



ATTI

X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA
XV Convegno della Rete Italiana LCA

INNOVAZIONE E CIRCOLARITÀ

Il contributo del *Life Cycle Thinking*
nel Green Deal per la neutralità climatica



22-24 settembre 2021

**Università Mediterranea
di Reggio Calabria**

Via dell'Università, 25
Reggio Calabria



ATTI

X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA
XV Convegno della Rete Italiana LCA

INNOVAZIONE E CIRCOLARITÀ

Il contributo del *Life Cycle Thinking*
nel Green Deal per la neutralità climatica

22-24 settembre 2021

**Università Mediterranea
di Reggio Calabria**

Via dell'Università, 25
Reggio Calabria

© 2022 Associazione Rete Italiana LCA

Publicato da: Associazione Rete Italiana LCA

Data di pubblicazione: 2022

Paese di pubblicazione: Italia

Lingua: Italiano

Formato dell'e-book: PDF

ISBN: 9791221004564



Comitato Scientifico del Convegno

Michela Aresta	Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Reattività Chimica e la Catalisi (CIRCC)
Maurizio Cellura	Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
Laura Cutaia	ENEA, Roma
Monica Lavagna	Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC)
Alessandro Manzardo	Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Centro Studi Qualità Ambiente (CESQA)
Paolo Masoni	Ecoinnovazione srl
Marina Mistretta	Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento Patrimonio Architettura Urbanistica (PAU)
Bruno Notarnicola	Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Dipartimento Jonico in “Sistemi Giuridici ed Economici del Mediterraneo: società, ambiente, culture”
Andrea Raggi	Università degli Studi “G. d’Annunzio” di Chieti-Pescara, Dipartimento di Economia
Lucia Rigamonti	Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA)
Serena Righi	Università di Bologna, Campus di Ravenna, Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) e Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Scienze Ambientali (CIRSA)
Roberta Salomone	Università degli Studi di Messina, Dipartimento di Economia
Antonio Scipioni	Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Centro Studi Qualità Ambiente (CESQA)



Comitato organizzatore

Marina Mistretta	Tesoriera Associazione Rete Italiana LCA - Università Mediterranea di Reggio Calabria
Giacomo Falcone	Università Mediterranea di Reggio Calabria
Patrizia Frontera	Università Mediterranea di Reggio Calabria
Alfio Strano	Università Mediterranea di Reggio Calabria
Anna Irene De Luca	Università Mediterranea di Reggio Calabria
Angela Malara	Università Mediterranea di Reggio Calabria

Segreteria Tecnica del Convegno

Teresa Maria Gulotta	Università degli Studi di Messina
Giovanni Mondello	Università degli Studi di Messina

convegnoretelca2021@gmail.com



PROGRAMMA

22 settembre 2021
mercoledì

14.00 – 15.00 **Registrazione dei partecipanti**

15.00 – 15.30 **Apertura dei lavori e saluti istituzionali**

*Chair: Marina Mistretta, Università Mediterranea di Reggio Calabria,
Associazione Rete Italiana LCA*

Marcello Santo Zimbone

Magnifico Rettore Università Mediterranea di Reggio Calabria

Tommaso Manfredi

Direttore Dip. Patrimonio Architettura Urbanistica Unirc

Laura D'Aprile

Dipartimento per la Transizione Ecologica e gli Investimenti Verdi (Ditei),
Ministero della Transizione Ecologica

Antonio Uricchio

Presidente ANVUR

Alessandro Ruggieri

Presidente AISME, Accademia Italiana di Scienze Merceologiche

Filippo De Rossi

Presidente Associazione Fisica Tecnica Italiana

Bruno Notarnicola

Presidente Associazione Rete Italiana LCA, Università degli Studi Aldo Moro

15.30 – 16.15 **SESSIONE I**

IL LIFE CYCLE THINKING NELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA

Chair: Bruno Notarnicola, Associazione Rete Italiana LCA

Il Life Cycle Thinking applicato alle strategie di crescita dell'idrogeno: sfide e prospettive

- Maurizio Cellura, Università degli Studi di Palermo

Green Deal e Sustainable Development Goals: Il ruolo del settore edile

- Marina Mistretta, Università Mediterranea di Reggio Calabria

Il contributo della metodologia PEF nelle politiche europee per il Green Deal

- Fulvio Ardente, Commissione Europea, Joint Research Centre Ispra

Il Life Cycle Thinking a supporto dello sviluppo di tecnologie per l'accumulo elettrochimico di energia elettrica

- Marco Ferraro, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano (CNR-ITAE), Messina
-

16.15 – 18.00

**SESSIONE II
LCT E CIRCOLARITÀ**

*Chair: Monica Lavagna – Associazione Rete Italiana LCA
Roberta Salomone – Università degli Studi di Messina*

**Circular Bioeconomy metrics and Life Cycle Assessment.
Answers from literature review**

- Federico Gallo, Università degli Studi di Padova

Implementing the Circular Transition Indicators in a global packaging company

- Anna Walker, Università degli Studi di Chieti-Pescara

"Toward carbon neutral urban regeneration: the use of LCA to support competition for innovative, carbon-free and circular architectural projects"

- Anna Dalla Valle, Politecnico di Milano

Strumenti con approccio di ciclo di vita di supporto alle aziende per la scelta di soluzioni circolari: la matrice di valutazione multicriterio

- Benedetta Bellotti, Ecoinnovazione srl

LCA on Carbon Dots: a state-of-the-art evaluation

- Virginia Lama, Università di Bologna

La banca dati italiana LCA BDI-LCA

- Caterina Rinaldi, ENEA
-

18.00 – 18.30

SESSIONE POSTER I

*Chair: Pietro Alexander Renzulli, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro"
Anna Irene De Luca, Università Mediterranea di Reggio Calabria*

Life Cycle Assessment applied to Carbon Dioxide Removal processes: a literature review

- Francesco Pietro Campo, Politecnico di Milano

Analisi delle strategie di riuso e riciclo dei nuovi "critical raw materials"

- Angela Malara, Università Mediterranea di Reggio Calabria

Life Cycle Assessment di batterie stazionarie a ioni-litio nello scenario italiano

- Andrea Temporelli, RSE Ricerca Sistema Energetico, Milano

Riuso del fresato e modificanti: due parametri per la misura della sostenibilità ambientale delle pavimentazioni stradali

- Lucia Capuano, Università degli Studi di Milano Bicocca

Il piano nazionale di ripresa e resilienza in ottica LCA: una valutazione preliminare per sviluppi futuri

- Daniela Camano, Università degli Studi di Padova

Blockchain Technology in Life Cycle Assessment: Opportunities and Current Challenges

- Davide Accordini, Politecnico di Milano
-

18.30 **Welcome Party**



PROGRAMMA

23 settembre 2021
giovedì

8.30 – 9.00 Registrazione dei partecipanti

9.00 – 10.45 SESSIONE III

METODI E STRUMENTI LCT-BASED NEL SETTORE DEI RIFIUTI

Chair: Lucia Rigamonti, Associazione Rete Italiana LCA

Alessandro Manzardo, Associazione Rete Italiana LCA

L'uso di sistemi aeromobili a pilotaggio remoto nel monitoraggio del biogas da discarica: set-up ai fini del miglioramento del profilo ambientale

- Giuseppe Tassielli, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro"

Collecting primary data in WEEE treatment facilities: mission impossible?

- Teresa Maria Gulotta, Università degli Studi di Messina

Analisi di uno strumento di carbon footprint per il compostaggio e la digestione anaerobica

- Eliana Mancini, Università degli Studi di Chieti-Pescara

Life Cycle Costing della Catena di Gestione dei Rifiuti da Costruzione e Demolizione

- Federica Carla Carollo, Politecnico di Milano

Life Cycle Assessment di un fotoreattore di laboratorio UV-C

- Rosa Di Capua, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro"

Thermodynamic rarity assessment of WEEE plant

- Erik Roos Lindgreen, Università degli Studi di Messina
-

10.45 – 11.15 Coffee Break

11.15 – 12.45 SESSIONE IV

EDILIZIA

Chair: Marina Mistretta, Associazione Rete Italiana LCA

Patrizia Frontera, Università Mediterranea di Reggio Calabria

The environmental footprint of buildings at city level: a new assessment tool

- Jacopo Famiglietti, Politecnico di Milano

Materiali isolanti per l'edilizia: uno studio di LCA

- Sonia Longo, Università degli Studi di Palermo

End of Life tool for building product development: the Solar Window Block case study

- Martino Gubert, Eurac Research Bolzano

Reuse in the construction sector: Life Cycle Assessment as a driver tool

- Serena Giorgi, Politecnico di Milano

Sustainability of disruptive innovation – cradle-to-gate LCA of Carbon Reinforced Concrete

- Jane Backes, RWTH Aachen University

LCA in building sector policies

- Monica Lavagna, Politecnico di Milano

12.45 – 13.15

SESSIONE POSTER II

*Chair: Laura Cutaia, Associazione Rete Italiana LCA
Sonia Longo, Università degli Studi di Palermo*

State-of-the-art analysis of environmental assessment studies
on Concentrated Solar Power systems

- Federico Rossi, Università degli Studi di Siena

Timber and concrete in the building sector: a review of Life Cycle Assessment studies

- Sofia Pastori, Politecnico di Milano

Carbon Footprint di un Ateneo: confronto metodologico tra ISO 14064-1 e linee guida RUS

- Alessandro Marson, Università degli Studi di Padova

L'approccio parametrico basato su LCA per l'eco-progettazione di involucri edilizi

- Francesca Thiebat, Politecnico di Torino

Moving A/E practices towards life cycle design

- Anna Dalla Valle, Politecnico di Milano

Recupero del fosforo da ceneri di fanghi di depurazione: modellazione del processo
e analisi del ciclo di vita

- Serena Righi, Università di Bologna
-

13.15 – 14.15

Pranzo

14.15 –
16.00

**SESSIONE V
ENERGIA**

*Chair: Maurizio Cellura, Associazione Rete Italiana LCA
Matilde Pietrafesa, Università Mediterranea di Reggio Calabria*

Life cycle assessment (LCA) of an innovative compact hybrid electrical-thermal storage
system for residential buildings in Mediterranean climate

- Valeria Palomba, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di tecnologie avanzate
per l'energia "Nicola Giordano (CNR-ITAE), Messina

Supporting life-cycle conscious decisions in household energy requalification

- Nicolò Golinucci, Politecnico di Milano

Primary vs secondary data in LCA: the case of an electronic product

- Giovanni Mondello, Università degli Studi di Messina

L'Italia e l'Europa verso la transizione energetica. Situazione attuale e scenari a confronto

- Benedetta Marmioli, RSE Ricerca Sistema Energetico, Milano

Environmental Impact Evaluations of automotive Lithium-ion Batteries' first and second life

- Silvia Colnago, Politecnico di Milano

Life Cycle Assessment of Sustainable Aviation Fuels: a review

- Simone Maranghi, Ecoinnovazione srl

EV LIBs towards circular economy: literature review of electric vehicle
lithium-ion batteries LCA for a circular economy implementation

- Matteo Fervorari, Politecnico di Milano
-

16.00 – 16.30	SESSIONE POSTER III <i>Chair: Paolo Masoni, Ecoinnovazione srl</i> <i>Serena Righi, Università degli Studi di Bologna</i> Towards sustainable freight transportation: an LCA review <ul style="list-style-type: none"> • Marta Negri, Politecnico di Milano Applicazione del Life Cycle Assessment al servizio di erogazione di acqua potabile in Romagna <ul style="list-style-type: none"> • Francesco Arfelli, Università di Bologna Qual è il reale interesse delle imprese verso l'economia circolare? Risposte da una survey <ul style="list-style-type: none"> • Elena Battiston, Università degli Studi di Padova Life Cycle Assessment Overview on Polyhydroxyalkanoates <ul style="list-style-type: none"> • Loïc Ronin, Politecnico di Milano Resource pressure of woven carpets: guide to their circular design <ul style="list-style-type: none"> • Virginia Lama, Università di Bologna Impatti ambientali delle perforazioni petrolifere: il contributo della "scarpa di cementazione" <ul style="list-style-type: none"> • Raffaella Taddeo, Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti – Pescara
16.30 – 17.00	Coffee Break
17.00 – 17.45	PREMIO GIOVANI RICERCATORI <i>Chair: Andrea Raggi, Associazione Rete Italiana LCA</i> Un framework esteso di Life Cycle Sustainability Assessment applicato ai sistemi energetici <ul style="list-style-type: none"> • Francesco Guarino, Università degli Studi di Palermo La Cereal Unit come metrica per allocazione e unità funzionale appropriate nel settore agroalimentare: Metodologia, limiti e prospettive discussi attraverso il caso dei seminativi in Italia <ul style="list-style-type: none"> • Giuseppe Costantini, Università degli Studi di Milano
17.45 – 18.15	ASSEMBLEA ASSOCIAZIONE RETE ITALIANA LCA
20.30	Cena sociale – L'A L'Accademia gourmet <i>Via Largo Cristoforo Colombo 6, Reggio Calabria</i> <i>(Solo per i partecipanti già registrati a questo evento)</i>



PROGRAMMA

24 settembre 2021
venerdì

9:15 – 11:00	SESSIONE VI ESPERIENZE E CASI STUDIO NEL SETTORE AGRO-ALIMENTARE <i>Chair: Bruno Notarnicola, Associazione Rete Italiana LCA</i> <i>Giacomo Falcone, Università Mediterranea di Reggio Calabria</i> Life Cycle Methodologies and Social Agrarian Metabolism Approach to assess Agroecology Practices in Mediterranean Olive Growing: A Methodological Framework in the International "Sustain olive" Project • Anna De Luca, Università Mediterranea di Reggio Calabria Assessing Climate Change impacts of typical Sardinian sheep cheese production: The Pecorino Sardo and Fiore Sardo case study • Delia Cossu, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Bioeconomia, Sassari Social Life Cycle Assessment degli Allevamenti Suinicoli intensivi in Italia: Indicatori e Scale di Valutazione • Giuseppe Coppola, Università degli Studi di Milano A proposal of customized Life Cycle model to circularity challenges in the olive-oil supply chain • Teodora Stillitano, Università Mediterranea di Reggio Calabria LCA e Emergy come strumenti di individuazione e valorizzazione di pratiche agricole circolari: un caso studio in Toscana • Gaia Esposito, Università degli Studi di Siena Environmental life cycle assessment of typical organic carrot in central Italy • Francesco Pacchera, Università degli Studi della Tuscia Messa a punto di un protocollo di gestione della sommersione per una risicoltura più sostenibile • Michele Zoli, Università degli Studi di Milano
11.00 – 11.30	Coffee Break

11.30 – 12.00	SESSIONE POSTER IV <i>Chair: Antonio Scipioni, Università degli Studi di Padova</i> <i>Filippo Praticò, Università Mediterranea di Reggio Calabria</i> A Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Organic Hazelnuts Production systems in Centre Italy <ul style="list-style-type: none"> • Giuseppe Coppola, Università degli Studi di Milano The role of users in addressing environmental impacts in LCA: a literature review <ul style="list-style-type: none"> • Alice Paola Pomè, Politecnico di Milano Applicazione metodologia mista LCA e UI/UX al contesto autoproduzione per la creazione di green skills <ul style="list-style-type: none"> • Claudia Morea, Università degli Studi di Firenze Life Cycle Assessment of Composite Materials: a literature review <ul style="list-style-type: none"> • Pietro Ballarin, Politecnico di Milano Simplified Life Cycle Assessment (LCA) of a semi-finished aluminium product <ul style="list-style-type: none"> • Ioannis Arzoumanidis, Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti – Pescara Abbattimento delle emissioni dalle porcaie attraverso scrubber con soluzione di acido citrico <ul style="list-style-type: none"> • Jacopo Bacenetti, Università degli Studi di Milano
12.00 – 12.45	TAVOLA ROTONDA "PNRR E TRANSIZIONE ECOLOGICA: OBIETTIVI E PROSPETTIVE DELLA GREEN REVOLUTION" <i>Chair: Marina Mistretta</i> <i>Partecipano:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Maurizio Cellura, Associazione Rete Italiana LCA • Patty L'Abbate, Senato della Repubblica • Maurizio Melis, Radio 24 - Il Sole 24 ore • Bruno Notarnicola, Associazione Rete Italiana LCA
12.45 – 13.00	CHIUSURA CONVEGNO <ul style="list-style-type: none"> • Bruno Notarnicola • Marina Mistretta • Maurizio Cellura
13.00 - 14.00	Pranzo

Sommario

PREFAZIONE16

SESSIONE II LCT E CIRCOLARITÀ

Circular Bioeconomy metrics and Life Cycle Assessment. Answers from literature review19

Implementing the Circular Transition Indicators in a global packaging company 28

Toward carbon neutral urban regeneration:
the use of LCA to support competition for innovative,
carbon-free and circular architectural projects 36

Strumenti con approccio di ciclo di vita a supporto delle aziende
per la scelta di soluzioni circolari: la matrice di valutazione multicriterio 44

LCA on Carbon Dots: a state-of-the-art evaluation 52

La banca dati italiana LCA BDI-LCA..... 59

SESSIONE POSTER I

Life Cycle Assessment applied to Carbon Dioxide Removal processes: a literature review 68

Analisi delle strategie di riuso e riciclo dei nuovi “critical raw materials” 76

Life Cycle Assessment di batterie stazionarie a ioni-litio nello scenario italiano..... 84

Riuso del fresato e modificanti: due parametri per la misura
della sostenibilità ambientale delle pavimentazioni stradali 93

Il piano nazionale di ripresa e resilienza in ottica LCA:
una valutazione preliminare per sviluppi futuri 101

Blockchain technology in life cycle assessment:
opportunities and current challenges 113

SESSIONE III METODI E STRUMENTI LCT-BASED NEL SETTORE DEI RIFIUTI

L'uso di sistemi aeromobili a pilotaggio remoto nel monitoraggio del biogas da discarica:
set-up ai fini del miglioramento del profilo ambientale122

Collecting primary data in WEEE treatment facilities: mission impossible? 129

Analisi di uno strumento di carbon footprint per il compostaggio e la digestione anaerobica.....138

Life cycle costing della catena di gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione..... 146

Life Cycle Assessment di un fotoreattore di laboratorio UV-C.....154

Thermodynamic rarity assessment of WEEE plant 164

SESSIONE IV EDILIZIA

The environmental footprint of buildings at city level: a new assessment tool.....171

Materiali isolanti per l'edilizia: uno studio di LCA183

End of Life tool for building product development: the Solar Window Block case study 191

Reuse of shipping containers in the construction sector: Life Cycle Assessment as a driver tool 199

Sustainability of disruptive innovation – cradle-to-gate LCA of Carbon Reinforced Concrete 207

LCA in building sector policies.....215

SESSIONE POSTER II

State-of-the-art analysis of environmental assessment studies
on Concentrated Solar Power systems 224

Timber and concrete in the building sector: a review of Life Cycle Assessment studies 232

Carbon Footprint di un Ateneo: confronto metodologico tra ISO 14064-1 e linee guida RUS..... 240

L'approccio parametrico basato su LCA per l'eco-progettazione di involucri edilizi..... 249

Moving A/E practices towards life cycle design..... 256

Recupero del fosforo da ceneri di fanghi di depurazione:
modellazione del processo e analisi del ciclo di vita..... 264

SESSIONE V ENERGIA

Life cycle assessment (LCA) of an innovative compact hybrid electrical-thermal
storage system for residential buildings in Mediterranean climate 273

Supporting life-cycle conscious decisions in household energy requalification 281

Primary vs secondary data in LCA: the case of an electronic product..... 290

L'Italia e l'Europa verso la transizione energetica
Situazione attuale e scenari a confronto 298

Environmental Impact Evaluations of automotive Lithium-ion Batteries' first and second life 307

Life Cycle Assessment of Sustainable Aviation Fuels: a review315

EV LIBs towards circular economy: literature review of electric
vehicle lithium-ion batteries LCA for a circular economy implementation 323

SESSIONE POSTER III

Towards sustainable freight transportation: an LCA review 334

Applicazione del Life Cycle Assessment al servizio di erogazione di acqua potabile in Romagna 342

Qual è il reale interesse delle imprese verso l'economia circolare? Risposte da una survey..... 350

Life Cycle Assessment Overview on Polyhydroxyalkanoates 358

Impatti ambientali delle perforazioni petrolifere: il contributo della “scarpa di cementazione” 366

PREMIO GIOVANI RICERCATORI

Un framework esteso di Life Cycle Sustainability Assessment applicato ai sistemi energetici 374

La Cereal Unit come metrica per allocazione e unità funzionale
appropriate nel settore agroalimentare: Metodologia, limiti e prospettive
discussi attraverso il caso dei seminativi in Italia..... 382

SESSIONE VI

ESPERIENZE E CASI STUDIO NEL SETTORE AGRO-ALIMENTARE

Life cycle methodologies and social agrarian metabolism approach
to assess agroecology practices in mediterranean olive growing:
a methodological framework in the international “sustainolive” project391

Assessing Climate Change impacts of typical Sardinian sheep cheese production:
The Pecorino Sardo and Fiore Sardo case study. 399

Social Life Cycle Assessment degli Allevamenti Suini intensivi in Italia:
Indicatori e Scale di Valutazione..... 407

A proposal of customized Life Cycle model to circularity challenges in the olive-oil supply chain..... 417

LCA e Emery come strumenti di individuazione e valorizzazione
di pratiche agricole circolari: un caso studio in Toscana 426

Environmental life cycle assessment of typical organic carrot in central Italy 434

Messa a punto di un protocollo di gestione della sommersione per una risicoltura più sostenibile..... 442

SESSIONE POSTER IV

A Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and
Organic Hazelnuts Production systems in Center Italy 451

The role of users in addressing environmental impacts in LCA: a literature review..... 460

Applicazione metodologia mista LCA e UI/UX al contesto autoproduzione per la creazione di green skills.....	468
Life Cycle Assessment of Composite Materials: a literature review	476
Simplified Life Cycle Assessment (LCA) of a semi-finished aluminium product	483
Abbattimento delle emissioni dalle porcelaine attraverso scrubber con soluzione di acido citrico	490

PREFAZIONE

Il X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA (XV Convegno della Rete Italiana LCA) si è svolto a Reggio Calabria nei giorni 22, 23 e 24 settembre 2021, sul tema "Innovazione e Circolarità: il contributo del Life Cycle Thinking nel Green Deal per la neutralità climatica". Il Convegno ha ricevuto il patrocinio del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), dell'Associazione Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione (AICARR), SETAC Italia, Città Metropolitana di Reggio Calabria, ARPA Calabria, Confindustria Reggio Calabria, Camera di Commercio di Reggio Calabria, e con il sostegno di CNR-ITAE di Messina.

In linea con gli obiettivi dell'Agenda 2030, che si pongono alla base delle politiche di ripresa post-Covid, il Green Deal europeo rappresenta la nuova roadmap della strategia di crescita sostenibile per raggiungere una giusta transizione energetica e la neutralità climatica entro il 2050. In tale contesto, l'approccio del Life Cycle Thinking (LCT), diventato uno dei pilastri principali delle politiche strategiche europee orientate alla decarbonizzazione dell'economia, rappresenta un supporto metodologico efficace nell'innovazione, coerente con la transizione ecologica, non solo di cicli produttivi e modelli di consumo, ma anche di approcci culturali e stili di vita.

Il X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA (XV Convegno della Rete Italiana LCA) si è focalizzato sul ruolo dell'LCT come approccio integrato: 1) nella valutazione della sostenibilità che le complesse sfide della transizione verso la neutralità climatica e l'uso efficiente delle risorse impongono; 2) nella definizione di strategie per il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile nelle sue varie dimensioni ambientali, economiche e sociali, stimolando la creazione di valore e la resilienza dei sistemi economici.

I contributi scientifici, presentati durante le sessioni tematiche orali e le sessioni poster, testimoniano il grande interesse della comunità scientifica nazionale verso tali tematiche, ponendo anche grande attenzione all'impiego dell'LCT per il raggiungimento dei SDG, all'integrazione con altri strumenti per la sostenibilità, e alla crucialità della metodologia LCA nel supportare le imprese nell'intraprendere un percorso più green, come metrica delle proprie prestazioni energetiche e ambientali.

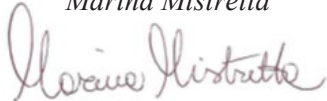
Il volume raccoglie i contributi scientifici, presentati a seguito di un processo di double peer review gestito dal Comitato Scientifico. I suddetti contributi sono stati inviati sui seguenti temi:

- Metodi e strumenti LCT – based nelle politiche ambientali.
- Impiego del LCT nelle strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.
- Sviluppi metodologici di LCA, LCC e SLCA e integrazione con altri strumenti per studi di sostenibilità
- Impiego del LCT per il raggiungimento dei Sustainable Development Goals
- LCT ed Economia Circolare: casi studio di eco-design e di produzione e consumo sostenibili
- Impiego della LCA e degli strumenti LCT - based nei settori alimentare e agroindustriale, energetico, chimico, edilizio, turistico, gestione dei rifiuti, infrastrutture viarie e trasporti.

Un'ultima sezione riporta i contributi presentati dai primi due classificati della dodicesima edizione del Premio Giovani Ricercatori LCA, rivolto ai giovani ricercatori, che operano nel campo dell'analisi del ciclo di vita al fine di promuovere la ricerca e divulgare le loro attività.

Il Chair del Convegno

Marina Mistretta



Il Presidente dell'Associazione Rete Italiana LCA

Bruno Notarnicola



Life Cycle Assessment Overview on Polyhydroxyalkanoates

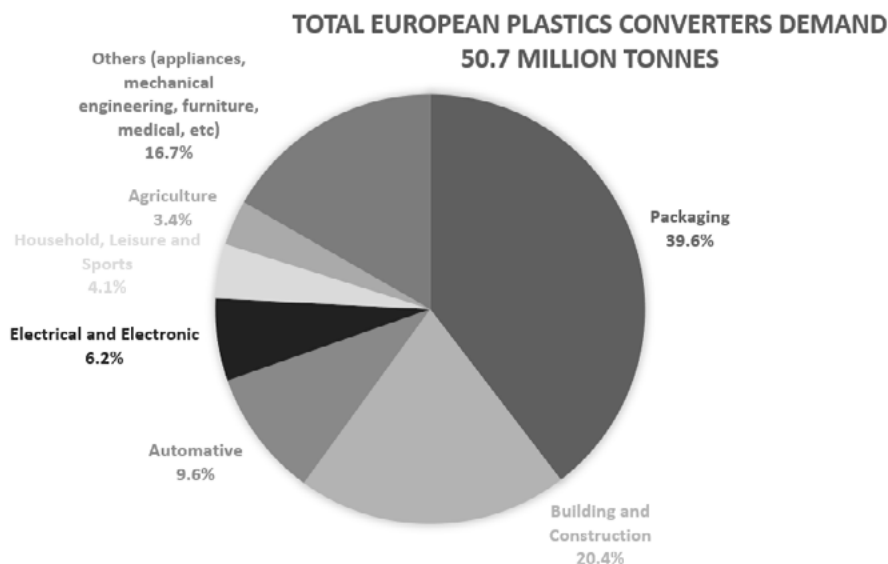
Loïc Ronin^{1*}, Giovanni Dotelli¹

Abstract: Fossil-based plastics are used in a lot of fields of application and make our daily life comfortable. The consumption of such plastics, meaning polymeric materials, is continuously increasing. Unfortunately, it leads to pollution of our environment. Polyhydroxyalkanoates (PHA) are biopolymers mainly produced by bacteria as carbon and energy storage. Due to their biodegradability and the potential range of their thermal and mechanical properties, these biopolymers are considered as a relevant alternative to substitute traditional polymers derived from fossil resources. This paper is a literature overview of papers and Life Cycle Assessment (LCA) studies related to PHA production. The environmental impact of different processes for the PHA production is evaluated in accordance with the LCA guidelines. Some recent and relevant publications were reviewed in detail, mainly focusing on the environmental impact.

1. Introduction

Plastic materials are products of our daily life. Their various properties make them useful in many fields, such as packaging industry, building and construction and automotive industry (Figure 1).

Figure 1: Distribution of European Union, Norway and Switzerland plastics converters demand by segment in 2019 (PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH, 2020)



¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica ‘Giulio Natta’, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

* Email: loic.ronin@polimi.it

The term ‘plastics’ refers to a group of organic materials. They are made from materials such as natural gas, coal, cellulose, salt and crude oil through a polycondensation or polymerisation process (PlasticsEurope, 2021). Since the 1950s, the production and consumption of plastics has grown at an incredible rate. According to Geyer *et al.*, 8.3 billion tonnes of plastics were produced between 1950 and 2015. Besides 6.3 billion tonnes are considered as waste and, ‘[if] current production and waste management trends continue, roughly 12,000 Mt of plastic waste will be in landfills or in the natural environment by 2050’ (Geyer *et al.*, 2017).

Since the emergence of the Green Chemistry concepts during 1990’s, the definition of the twelve principles of Green Chemistry by Anastas and Warner in 1998 (Anastas and Warner, 1998) and the democratization of LCA methods, many research scientists have decided to engage in the development of greener chemistry to produce plastics. The global pollution caused by plastics and microplastics is stimulating intense research towards more environmentally friendly materials. Among these, PHA are a very serious avenue of research.

PHA are linear polyesters that have been known since the 1920s. Seventy years after their discovery, PHA have begun to attract great interest in the world scientific community, including in Italy. PHA are biodegradable, biocompatible and can be produced from different renewable raw materials. The PHA market size projected to reach USD 121 million by 2025. Besides, Europe is expected to be the largest PHA market by 2025, in terms of value and volume (PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH, 2020; ReportLinker, 2021).

PHA, such as poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) and poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV), are the subject of numerous research projects at the laboratory, pilot, and industrial scales around the world. Much more research is needed to enable PHA to compete with traditional polypropylene and polyethylene in the plastics market and improve their environmental, economic, and social performance. If PHA and other biopolymers appear a priori to be more environmentally friendly than petroleum-based polymers because of their biodegradability, serious LCA studies are and will be necessary to confirm or not this idea. Indeed, ‘the previously often-cited myth of biopolymers [including PHA] being intrinsically more sustainable than established petrochemical plastics nowadays has finally been abandoned’ (Koller, 2020).

2. Literature review

A literature review about different aspects of PHA production was performed. Only relevant LCA studies related to this topic and published between 2017 and 2021 were considered. Among these documents, four texts were selected: each one illustrates one or more trends that drive the production of PHA and the application of LCA tools on this production. So, four main topics are highlighted in this document: the choice of bacteria culture (pure or mixed), the choice of raw material (carbon sources), the development of biorefineries from bio-based feedstocks and the extraction step of PHA production. The main characteristics of the final selected papers are resumed in Table 1.

Table 1: Reviewed LCA studies on PHA production - Main characteristics

Reference	Raw materials	Culture	Functional Unit(s) (FU)	System Boundaries	Extraction Step	Origin of data	Main impact categories
(Righi <i>et al.</i> , 2017)	Not applicable	Not applicable	1kg of PHB ready for the product's manufacturing	Gate-to-gate assessment: extraction process only Biomass preparation, chemicals production, PHB extraction, chemicals recovery, air emissions abatement, solid waste management	Extraction using dimethyl carbonate	Literature, simulation with Aspen Hysys, laboratory activities, Gabi professional Database, Ecoinvent version 2 database	GWP, OD, Htc, HTnc, FE, AC, POF, EuF, EuM, EuT, PM, IR, RD, WD
(Kookos, Koutinas and Vlysidis, 2019)	Soybean oil or sucrose as fermentation feedstock	Pure: wild-type strain <i>Ralstonia eutropha</i> H16	1kg of PHB, considered equivalent of 1kg of polymer produced from fossil resources	Cradle-to-gate assessment: production of agricultural crops, transportation of crops to biotransformation facility, extraction of raw materials, fermentation, recovery of biopolymer	Surfactant-hypochlorite method combined with spray-drying	Literature, PlasticsEurope, US LCI database, Ecoinvent Centre, Gabi Professional Database	NREU, GHG, EP, AP

(continued on the next page)

Table 1: (continued from previous page)

Reference	Raw materials	Culture	Functional Unit(s) (FU)	System Boundaries	Extraction Step	Origin of data	Main impact categories
(Nieder-Heitmann, Haigh and Görgens, 2019)	Bagasse and trash feedstock	Pure: recombinant <i>Escherichia coli</i>	1kWh electricity produced in the heat and power plant, 1k bioproduct produced (including PHB for scenarios 3 and 4)	Sugarcane cultivation and transportation, Sugar production, Bio-product and electricity production (biorefinery and CHP plant)	Sodium hydroxide alkaline digestion	Literature, own calculations	GWP100, OP, human toxicity, fresh water-, marine aquatic-, terrestrial ecotoxicity, POCP, AP, eutrophication
(Vogli <i>et al.</i> , 2020)	Anaerobically digested sewage sludge	Mixed	1kg of PHA produced	Cradle-to-grave assessment: Sludge pyrolysis, volatile fatty acids production, biomass production, extraction, PHA end-of-life	Extraction using dimethyl carbonate	Laboratory and pilot-scale experiments, COREPLA (Italy), GaBi Professional Database, Ecoinvent Database version 2, Literature	Following ILCD/PEF recommendations and 'primary energy from renewable and non-renewable resources'

Abbreviations used in Table 1 but not mentioned before: Global Warming Potential (GWP), Ozone Depletion (OD), Human Toxicity cancer (Htc), Human Toxicity non cancer (HTnc), Freshwater Ecotoxicity (FE), Acidification (AC), Photochemical Ozone Formation (POF), Freshwater Eutrophication (EuF), Marine Eutrophication (EuM), Terrestrial Eutrophication (EuT), Particulate Matter formation (PM), Ionizing Radiation (IR), Resource Depletion (RD), Water Depletion (WD), Non-renewable Energy Use (NREU), GreenHouse Gas (GHG), Eutrophical Potential (EP), Acidification Potential (AP), 100 year Global Warming Depletion (GWP100), Photochemical oxidation (POCP), International Reference Life Cycle Data System (ILCD), Product Environmental Footprint (PEF)

Righi *et al.* did perform a LCA study about the extraction step of PHA process from microbial slurry or dried biomass and using solvent evaporation or polymer precipitation. Instead of using a chlorinated solvent to extract intracellular PHB from the bacteria that produced them, as is still often the case today, Righi *et al.* applied an extraction protocol based on dimethyl carbonate. They conclude that this protocol is definitely better than other protocols based on chlorinated solvents. In particular, Righi *et al.* recommend using dried biomass and performing precipitation of the desired polymer.

Kookos, Koutinas and Vlysidis did perform a cradle-to-gate assessment using the ISO Standards 14040:2006 and 14044:2006 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b) related to the production of PHB from soybean oil or sucrose as fermentation feedstock thanks to a pure culture. The values of NREU, GHG, EP and AP associated with PHB production are compared to those of two petroleum-based plastics: high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP). Kookos, Koutinas and Vlysidis are formal about their conclusions:

- GHG emissions, NREU, AP and EP for PHB production depend strongly of the choice of renewable raw material and the energy allocation methodology,
- a relevant choice for the renewable raw material and for the energy allocation methodology leads to significantly lower estimates of GHG and NREU values compared to those obtained for HDPE and PP,
- a system which combines agricultural residues and side streams from the food industry with an integrated biorefinery may be a pertinent approach to produce plastics.

Nieder-Heitman, Haigh and Görgens studied the environmental and techno-economic performance of six biorefinery scenarios to ensure the sustainability of the South African sugar industry. Two scenarios (scenarios 3 and 4) are related to the production of PHB. They conclude that this scenario 4 was the most relevant in terms of both environmental and techno-economic perspective. Besides, they developed a tool to help analyze scenarios related to biorefineries in this same territory.

Vogli *et al.* did perform a LCA study to evaluate the environmental impact of a novel PHA production process with mixed cultures. It is a hybrid through thermochemical-biological process using sewage sludge as feedstock. They conclude that this process could be a competitive candidate for the production of PHA at different scale. The use of low cost raw materials, renewable energies and an improvement of the technologies used are recommended to make this process really interesting.

3. Conclusions

As integral part of the Horizon Europe framework programme beginning in 2021, there are some missions to reduce global pollution caused by plastics. Indeed, European people want to do away with the marine litter, especially traditional plastics and microplastics (Publications Office of the European Union, 2020). In today's society, there is an increased attention and demand for sustainable plastics. In this work, the environmental impact of various processes related to the production of PHA has been reported. More and more studies show the interest of producing these biopolymers in biorefineries from renewable raw materials, using mixed culture instead of pure culture and a well-designed extraction process. The choice of carbon source, bacterial strain(s) and extraction solvent(s) are crucial to produce high quality PHA whose properties can compete

with those of traditional petroleum-based plastics (Croxatto Vega *et al.*, 2019; Nieder-Heitmann, Haigh and Görgens, 2019; de Souza Reis *et al.*, 2020; Nitkiewicz *et al.*, 2020).

Still today, most plastic materials are fossil based but plastics production should decouple from fossil feedstock. Alternative feedstocks, such as recycled oils, responsibly sourced biomass, or even CO₂ should replace fossil feedstock (PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH, 2020). PHA have been extensively studied as an alternative to petroleum-based plastics for use in pharmaceuticals, biomedical products, agriculture, and packaging materials. This must continue.

The current difficulties of producing these biopolymers on an industrial scale should not slow down the research activities dedicated to PHA in Italy (ANSA, 2020; Polimerica, 2020; Plast Magazine, 2021). There are many prospects for microbiological processes for the production of PHA to be explored, including the choice of raw materials, bacterial strain(s), the design of new biorefineries, and extraction techniques (solvent-based or not). New applications of PHA and their composites are expected (Guzik *et al.*, 2020; Meereboer, Misra and Mohanty, 2020). PHA have a great environmental potential. Research scientists should continue their efforts to make production processes for PHA more economical and ever environment friendly (Nitekiewicz *et al.*, 2020).

Finally, as exciting as they may be, all these perspectives and applications will have to be based on a serious analysis of their environmental, social and economic impact in accordance with the LCA guidelines and Green Metrics. While many LCA studies have focused on the environmental impact of PHA production as well as the economic impact - albeit to a lesser extent - an effort should be made to analyze the social impact of this production and consumption. This is all the truer in the context of Industry 4.0/5.0, two of whose pillars are a human-centered approach for research scientist, producer and consumer (Nahavandi, 2019; Longo, Padovano and Umbrello, 2020) and environmental performance (Raihanian Mashhadi and Behdad, 2018; Furstenau *et al.*, 2020; Ivascu, 2020).

4. References

- Anastas, P. T. and Warner, J. C. (1998) *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press, New York.
- ANSA (2020) *Bio-on: annullati i sequestri per il falso in bilancio - Cronaca, Agenzia ANSA*. Available at: https://www.ansa.it/sito/notizie/cronaca/2020/09/22/bio-on-annullati-i-sequestri-per-il-falso-in-bilancio_ae314ea3-925a-4fa5-aebc-eba7dbbb9740.html (Accessed: 10 March 2021).
- Croxatto Vega, G. *et al.* (2019) 'Maximizing Environmental Impact Savings Potential through Innovative Biorefinery Alternatives: An Application of the TM-LCA Framework for Regional Scale Impact Assessment', *Sustainability*, 11(14), p. 3836. doi: 10.3390/su11143836.
- Furstenau, L. B. *et al.* (2020) 'Link Between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives', *IEEE Access*, 8, pp. 140079–140096. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012812.
- Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. (2017) 'Production, use, and fate of all plastics ever made', *Science Advances*, 3(7), p. e1700782. doi: 10.1126/sciadv.1700782.

- Guzik, M. *et al.* (2020) 'What Has Been Trending in the Research of Polyhydroxyalkanoates? A Systematic Review', *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. doi: 10.3389/fbioe.2020.00959.
- International Organization for Standardization (2006a) 'ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework'.
- International Organization for Standardization (2006b) 'ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines'.
- Ivascu, L. (2020) 'Measuring the Implications of Sustainable Manufacturing in the Context of Industry 4.0', *Processes*, 8(5), p. 585. doi: 10.3390/pr8050585.
- Koller, M. (2020) *The Handbook of Polyhydroxyalkanoates, Three Volume Set* (3 vol). 1st ed. Boca Raton: CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003080718>.
- Kookos, I. K., Koutinas, A. and Vlysidis, A. (2019) 'Life cycle assessment of bioprocessing schemes for poly(3-hydroxybutyrate) production using soybean oil and sucrose as carbon sources', *Resources, Conservation and Recycling*, 141, pp. 317–328. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.025.
- Longo, F., Padovano, A. and Umbrello, S. (2020) 'Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0: A Human-Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future', *Applied Sciences*, 10(12), p. 4182. doi: 10.3390/app10124182.
- Meereboer, K. W., Misra, M. and Mohanty, A. K. (2020) 'Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites', *Green Chemistry*, 22(17), pp. 5519–5558. doi: 10.1039/D0GC01647K.
- Nahavandi, S. (2019) 'Industry 5.0—A Human-Centric Solution', *Sustainability*, 11(16), p. 4371. doi: 10.3390/su11164371.
- Nieder-Heitmann, M., Haigh, K. F. and Görgens, J. F. (2019) 'Life cycle assessment and multi-criteria analysis of sugarcane biorefinery scenarios: Finding a sustainable solution for the South African sugar industry', *Journal of Cleaner Production*, 239, p. 118039. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118039.
- Nitkiewicz, T. *et al.* (2020) 'How sustainable are biopolymers? Findings from a life cycle assessment of polyhydroxyalkanoate production from rapeseed-oil derivatives', *Science of The Total Environment*, 749, p. 141279. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141279.
- Plast Magazine (2021) *Crack Bio-on, dieci persone a rischio processo - Bioplastiche*, *Plastmagazine*. Available at: <https://www.plastmagazine.it/crack-bio-on-dieci-persone-a-rischio-processo/> (Accessed: 10 March 2021).
- PlasticsEurope (2021) *What are plastics*. Available at: <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics> (Accessed: 10 March 2021).
- PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH (2020) *EUROPEAN PLASTICS INDUSTRY MARKET DATA: Plastics - the Facts 2020*. Available at: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data> (Accessed: 10 March 2021).
- Polimerica (2020) *In autunno bando per la vendita di Bio-on*, Polimerica.it. Available at: <https://www.polimerica.it/articolo.asp?id=23870> (Accessed: 10 March 2021).
- Publications Office of the European Union (2020) *Mission Starfish 2030 : restore our ocean and waters*. Publications Office of the European Union. Available at: <http://op.europa.eu/>

en/web/eu-law-and-publications/publication-detail/-/publication/672ddc53-fc85-11ea-b44f-01aa75ed71a1 (Accessed: 10 March 2021).

- Raihanian Mashhadi, A. and Behdad, S. (2018) 'Ubiquitous Life Cycle Assessment (U-LCA): A Proposed Concept for Environmental and Social Impact Assessment of Industry 4.0', *Manufacturing Letters*, 15, pp. 93–96. doi: 10.1016/j.mfglet.2017.12.012.
- ReportLinker (2021) 'Polyhydroxyalkanoate Market by Type, Production Method, Application And Region - Global Forecast to 2025'. Available at: https://www.reportlinker.com/p04660850/Polyhydroxyalkanoate-Market-by-Type-Manufacturing-Technology-Application-Global-Forecast-to.html?utm_source=GNW.
- Righi, S. *et al.* (2017) 'A life cycle assessment of poly-hydroxybutyrate extraction from microbial biomass using dimethyl carbonate', *Journal of Cleaner Production*, 168, pp. 692–707. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.227.
- de Souza Reis, G. A. *et al.* (2020) 'Optimization of Green Extraction and Purification of PHA Produced by Mixed Microbial Cultures from Sludge', *Water*, 12(4), p. 1185. doi: 10.3390/w12041185.
- Vogli, L. *et al.* (2020) 'Life Cycle Assessment and Energy Balance of a Novel Polyhydroxyalkanoates Production Process with Mixed Microbial Cultures Fed on Pyrolytic Products of Wastewater Treatment Sludge', *Energies*, 13(11), p. 2706. doi: 10.3390/en13112706.