
**XIV Convegno della rete Italiana LCA
IX Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA**

**La sostenibilità della LCA tra sfide globali e
competitività delle organizzazioni**

**Cortina d'Ampezzo
9-11 dicembre 2020**

A cura di Erika Mancuso, Sara Corrado, Arianna Dominici Loprieno, Laura Cutaia

1222 • 2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

ENEA

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

Rete Italiana LCA



La sostenibilità della LCA tra sfide globali e competitività delle organizzazioni

ATTI
del XIV Convegno della rete Italiana LCA -
IX Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA

Cortina d'Ampezzo
9-11 dicembre 2020

A cura di Erika Mancuso, Sara Corrado, Arianna Dominici Loprieno, Laura Cutaia

La sostenibilità della LCA tra sfide globali e competitività delle organizzazioni

Atti del del XIV Convegno della rete Italiana LCA - IX Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA
Cortina d'Ampezzo 9-11 dicembre 2020

A cura di Erika Mancuso, Sara Corrado, Arianna Dominici Loprieno, Laura Cutaia

ISBN: 978-88-8286-416-3

2021 ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Copertina: Flavio Miglietta

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - Centro Ricerche Frascati

Comitato Scientifico	5
Comitato Organizzatore.....	7
Programma	8
SESSIONE I - Sostenibilità Agroalimentare	17
Impronta ambientale delle soluzioni di confezionamento del Grana Padano DOP	18
Analisi dell’impatto ambientale della produzione di carne bovina in un sistema di allevamento semi-intensivo in Paraguay.....	27
Sviluppo di un database italiano di Life Cycle Inventory dei prodotti agroalimentari: la metodologia	37
Assessment of carbon footprint of Italian red wines	46
Lo stoccaggio di carbonio organico nei suoli come indicatore addizionale negli studi di Product Environmental Footprint: il modello RothC applicato a un uliveto biologico in Italia	56
La definizione dei sistemi di prodotto di riferimento negli standard ISO 14000: applicazione nel Passaporto Ambientale per i prodotti agroalimentari della Montagna Vicentina	65
Impatto ambientale della coltivazione in pieno campo della canapa industriale (Cannabis sativa L.): valutazione di differenti itinerari tecnici.....	75
Profili ambientali di prodotti Made in Italy.....	84
SESSIONE I – poster	96
LCA as a tool for measuring Sustainable Development Goals for food and biowaste. A review.....	97
Commodity Life Cycle Costing: un nuovo approccio per valutare l’uso delle risorse naturali nel corso del ciclo di vita	114
LCA approach for the C&D waste management system in different countries of the world.....	125
Measuring circularity in the tourism sector: a step forward.....	134
Emissioni provenienti dall’allevamento suinicolo: valutazione dell’impatto ambientale considerando l’utilizzo di uno scrubber per il trattamento dell’aria.....	146
LCA methodology application to assess the environmental impact of CCS and CCU: a review	155
An environmental life cycle assessment of paints and varnishes in the Italian production process.....	165
SESSIONE II - Sostenibilità nella Gestione dei Rifiuti.....	174
Influenza della tipologia di sacchetto nella valutazione LCA della filiera di gestione del rifiuto organico.....	175
Life Cycle Assessment della pirolisi di biomasse residuali dal settore agro – alimentare	185
Technical functionality as a basis for developing substitution coefficients in waste management Life Cycle Assessment studies	195
Environmental impacts evaluation of a ceramic industry processes through integration of Life Cycle Assessment and Risk Assessment	204

How can Life Cycle Assessment contribute to circular economy transition: hints from sustainability transition research.....	214
SESSIONE III - Sostenibilità in Edilizia	223
Life Cycle Assessment e monetizzazione degli impatti come strumenti di supporto alle politiche di circular economy nel settore edilizio.....	224
L'analisi LCA a supporto della sostenibilità delle imprese: prodotti edilizi in laterizio	234
Valutazione dei tempi di ritorno energetici e ambientali e della convenienza economica per la riqualificazione energetica di una scuola	245
Assessing maritime transport through LCA and LCC: a literature review	256
Life cycle assessment of AlTiN thin films deposited by magnetron sputtering	266
LCA di diverse configurazioni realizzative per un impianto fotovoltaico piano con moduli ad eterogiunzione.....	275
SESSIONE IV - Sostenibilità Circolare	285
Sviluppo della prima RCP nell'ambito dello schema "Made Green in Italy"	286
LCA-based material selection in the early stages of design: environmental benefits, tools, obstacles and opportunities	296
The new Guidelines for Social Life Cycle Assessment of products and related pilot phase: challenges and successes	306
Towards an LCA-based market incentive mechanism regulated through blockchain for carbon emissions reduction	313
Carbon footprint di uno stand espositivo	323
Valutazione preliminare in ottica di ciclo di vita della fattibilità di una filiera italiana del riciclaggio delle batterie elettriche per autotrazione	333
SESSIONE II - poster.....	342
Approcci LCA per la verifica di Tecnologie Reversibili per il riuso, la rigenerazione e il riciclo.....	343
Analisi di esperienze applicative LCA di edificio: differenze, complementarità, sinergie.....	353
A green chemistry case study: sensor-based methods for bioactive compounds determination in food	363
Circularità e sostenibilità nella digestione anaerobica	372
Comparative LCA of fossil fuels and biofuels use for transportation – A literature review	381
Life cycle inventories for modelling the production of battery electric vehicles in the European life cycle assessment studies	392
Do PCRs and EPDs need to be improved? Critical issues to EPD system with a focus on the construction sector	402
SESSIONE III – poster	411
Social Organizational Life Cycle Assessment (SO-LCA): un caso studio focalizzato sulla comunità locale	412
Analisi di letteratura e aspetti metodologici per LCA di batterie stazionarie.....	419
Long-term prospective LCA of emerging photovoltaics	429

Dalla PCR alla EPD: il percorso di sostenibilità dell'attività estrattiva del calcare micronizzato di Gola della Rossa Mineraria (Ancona)	437
L'utilizzo del Life Cycle Assessment nel settore della ristorazione. Una revisione sistematica della letteratura	446
Carbon footprint implications of using seawater and marine aggregates in concrete	459
Analisi del ciclo di vita del kWh Italiano	468
Evidences of human health damage mitigation associated with the Italian lockdown due to COVID-19 through the lens of energy metabolism assessment	479
Banca dati Italiana LCA: creazione di dataset sul mix elettrico nazionale	493
Performing a fast and effective Global Sensitivity Analysis using Python: a simplified example applied to the LCA of Italian electricity generation scenarios	503
Modeling combined heat and power plants in Life Cycle Assessment: a comparison among different approaches to deal with multifunctionality	515
PREMIO GIOVANI RICERCATORI.....	527
Temporal variability and Battery Electric Vehicles influence on LCA impacts of marginal electricity consumption in Italy	528
LCA- and LCC-based Solar Home Systems ecodesign	538

Life Cycle Assessment della pirolisi di biomasse residuali dal settore agro – alimentare

Maria Anna Cusenza^{1*}, Maurizio Cellura¹, Sonia Longo¹, Antonio Messineo²,
Marina Mistretta³, Maurizio Volpe²

¹Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo

²Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università di Enna – Kore

³Dipartimento Patrimonio, Architettura, Urbanistica (P.A.U.), Università degli Studi

Mediterranea di Reggio Calabria

Email*: mariaanna.cusenza@unipa.it

Abstract

Il presente studio si propone di valutare gli impatti energetico - ambientali connessi al processo di pirolisi di rifiuti agro – alimentari attraverso l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment seguendo un approccio dalla culla al cancello. Il sistema analizzato consiste in un reattore di pirolisi al quarzo a letto fisso realizzato a scala di laboratorio. L'unità funzionale per l'analisi è 1 MJ di energia termica potenzialmente generata dalla combustione del bio-char prodotto dalla pirolisi di residui della potatura di olivi e dei residui della spremitura delle arance a tre diverse temperature (400 °C, 500 °C e 650 °C). Lo studio fornisce un ampio set di indicatori ambientali e identifica gli hot spot del processo esaminato. I risultati ottenuti possono costituire un supporto scientifico nella valutazione delle strategie di gestione dei rifiuti conformi ai principi dell'economia circolare e nell'eco-design degli impianti di pirolisi.

1. Introduzione

Garantire l'approvvigionamento di energia pulita e sicura e realizzare un'economia circolare sono elementi prioritari della strategia delineata nel Green Deal Europeo che ha l'obiettivo di annullare le emissioni nette di gas a effetto serra (GHG) entro il 2050 e disaccoppiare la crescita economica dall'uso delle risorse e dalla produzione di rifiuti (European Commission, 2019, 2018).

In questo contesto, i processi di termovalorizzazione dei rifiuti (Waste to Energy - WtE) stanno acquisendo un interesse crescente nella comunità scientifica, essendo pratiche coerenti con il piano d'azione per l'economia circolare e in grado di contribuire, nel contempo, al conseguimento degli obiettivi della politica energetica e climatica dell'Unione Europea (European Commission, 2017; Vamvuka, 2011). I processi di termovalorizzazione includono il co-incenerimento dei rifiuti in impianti di combustione, l'incenerimento di rifiuti in impianti dedicati, la digestione anaerobica dei rifiuti biodegradabili, l'incenerimento indiretto a seguito di pirolisi o gassificazione, ecc. (European Commission, 2017). Tra le tecnologie disponibili, la pirolisi dei rifiuti sta ricevendo una crescente attenzione (Kim et al., 2020). Il processo di pirolisi prevede la decomposizione termica di

materiali organici a temperature comprese tra 400 e 800 °C in assenza di ossigeno o in atmosfera inerte e la sua conversione in un prodotto liquido (bio-olio), un prodotto solido (bio-char) e un prodotto gassoso (syngas) contenente metano, idrogeno, anidride carbonica e monossido di carbonio. Rispetto agli altri trattamenti termochimici la pirolisi ha una temperatura di processo più bassa e causa minori emissioni di inquinanti atmosferici come i difenileteri polibromurati, presenta una maggiore flessibilità nelle dimensioni dell'impianto e fornisce l'opportunità di trasformare materiali a bassa densità energetica in biocarburanti ad alta densità energetica e sostanze chimiche di elevato valore (Czajczyńska et al., 2017). Un'analisi di letteratura effettuata ha evidenziato che pochi studi hanno valutato gli impatti ambientali connessi al processo di pirolisi delle biomasse residuali (Fernandez-Lopez et al., 2015; Parascanu et al., 2018; Wang et al., 2020). Tra gli studi esaminati, solo Parascanu et al. (2018) hanno eseguito una valutazione del ciclo di vita del trattamento di pirolisi delle biomasse.

In questo contesto, il presente lavoro descrive l'applicazione della Life Cycle Assessment (LCA) al processo di pirolisi eseguito alle temperature di 400° C, 500° C e 650° C di biomasse residuali del settore agro – alimentare. Lo studio fornisce un ampio set di indicatori di impatto energetico e ambientale e individua gli hot spot del sistema in esame. I risultati ottenuti possono supportare le strategie di gestione delle biomasse residuali in un'ottica di economia circolare e l'eco-design dei sistemi di pirolisi a scala industriale.

2. Descrizione del sistema di prodotto

Il sistema esaminato è un reattore di pirolisi a letto fisso realizzato a scala di laboratorio e installato presso l'università "Kore" di Enna. Il reattore è costituito da un cilindro in quarzo di 340 mm di lunghezza e 20 mm di diametro. Il reattore al quarzo viene riscaldato da un forno elettrico. La velocità di riscaldamento è pari a 50 °C/minuto, mentre il tempo di reazione a temperatura costante è di 30 minuti (pirolisi lenta). Il reattore, chiuso da un solo lato, presenta un'estremità aperta in cui è inserito un tappo in quarzo dotato di un tubo interno di 8 mm di diametro attraverso il quale, durante la reazione di pirolisi, il gas inerte (azoto) fluisce all'interno del reattore alla velocità di 1,5 L/minuto. Il processo di pirolisi produce un residuo solido (bio-char) che si deposita sul reattore e gas e vapori condensabili che escono dal reattore attraverso un braccio laterale di 8 mm di diametro. Quest'ultimi sono convogliati verso due trappole fredde in cui avviene la loro condensazione in bio-olio. Una camicia di riscaldamento in alluminio mantiene i gas e i vapori in uscita dal reattore alla temperatura costante di circa 180 °C per prevenirne la condensazione prima del raggiungimento delle trappole fredde. La prima trappola consiste in un tubo ad U immerso in un bagno di acqua/glicole etilenico e ghiaccio secco e raggiunge una temperatura di circa -30 °C; la seconda trappola consiste in un tubo di vetro che è mantenuto alla temperatura di -30 °C da un gruppo frigorifero. A valle della seconda trappola è posizionato un filtro in lana di roccia che raccoglie il bio-olio che non si è condensato nelle trappole. Un gorgogliatore ad acqua è posto all'estremità del sistema per garantire il corretto flusso di gas al suo interno. I gas non condensati vengono scaricati attraverso una cappa di scarico. Alla fine del processo le due

trappole vengono pulite con una soluzione a base di cloroformio e metanolo. Le particelle di bio-olio trattenute nella lana di roccia sono recuperate mediante un evaporatore rotativo.

3. Applicazione della metodologia LCA al caso studio

a. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Lo studio ha l'obiettivo di stimare gli impatti energetico – ambientali connessi al processo di pirolisi di residui agro – alimentari e di identificare i processi responsabili del maggior contributo agli impatti. L'analisi è stata effettuata tramite la metodologia LCA in accordo agli standard ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b).

Gli esperimenti di pirolisi sono eseguiti alle temperature di 400 °C, 500 °C e 650 °C. Ad ogni ciclo di pirolisi sono caricati nel reattore circa 10 g di biomassa residuale che nelle condizioni operative esaminate forniscono in uscita 0,6 g di bio-char, 0,3 g di bio-olio e 0,1 g di gas e vapori non condensati. Pertanto, il processo esaminato è multifunzionale.

L'unità funzionale (UF) selezionata per lo studio è 1 MJ di energia termica potenzialmente generata dalla combustione del bio-char prodotto dal processo pirolisi dei residui della potatura di olivi (RPO) e dai residui della spremitura delle arance (RSA) nelle condizioni operative esaminate.

Nella Tabella 1 si riportano i flussi di riferimento necessari ad ottenere l'U.F. corrispondenti ad ogni configurazione esaminata, calcolati sulla base dei poteri calorifici superiori misurati in laboratorio.

Tabella 1. Flussi di riferimento

Temperatura di pirolisi (°C)	RPO (kg)	RSA (kg)
400	3,6E-02	3,2E-02
500	3,8E-02	3,1E-02
650	4,1E-02	3,2E-02

L'analisi segue un approccio "dalla culla al cancello". I confini del sistema includono il trasporto della biomassa residuale al laboratorio, i pretrattamenti consistenti nell'essiccazione e la triturazione della biomassa, il processo di pirolisi, il trattamento di fine vita dei rifiuti di processo e la fase di costruzione del reattore. Per quanto riguarda la fase di trasporto, si è ipotizzata una distanza di approvvigionamento di 100 km. Con riferimento alla gestione della multifunzionalità, in una prima analisi i carichi ambientali sono stati attribuiti interamente al bio-char poiché è il prodotto principale del sistema di laboratorio in esame. Tuttavia, allo scopo di valutare l'influenza di queste assunzioni sui risultati ottenuti è stata effettuata un'analisi di sensibilità considerando due scenari di trasporto caratterizzati da distanze di approvvigionamento (DA) pari a

200 km (DA200) e 300 km (DA300), mentre con riferimento alla gestione della multifunzionalità è stato analizzato uno scenario in cui gli oneri ambientali sono ripartiti tra bio-char e bio-olio in base ai corrispondenti poteri calorifici superiori.

Le categorie di impatto selezionate per la valutazione delle prestazioni energetico – ambientali sono: consumo di energia primaria (CED), riscaldamento globale potenziale (GWP), assottigliamento dello strato di ozono (ODP), tossicità umana – effetti non cancerogeni (HT-nc), tossicità umana – effetti cancerogeni (HT-ce), particolato atmosferico (PM), radiazioni ionizzanti – effetti sulla salute umana (IR – hh), radiazioni ionizzanti – effetti sull’ambiente (IR – e), formazione di ossidanti fotochimici (POFP), acidificazione potenziale (AP), eutrofizzazione terrestre (EU_T), eutrofizzazione delle acque dolci (EU_F), eutrofizzazione delle acque marine (EU_M), ecotossicità delle acque dolci (E_{FW}), consumo di risorse minerali, fossili e rinnovabili (MFFRD).

La stima del consumo di energia primaria è stata effettuata impiegando il metodo Cumulative Energy Demand (CED) (Frischknecht et al., 2007) mentre gli impatti ambientali sono stati stimati attraverso il metodo ILCD 2011 Midpoint con le eccezioni delle categorie di impatto "Uso del suolo" e "Impoverimento delle risorse idriche" che sono escluse a causa dell’elevata incertezza dei dati di inventario (JRC European commission, 2011).

b. Analisi di inventario

Per l’analisi di inventario sono stati utilizzati dati primari e secondari. In particolare, gli input dei processi di foreground, in termini di consumo di energia e materie prime, sono stati raccolti in laboratorio. I dati relativi agli eco – profili di tutti gli input di processo (processi di background) sono stati tratti dal database ambientale Ecoinvent 3.6 (Wernet et al., 2016) e sono riferiti al contesto italiano, quando possibile, o a quello europeo.

c. Valutazione degli impatti energetico – ambientali e interpretazione dei risultati

Gli impatti energetico – ambientali associati all’UF per ogni tipologia di biomassa e per ogni temperatura di pirolisi considerate sono riportate nella Tabella 2.

Tabella 2: Impatti energetico – ambientali riferiti all’UF

Categorie di impatto	<u>RPO - 400°C</u>	<u>RPO - 500°C</u>	<u>RPO - 650°C</u>	<u>RSA - 400°C</u>	<u>RSA - 500°C</u>	<u>RSA - 650°C</u>
CED (MJ)	9,20E+01	9,60E+01	1,10E+02	8,10E+01	8,00E+01	8,30E+01
GWP (kgCO _{2eq})	5,40E+00	5,70E+00	6,30E+00	4,80E+00	4,70E+00	4,90E+00
ODP (kgCFC-11 _{eq})	7,70E-07	8,10E-07	9,00E-07	6,80E-07	6,70E-07	6,90E-07

Categorie di impatto	<u>RPO - 400°C</u>	<u>RPO - 500°C</u>	<u>RPO - 650°C</u>	<u>RSA - 400°C</u>	<u>RSA - 500°C</u>	<u>RSA - 650°C</u>
HT-nce (CTUh)	2,10E-06	2,20E-06	2,40E-06	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-06
HT-ce (CTUh)	3,90E-07	4,00E-07	4,50E-07	3,40E-07	3,40E-07	3,50E-07
PM (kgPM _{2.5eq})	2,60E-03	2,70E-03	3,00E-03	2,30E-03	2,30E-03	2,40E-03
IR-hh (kBqU ²³⁵ _{eq})	8,00E-01	8,40E-01	9,40E-01	7,10E-01	7,00E-01	7,30E-01
IR-e (CTUe)	2,30E-06	2,40E-06	2,70E-06	2,10E-06	2,00E-06	2,10E-06
POFP (kgNMVOC _{eq})	1,20E-02	1,30E-02	1,40E-02	1,10E-02	1,10E-02	1,10E-02
AP (molH ⁺ _{eq})	4,20E-02	4,40E-02	5,00E-02	3,70E-02	3,70E-02	3,90E-02
EU _T (molN _{eq})	1,20E-01	1,30E-01	1,40E-01	1,10E-01	1,10E-01	1,10E-01
EU _F (kgP _{eq})	1,90E-03	2,00E-03	2,30E-03	1,70E-03	1,70E-03	1,70E-03
EU _M (kgN _{eq})	8,50E-03	8,90E-03	9,80E-03	7,50E-03	7,40E-03	7,60E-03
E _{FW} (CTUe)	9,50E+01	1,00E+02	1,10E+02	8,40E+01	8,30E+01	8,70E+01
MFRRD (kgSb _{eq})	2,10E-04	2,20E-04	2,40E-04	1,90E-04	1,80E-04	1,90E-04

Dall'analisi dei dati emerge che il bio-char ottenuto dalla pirolisi dei residui della spremitura delle arance alla temperatura di 500°C (RSA500) presenta le migliori performance energetico – ambientali rispetto alle altre configurazioni esaminate. Il bio-char ottenuto dalla pirolisi dei residui della potatura degli olivi a 650 °C (RPO650) presenta le peggiori prestazioni energetico - ambientali. In media, gli impatti associati alla configurazione RPO650 sono più elevati degli impatti

associati alla configurazione RSA500 di circa il 35%. Gli impatti associati alla configurazione RPO500 sono in media maggiori del 20% rispetto a quelli della configurazione RSA500. Da ciò ne consegue che la selezione della tipologia di biomassa residuale in ingresso è fondamentale per ottenere maggiori benefici energetico – ambientali dall'impiego di questa tecnologia.

Per ciascuna tipologia di biomassa esaminate si registrano variazioni trascurabili (minori del 5%) degli impatti energetico - ambientali al variare della temperatura di pirolisi nel range esaminato (400 – 650 °C).

Per un'analisi più dettagliata del sistema esaminata, nella Figura 1 è rappresentata l'incidenza dei diversi processi sugli impatti totali. I dati riportati sono relativi alla configurazione RSA500 e sono rappresentativi di tutti i casi esaminati. Dall'analisi dei dati emerge che la fase operativa è responsabile del maggior contributo in tutte le categorie di impatto esaminate, la sua incidenza varia dal 44% (CED) al 91% (EU_T). Il trasporto della biomassa incide con percentuali variabili tra il 4% (EU_T e EU_M) e il 36% (MFRRD). Inoltre, il trasporto è responsabile di un impatto non trascurabile sulle seguenti categorie: IR-e (20%), ODP (18%) e POFP, GWP e PM (17%). La costruzione dell'impianto presenta un contributo non trascurabile (34%) sulla HT-nce, mentre il trattamento delle acque reflue presenta un'incidenza significativa sull'EU_M (48%), sul CED (45%) e sulla HT-nce (30%).

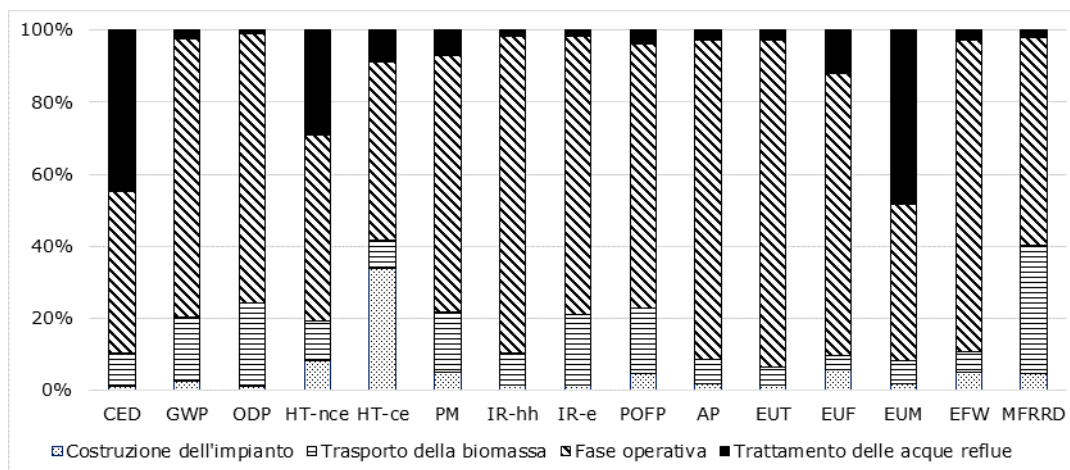


Figura 1: Impatti ambientali del ciclo di vita - Analisi dei contributi

Nella Figura 2 è rappresentata l'analisi dettagliata degli impatti associati alla fase operativa del processo di pirolisi dei residui di spremitura delle arance alla temperatura di 500°C. L'analisi evidenzia che l'energia elettrica (EE) consumata nell'evaporatore rotativo presenta un contributo significativo in tutte le categorie di impatto esaminate. Il processo di pirolisi incide con percentuali che variano dall'11% (MFRRD) al 20% (EU_T e AP). Il ghiaccio secco utilizzato nella prima trappola di raffreddamento causa un contributo rilevante (maggiore del 20%) in diverse categorie di impatto (MFRRD, HT-nce, HT-ce, EU_F, GWP, IR-hh e IR-e). In particolare, esso è responsabile di circa il 50% dell'impatto sulla categoria MFRRD. Complessivamente, il contributo dell'impatto associato all'elettricità consumata durante la fase operativa varia dal 50% (MFRRD) al 90% (EU_T).

Pertanto, l'adozione di tecnologie più efficienti e pulite può migliorare notevolmente le prestazioni ambientali del trattamento di pirolisi. Il contributo del cloroformio è rilevante per l'ODP (circa 27%) e trascurabile per le altre categorie esaminate. Il consumo di energia elettrica per l'essiccazione e la triturazione della biomassa, l'acqua utilizzata nel gorgogliatore e la produzione del metanolo causano un contributo trascurabile in tutte le categorie di impatto (inferiore all'1%).

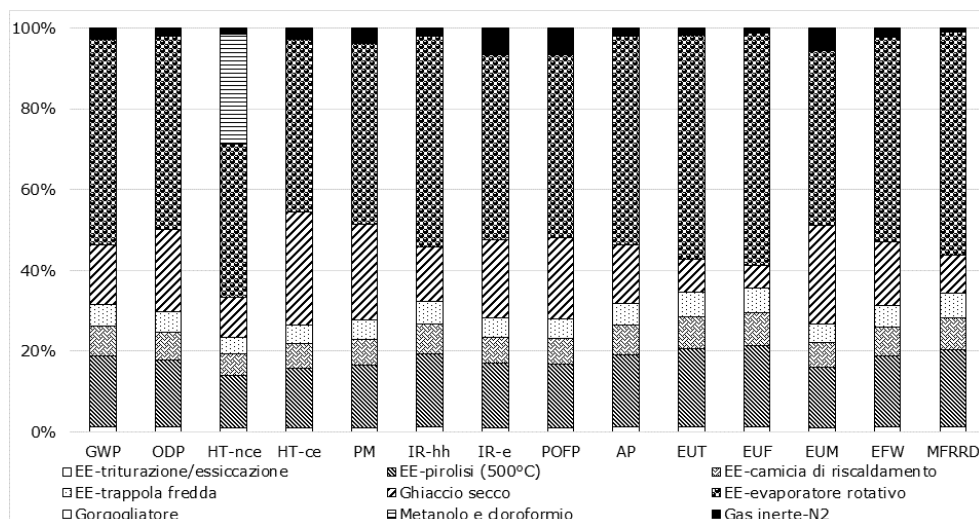


Figura 2: Fase operativa - Analisi dei contributi

d. Analisi di sensibilità

Il processo di pirolisi genera tre co-prodotti: il bio-char, il bio-olio e i gas e vapori non condensati. L'eco-profilo del bio-char è stato determinato ipotizzando che il bio-olio e i gas e vapori non condensati siano dei rifiuti. Al fine di valutare l'incidenza di tale scelta metodologica sui risultati finali, è stata eseguita un'analisi di sensibilità, in cui il bio-olio è stato considerato un co-prodotto mentre i gas e i vapori non condensati, considerata l'esigua quantità prodotta nelle condizioni operative esaminate, sono stati trattati anche in questo caso come rifiuti. La ripartizione dei flussi di materia ed energia in ingresso ai diversi co-prodotti è stata eseguita attraverso un'allocazione basata sui poteri calorifici superiori del bio-char e del bio-olio misurati in laboratorio. La valutazione degli impatti energetico – ambientali effettuata applicando l'allocazione ha evidenziato che gli impatti si riducono, rispetto al caso senza allocazione, di una percentuale pari a circa il 20%. Questo risultato ha evidenziato la necessità di approfondire questo aspetto allo scopo effettuare una modellizzazione che sia rappresentativa del sistema di prodotto esaminato.

Nella Tabella 3 sono illustrati i risultati dell'analisi di sensibilità relativi alla distanza di approvvigionamento. L'analisi mostra che gli impatti ambientali aumentano di percentuali che vanno dal 4% (EUF) fino al 36% (MFRRD) nel caso in cui si assuma una distanza di approvvigionamento di 200 km, e dall'8% (EUF) fino al 71% (MFRRD) nel caso in cui la distanza sia 300 km. Quindi, la distanza di approvvigionamento influisce notevolmente sui risultati ottenuti e suggerisce l'importanza di prevedere l'installazione di impianti a piccola – media scala che possano essere alimentati con biomassa a filiera corta.

Tabella 3: Risultati analisi di sensibilità – Distanza di approvvigionamento

Categoria di impatto	RSA (DA: 100 km)	RSA (DA: 200 km) [%]	RSA (DA: 300 km) [%]
CED (MJ)	8,0E+01	16	33
GWP (kg CO _{2eq})	4,7E+00	18	36
ODP (kg CFC-11 _{eq})	6,7E-07	23	46
HT-nce (CTUh)	1,8E-06	11	22
HT-ce (CTUh)	3,4E-07	8	15
PM (kg PM _{2.5eq})	2,3E-03	17	33
IR-hh (kBq U ²³⁵ _{eq})	7,0E-01	9	18
IR-E (interim) (CTUe)	2,0E-06	20	39
POFP (kg NMVOC _{eq})	1,1E-02	18	36
AP (mol H ⁺ _{eq})	3,7E-02	7	13
EUT (mol N _{eq})	1,1E-01	5	10
EUf (kg P _{eq})	1,7E-03	4	8
EUM (kg N _{eq})	7,4E-03	6	13
EFw (CTUe)	8,3E+01	6	12
MFRRD (kg S _{eq})	1,8E-04	36	71

4. Conclusioni

Lo studio ha riguardato l'analisi degli impatti ambientali di ciclo di vita connessi al processo di pirolisi, alle temperature di 400 °C, 500 °C e 650 °C, dei residui della potatura degli olivi e dei residui della spremitura delle arance.

L'analisi ha riguardato un impianto di pirolisi a scala di laboratorio ed è basata su dati primari raccolti direttamente in laboratorio.

Lo studio ha evidenziato che la qualità della biomassa in ingresso incide sulla qualità del bio-char prodotto. Nel caso studio esaminato gli impatti energetico - ambientali associati alla pirolisi condotta alla temperatura di 500 °C dei residui della potatura degli olivi sono superiori del 20% rispetto agli impatti associati alla pirolisi dei residui della spremitura delle arance eseguita alla stessa temperatura.

Considerata l'elevata incidenza dell'energia elettrica consumata durante la fase operativa, per migliorare la sostenibilità ambientale del sistema in esame è necessario adottare processi e tecnologie più efficienti e aumentare l'uso di fonti energetiche rinnovabili.

L'analisi di sensibilità ha evidenziato che la distanza di approvvigionamento della biomassa influisce in modo significativo sui risultati della valutazione ambientale. Questo risultato suggerisce di ridurre la distanza di approvvigionamento attraverso l'adozione di sistemi di pirolisi localizzati in prossimità di aziende agro-alimentari.

La ricerca è stata svolta nell'ambito del progetto PRIN Bando 2017 - Prot. 20175TXJER, titolo: "Biomasses Circular Holistic Economy APproach to EneRgy equipments (BIO-CHEAPER).

5. Bibliografia

Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A.J., Spencer, N., Jouhara, H., 2017. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Therm. Sci. Eng. Prog.* <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>

European Commission, 2019. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019 COM(2019) 640 final COMMUNICATION. <https://doi.org/10.2307/j.ctvd1c6zh.7>

European Commission, 2018. Circular Economy - Implementation of the Circular Economy Action Plan. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm.

European Commission, 2017. The role of waste-to-energy in the circular economy. *Commun. From Comm. To Eur. Parliam. Counc. Eur. Econ. Soc. Comm. Comm. Reg.* COM(2017) 34.

Fernandez-Lopez, M., Puig-Gamero, M., Lopez-Gonzalez, D., Avalos-Ramirez, A., Valverde, J., Sanchez-Silva, L., 2015. Life cycle assessment of swine and dairy manure: Pyrolysis and combustion processes. *Bioresour. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.140>

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hischer, R., Hellweg, S., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. *Am. Midl. Nat.* 150, 1–151.

ISO, 2006a. ISO 14040: Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework, International Organization for Standardization. <https://doi.org/10.1002/jtr>

ISO, 2006b. ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, International Organization for Standardization.

<https://doi.org/10.1136/bmj.332.7555.1418>

JRC European commission, 2011. ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context, Vasa. <https://doi.org/10.278/33030>

Kim, S., Lee, Y., Andrew Lin, K.Y., Hong, E., Kwon, E.E., Lee, J., 2020. The valorization of food waste via pyrolysis. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120816>

Parascanu, M.M., Puig Gamero, M., Sánchez, P., Soreanu, G., Valverde, J.L., Sanchez-Silva, L., 2018. Life cycle assessment of olive pomace valorisation through pyrolysis. *Renew. Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.027>

Vamvuka, D., 2011. Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes-An overview. *Int. J. Energy Res.* <https://doi.org/10.1002/er.1804>

Wang, J., You, S., Lu, Z., Chen, R., Xu, F., 2020. Life cycle assessment of bio-based levoglucosan production from cotton straw through fast pyrolysis. *Bioresour. Technol.* 307, 123179. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123179>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>