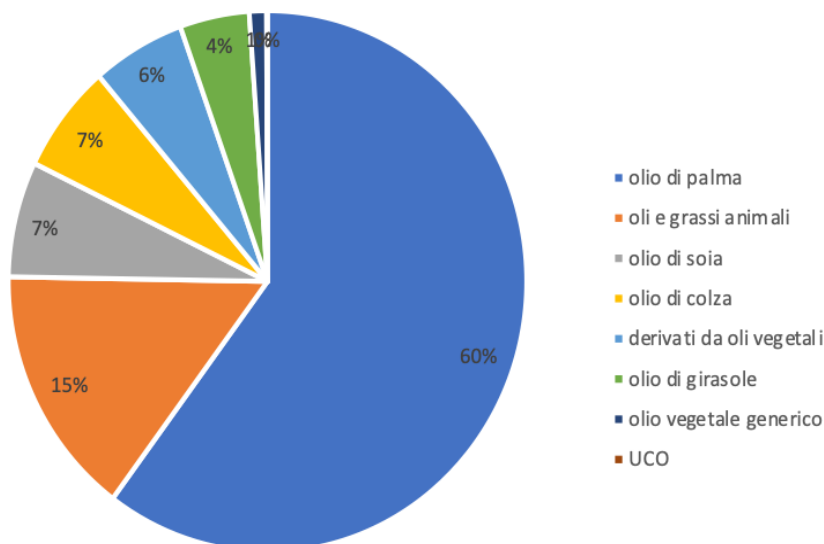


Figura 10. Consumi di bioliquidi sostenibili in Italia per tipologia.

Per quanto riguarda la potenza media degli impianti e il numero di impianti, emerge che quelli alimentati a oli vegetali grezzi sono generalmente più grandi (1,01 MW, Tabella 4) di quelli che utilizzano altri bioliquidi (0,56 MW, Fig. 11.a). A questo corrisponde anche una diversa produzione di energia elettrica: l'82% dell'energia elettrica prodotta da bioliquidi sostenibili (3.503,7 GWh su un totale di 4.290,7 GWh) è generata da oli vegetali grezzi (Fig. 11).

Tabella 3. Numerosità e potenza impianti italiani a bioliquidi sostenibili, anno 2018

| | numero impianti | Potenza totale (MW) | Potenza media (MW) |
|---------------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| oli vegetali grezzi | 403 | 405,4 | 1,01 |
| altri bioliquidi | 79 | 44,1 | 0,56 |

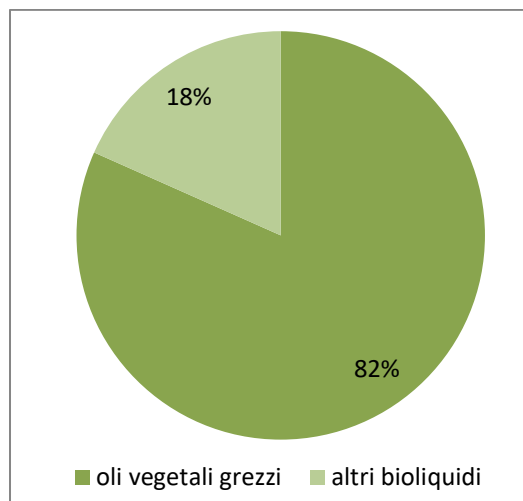


Figura 11. Energia elettrica (GWh) da bioliquidi, prodotta nel 2018

Infine, il rapporto GSE mostra che per il 2018 la produzione di energia elettrica da biocombustibili liquidi avviene principalmente nel Sud Italia e nelle isole (49%), seguito dalle regioni del Nord Italia (42%), come mostrato in Fig. 12. La regione italiana che presenta una maggiore produzione di energia elettrica da bioliquidi è la Puglia (952 kWh, pari al 22% del totale), seguita da Campania (743 kWh, 17% del totale) ed Emilia Romagna (652 kWh, 15% del totale); le altre regioni contribuiscono con percentuali inferiori al 10% (Friuli Venezia Giulia, Veneto, Lombardia e Sardegna) o al 5% (Lazio, Basilicata, Provincia Autonoma di Bolzano, Piemonte, Abruzzo, Toscana, Umbria, Provincia Autonoma di Trento, Molise, Marche, Liguria, Calabria, Valle d'Aosta, Sicilia) (Fig. 13).

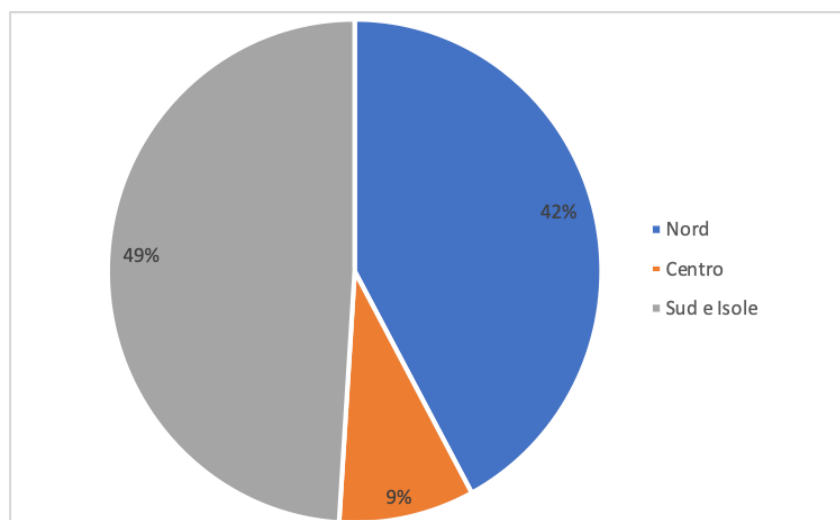


Figura 12. Distribuzione della produzione elettrica da bioliquidi per macro-aree in Italia nel 2018.

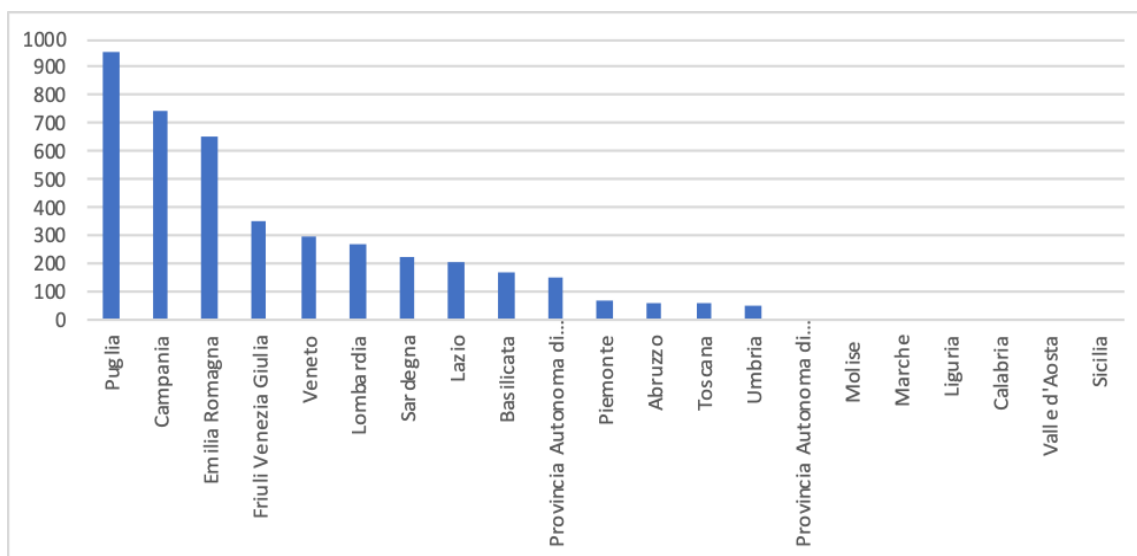


Figura 13. Produzione elettrica da bioliquidi per regione nel 2018.

7.4 Preparazione degli inventari per le filiere biomasse solide, biogas e bioliquidi

A questa prima indagine conoscitiva è seguita una fase di ricerca più approfondita, effettuata con l'ausilio di questionari *ad hoc* (inventari). I primi inventari preparati sono stati incentrati sul tipo di impianto più comunemente impiegato (per la produzione di energia elettrica da biomasse solide, biogas e bioliquidi) e suddivisi sia per dimensione dell'impianto (grande, medio e piccolo) che per regione/macro-area.

In dettaglio, i dati sugli impianti richiesti negli inventari riguardano:

- la tipologia di impianto: es. tecnologia, cogenerazione, potenza, rendimento, ore/gg di attività annuali ecc.;
- i flussi materiali: es. quali e quante biomasse, emissioni e rifiuti ecc.;
- i flussi energetici: es. quanta energia si consuma nel processo e quanta se ne produce;
- i sistemi di ricezione e stoccaggio delle materie prime (es. biomasse in entrata), dei prodotti e dei co-prodotti;
- gli eventuali trattamenti pre- e post-produzione.

Tutti i flussi, in entrata ed uscita, riportati negli inventari sono stati riferiti alla produzione di 1 kWh di energia elettrica, scelta come unità funzionale. Inoltre, per ogni dato è stata prevista anche l'indicazione della fonte, in modo da poterne stabilire la qualità e il potenziale utilizzo per studi di LCA affidabili.

A partire dai dati ottenuti mediante questo primo tipo di inventario, saranno predisposti nuovi inventari di approfondimento, così da ottenere una banca dati completa, in grado di analizzare le filiere delle bioenergie in modo esaustivo.

In particolare, i successivi inventari saranno focalizzati sulle biomasse che risultano più utilizzate e le informazioni richieste riguarderanno principalmente:

1. la raccolta: es. macchinari per la raccolta, carburante consumato ecc.;

2. la provenienza e il trasporto: es. luogo di produzione, distanza media dal punto di produzione della biomassa all'impianto di conversione; veicolo *-tipo, categoria Euro, capacità, carburante impiegato e consumato* - più comunemente utilizzato.

Nel caso in cui dagli inventari sugli impianti emergerà che le biomasse da colture dedicate sono utilizzate in modo significativo, saranno predisposti inventari interamente dedicati alla produzione di tali biomasse.

Per la ricerca dei dati da inserire nell'inventario ci si sta avvalendo della collaborazione di colleghi ENEA esperti in bioenergie.

Ulteriori informazioni sui flussi elementari delle filiere selezionate potranno essere ricavate da articoli scientifici e riviste specializzate, banche dati, comunicazioni ambientali di prodotto, rapporti ambientali e risultati di progetti (soprattutto se sviluppati a livello di filiera). In aggiunta, se necessario, tali informazioni saranno integrate con stime di esperti del settore e con dati forniti da associazioni di categoria o aziende rappresentative del contesto italiano.

8 Conclusioni

Lo scopo principale di questa analisi resta l'identificazione e la validazione dei flussi a supporto della costruzione di una banca dati italiana LCA. Questa banca dati, aggiornata con dati relativi al territorio nazionale, sia per quanto riguarda l'approvvigionamento delle biomasse sia per l'identificazione delle tecnologie di conversione, consentirà l'implementazione di analisi LCA sito-specifiche affidabili in modo da supportare efficacemente i decisori politici verso strategie green.

Per ciascuna filiera energetica da biomassa saranno identificati i principali flussi in ingresso e in uscita, al fine di quantificare i potenziali impatti ambientali e di identificare i principali hotspot.

Bibliografia

Bentsen N.S., Møller I.M., 2017. Solar energy conserved in biomass: Sustainable bioenergy use and reduction of land use change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 71, 954-958.

Bruckner T., Bashmakov I.A., Mulugetta Y., Chum H., de la Vega Navarro A., Edmonds J., et al, Energy systems. In: Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., et al (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2014, pp. 511–597.

COM (2014)15 final. Quadro per le politiche dell'energia e del clima per il periodo dal 2020 al 2030. Link: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:IT:PDF> (ultimo accesso, 6 luglio 2020).

COM (2016) 767 final/2. Proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione). Link: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=IT> (ultimo accesso, 6 luglio 2020).

Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. Link: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2011/03/28/011G0067/sg> (ultimo accesso, 6 luglio 2020)

Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques.

Direttiva 2009/28/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili e recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. Link: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32009L0028> (ultimo accesso, 6 luglio 2020).

Direttiva 2018/2001/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione). Link: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex:32018L2001> (ultimo accesso, 6 luglio 2020).

Ekvall T., Assefa G., Björklund A., Eriksson O., Finnveden G., 2007. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management* 27, 989–996.

Fiorentino G., Ripa M., Mellino S., Fahd S., Ulgiati S., 2014. Life Cycle Assessment of Brassica carinata biomass conversion to bioenergy and platform chemicals. *Journal of Cleaner Production*, 66:174-187.

Fiorentino G., Ripa M., Ulgiati S., 2017. Chemicals from biomass: technological versus environmental feasibility. A review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 11, 195-214.

Florio C., Fiorentino G., Corcelli F., Ulgiati S., Dumontet S., Güsewell J., Eltrop L., 2019. A Life Cycle Assessment of Biomethane Production from Waste Feedstock Through Different Upgrading Technologies. *Energies* 12(4), 718-729.

Giampietro, M., Ulgiati, S., 2005. Integrated assessment of large-scale biofuel production, *CRC Crit. Rev. Plant. Sci.* 24, 365_384.

Giampietro M., Ulgiati S., Pimentel D., 1997. Feasibility of Large-Scale Biofuel Production. Does an enlargement of scale change the picture? *Bioscience* 47, 587-600.

Goyal H.B., Seal D., Saxena R.C., 2008. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 12, 504-517.

Gomiero, T., 2018. Large-scale biofuels production: a possible threat to soil conservation and environmental services, *Appl. Soil Ecol.* 123, 729-736.

GSE (Gestore Servizi Energetici), 2018. <https://www.gse.it/dati-e-scenari/rapporti> e <https://www.gse.it/dati-e-scenari/statistiche>

GSE (Gestore Servizi Energetici), 2019. Rapporto Statistico 2018 sulle fonti rinnovabili. https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/GSE%20-%20Rapporto%20Statistico%20FER%202018.pdf (ultimo accesso 21 ottobre 2020).

IRENA (International Renewable Energy Agency), 2015. Lavagne d'Ortigue O., Whiteman A. and Elsayed S.. Renewable energy capacity statistics 2015. Link: <https://www.irena.org/publications/2015/Jun/Renewable-Energy-Capacity-Statistics-2015> oppure www.irena.org/Publications (ultimo accesso, 6 luglio 2020).

ISO (International Organization for Standardization), 2006a. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Standard ISO 14040. Geneva, Switzerland.

ISO (International Organization for Standardization), 2006b. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Standard ISO 14044. Geneva, Switzerland.

Kan T., Strezov V., Evans T.J., 2016. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 57, 1126-1140.

Kumar D., Singh B., Korstad J., 2017. Utilization of lignocellulosic biomass by oleaginous yeast and bacteria for production of biodiesel and renewable diesel. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 73, 654–671.

Lamers P., Hamelinck C., Junginger M., Faaij A., 2011. International bioenergy trade—A review of past developments in the liquid biofuel market. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 15, 2655-2676.

Menon V., Rao M., 2012. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Progress in Energy and Combustion Science* 38, 522-550.

Nakada S., Saygin D., Gielen D., 2014. Global bioenergy: supply and demand projections. A working paper for REmap 2030.

http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/1409_IRENA_-_REmap_2030_Biomass_paper_2014.pdf.

Nazioni Unite, 2007. Rapporto all'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, agosto 2007, Jean Zigler, Relatore Speciale delle Nazioni Unite per il diritto al cibo, 22 agosto 2007, No. A/62/289.

REN21, Renewables 2015 Global Status Report, 2015. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf.

Ripa M., Buonauro C., Mellino S., Fiorentino G., Ulgiati S., 2014. Recycling Waste Cooking Oil into Biodiesel : A Life Cycle Assessment. *International Journal of Performability Engineering* 10(4), 347–356.

Russo D., Dassisti M., Lawlor V., Olabi A.G., 2012. State of the art of biofuels from pure plant oil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 16(6), 4056-4070.

Sánchez Ó.J., Cardona C.A., 2008. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology* 99, 5270-5295.

Schmid A., Dordick J.S., Hauer B., Kiener A., Wubbolts M., Witholt B., 2001. Industrial biocatalysis today and tomorrow. *Nature* 409, 258-268.

Sheldon R.A., 2011. Utilisation of biomass for sustainable fuels and chemicals: Molecules, methods and metrics, *Catalysis Today* 167, 3–13.

Sun Y., Cheng J., 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology* 83(1), 1-11.

United Nations, 2007. Rapporto all'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, agosto 2007, Jean Zigler, Relatore Speciale delle Nazioni Unite per il diritto al cibo, 22 agosto 2007, No. A/62/289.

Wettstein S.G., Alonso D.M., Gürbüz E.I., Dumesic J.A., 2012. A roadmap for conversion of lignocellulosic biomass to chemicals and fuels. *Current Opinion in Chemical Engineering* 1, 218-224.

Yousuf A., 2012. Biodiesel from lignocellulosic biomass – Prospects and challenges. *Waste Management* 32, 2061–2067.

Zucaro A., Forte A., Fagnano M., Bastianoni S., Basosi R., Fierro A., 2015. Comparative Attributional Life Cycle Assessment of Annual and Perennial Lignocellulosic Feedstocks Production Under Mediterranean Climate for Biorefinery Framework. *Integrated Environmental Assessment and Management* 11 (3), 397-403.

Zucaro A., Fiorentino G., Ulgiati S., 2020. Constraints, impacts and benefits of lignocellulose conversion pathways to liquid biofuels and biochemicals. In: ABU Yousuf A., Pirozzi D., Sannino F. (eds), *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*. Elsevier Academic Press. pp. 249-282. (ISBN: 978-0-12-815936-1).

Zucaro, A., Forte, A., Fierro, A., 2018. Life cycle assessment of wheat straw lignocellulosic bio-ethanol fuel in a local biorefinery prospective. *Journal of Cleaner Production*. 194, 138-149.

AGROALIMENTARE

EDILIZIA COSTRUZIONI

ENERGIA

LEGNO ARREDO

ISBN 978-88-8286-517-7



enea.it