



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PERUGIA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE, ALIMENTARI E  
AMBIENTALI**

**Corso di Laurea in Agricoltura biologica  
Curriculum: bioeconomia**

**VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE  
DELLA PHRAGMITES AUSTRALIS (CANNA  
PALUSTRE) COME MATERIALE PER L'EDILIZIA,  
ATTRAVERSO IL LIFE CYCLE ASSESSMENT**

**Relatore:**

**Prof.ssa Luisa Paolotti**

**Correlatore:**

**Prof. Francesco Romagnoli**

**Candidato:**

**Gabriele Campadello**

**ANNO ACCADEMICO 2023/2024**

# INDICE

RIASSUNTO .....	II
ABSTRACT .....	III
<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBIETTIVO DEL LAVORO DI TESI .....	11
<b>2. LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT (LCSA), STORIA, EVOLUZIONE E APPLICAZIONE DEL METODO .....</b>	<b>13</b>
2.1. PRESENTAZIONE DEL METODO .....	13
2.2. STRUTTURA DEL METODO .....	17
2.3. I - DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI E DEL CAMPO DI APPLICAZIONE (GOAL AND SCOPE DEFINITION).....	19
2.4. II - ANALISI DI INVENTARIO DEL CICLO DI VITA (LCI – LIFE CYCLE INVENTORY).....	24
2.5. LA GESTIONE DEL “FINE VITA” NELL’ANALISI DI INVENTARIO.....	26
2.5.1. <i>I principali aspetti metodologici</i> .....	28
2.5.2. <i>Considerazioni sulla fase di inventario</i> .....	29
2.6. III - L’ANALISI DEGLI IMPATTI (LCIA – LIFE CYCLE IMPACT ANALYSIS) .....	30
2.6.1. <i>Aspetti generali e definizioni</i> .....	30
2.6.2. <i>Le principali categorie di impatto</i> .....	32
2.6.3. <i>Strumenti operativi e calcolo degli impatti</i> .....	35
2.7. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI.....	39
<b>3. PHRAGMITES AUSTRALIS (CAV.) TRIN. EX STEUD.: CARATTERISTICHE AGRONOMICHE, ECOLOGICHE E APPLICAZIONE NELL’EDILIZIA BIO-BASED .....</b>	<b>42</b>
3.1. MORFOLOGIA ED ECOLOGIA .....	42
3.2. ASPETTI BENEFICI DELLA GESTIONE DEI CANNETI .....	43
3.3. EDILIZIA BIO-BASED .....	46
<b>4. CASI STUDIO: CONFRONTO TRA UN PANNELLO TERMO ISOLANTE IN PHRAGMITES AUSTRALIS E UNO IN POLISTIRENE ESPANSO (EPS); CONFRONTO TRA UNA COPERTURA IN PHRAGMITES AUSTRALIS E UNA IN TEGOLE DI TERRACOTTA .....</b>	<b>54</b>
4.1. DEFINIZIONE DELL’OBIETTIVO E DEL CAMPO DI APPLICAZIONE (GOAL AND SCOPE DEFINITION) .....	54
4.1.1. <i>Unità funzionale</i> .....	55
4.1.2. <i>Modello dell’analisi del ciclo di vita</i> .....	56
4.2. ANALISI DI INVENTARIO DEI PRODOTTI BIO-BASED .....	57
4.2.1. <i>Fase di raccolta</i> .....	59
4.2.2. <i>Fase di lavorazione delle canne</i> .....	62
4.2.3. <i>Fase di posa in opera e fase d’uso</i> .....	64
4.2.4. <i>Fase di smaltimento</i> .....	68
4.2.5. <i>Fase di trasporto</i> .....	71
4.3. ANALISI DI INVENTARIO DEI PRODOTTI TRADIZIONALI (NON BIO-BASED) .....	73
4.3.1. <i>Fase di estrazione delle materie prime</i> .....	75
4.3.2. <i>Fase di lavorazione</i> .....	76
4.3.3. <i>Fase di posa in opera e fase d’uso</i> .....	78
4.3.4. <i>Fase di smaltimento</i> .....	80
4.3.5. <i>Fase di trasporto</i> .....	81
4.4. ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI.....	82
4.4.1. <i>Valutazione degli impatti ambientali dei pannelli termo-isolanti</i> .....	83
4.4.2. <i>Interpretazione degli impatti ambientali dei pannelli termo-isolanti</i> .....	90
4.4.3. <i>Valutazione degli impatti ambientali dei prodotti per coperture</i> .....	91
4.4.4. <i>Interpretazione degli impatti ambientali dei prodotti da copertura</i> .....	97
<b>5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE .....</b>	<b>101</b>
<b>6. ACKNOWLEDGMENTS .....</b>	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>104</b>

## Riassunto

Il progetto di tesi, che verrà presentato di seguito, nasce dalla volontà di contribuire positivamente e attivamente alla ricerca di soluzioni il cui utilizzo favorisca la riduzione degli impatti ambientali, incluse le emissioni climalteranti, legati alle attività antropiche. Nel corso degli ultimi decenni, l'attenzione nei confronti della tutela ambientale sta aumentando e con essa le azioni mitigatrici. Il fulcro di questa ricerca riguarda due prodotti bio-based, per l'utilizzo in campo edilizio, realizzati con la specie vegetale *Phragmites australis* o canna lacustre. Il primo è un pannello termo-isolante utilizzato per la realizzazione di un sistema di coibentazione degli edifici, installabile sia all'interno che all'esterno degli stessi. Il secondo è costituito da tetti di abitazioni e non solo. Essi verranno rispettivamente confrontati con un pannello termo-isolante realizzato in EPS (polistirene) e un tetto realizzato con tegole di terracotta. La metodologia di confronto è la LCA (Life Cycle Assessment), ossia analisi del ciclo di vita. Questa metodologia permette di determinare gli impatti ambientali generati da un prodotto o servizio durante l'intero ciclo di vita, in un approccio definito "dalla culla alla tomba". Lo studio comparativo ha fornito dei risultati promettenti, che potranno essere ulteriormente investigati per favorire l'adozione delle soluzioni bio-based rispetto a quelle tradizionali più impattanti.

# Abstract

The thesis project, which will be presented below, stems from the desire to contribute positively and actively to the search for solutions whose use promotes the reduction of climate-changing emissions. Over the past decades, attention to environmental protection has been increasing and with it mitigating actions. The focus of this research is on two bio-based products, for use in construction, made from the plant species *Phragmites australis* or common reed. The first product analyzed is a thermo-insulating panel used to make an insulation system for buildings, which can be installed both inside and outside buildings. The second product analyzed is a roof for houses or other typologies of buildings. They will be compared with a thermal insulation panel made of EPS (polystyrene) and a roof made of terracotta tiles, respectively. The methodology of comparison is LCA (Life Cycle Assessment). This methodology makes it possible to determine the environmental impacts generated by a product or service throughout its life cycle, in an approach referred to as “cradle-to-grave.” The comparative study provided promising results, which can be further investigated to encourage the adoption of bio-based solutions over more impactful traditional ones.

## 1. Introduzione

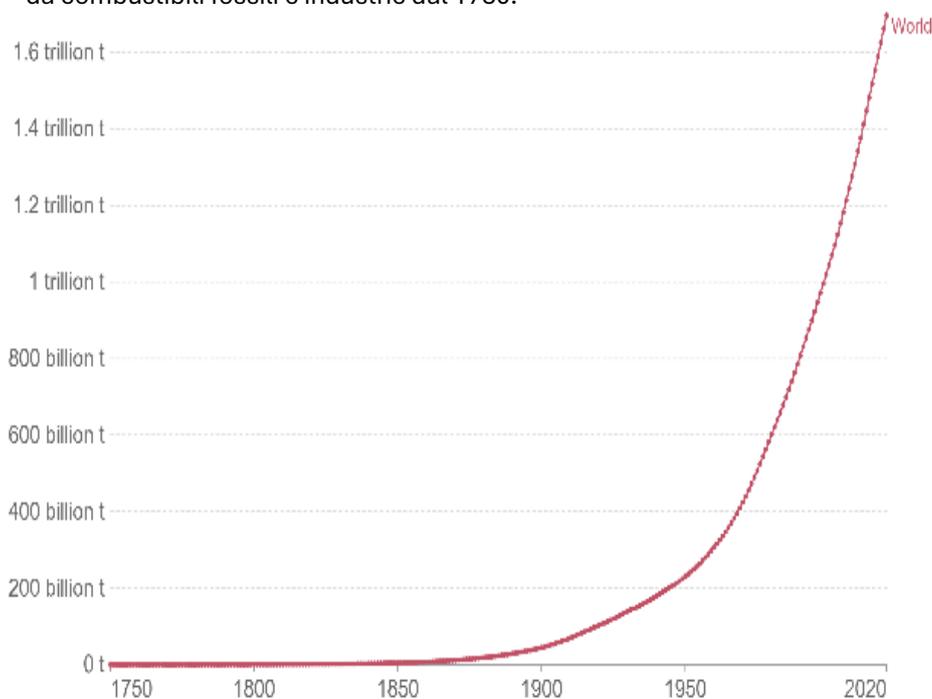
L'elaborazione di tale progetto di tesi prende le mosse dalla consapevolezza di quanto i comportamenti dell'uomo, e il suo stile di vita, stiano comportando il depauperamento delle risorse naturali e compromettendo l'integrità della biosfera e dei servizi eco-sistemici che essa fornisce, riducendone o precludendone il godimento, in maniera diversa, tanto alle generazioni attuali quanto a quelle future. Ai giorni nostri tale consapevolezza è sempre più radicata, non solo nel mondo accademico o in coloro che fanno parte dell'indotto lavorativo del settore ambientale, ma anche nei comuni cittadini che stanno iniziando a notare delle criticità, dovute ai cambiamenti climatici, nella vita di tutti i giorni. Tali criticità sono la conseguenza del modello di sviluppo, inteso sinteticamente come modalità di produzione e di consumo, che la società, industriale prima e capitalistica o capitalistico-finanziaria poi, hanno contribuito a diffondere. Lo stile di vita dominante, soprattutto nell'Occidente, come lo conosciamo oggi, è relativamente recente e deriva dai cambiamenti introdotti nella società dalla prima e dalla seconda rivoluzione industriale, che ebbero inizio a partire dalla seconda metà del XVIII secolo. Questi due eventi epocali hanno introdotto l'utilizzo di macchinari per facilitare e velocizzare il lavoro manuale, aumentando la produttività nei più importanti settori produttivi: tessile, agricolo, siderurgico, estrattivo ecc. Il vero punto di svolta nella prima delle due rivoluzioni fu l'introduzione del motore a vapore alimentato a carbone, inventato da James Watt. È da questo momento che iniziò l'utilizzo su larga scala di risorse fossili non rinnovabili come fonti di energia primaria, per lo svolgimento della maggior parte delle attività umane. Il progresso non si arrestò al motore a vapore e all'utilizzo di carbone come combustibile, ma avanzò con la scoperta dell'energia elettrica e il passaggio da una fonte fossile (carbone) ad un'altra, che tutt'oggi domina il mercato delle fonti di energia, il petrolio. L'incremento della produzione, oltre che nelle fabbriche, si ebbe anche in agricoltura, permettendo un aumento demografico che a sua volta comportò la necessità di una quantità maggiore di beni. Questa tendenza di produzione e consumo incrementale aumentò di pari passo con l'aumentare della popolazione mondiale, fino a degenerare nel modello, attualmente dominante in buona parte del mondo, denominato "consumistico": *fenomeno economico-sociale, tipico dei paesi a reddito elevato ma presente anche nei paesi in via di sviluppo, consistente nell'aumento dei consumi per soddisfare i bisogni indotti dalla pressione della*

*pubblicità e da fenomeni d'imitazione sociale diffusi tra ampi strati della popolazione (Treccani, s.d.).*

Tale modello di consumo è stato ed è responsabile dell'aumento senza precedenti delle emissioni climalteranti di diversa natura, responsabili del peggioramento della qualità dell'aria, dell'acqua e della terra. Per rendere le emissioni, derivanti da composti diversi, confrontabili tra loro, vengono ricondotte ad un'unità di misura univoca e riconosciuta a livello internazionale, la CO<sub>2eq</sub>. Questa è usata nella *figura 1.1* per rappresentare le emissioni climalteranti a partire dalla seconda metà del XVIII secolo.

### **Emissioni di CO<sub>2</sub> cumulate**

Le emissioni cumulate sono la somma delle emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte da combustibili fossili e industrie dal 1750.



**Figura 1.1 - Emissioni globali di CO<sub>2eq</sub> (Fonte: World Economic Forum)**

Il mondo accademico e scientifico, prima di qualsiasi altro, aveva compreso la pericolosità degli impatti che l'uomo, con le sue attività, stava generando nei confronti dell'ambiente e aveva provato a divulgare questa consapevolezza alla popolazione. Due delle opere più conosciute e che hanno avuto una profonda eco al di fuori del mondo accademico, sono le seguenti:

- *Primavera silenziosa* (1962) di Rachel Carson, ebbe una risonanza enorme, anche grazie alla sua natura non prettamente scientifica (la cui autorevolezza è comunque garantita dal fatto che l'autrice fosse una ricercatrice affermata), che lo rese fruibile ad un pubblico non esperto; la trattazione si concentra per lo più sull'uso eccessivo ed irresponsabile di composti chimici (fitofarmaci in generale) in agricoltura, oltre a dimostrare in maniera inequivocabile l'interconnessione tra le varie componenti di uno stesso ecosistema, nonché di ecosistemi diversi tra loro. In sintesi, evidenzia come la diffusione degli inquinanti, una volta dispersi nell'ambiente, non possa essere arrestata, ma anzi questi passino da un vettore ad un altro (es. da una pianta irrorata con un fitofarmaco ad un uccello), fino a tornare, sottoforma di cibo e acqua, a colui che li ha prodotti e dispersi nell'ambiente, l'uomo, con conseguenze più o meno note ma sempre nocive.

- *Rapporto sui limiti dello sviluppo* (1972), redatto da un gruppo di ricercatori del MIT di Boston su commissione del Club di Roma. È un report scientifico che evidenzia, grazie a delle simulazioni, svolte con quello che allora era uno dei software più avanzati al mondo (World3), come il modello di produzione e consumo in uso da diversi decenni, soprattutto nel mondo occidentale, fosse ampiamente insostenibile; principalmente per la disponibilità limitata di risorse naturali che il Pianeta può fornire e per la limitata capacità di assorbimento degli inquinanti. Il report proponeva diversi scenari, che davano risultati diversi a seconda di quali scelte e quali politiche sarebbero state adottate di lì in avanti. L'aspetto sorprendente è l'elevata precisione con cui questi ricercatori avessero proiettato il modello nel futuro, tant'è che rileggendolo ai giorni nostri, si evince quanto alcuni degli scenari prospettati si siano poi realmente verificati.

Queste due pubblicazioni, così come altre opere e iniziative di altro genere, contribuirono a destare un'attenzione sempre maggiore nei confronti dell'ambiente. Questa cognizione iniziò a radicarsi tanto nella popolazione quanto tra i decisori politici. Nel primo caso, iniziarono a nascere i primi movimenti ambientalisti che criticavano aspramente, anche con manifestazioni di portata mondiale, i modelli di produzione e consumo, propri soprattutto della parte occidentale del Pianeta; nel secondo caso, le tematiche relative all'ambiente e alla sua salvaguardia iniziarono ad entrare nel dibattito politico, fino a concretizzarsi nell'istituzione di veri e propri organismi sovranazionali.

Nella *figura 1.2*, alcune delle tappe fondamentali dell'istituzione degli organismi mondiali e le normative più importanti per il monitoraggio e la diffusione di informazioni, in materia di ambiente.



*Figura 1.2 - Tappe fondamentali per l'istituzione di organismi e promulgazione di leggi in favore della tutela ambientale (Fonte: elaborazione propria)*

Come mostrato dallo schema cronologico sopra riportato, la consapevolezza di monitorare e preservare l'integrità ambientale si è concretizzata nell'istituzione di alcuni tra i più importanti organismi internazionali e nella promulgazione di leggi ad hoc.

Nell'anno in cui venne pubblicato il rapporto del MIT di Boston sui limiti dello sviluppo, le Nazioni Unite (UN), anche in seguito all'impulso che provenne dalla conferenza sull'ambiente umano, tenutasi quello stesso anno a Stoccolma, fondarono il primo programma internazionale che aveva il compito di occuparsi delle tematiche ambientali:

*Programma Ambiente delle Nazioni Unite (UNEP)*. Esso fu concepito con lo scopo di monitorare lo stato dell'ambiente e informare i decisori politici riguardo le sfide ambientali globali, che la ricerca scientifica riteneva prioritarie (UNEP, 2022). L'attenzione e la tutela nei confronti dell'ambiente hanno portato all'introduzione di alcuni nuovi concetti e la relativa terminologia specifica. Uno dei concetti chiave e più ricorrenti quando si affronta il tema della salvaguardia ambientale è

sicuramente la “sostenibilità” o “sviluppo sostenibile”.

Tale concetto fu definito per la prima volta nel rapporto *Our common future*, anche noto come *Rapporto Brundtland (1987)*, in cui si definiva il concetto di *sustainable development* come segue: “Lo sviluppo sostenibile è quello sviluppo che consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri” (Brundtland, 1987). Negli anni il significato del termine sostenibilità è rimasto lo stesso, ma il concetto è stato ampliato ed integrato. Attualmente la sostenibilità è distinta in tre pilastri: ambientale, sociale ed economico. Essi sono profondamente correlati tra loro, e le variazioni che intercorrono in uno di essi generano cambiamenti anche negli altri due. Da qui la complessità insita nel perseguire uno sviluppo di questo tipo. A rendere meno complesso il perseguimento di uno sviluppo sostenibile, ci sono alcuni organismi di cooperazione internazionale e di diffusione della conoscenza, che agevolano l’individuazione delle criticità e forniscono linee guida pratiche per la riduzione delle stesse; essi inoltre, lavorano per la definizione di un percorso comune che i paesi dovrebbero percorrere congiuntamente, data la portata globale del fenomeno. Tra i più noti e importanti ci sono l’IPCC e la COP.

L’*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* venne fondato nel 1988 con il compito di fornire analisi e raccomandazioni annuali sullo stato del cambiamento climatico e sulle conseguenze economiche e sociali che esso avrebbe comportato. Attualmente, il rapporto annuale dell’IPCC è il più completo e autorevole tra i rapporti redatti da altre organizzazioni o organismi, deputati allo svolgimento delle stesse funzioni (IPCC, 2018).

La *Conference Of Parties (COP)*, è un incontro che si svolge annualmente, a cui partecipano tutti i paesi membri delle Nazioni Unite, in cui si discute dei risultati ottenuti dalle varie nazioni (o “parties”), in base ad obiettivi fissati nelle precedenti edizioni, e si propongono nuovi obiettivi da perseguire (Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL), 2024). Per fare un esempio, uno degli impegni più noti, sul quale tutti i paesi sono convenuti, è quello preso dai “parties”, in seguito alla COP di Parigi del 2015, per cooperare affinché si eviti lo sfioramento della soglia dei 2°C, idealmente 1,5°C, della temperatura media globale. Il punto debole delle COP è che le decisioni prese in questa sede non risultano legalmente vincolanti. Ciò può comportare che i paesi partecipanti non accettino di perseguire

gli obiettivi definiti in sede di consiglio o che recedano arbitrariamente dagli accordi presi in precedenza, nonostante essi siano il frutto di lunghe trattative e compromessi raggiunti da rappresentanti e delegazioni dei circa 193 paesi che ne fanno parte.

Oltre agli organismi citati pocanzi uno dei programmi più conosciuti e che ha contribuito a sensibilizzare la popolazione, le istituzioni e il mondo aziendale è stata l'Agenda 2030.

L'*Agenda 2030* è un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità, sottoscritto nel 2015 dai 193 paesi dell'ONU. Essa ingloba 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile – Sustainable Development Goals, SDGs – in un grande programma d'azione, per un totale di 169 'target' o traguardi. L'avvio ufficiale degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile ha coinciso con l'inizio del 2016, guidando il mondo sulla strada da percorrere nell'arco dei successivi 15 anni: i Paesi, infatti, si sono impegnati a raggiungerli entro il 2030. Gli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile danno seguito ai risultati degli Obiettivi di Sviluppo del Millennio (Millennium Development Goals) che li hanno preceduti, e rappresentano obiettivi comuni su un insieme di questioni importanti per lo sviluppo: la lotta alla povertà, l'eliminazione della fame e il contrasto al cambiamento climatico, per citarne solo alcuni. 'Obiettivi comuni' significa che essi riguardano tutti i Paesi e tutti gli individui: nessuno ne è escluso, né deve essere lasciato indietro lungo il cammino necessario per portare il mondo sulla strada della sostenibilità (UNRIC, 2016).

In materia di tutela ambientale e sostenibilità l'Unione Europea non è stata meno prolifica delle Nazioni Unite, ma anzi, ha lavorato alacremente affinché si dotasse di organismi e leggi che regolassero, in maniera adeguata, le tematiche relative ai temi succitati.

Innanzitutto, fu proprio l'Europa ad ospitare la prima conferenza sull'ambiente umano, a Stoccolma nel 1972, contribuendo ampiamente a diffondere la consapevolezza dell'insostenibilità del modello di vita adottato dall'uomo fino a quel momento. Questo, fu sicuramente un volano per il primo grande passo che l'Europa fece per dotarsi di una legge, che mirava alla conservazione del patrimonio naturale ed ambientale dell'Unione Europea:

L'Environmental Action Programme (EAP), fu il primo di una serie di programmi (attualmente è in vigore l'ottava versione). Nel merito l'EAP stabiliva che lo sviluppo economico, la prosperità e la protezione dell'ambiente erano reciprocamente interdipendenti e che "la protezione dell'ambiente appartiene ai principi fondamentali della Comunità", focalizzando gli sforzi su tre aspetti:

- prevenzione, riduzione e contenimento del danno ambientale,
- conservazione di un equilibrio ecologico,
- uso razionale delle risorse naturali.

Il primo EAP (Environmental Action Programme) si focalizzò per lo più sulla protezione delle acque e sui rifiuti, ma conteneva anche un approccio settoriale, con particolare riferimento all'agricoltura e alla pianificazione territoriale. In forma embrionale si trovavano anche le attività preparatorie per il controllo delle emissioni (Hey, 2007). Dal primo EAP sono stati compiuti molti progressi e attualmente si è arrivati all'ottava versione che è entrata in vigore nel 2022 e lo resterà fino al 2030, inserendosi nel contesto più ampio del Green Deal europeo di cui si tratterà più avanti.

Un altro traguardo degno di nota della politica ambientale perseguita dall'UE è l'istituzione della Rete Natura 2000. Questo è il principale strumento della politica dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità. Si tratta di una rete ecologica diffusa su tutto il territorio dell'Unione istituita ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat" per garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie di flora e fauna minacciati o rari a livello comunitario. La rete Natura 2000 è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), identificati dagli Stati Membri secondo quanto stabilito dalla Direttiva Habitat, che vengono successivamente designati quali Zone Speciali di Conservazione (ZSC), e comprende anche le Zone di Protezione Speciale (ZPS) istituite ai sensi della Direttiva 2009/147/CE "Uccelli" concernente la conservazione degli uccelli selvatici.

È importante sottolineare che la tutela di questi siti non comporta l'esclusione della presenza dell'uomo da essi, ma mira alla coesistenza tra le esigenze sociali, economiche e ambientali e la salvaguardia degli stessi.

Come tappa finale di questo lungo excursus, si giunge a quello che si connota come un impegno europeo senza precedenti. Gli eventi catastrofici sempre più ricorrenti, l'inadeguatezza infrastrutturale, la difficoltà di mitigare o l'incapacità di fronteggiare i cambiamenti climatici, nonché la fragilità dell'intero Pianeta, evidenziata dalla Pandemia di Covid-19, sono stati elementi fondamentali per esortare i decisori politici europei ad adottare una strategia olistica, che potesse far fronte ai crescenti cambiamenti globali. Tale strategia trasversale adottata dall'UE prende il nome di *Green Deal*.

Il cosiddetto *Patto Verde* europeo non è una semplice legge, ma una strategia che si articola in più fasi e in un orizzonte temporale ampio (fino al 2050), che permea tutti i settori e le materie che sono di competenza dell'UE. Tutte le leggi che verranno promulgate e le iniziative che verranno avviate dall'Unione Europea avranno come punto di riferimento il *Green Deal*, il cui fine ultimo è quello di rendere l'Europa un continente a zero emissioni nette entro il 2050, e riducendole già del 55% entro il 2030. Per comprendere meglio la portata di questo fenomeno si riporteranno alcuni esempi volti a dimostrare la trasversalità di tale impegno, che non si risolve nella sola riduzione delle emissioni, ma prevede l'efficientamento di tutte le componenti e gli elementi che contribuiscono all'inquinamento e al depauperamento dell'ambiente e delle risorse e i servizi ecosistemici che esso offre.

SETTORE	STRATEGIA	OBIETTIVI 2030
 <b>AGRICOLTURA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dal produttore al consumatore</li> <li>- Biodiversità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 25% di agricoltura biologica</li> <li>- 10% di terre da agricole a non agricole</li> </ul>
 <b>ECONOMIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economia circolare</li> <li>- Diritto alla riparazione</li> <li>- Progettazione eco-compatibile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Responsabilità estesa del produttore</li> <li>- Passaporto digitale dei prodotti</li> </ul>
 <b>EDILIZIA</b>	Ondata di ristrutturazioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ridurre del 60% le emissioni degli edifici</li> <li>- Raddoppiare i tassi di ristrutturazione per riduzione emissioni</li> </ul>
 <b>ENERGIA, TRASPORTI E TELECOMUNICAZIONI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>TEN-E (Reti TransEuropee dell'Energia)</u></li> <li>- <u>Eurobollo</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 45% dell'energia europea da fonti rinnovabili</li> <li>- Dal 2035 auto e furgoni nuovi a 0 emissioni</li> <li>- Caricabatterie universale per smartphone (USB-C)</li> </ul>
 <b>FORESTE</b>	One-Health	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tre miliardi di nuovi alberi</li> <li>- Salvaguardia foreste primarie e antiche</li> <li>- Ecoturismo</li> </ul>

*Tabella 1.1 – Principali settori impattanti e relativi obiettivi (Fonte: Elaborazione propria)*

Il Green Deal ha dato impulso e slancio a iniziative che hanno come finalità comune, quella di ridurre le emissioni di tutte le attività umane che si svolgono sul suolo europeo. Per facilitare il raggiungimento di questi obiettivi, negli ultimi decenni sono stati sviluppati strumenti e software che coadiuvassero il lavoro di tecnici ed esperti. Tra questi strumenti se ne possono annoverare diversi:

- Certificazioni ambientali (EPD, EMAS, PEF)
- Strategie (ESG, IIRC)
- Standards (ISO, PCR)
- Metodologie LCA (Life Cycle Assessment)

L'Unione Europea (UE) può essere considerata uno dei leader mondiali nel contrasto al cambiamento climatico, insieme alla Cina che sta facendo passi da gigante nella transizione ecologica. Ciò che garantisce questo primato all'UE sono le politiche e gli strumenti che ha adottato e sviluppato nel corso degli ultimi

decenni, che consentono a tutte le parti interessate di contribuire efficacemente al fine ultimo: la riduzione delle emissioni climalteranti.

Nei capitoli successivi di questo lavoro di ricerca verranno approfonditi due degli elementi precedentemente menzionati, nello specifico:

1. Lo svolgimento della valutazione del ciclo di vita di prodotti bio-based usati nel settore edile con l'ausilio del software SimaPro,
2. Gli standard ISO, specificatamente alle norme relative all'LCA: la ISO 14040 che riporta "Principi e quadro di riferimento" (ISO, 2006) e la ISO 14044 che riporta "Requisiti e linee guida" (ISO, 2006)

Solo per dare un'idea dell'importanza che le certificazioni ambientali hanno e avranno nel prossimo futuro, e quindi di conseguenza anche coloro che lavoreranno in questo settore, si riporta il seguente esempio: attualmente negli Stati Uniti d'America le aziende che vogliono partecipare alla realizzazione delle grandi opere federali, ossia agli appalti pubblici per la realizzazione di opere edili, devono necessariamente essere dotati di una certificazione ambientale. In Europa, questo requisito non è ancora imposto per legge bensì volontario.

Sul fronte europeo una novità legislativa rilevante è l'adozione, in data 11/11/2022, della Direttiva CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive). Questa renderà le imprese più pubblicamente responsabili, obbligandole a divulgare regolarmente informazioni sul loro impatto sociale ed ambientale. I nuovi requisiti di rendicontazione della sostenibilità dell'UE si applicheranno a tutte le grandi società, quotate o meno in borsa. Dovranno conformarsi anche le imprese extra UE con un'attività sostanziale nell'UE (con un fatturato superiore a 150 milioni di euro nell'UE). Saranno coinvolte anche le PMI elencate, ma avranno più tempo per adattarsi alle nuove regole.

Le regole entreranno in vigore tra il 2024 e il 2028:

- Dal 1° gennaio 2024 per le grandi imprese di interesse pubblico (con oltre 500 dipendenti) già soggette alla direttiva sulla rendicontazione non finanziaria, con scadenza 2025,

- Dal 1° gennaio 2025 per le grandi imprese attualmente non soggette alla direttiva sulla rendicontazione non finanziaria (con più di 250 dipendenti e/o 40 milioni di euro di fatturato e/o 20 milioni di euro totale di attivo), con scadenza 2026,
- Dal 1° gennaio 2026 per le PMI e le altre imprese, con segnalazioni in scadenza nel 2027. Le PMI possono rinunciare fino al 2028. (Direttiva 2022/2464, 2022)

### **1.1. Obiettivo del lavoro di tesi**

Dopo aver fornito una visione panoramica dell'argomento che verrà trattato in questa tesi, partendo dal periodo delle prime emissioni fino ad arrivare alle politiche che mirano alla loro riduzione o eliminazione, e aver contestualizzato l'ambito in cui questa ricerca si colloca, si procederà a spiegare quale è l'obiettivo perseguito. Come evidenziato in precedenza, su questo lavoro di tesi l'analisi si concentrerà su bio-materiali, cioè prodotti ottenuti parzialmente o interamente da biomassa. In questo caso specifico i materiali che verranno trattati sono costituiti prevalentemente da *Phragmites australis* (Cav.), una specie vegetale spontanea tipica delle zone umide dell'Europa e non solo, la cui utilizzazione sarà applicata al settore dell'edilizia, attraverso la produzione di pannelli isolanti e tetti. La conduzione di questo studio è stata coadiuvata da due aziende operanti nel settore, che sono state disponibili a fornire dati tecnici affinché la ricerca e la modellazione fossero condotte nel modo più accurato possibile.

Il core dello studio è quello di determinare se e quanto si risparmi, in termini di impatto ambientale, utilizzando materiali bio-based in sostituzione dei materiali tradizionali, in tutte le fasi di vita dei prodotti (produzione, installazione, utilizzo, ecc.). Per eseguire questo tipo di valutazione si è fatto ricorso alla metodologia LCA (Life Cycle Assessment o analisi del ciclo di vita), descritta in dettaglio nel capitolo 2, e attraverso il software SimaPro ©. La LCA è una metodologia di valutazione che prevede l'analisi di uno o più prodotti o processi (in questo caso di prodotti), dalla raccolta o estrazione della/e materia/e prima/e fino agli scenari di fine vita (riciclo, riuso, ecc.), passando per tutte le fasi intermedie di trasformazione e utilizzo. Questo permette di determinare, in modo quanto più possibile rigoroso, gli impatti che un prodotto genera durante tutto l'arco della sua vita (Hauschild, 2018). L'obiettivo finale sarà dunque quello di determinare se, l'utilizzo dei due prodotti bio-based sarà giustificato da una reale riduzione degli impatti ambientali rispetto agli omologhi tradizionali. Durante la trattazione ci si soffermerà anche sugli aspetti

tecniche, come l'efficienza e la vita utile del prodotto, essendo questi i punti che solitamente vengono indicati come i più critici.

## **2. Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), storia, evoluzione e applicazione del metodo**

### **2.1. Presentazione del metodo**

La metodologia LCA è il metodo più usato e più completo per svolgere l'analisi del ciclo di vita di prodotti e processi e si può dire che si sia sviluppata parallelamente, sia a livello temporale che a livello tecnico, con il concetto di sostenibilità. La forte connessione che lega questi concetti tra loro ha fatto in modo che, così come la sostenibilità è divisa nei tre pilastri fondamentali (ambientale, sociale ed economico), anche per l'LCA sono state distinte tre modalità di applicazione, ognuna adattata sulla base del pilastro che è chiamata a valutare. L'LCA (Life Cycle Assessment) si riferisce principalmente alla valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto o servizio lungo tutto il suo ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento. Tuttavia, in un'ottica di Life Cycle Thinking, si tende ad adottare una visione più ampia, includendo anche le altre due dimensioni della sostenibilità: quella sociale ed economica. Nello specifico:

1. LCA (Life Cycle Assessment): si concentra esclusivamente sulla sostenibilità ambientale, analizzando l'impatto ecologico di un prodotto o servizio.
2. S-LCA (Social Life Cycle Assessment): si indirizza sulla sostenibilità sociale, identificando, analizzando e quantificando gli effetti su diversi gruppi di stakeholder, come lavoratori, comunità locali, consumatori e altri attori della catena del valore. Considera pertanto aspetti come le condizioni di lavoro, i diritti umani, la salute e la sicurezza.
3. LCC (Life Cycle Costing): si indirizza alla sostenibilità economica, quantificando tutti i costi associati a un prodotto o servizio lungo il suo ciclo di vita. Questo include i costi di acquisto, possesso, funzionamento, manutenzione e smaltimento, fornendo una visione completa dell'impatto economico.

In sintesi, mentre l'LCA vero e proprio si focalizza sull'impatto ambientale, una visione integrata di Life Cycle Thinking include anche il S-LCA per la sostenibilità sociale e l'LCC per quella economica, offrendo un approccio completo e multidimensionale alla valutazione della sostenibilità.

Prima di introdurre l'argomento che verrà trattato in questo capitolo è bene fare una

distinzione tra quella che è la metodologia, ovvero la valutazione del ciclo di vita o in inglese Life Cycle Assessment (LCA), e quelli che sono gli strumenti che permettono di attuarla, ossia SimaPro, GaBi, OperLCA ecc., i quali sono dei software sviluppati appositamente per condurre questo tipo di studi.

Fatta chiarezza sulla distinzione tra strumenti e metodologia si procederà con la spiegazione di quest'ultima.

Innanzitutto, il concetto stesso di ciclo di vita è derivato dalla consapevolezza, in primis grazie al report al Club di Roma, *I limiti dello sviluppo* (D. H. Meadows, 1972), che i cambiamenti ambientali e non solo, che si sarebbero verificati di lì in avanti avrebbero richiesto un approccio olistico per essere affrontati, sia per investigarne le cause sia per concepire delle soluzioni mitigatrici o risoltrici. Per approccio olistico si intende un modo di pensare ad un fenomeno nella maniera più ampia possibile, ossia individuandone tutte le connessioni e le implicazioni, a monte e a valle, ossia un modo che permetta di vedere il fenomeno nel suo complesso ed averne una panoramica per inquadrarlo nella sua interezza. Soltanto in questo modo sarà possibile individuare le cause e le soluzioni cogenti per un problema complesso com'è quello del cambiamento climatico e ambientale in generale.

L'LCA è una metodologia innovativa che ha visto un suo progressivo sviluppo concettuale e tecnico, nonché un crescente utilizzo, a partire dalla fine degli anni '90.

I concetti fondanti sono stati espressi molto tempo prima rispetto a quando si è iniziato ad implementare la metodologia e gli strumenti per metterla in atto. I metodi sui quali si basa quello che oggi è l'LCA sono nati negli anni '60, in collaborazione tra università e mondo industriale. All'epoca erano conosciuti come Analisi del Profilo delle Risorse e dell'Ambiente (REPA) o eco-bilanci, fino a quando il nome LCA non è diventato di uso corrente negli anni '90. Il metodo iniziò ad essere sviluppato negli Stati Uniti e nel Nord Europa. Agli albori consisteva perlopiù in un conteggio dei materiali e dell'energia, visto che prevedeva un inventario dell'uso delle risorse (acciaio, petrolio grezzo, ecc.), delle emissioni e della generazione di rifiuti solidi per ognuna delle fasi del processo produttivo. Dal momento che l'operazione di inventario diventava sempre più complessa si iniziarono a tradurre i risultati dei flussi di materia ed energia in valori potenziali di impatto ambientale. In altre parole, da una semplice lista di materiali e di risorse vennero calcolati un insieme di indicatori che rappresentavano i contributi degli

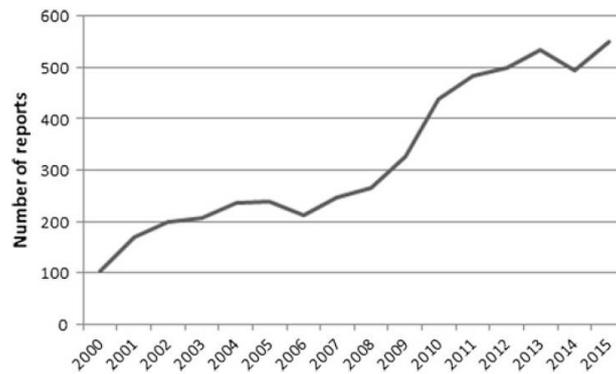
stessi materiali e risorse espressi secondo diverse categorie di impatto, come: cambiamento climatico, eutrofizzazione e scarsità delle risorse.

Durante quella che si può considerare come la fase embrionale dell'attuale analisi LCA, i diversi stakeholders impegnati nello sviluppo della metodologia e degli strumenti per applicarla, si focalizzarono su aspetti diversi sulla base delle necessità del momento del mondo reale, a discapito della coerenza e della omogeneità dei metodi. Per alcuni anni ci si concentrò più sull'aspetto legato alla produzione di rifiuti solidi; quando il prezzo del petrolio stava subendo forti fluttuazioni e impennate di prezzo si pose l'accento sull'uso dell'energia; dopo ancora ci si focalizzò sulle emissioni in atmosfera.

Questa frammentazione cercò di essere omogeneizzata per la prima volta da una metodologia che considerava contemporaneamente un insieme completo di categorie di impatto come le conosciamo oggi, il CML92 (M. Z. Hauschild, 2017). Durante gli anni a venire fecero la loro comparsa altri metodi, i quali potevano avere anche differenze sostanziali tra loro, comportando risultati significativamente diversi anche analizzando uno stesso prodotto.

Ma un'altra problematica era preminente rispetto a questa, ed era la necessità di espandere il numero di processi per i quali avere a disposizione emissioni ed impatti in modo da allargare lo spettro dei prodotti analizzabili con LCA. A questa problematica venne in soccorso il rilascio della prima versione del databaseecoinvent (v 1.01) che copriva tutti i settori industriali e mirava ad avere dei dati con standard e qualità uniformi. Per inciso, questo database è uno dei più usati al mondo, nonché quello che è stato utilizzato per lo svolgimento del presente studio LCA, ovviamente nella sua versione aggiornata (v 3.10).

Mentre l'interesse nei confronti dell'LCA continuava a crescere e veniva adottato da un numero sempre maggiore di organizzazioni, aziende e governi, tendeva a crescere la consapevolezza che i risultati che si ottenevano da questi studi avevano divergenze marcate a seconda delle scelte metodologiche che si utilizzavano per condurli, anche se condotti su uno stesso prodotto o processo.



**Figura 2.1 – Andamento in cifre dei report pubblicati dalle aziende che menzionano LCA. (Fonte: libro “Life Cycle Assessment – Theory and practice”)**

In seguito alla forte richiesta di una metodologia più coerente e globale con la quale si potessero ottenere dei risultati coerenti tra loro e con un grado di incertezza accettabile, anche utilizzando metodologie o database diversi, si iniziarono ad organizzare dei tavoli tecnici con lo scopo di sviluppare un quadro comune e dei principi condivisi da adottare.

A partire dall’inizio degli anni ’90 la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) e la UNEP (United Nations Environmental Program) iniziarono un percorso di ricerca che portasse al delineamento di un quadro più chiaro per tutti coloro che volessero condurre studi LCA. Le due organizzazioni decisero di creare una collaborazione per assicurare lo sviluppo di “buone pratiche” nella conduzione degli studi LCA e fare in modo che sempre più organizzazioni, aziende ecc. ne facessero uso. Così nel 2002 fu lanciata la UNEP /SETAC Life Cycle Initiative.

Negli stessi anni la ISO (International Organization for Standardization) iniziò un processo di standardizzazione formale. Per venire incontro alle esigenze dell’industria che richiedeva l’implementazione dell’LCA per lo sviluppo dei prodotti e per finalità di marketing e pubblicizzazione dei prodotti più green, dal 1993 la ISO iniziò a lavorare ad un progetto per sviluppare standard globali per l’LCA. Questo processo di ricerca e sviluppo si concretizzò nel rilascio e nell’adozione di quattro standard nell’arco di tempo che andava dal 1993 al 2000:

- ISO 14040 – Principi e quadro di riferimento
- ISO 14041 – Obiettivi e campo di applicazione
- ISO 14042 – Valutazione degli impatti del ciclo di vita

- ISO 14043 – Interpretazione del ciclo di vita

In una revisione del 2006 le ultime tre vennero raggruppate nella ISO 14044 riportando dettagliatamente i requisiti e le linee guida necessari per lo svolgimento di uno studio LCA.

Event	Year	Note
The (perhaps) first LCA-oriented study was presented on energy requirements for the production of chemical intermediates and products	1963	World Energy Conference, Harold Smith
Coca Cola commissions its first study comparing beverage containers	1969	Not public
The methodological foundation for environmentally extended input/output analysis is made	1970	Leontief (1970)
Publication of the first public and peer-reviewed LCA study "Resource and Environmental Profile Analysis of Nine Beverage Container Alternatives", commissioned by the US EPA	1974	EPA (1974)
First impact assessment method based on critical volumes introduced	1984	BUS (1984)
The first widely used commercial LCA software, GaBi, was released in its first version	1989	Thinkstep (2016)
SimaPro, another widely used commercial LCA software, was released in its first version	1990	PRé (2016)
The term "life cycle assessment" was coined	1990	SETAC (1991)
Emergence of a number of LCI databases managed by different institutions	Early 1990s	
First environmental theme-oriented impact assessment methodology, CML92	1992	Heijungs et al. (1992)
SETAC Code of Practice published in effort to harmonise LCA framework, terminology and methodology	1993	SETAC (1993b)
The academic journal fully dedicated to LCA, The International Journal of Life Cycle Assessment, was born	1996	
ISO 14040 standard on LCA principles and framework released	1997	ISO 14040
ISO 14041 standard on goal and scope definition released	1998	ISO 14041
Damage-oriented methodology Eco-indicator 99 emerges	1999	Goedkoop and Spriensma (2000)
ISO 14042 standard on life cycle impact assessment released	2000	ISO 14042
ISO 14043 standard on life cycle interpretation released	2000	ISO 14043
UNEP/SETAC Life Cycle Initiative launched	2002	
The LCI database ecoinvent version 1.01 is released	2003	Ecoinvent (2016)
Establishing of a general methodological framework and guideless for LCA through ISO 14040 and ISO 14044	2006	
A framework for Life Cycle Sustainability Analysis was proposed	2008	Klöppfer (2008)
ILCD handbook published	2010	EC (2010)
PEF and OEF guidelines published	2012 and later	

*Tabella 2.1 – Eventi chiave della storia dell’LCA. (Fonte: libro “Life Cycle Assessment – Theory and practice”)*

## 2.2. Struttura del metodo

L’articolazione del metodo è principalmente dettata dalle norme sopra riportate, la ISO 14040 e la 14044.

La procedura per la conduzione di uno studio LCA è suddivisa in fasi e ovviamente inizia dalle fasi preliminari, necessarie per qualsiasi prodotto o processo che sarà

oggetto di studio. Per esempio, la produzione della maggior parte dei prodotti materiali implica l'estrazione di materie prime (metalli, petrolio, ecc.), che viene considerata come la fase zero in qualsiasi processo produttivo. Questa affermazione implica però una precisazione: se è vero che la prima fase del processo produttivo che crea degli impatti ambientali è quella dell'estrazione delle materie prime, è altrettanto vero che c'è una fase precedente ad essa che può avere un'influenza, positiva o negativa, su questi impatti: la fase di design e progettazione del prodotto stesso.

Solitamente la fase di design o sviluppo non è considerata negli studi LCA, anche se questa fase darebbe un contributo significativo. Le decisioni prese in fase di design o sviluppo infatti, possono influire molto sugli impatti generati dal prodotto nelle fasi successive (per esempio il design più o meno aerodinamico di una macchina può contribuire al livello di consumo di carburante che la stessa avrà durante la fase di utilizzo), consentendo quindi di ridurre gli impatti a monte. Troppo spesso questo aspetto viene trascurato, ma l'attenzione nei suoi confronti sta assumendo un'importanza sempre maggiore. A dimostrazione di ciò, si ricorda che l'eco-design ha una norma ISO dedicata, la 14062, che detta le linee guida per sviluppare un adeguato processo di progettazione del prodotto (G. Rebitzer, 2004).

La *Figura 2.2* mostra le quattro fasi essenziali e necessarie per lo svolgimento di uno studio LCA:

- 1) Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione;
- 2) Inventario dei flussi e dei relativi dati;
- 3) Valutazione degli impatti ambientali;
- 4) Interpretazione dei risultati.

Oltre alla distinzione nelle quattro sezioni si può notare come le frecce abbiano tutte una doppia direzione, ovvero vanno verso lo step successivo ma da esso tornano anche indietro. Questo sottolinea come lo studio LCA sia un processo iterativo, che permette di tornare allo step precedente, per modificare o correggere eventuali errori (dati sbagliati, errori di misura, di calcolo, ecc.), per poi verificare nello step successivo che tali correzioni restituiscano i valori coerenti. Per esempio, se nella fase di Impact assessment mi accorgo di avere dei valori palesemente distanti da quelli attesi posso tornare nella fase di Life cycle inventory, controllare i valori inseriti ed eventualmente correggerli, per poi tornare alla fase di Impact assessment

per vedere se le modifiche apportate abbiano ricondotto i valori in un intervallo plausibile.

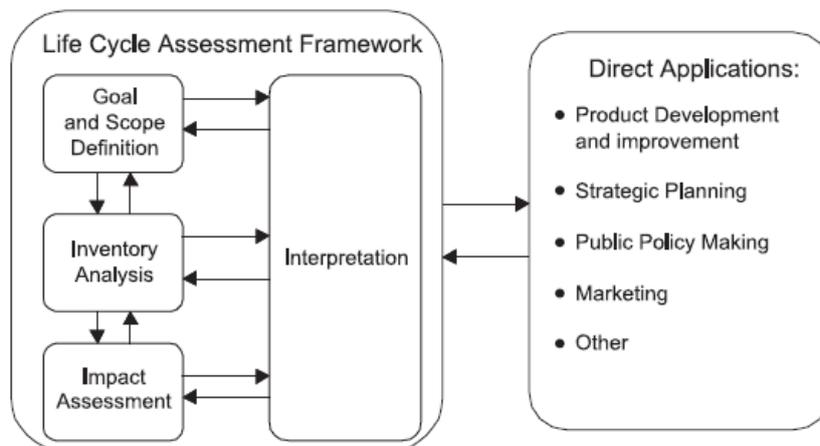


Figura 2.2 – Fasi e impieghi dell’LCA. (Fonte: life-aquaenvec.eu)

Al giorno d’oggi in qualsiasi ambito è ricorrente l’uso di acronimi e neologismi. Il settore della sostenibilità, e in particolare di tutto ciò che gravita attorno alla metodologia LCA, non fa eccezione. Nella trattazione verranno forniti, di volta in volta, i significati di ognuno di questi acronimi o neologismi per consentire una lettura più chiara anche a coloro che non hanno dimestichezza con essi. Di seguito verranno spiegate nel dettaglio le quattro fasi principali di applicazione della metodologia LCA con i relativi termini tecnici.

### 2.3. I - Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione (Goal and scope definition)

La prima fase, goal and scope definition (definizione di obiettivi e campo di applicazione) di un LCA, fornisce la descrizione di un product system (o prodotto di sistema, che identifica l’intero ciclo di vita del prodotto con i relativi flussi di energia e di materiale) in termini di confini di sistema e di un’unità funzionale (F.U., Functional Unit). Quest’ultima è la base fondamentale che permette la comparazione e l’analisi di materiali o servizi diversi riconducendoli alla stessa quantità di prodotto o servizio erogato, detta appunto unità funzionale. Questa generalmente non è solo una quantità di materiale. Gli utilizzatori di software per la conduzione di analisi LCA (practitioners) per esempio, potranno confrontare tipi di packaging alternativi sulla base di  $1\text{m}^3$  di prodotto da imballare, ossia il servizio

che il packaging svolge per una stessa quantità di prodotto. La quantità di materiale di packaging richiesto, chiamato flusso di riferimento (reference flow), per imballare 1m<sup>3</sup> di prodotto potrà variare anche di molto a seconda del materiale usato (carta, plastica, alluminio, ecc.), ma l'unità funzionale sarà la stessa per tutti, consentendone quindi la comparazione.

I punti chiave della fase di obiettivo sono i seguenti:

- 1) Finalità di applicazione dei risultati: cioè il motivo o i motivi per cui si intende condurre lo studio e come verranno utilizzati i risultati ottenuti;
- 2) Limitazioni dovute a scelte metodologiche: qual è il perimetro entro il quale lo studio può contribuire a dare risposte riguardo una specifica problematica, ovvero per cosa può essere usato lo studio e per cosa non può essere usato. Per esempio, se nello studio considero solo l'indicatore del riscaldamento globale non posso usare i risultati dello studio per dare giudizi riguardanti l'acidificazione degli oceani.
- 3) Individuazione del contesto e motivo per il quale si conduce lo studio: si fornisce una descrizione dettagliata di quello che sarà il contesto di riferimento dello studio, rimanendo coerenti con quanto espresso nella fase 1. Inoltre, si darà una spiegazione delle ragioni che hanno portato alla conduzione dello studio. Nella fase 1 si spiega *cosa* lo studio fa, nella 3 bisognerebbe spiegare *perché* lo studio viene condotto. Per esempio, la fase 1 descrive che lo studio andrà a studiare diversi tipi di smaltimento dei rifiuti degli enti pubblici di una città, la fase 3 spiega che questo verrà fatto perché il comune deve scegliere quale modalità di gestione dei rifiuti adottare.
- 4) Pubblico di riferimento: l'obiettivo deve individuare la platea a cui lo studio si rivolge. Possono essere clienti, aziende, gruppi di consumatori o specifici dipartimenti di un settore industriale. Il pubblico a cui lo studio è destinato influenza profondamente la struttura dello studio stesso e il modo con cui esso è redatto. Per esempio, se il pubblico di riferimento è costituito da figure che non hanno familiarità con l'LCA si redigerà un report che spiega minuziosamente, in modo pedagogico la terminologia e lo svolgimento dell'iter tecnico dello studio.
- 5) Studi comparativi che saranno presentati al pubblico: bisogna dichiarare se uno studio è di natura comparativa e se questo verrà condotto con la finalità di essere presentato al pubblico. Se così fosse, le norme ISO prevederebbero

determinati requisiti di documentazione e di conduzione del processo, nonché la verifica esterna da parte di un ente terzo.

6) Committenti dello studio e altri attori coinvolti; dev'essere riportato chi ha commissionato lo studio e chi lo ha finanziato. Questo punto è utile per capire se lo studio possa risentire di faziosità o se ci siano potenziali conflitti di interesse di cui il lettore dev'essere a conoscenza.

Dopo aver definito l'obiettivo si definisce il campo di applicazione. In questa fase si determina che product system deve essere valutato e come questa valutazione dovrebbe essere compiuta. L'obiettivo generale è quello di assicurare e documentare la coerenza di metodi, assunzioni e dati permettendo così la riproducibilità dello studio, caratteristica indispensabile per rendere valido, secondo il metodo scientifico, il lavoro di valutazione.

Come spiegato in precedenza verranno presentati dei termini tecnici con le relative definizioni propedeutiche alla comprensione degli argomenti che verranno spiegati più avanti.

Un'unità di processo (unit process) è il più piccolo elemento considerato in un modello di inventario (vedi più avanti) del ciclo di vita per cui sono quantificati i dati di input e di output. Le unità di processo possono quindi essere considerate come i blocchi costitutivi di un modello di inventario del ciclo di vita che sono tenuti insieme da dati di input e output, i quali possono essere distinti in sei categorie:

*Flussi di input:*

1. Materiali
2. Energia
3. Risorse

*Flussi di output:*

4. Prodotti
5. Rifiuti da trattare
6. Emissioni

In pratica per un'unità di processo si può sia intendere un singolo processo che un impianto in cui avvengono più processi. In quest'ultimo caso si può procedere alla suddivisione in ulteriori due o più unità di processo. Solitamente le unità di processo non guadagnano né perdono massa e la somma di tutti i flussi in input deve essere uguale alla somma di tutti i flussi in output.

I flussi di output appartenenti alle categorie *prodotto* o *rifiuti da trattare* di un'unità di processo possono essere considerati come flussi di input per un'altra unità di processo, questo è il modo in cui i flussi si collegano in un inventario del ciclo di vita. A differenza dei flussi di *risorse* ed *emissioni* che non si scambiano tra unità di processo diverse. Tant'è che vengono definiti come *flussi elementari*, ossia come “singola sostanza o energia che è stata ottenuta dall'”ecosfera” (vedi più avanti) o che in essa viene rilasciata senza previa o successiva trasformazione umana”.

L'ecosfera è intesa semplicemente come ambiente o natura, cioè come tutto ciò che non è intenzionalmente realizzato dall'uomo.

In contrapposizione all'ecosfera c'è la tecnosfera, che è invece tutto ciò che è artefatto o realizzato dall'uomo. Anche il processo di fotosintesi è considerato tecnosfera quando è impiegato all'interno di un sistema agricolo organizzato dall'uomo.

Spesso le unità di processo che costituiscono l'intero ciclo di vita del prodotto sono addirittura centinaia. È utile quindi distinguerle in unità di processo appartenenti al sistema primario (Foreground system) e al sistema secondario (Background system). Nel primo sono contenuti quei product system che sono specifici per il prodotto oggetto di studio; sono quelli di cui si conosce nel dettaglio la natura e l'entità perché derivanti da fornitori o altri soggetti con cui si hanno contatti diretti. Di conseguenza il sistema primario è modellato sulla base di dati primari. In questo caso, sulla base dei dati ricavati dallo studio si potrà agire direttamente sulle scelte di queste persone fisiche o giuridiche, scegliendo un fornitore piuttosto che un altro o scegliendo un tipo di trasporto piuttosto che un altro, dato il maggiore controllo che si ha su di essi.

Al secondo caso invece, appartengono quei processi che non sono specifici per il prodotto studiato ma sono processi usati anche per altri tipi di produzione: forniture elettriche, smaltimento rifiuti, ecc.

Su questi il decision maker ha meno capacità di influenzare modifiche o

cambiamenti perché non ha contatto diretto con chi fornisce il prodotto o il servizio (Rosenbaum, 2012).

Nella fase di definizione del campo di applicazione (scope) l'oggetto dello studio LCA e del LCI (Life Cycle Inventory) deve essere descritto nel dettaglio. Questo dev'essere coerente con l'obiettivo (goal) definito in precedenza. Certamente sarà necessario che ogni fase dello studio rispetti i requisiti di coerenza dei metodi, delle assunzioni e dei dati. Qualora sorgessero delle incongruenze o si rendesse necessario l'utilizzo di dati non propriamente coerenti, per qualsivoglia ragione (mancanza di dati certi, difficile reperibilità, ecc.), questo dovrà essere esplicitato nell'apposita sezione delle interpretazioni o conclusioni. La determinazione del campo di applicazione di uno studio si dovrebbe derivare sulla base dell'obiettivo e si dovranno descrivere i seguenti punti, così da evitare errori di incoerenza:

- I risultati attesi sulla base delle premesse;
- Il sistema o il processo oggetto di studio, così come le sue funzioni, l'unità funzionale e il flusso o flussi di riferimento;
- Come verrà svolta la modellazione del LCI e la gestione di processi e prodotti;
- Confini del sistema ed eventuali regole di cut-off (con questo termine ci si riferisce all'esclusione di alcuni parametri quando siano al di sotto di una determinata soglia; tali soglie sono definite dalla norma 14044);
- Le categorie di impatto LCIA e gli specifici metodi LCIA che saranno usati, nonché, se usate, la normalizzazione e la ponderazione dei dati (vedere più avanti);
- Altri requisiti dei dati LCI riguardanti la rappresentatività tecnologica, geografica e temporale;
- Tipo, qualità e fonti dei dati e informazioni richieste;
- Requisiti per la comparazione tra due sistemi;
- Identificare la necessità di una revisione critica;
- Pianificare la presentazione dei risultati.

L'elenco segue l'ordine logico con cui le fasi dovrebbero essere svolte, ma la natura iterativa del processo di uno studio LCA a volte rende interconnesse queste fasi, che non sempre sono nettamente distinte l'una dall'altra. Nello studio si dovrà cercare di seguire il più possibile questo ordine per rendere più facile l'esecuzione dello studio e renderlo più chiaro e comprensibile agli occhi del lettore.

## **2.4. II - Analisi di inventario del ciclo di vita (LCI – Life Cycle Inventory)**

La fase di inventario è il momento più importante di un LCA, nel quale si procede alla costruzione di un modello analogico della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra le singole operazioni appartenenti alla catena produttiva effettiva. In questa fase non sono previste analisi o commenti riguardo gli impatti ambientali che gli input e gli output possono provocare. L'obiettivo di questa fase è quello di fornire dati oggettivi che vadano a costituire la base del modello, e solo in seguito ad una loro adeguata modellazione si potrà procedere con l'analisi (LCIA – Life Cycle Inventory Analysis). La procedura con cui eseguire un inventario LCA è fornita dalla norma ISO 14040, che rende quindi meno arbitrario il processo stesso e tende a ridurre la soggettività e ad aumentare la confrontabilità di studi diversi tra loro.

Come specificato nel paragrafo precedente è importante che la qualità dei dati sia la migliore possibile e che la coerenza tra i vari tipi di dati raccolti sia massima. Calando nella pratica queste istruzioni si evidenzia una situazione meno ideale di quella raccomandata. Ciò vuol dire che molto probabilmente non si avrà un'accuratezza di primo ordine per la totalità dei dati raccolti, ma essendo consapevoli di questa problematica si dovrà procedere in modo da avere un livello di affidabilità migliore possibile.

Per rendere più semplice l'operazione si consiglia di disegnare un diagramma di flusso che è uno schema all'interno del quale vengono messi graficamente in evidenza i confini del sistema, i processi che si svolgeranno al suo interno e le materie prime e l'energia utilizzate come input per ottenere il prodotto finale. Quando si svolge l'analisi di inventario è consigliato seguire il principio del rasoio di Occam, che recita "è inutile fare con più ciò che si può fare con meno". Questo applicato alla fase di inventario si traduce nel consiglio di non esagerare con il grado di dettaglio dei dati quando esso non è necessario, in quanto la qualità del modello non dipenderà tanto dalla completezza della rappresentazione, ma dalla presenza in esso di tutte le componenti effettivamente significative (Baldo, 2008). Quindi, per rendere il sistema globale meglio identificabile e di più facile interpretazione, può essere a volte necessaria l'esclusione volontaria da un inventario di alcuni sottosistemi, come quelli relativi a componenti minori di un processo o a materiali il cui apporto è trascurabile. Tale esclusione deve essere

logica, giustificata dallo scopo dello studio e sempre dichiarata, nonché permessa dagli standard di riferimento.

Detto ciò, i dati da utilizzare nella fase di inventario dovrebbero, per quanto possibile, essere raccolti direttamente sul campo e per questa ragione si parla di solito di dati primari o *primary data*. Qualora i dati primari non fossero disponibili si potrà ricorrere ai dati secondari o *secondary data*, reperibili in letteratura o in apposite banche dati, come quelle fornite direttamente dal software che si usa per condurre lo studio.

Chiaramente tanto più elevata sarà la disponibilità di dati primari tanto più specifico e affidabile sarà lo studio. Tuttavia, anche nella migliore delle ipotesi non si avranno a disposizione solo dati primari, basti pensare alla fornitura di energia elettrica o al consumo di veicoli per il trasporto delle merci. Solitamente per questo tipo di dati si utilizzano dati secondari.

Nella fase di inventario deve essere tenuto in considerazione anche il concetto di allocazione. L'allocazione è uno strumento contemplato dalla norma ISO 14040 che permette di suddividere il valore degli input e degli output sulla base del loro contributo all'intero processo. Per comprendere meglio questo concetto si farà un esempio:

Si immagini che si stia conducendo uno studio su bottiglie di plastica. Lo stabilimento dove le bottiglie vengono prodotte produce anche altri tipi di prodotti in plastica. Quindi il dato sull'intero fabbisogno energetico della fabbrica non è applicabile alla sola produzione delle bottiglie; a questo punto dovrà essere effettuata un'allocazione, ossia una suddivisione del consumo energetico della fabbrica sulla base o di una caratteristica fisica dei prodotti (come consiglia la norma ISO 14040) oppure sulla base di altre caratteristiche. Se il consumo energetico annuale totale dell'impianto è di 50'000 Kwh e la produzione totale di tutti i prodotti (non solo delle bottiglie di plastica) è di 10'000 Kg vorrà dire che il consumo per la produzione di 1 Kg di prodotto è di 5 Kwh. Moltiplicando l'ammontare (in Kg) di bottiglie prodotte per il valore unitario di energia necessaria a produrre un Kg di prodotto (5Kwh), si otterrà la quota parte di energia elettrica che serve per la produzione del prodotto oggetto di studio.

Qualora non fosse possibile trovare delle relazioni di tipo fisico per eseguire la suddivisione del processo, allora si potrà ricorrere a metodi alternativi. Uno di

questi è quello basato su relazioni di tipo economico. Quest'ultimo è considerato un metodo alternativo valido e accettato ma che risente di diversi punti deboli che, a volte, ne determinano la scarsa attendibilità per due ragioni fondamentali: primo, perché l'aspetto economico è totalmente scollegato dalle relazioni fisiche proprie di un prodotto; secondo, perché il valore economico di un prodotto è per sua natura soggetto a fluttuazioni ed è variabile già all'interno del mercato di uno stesso paese e tanto più a livello globale.

## **2.5 La gestione del “fine vita” nell'analisi di inventario**

Una parte fondamentale dello studio del ciclo di vita di un prodotto è proprio quella della gestione del prodotto una volta che è giunto alla fine del suo periodo utile, ossia quando cessa di erogare il servizio o di svolgere la funzione per cui era stato concepito. A questo punto viene dismesso, diventando un rifiuto o un insieme di materiali che possono essere riusati, riciclati ecc.

Questa fase è fondamentale nell'analisi del ciclo di vita, perché eseguendo uno studio di questo tipo prima che il prodotto venga prodotto e commercializzato, è possibile studiare i vari scenari di “fine vita” (End of Life) e aumentare la componente riutilizzabile o riciclabile a discapito di quella parte che non è possibile riutilizzare o riciclare.

Il controllo sullo scenario di fine vita ha però dei limiti a seconda che si tratti degli scarti di processo o degli scarti del prodotto stesso. Nel primo caso ogni produttore avrà un controllo diretto dei propri scarti potendo sviluppare e attuare delle misure volte a ridurli o a riutilizzarli o smaltirli nel modo più corretto. Nel secondo caso queste operazioni saranno più difficili sia per ragioni di distanza spaziale tra produttore e utilizzatore/consumatore finale (si pensi a prodotti venduti all'estero), sia per ragioni di distanza temporale (prodotti che durano anni) tra il momento della produzione e il momento dello smaltimento.

All'interno del ciclo di vita di un prodotto si costituiscono diversi flussi, di materia, di energia ma anche di sottoprodotti o scarti che l'LCA si propone di valutare e confrontare con tutti gli altri flussi. Questo aspetto è una grande opportunità in quanto rende lo studio e i relativi risultati molto precisi e dettagliati. I sistemi di gestione dei rifiuti spesso permettono di avviare a recupero dei materiali oppure di produrre dei flussi di energia. Questi “sottoprodotti” complicano la valutazione del sistema in quanto è necessario quantificare i benefici (ambientali)

generati da tali flussi e paragonarli con i carichi ambientali associati al trattamento del materiale in ingresso. Per esemplificare quanto appena detto si pensi ad un termovalorizzatore; è vero che produce degli inquinanti nel momento in cui brucia i rifiuti al suo interno, ma la bruciatura di tali rifiuti genera un flusso di energia che dev'essere considerato opposto ai carichi ambientali delle emissioni generate dalla combustione.

Quando un prodotto giunge alla fine del suo ciclo di vita si prospettano tre scenari:

- Il recupero di materia;
- Il recupero di energia;
- Lo smaltimento in discarica.

Il primo scenario prevede che il prodotto possa essere o riusato, ripristinando le funzionalità originarie del prodotto attraverso delle operazioni di ricondizionamento, o riciclato, recuperando il materiale costituente il prodotto per realizzarne uno nuovo (uguale o diverso dal precedente). Nel caso di riciclo, si può avere riciclo aperto quando il materiale scartato rientra in circolo in un processo diverso da quello originario coinvolgendo un cambiamento delle sue proprietà; riciclo chiuso, quando il materiale da avviare a riciclo rientra in circolo nel medesimo processo che lo ha generato, sostituendo i materiali vergini in ingresso secondo modalità caratteristiche del processo stesso oppure quando non vi sia un cambiamento nelle proprietà del materiale.

Il secondo scenario è realizzabile attraverso degli impianti di termovalorizzazione che permettono la produzione di energia elettrica o termica recuperando l'energia presente nei materiali di scarto che possono essere utilizzati tal quali o dopo delle attività di selezione mirate alla massimizzazione dell'efficienza energetica.

L'ultimo scenario è destinato a trattare tutti quei prodotti dai quali, per caratteristiche intrinseche o per l'assenza di tecnologie adeguate, non può essere recuperata né materia né energia, se non una piccolissima parte di quest'ultima.

Non tragga in inganno il fatto che destinando un prodotto ad uno dei primi due scenari possa comportare un annullamento tout court delle emissioni climalteranti dello stesso. Il recupero di materia e di energia avviene comunque attraverso dei processi industriali che a loro volta emettono sostanze inquinanti. È bene quindi determinare preventivamente se e quanto sia conveniente, in termini sia ambientali che economici e sociali, ricorrere ad uno di questi metodi di gestione dei rifiuti. In

estrema sintesi, bisogna verificare se le emissioni generate da un processo di gestione dei rifiuti siano inferiori rispetto a quelle generate da un sistema di gestione diverso.

Nella determinazione degli impatti ambientali va tenuto in considerazione tutto il ciclo della gestione dei rifiuti, a partire dalla loro raccolta (con i relativi trasporti, ecc.), passando per le operazioni di separazione dei rifiuti, al trattamento nell'impianto ecc.

### **2.5.1. I principali aspetti metodologici**

Come accennato nel paragrafo precedente l'aspetto interessante e pratico su cui basare le scelte è quello di quantificare gli aspetti positivi associati al recupero di alcune tipologie di rifiuti.

La prima metodologia descritta sarà quella degli "impatti evitati". È spesso usata in scenari di riciclo aperto e secondo questo approccio si sottraggono dagli impatti ambientali generati quelli associati alla produzione dei flussi recuperati secondo le prestazioni ambientali delle filiere tipicamente utilizzate. Per fare un esempio è noto che gli impianti di termovalorizzazione generino degli impatti ambientali, ma è altrettanto noto che l'utilizzo di questo sistema permette il recupero di energia elettrica (tra le altre) che altrimenti si sarebbe dovuta produrre attraverso altre tecnologie. Per determinare i benefici del recupero energetico ottenuto dal processo, bisogna sottrarre agli impatti della termovalorizzazione quelli dovuti alla produzione della quantità di energia recuperata dalla combustione dei rifiuti. Il risultato di questo approccio è quindi la valutazione degli impatti ambientali di un sistema tenuto conto anche dei benefici associati agli eventuali recuperi.

Il secondo approccio è quello delle emissioni della CO<sub>2</sub> (anidride carbonica) derivante da fonte biologica. È tutt'ora uno degli argomenti più dibattuti e sul quale si fa fatica ad avere una visione unanime di come dovrebbe essere considerato, almeno nella conduzione degli studi LCA. La CO<sub>2</sub> è tra le principali sostanze responsabili dell'aumento della temperatura globale ed è stata anche scelta come molecola di riferimento per esprimere i risultati degli impatti ambientali secondo un'unica unità di misura, la CO<sub>2</sub>eq. (anidride carbonica equivalente). Il principale punto interrogativo a riguardo è se la CO<sub>2</sub> generata da combustione di materiale biologico o emessa da processi biologici sia equiparabile a quella generata da

processi non biologici. C'è chi sostiene che le emissioni generate da processi biologici facciano parte di un ciclo naturale e che quindi il loro riassorbimento sia garantito dalla natura stessa, rendendo nullo il loro contributo all'effetto serra. Se in linea di principio il concetto è vero bisogna andare ad investigare la cinetica dei processi di emissione e riassorbimento per capire se nella pratica questa linea di pensiero sia corretta. Se la quantità di CO<sub>2</sub> emessa da un processo biologico nell'arco di una settimana è fissata, grazie alla fotosintesi di un albero, nell'arco di due anni ci sarà un lasso di tempo in cui la molecola rimarrà nell'atmosfera contribuendo al riscaldamento globale.

### **2.5.2. Considerazioni sulla fase di inventario**

In questa fase sono stati raccolti tutti i dati necessari a svolgere nella maniera corretta uno studio LCA. È stato spiegato come raccogliere e manipolare i dati per ottenere uno studio quanto più attendibile possibile. È cura e dovere del LCA practitioner raccogliere tutti i dati primari possibili e ricorrere ai dati secondari solo quando non sia possibile reperire i primi in maniera adeguata. Egli è tenuto a ridurre al minimo le assunzioni e qualora si rendesse necessario utilizzarle, bisognerà fare riferimento alle PCR (Product Category Rules), agli standard o alle norme vigenti. Lo studio LCA non è condotto per ottenere i risultati sperati o ipotizzati a monte del suo svolgimento, ma è una metodologia che dev'essere imparziale e deve riflettere la realtà dei fatti, anche qualora essi siano diversi o opposti a quelli attesi o sperati da colui che lo conduce o lo commissiona.

Detto ciò, l'LCA non è una metodologia esatta, data la sua stessa natura eterogenea e complessa.

Si ritiene che gli studi LCA siano affetti da un errore minimo dell'ordine del 5-10%. A tal proposito si potrebbe pensare che l'approssimazione dei risultati venga fatta sempre per difetto, in quanto negli studi vengono spesso omessi dei processi o dei materiali che sono considerati trascurabili. D'altro canto, si potrebbe obiettare che l'approssimazione sia per eccesso a causa degli impatti più elevati dovuti all'utilizzo di database datati rispetto al periodo in cui si conduce lo studio. Attualmente non esiste un metodo ideale ma ciò che può essere dichiarato con certezza è che lo studio LCA offre il massimo supporto quando si tratta di eseguire valutazioni di confronto. È possibile che lo studio non sia estremamente preciso nella determinazione dei valori assoluti degli impatti ambientali ma nel confronto

tra due o più prodotti, in cui si possono stabilire delle percentuali di variazione, il metodo LCA esprime il suo massimo potenziale. Questo ultimo scenario è quello che verrà utilizzato per questo studio.

## **2.6. III - L'analisi degli impatti (LCIA – Life Cycle Impact Analysis)**

I dati relativi ai flussi di energia e materia in input e in output che sono stati calcolati e raccolti nella fase di inventario saranno necessari in questa fase per ottenere, attraverso delle procedure di calcolo, gli impatti generati da tali flussi e le eventuali implicazioni secondarie che questi generano.

L'analisi degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente (emissioni o reflui) e del consumo di risorse associati a un'attività produttiva.

Questo compito risulta essere tutt'altro che semplice, specialmente per quanto riguarda le conseguenze derivanti dalle emissioni nell'ambiente: esistono problemi oggettivi per l'individuazione e successiva interpretazione scientifica delle correlazioni fra le emissioni stesse e gli effetti ambientali. Le discipline che studiano gli effetti dell'attività antropica sull'ambiente sono, infatti, di sviluppo recente e per questo ancora caratterizzate da diverse difficoltà. Queste sono legate soprattutto all'interpretazione rigorosa di tali effetti e alla formulazione di modelli di previsione scientificamente accettabili (questo vale, in particolare, per gli effetti a livello planetario come il riscaldamento globale e l'assottigliamento della fascia di ozono).

### **2.6.1. Aspetti generali e definizioni**

Va premesso che, per valutare in maniera appropriata l'inquinamento dell'ambiente su diverse scale, devono essere tenuti in conto tre diversi fattori essenziali, quali l'emanazione di sostanze nocive (emissione), la diffusione e l'eventuale trasformazione che le sostanze subiscono una volta introdotte nell'ambiente (trasmissione), la concentrazione o la deposizione di inquinanti nel luogo d'azione (immissione). A seguito di questa premessa risulterà più chiara la definizione di "impatto ambientale" per intenderne correttamente i rapporti con gli "effetti ambientali": un impatto è una qualsiasi modificazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l'ambiente (ISO

14001).

Un impatto è associato a uno o più effetti ambientali: ad esempio, la CO<sub>2</sub> emessa durante la combustione di un certo quantitativo di carbone provoca un impatto che contribuisce all'effetto serra. Poiché non è possibile correlare inequivocabilmente uno specifico impatto ai suoi effetti ambientali, ci si deve limitare ad affermare che "l'impatto è ciò che prelude a un effetto", senza pretendere di poter quantificare rigorosamente il secondo sulla base del primo.

Dunque, mentre possiamo ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati della fase di analisi di inventario, i corrispondenti effetti ambientali potranno solo essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni da stabilire.

Una prima considerazione è quella che permette di evidenziare come gli effetti dovuti alle sostanze rilasciate nell'ambiente possano verificarsi nelle immediate vicinanze del punto di emissione oppure possano avere una ricaduta su tutto il pianeta. In pratica, gli effetti ambientali si suddividono, in base alla scala di azione, in effetti globali, regionali o locali.

Questo aspetto è dovuto alle caratteristiche fisiche e chimiche dell'emissione che genera l'effetto, nonché chiaramente alle condizioni ambientali. Per esempio, analizzando il comportamento ed il tempo di permanenza delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera, si può affermare che l'effetto serra è un effetto a scala globale in quanto, è stato appurato che, l'emissione di gas serra in un punto contribuisce all'effetto su tutto il pianeta.

È caratteristica, dunque, di questa fase della LCA la "globalità" dell'analisi. Per questo motivo, i risultati di un'analisi di inventario possono essere in generale utilizzati per la valutazione di effetti a scala globale.

Un ultimo aspetto da citare in questa parte teorica introduttiva è associato nuovamente al problema della trasmissione degli inquinanti rilasciati nell'ambiente. Le sostanze nocive emesse durante la fase di trasmissione possono subire trasformazioni chimiche, fisiche o biologiche dando origine ad altri composti che normalmente vengono definiti inquinanti di neoformazione o secondari. Questa considerazione è importante quando si vogliono definire e prevedere gli effetti ambientali causati dalle eventuali emissioni del processo che si sta analizzando. Per fare un esempio del fenomeno si può citare la formazione di ossidanti fotochimici derivanti dall'interazione che la luce del sole ha con gli idrocarburi emessi in atmosfera e che porta alla formazione di molecole di ozono.

È quindi chiaro come questo rappresenti un ulteriore ostacolo alla determinazione univoca degli effetti ambientali dovuti agli impatti negativi causati da un processo.

Alle difficoltà prima citate, legate ai fattori spazio e tempo di un impatto, è possibile in parte ovviare ricorrendo al concetto di “elemento di tensione” (stressor). Esso è definito come un insieme di condizioni che possono portare a un effetto negativo sull’ambiente.

Ad esempio, considerando il totale delle emissioni di SO<sub>2</sub> provenienti dai risultati di un’analisi di inventario, le piogge acide, la conseguente acidificazione e l’eventuale perdita di biodiversità in un lago sono le conseguenze immediatamente ipotizzabili.

In questo caso l’emissione di sostanze acide rappresenta lo stressor primario che può essere associato ad altri gruppi di stressor derivati come quelli ora citati, ovvero le piogge acide e la perdita di biodiversità. Così ogni sostanza viene trattata come stressor primario e si procede all’analisi di tutte le possibili cause di quelli che sono gli effetti derivati.

### **2.6.2. Le principali categorie di impatto**

Le categorie di impatto sono quelle categorie all’interno delle quali i diversi tipi di impatto vengono suddivisi per determinare su quale aspetto incidono maggiormente.

Le macroaree a cui le diverse categorie appartengono sono:

- Ecologia: effetti sulla popolazione e sull’ecosistema (ecological effects)
- Salute: effetti sulla salute e sulla sicurezza dell’uomo (human health and safety effects)
- Risorse: esaurimento di risorse di energia e di materiali (resource depletion)
- Riflessi sociali: impatto su tutte le attività umane che interagiscono con il sistema considerato e sul degrado dell’habitat (habitat degradation)

Nella fattispecie le categorie di impatto principali sono le seguenti:

- 1) Effetto serra (global warming potential): l’effetto serra è un fenomeno naturale e utile, che assicura il riscaldamento del pianeta Terra ed è legato alla presenza di alcuni gas atmosferici quali l’anidride carbonica, l’ozono, il vapore acqueo e il metano. Questi gas sono in grado di trattenere la radiazione solare

all'interno dell'atmosfera del Pianeta creando le condizioni adeguate alla vita come la conosciamo. Se tale effetto non esistesse le condizioni climatiche della Terra sarebbero inospitali per le forme di vita che attualmente lo popolano (umani, animali, piante ecc.). Come spiegato nel primo capitolo, il problema legato a questo effetto è iniziato quando l'Uomo ha cominciato ad immettere in atmosfera un quantitativo esagerato di gas che creano effetto serra, provocando un'alterazione del normale ciclo naturale che regola tale aspetto.

2) Assottigliamento della fascia di ozono stratosferico (stratospheric ozone depletion): l'ozono, molecola triatomica di ossigeno ( $O_3$ ), pur rappresentando meno di una parte per milione dei gas atmosferici, assorbe quasi interamente la radiazione ultravioletta proveniente dal Sole. Tale radiazione ha sufficiente energia per danneggiare molecole biologiche fondamentali come il DNA, determinando un aumento dei tumori della pelle e delle deficienze immunitarie, oltre a danni generalizzati a tutta la biosfera. Da ciò si può intuire l'importanza della sua presenza in atmosfera.

Il processo di formazione dell'ossigeno triatomico ( $O_3$ ) è dovuto proprio alla radiazione solare, in grado di scindere la molecola di ossigeno ( $O_2$ ) in due atomi di ossigeno (O). In seguito, in seguito le molecole di ossigeno indissociato urtano con i singoli atomi di ossigeno formando, l'ozono ( $O_3$ ). Quest'ultimo forma una sorta di strato protettivo intorno alla Terra, con uno spessore non omogeneo, ma risulta essere massimo all'equatore e più assottigliato verso i poli. Il range di altezza, rispetto alla superficie terrestre, nel quale si forma questo strato varia dai 25 ai 50 chilometri. Un esempio di attività che riduce fortemente la presenza di molecole di ozono sono le emissioni dovute ai motori jet degli aerei. Questi emettono tra le altre sostanze anche i cloro-fluorocarburi CFC e HCFC; il cloro in essi contenuto, liberandosi in aria a causa delle radiazioni UV, riduce la quantità di ozono accelerandone la trasformazione in ossigeno molecolare biatomico.

3) Acidificazione (Acidification): con il termine piogge acide si intende il processo di ricaduta dall'atmosfera di particelle, gas e precipitazioni acide. Questa ricaduta può avvenire sia in forma umida (piogge, neve, nebbie, ecc.) che in forma secca (quando il materiale non si è mischiato con particelle d'acqua). Le precipitazioni acide sono causate essenzialmente dagli ossidi di zolfo ( $SO_x$ ), e in parte minore da ossidi di azoto ( $NO_x$ ), presenti in atmosfera sia per cause naturali, sia per effetto delle attività umane.

A livello globale, le nazioni più colpite sono quelle su cui, per effetto dei venti dominanti, si scaricano le nubi acide prodotte in altri paesi. Il problema risulta essere particolarmente grave in Canada e in Scandinavia: in queste aree, infatti, l'abbassamento del pH di migliaia di laghi ha provocato la scomparsa di numerose specie animali e vegetali.

4) Eutrofizzazione (Eutrophication): il fenomeno dell'eutrofizzazione si può verificare sia nei suoli che nelle acque superficiali. Una delle attività che contribuisce in maniera importante al verificarsi di questo fenomeno sono i fertilizzanti agricoli e gli scarichi industriali. Il fenomeno è più noto per gli effetti che comporta nelle acque superficiali: in questo caso l'abbondanza di sostanze come l'azoto o il fosforo permettono una proliferazione delle alghe acquatiche superiore rispetto ai normali ritmi naturali, comportando quindi un consumo eccessivo dell'ossigeno presente nel corpo idrico, la cui purezza naturale viene compromessa.

5) Formazione di smog fotochimico (Photochemical Smog): è un tipo di inquinamento dell'aria che si forma quando la luce solare attiva delle reazioni chimiche tra inquinanti come ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e composti organici volatili (VOC) in atmosfera. Queste reazioni creano ozono nel livello più prossimo alla superficie terrestre e altri inquinanti secondari, che risultano in una foschia giallo-brunastra, particolarmente comune nelle aree urbane durante i giorni caldi e soleggiati. Il fenomeno crea rischi significativi per la salute, causando problemi respiratori e irritazione degli occhi, ed è particolarmente accentuato nelle città con un alto tasso di traffico e una conformazione geografica che trattiene l'aria inquinata. Questo tipo di inquinamento è il risultato diretto delle attività umane, in particolare delle emissioni dei veicoli e dei processi industriali, e tende a peggiorare con condizioni climatiche calde e poco vento.

6) Tossicità (Toxicity): questa categoria raggruppa una quantità di cause molto vaste che sarebbe riduttivo sintetizzare in questa sede. Nonostante questo, va ricordato che esistono comunque dei tentativi di standardizzazione per la potenziale ecotossicità.

7) Consumo di risorse non rinnovabili (Resource use): questa categoria racchiude al suo interno sia risorse energetiche che risorse materiali. A volte sarebbe utile e auspicabile mantenere separati questi due tipi di risorse ma non sempre è possibile. Come nel caso degli effetti ambientali, anche per l'uso di risorse è necessario stabilire un indice che possa correlare gli effetti prodotti dai consumi

che si generano in un determinato sistema produttivo con la situazione generale di disponibilità di risorse naturali; in questo modo potrà essere evidenziato l'effetto della diminuzione di tale disponibilità, mettendo in luce il problema della scarsità delle risorse stesse.

<b>Effetto</b>	<b>Scala</b>
Effetto serra	Globale
Assottigliamento fascia ozono	Globale
Consumo di risorse	Globale
Acidificazione	Regionale
Eutrofizzazione	Regionale/locale
Formazione di smog fotochimico	Regionale
Tossicità	Regionale/locale
Degradazione dell'area	Locale
Disturbi di tipo fisico (tipo rumore)	Locale

*Tabella 2.2 – Principali effetti ambientali e scala di influenza (Fonte: elaborazione propria)*

### **2.6.3. Strumenti operativi e calcolo degli impatti**

L'obiettivo di questa fase dell'LCA è quella di attribuire i consumi e le emissioni ottenuti in fase di inventario a specifiche categorie di impatto riferibili a effetti ambientali conosciuti. Inoltre, mira a quantificare, con opportuni metodi di caratterizzazione, l'entità del contributo complessivo che il processo o il prodotto ha nei confronti degli effetti considerati.

Sulla base di quanto stabilito dalle ISO 14040 e 14044, in questa fase vengono distinti elementi obbligatori ed altri facoltativi che convertono i risultati di inventario in opportuni indicatori.

Gli elementi obbligatori sono:

- La selezione degli effetti ambientali da considerare, oltre che degli indicatori ambientali che li rappresentano,
- l'assegnazione dei risultati della fase di LCI agli effetti ambientali scelti ("classificazione"),
- il calcolo degli indicatori di categoria ("caratterizzazione").

Gli elementi facoltativi sono:

- Il confronto degli indicatori ambientali calcolati con dei valori di riferimento (“normalizzazione”),
- la determinazione e il confronto dell’importanza dei singoli effetti ambientali (“pesatura”)

La prima operazione da effettuare nella fase di LCIA (Life Cycle Impact Assessment) è la scelta degli effetti ambientali (o categorie di impatto) sui quali sarà basata l’analisi. Come tutte le applicazioni in cui si utilizza un modello di calcolo per elaborare dati, anche nel LCA il calcolo degli indicatori finali risente in modo sensibile delle ipotesi fatte, della qualità dei dati utilizzati e del grado di conoscenza scientifica dei fenomeni di trasmissione degli inquinanti e dei relativi impatti.

Le maggiori incertezze risiedono nei fattori di caratterizzazione dei diversi reflui immessi nell’ambiente: impiegando fattori riconosciuti a livello internazionale, si limita sensibilmente la componente di soggettività. Il ricorso a fattori di caratterizzazione, la cui valenza scientifica è accertata, permette infatti di definire un indice oggettivo.

## **CLASSIFICAZIONE**

Dal punto di vista operativo la classificazione consiste nell’organizzare i dati dell’inventario. Questo significa distribuire i valori di tutte le emissioni, gassose, liquide e solide, provocate direttamente e indirettamente dalle operazioni considerate, nelle varie categorie di impatto. Inoltre, è opportuno ribadire che se è vero che tali categorie di impatto si riferiscono a effetti ambientali conosciuti, questi devono essere considerati per ora soltanto come effetti potenziali. Non solo per l’incertezza della correlazione dovuta ai limiti delle conoscenze scientifiche, ma anche perché non esiste, a questo livello di analisi, la pretesa di effettuare una determinazione puntuale degli effetti ambientali nel sito specifico in esame e nel momento preciso dell’indagine. Il primo approccio alla valutazione è, infatti, di tipo generale e porterà semplicemente a collegare quantitativamente un processo produttivo con determinate categorie di impatto.

## **CARATTERIZZAZIONE**

Dopo aver completato la classificazione dei diversi impatti causati dal processo, i metodi di caratterizzazione permettono di determinare in modo omogeneo e quantitativo il contributo delle singole emissioni. In tal modo risulta possibile esprimere quantitativamente, in un'opportuna unità di misura, il contributo che a ogni categoria fornisce l'operazione in esame; in altre parole, questa fase permette di determinare i valori degli "indicatori di categoria" che in precedenza sono stati definiti per ogni singolo effetto considerato.

In definitiva, l'impatto risulta rappresentato da valori numerici ottenuti elaborando i risultati della LCI con operazioni di raggruppamento e classificazione: il suo collegamento con l'effetto consiste nel fatto che esso ne è una causa potenziale. In questa accezione, il termine impatto non deve pertanto essere sopravvalutato, come avviene invece spesso nel suo uso corrente quando lo si confonde con l'effetto che può provocare.

## **NORMALIZZAZIONE**

È uno delle fasi facoltative della ISO 14044. Supporta l'interpretazione del profilo di impatto ed è il primo passo verso un risultato completamente aggregato che in seguito necessiterà una pesatura tra gli indicatori.

I risultati normalizzati di un LCIA danno, per ogni gruppo di impatti di "midpoint level" (cambiamento climatico, eutrofizzazione, ecc.) o "endpoint level" (salute umana, ambiente naturale, ecc.) la relativa quota di contribuzione comparandola con valori medi per persona o per paese, ecc. Questo permette di capire a che tipo di impatti il sistema nella sua interezza contribuisce in maniera maggiore o minore. Una cosa importante è che le singole categorie di impatto non possono essere confrontate tra loro dal momento che hanno unità di misura diverse e quindi non possono nemmeno essere sommate. Se volessero essere comparati e sommati questo richiederebbe un ulteriore passaggio, che è la pesatura o "weighting".

## **PESATURA**

È anch'essa una fase facoltativa come la normalizzazione. Prevede di assegnare pesi quantitativi distinti a tutte le categorie di impatto esprimendo la loro

importanza relativa. In questa fase ognuno dei risultati LCIA per le diverse categorie di impatto sono moltiplicati per un fattore di pesatura relativo. Eseguita questa operazione i risultati possono essere confrontati l'un l'altro e sommati. L'obiettivo finale è quello di avere una possibilità in più per eseguire il confronto dei risultati.

Una volta che sono state individuate le fasi che contribuiscono maggiormente alle diverse categorie di impatto, uno strumento interessante da applicare è l'analisi di sensitività.

Grazie alla natura iterativa del processo di LCA, il practitioner è in grado di utilizzare questo tipo di analisi per eseguire delle simulazioni che rappresentino degli scenari alternativi. In questo modo possono essere modificati i dati di input per rendersi conto di come i risultati finali possano cambiare in funzione delle modifiche che avvengono nel sistema.

Si può ipotizzare una situazione in cui la fase più impattante del processo sia il trasporto; in questo caso è possibile ridurre le distanze di trasporto del prodotto per capire se e quali vantaggi si possono ottenere accorciando, in termini spaziali, la filiera dello stesso. Questo può essere fatto per qualsiasi altro dato di input per comprendere come ridurre l'impatto delle fasi più critiche e far acquistare al prodotto una competitività ambientale superiore. Il processo permette di prevedere i risvolti di una determinata azione e valutarne la sua validità ed efficacia, prima che essa venga messa in pratica. Questa analisi rende lo studio LCA, e in particolare l'analisi di sensitività, uno strumento estremamente utile e importante per qualsiasi soggetto che voglia prendere delle decisioni ponderate, basate su dati e calcoli, con un livello di accuratezza elevato e che permetta di vagliare le diverse ipotesi "sulla carta" ma in maniera concreta; tutto ciò è reso possibile perchè in questo modo si può rappresentare verosimilmente gli scenari pratici e reali all'interno dello studio, evitando un dispendio di tempo ed eventualmente di risorse economiche. Nonostante l'LCA non sia in grado di prendere in considerazione tutte le problematiche e i risvolti pratici degli scenari ipotizzati, comporta un risparmio di tempo e denaro tanto maggiore quanto più alto è il livello di accuratezza dello studio.

In questo capitolo sono state spiegate nel dettaglio le diverse fasi necessarie allo svolgimento di uno studio LCA, le quali non sarebbero visibili o comprensibili se ci si limitasse ad osservare i risultati dello studio stesso, in quanto tutte le procedure

elencate sono in parte coadiuvate e in parte svolte tout court dal software usato. Se è vero che la raccolta dei dati avviene ad opera del soggetto che svolgerà lo studio, eventualmente aiutato dai vari operatori e lavoratori del settore interessato, alcuni dati sono forniti direttamente dal software mentre altri sono il frutto di assunzioni o ipotesi dello stesso practitioner. Il software oltre a coadiuvare nella fornitura di alcuni dati di difficile reperibilità aiuta a svolgere tutte le operazioni di calcolo che sarebbe impensabile condurre manualmente. Per chiarezza, la maggior parte delle operazioni che sono state presentate in questo capitolo vengono svolte all'interno del software, le cui informazioni dettagliate e i cui algoritmi consentono una conduzione attendibile e agevole dello studio.

## **2.7. Interpretazione dei risultati**

L'ultima delle quattro fasi dell'intero LCA è l'interpretazione dei risultati. La sua funzione è duplice:

- Durante le fasi iterative dell'LCA serve come guida per determinare la bontà o meno dei risultati ottenuti e permettere, eventualmente, una loro modificazione o correzione, per rappresentare e riflettere in modo ottimale l'intero ciclo di vita del prodotto.
- Una volta finita la fase iterativa del processo di LCA ed avendo effettuato tutte le correzioni e gli aggiustamenti necessari, serve come prova della corretta esecuzione dello studio e come base solida su cui fondare le considerazioni finali.

Come mostrato in *Figura 2.2*, la fase di interpretazione dei risultati è collegata a tutte le tre fasi precedenti dello studio LCA.

Nell'interpretazione i risultati sono valutati al fine di dare una risposta alle domande e ai dubbi posti nella fase di definizione degli obiettivi. L'interpretazione dovrebbe portare a delle conclusioni o raccomandazioni. Queste andrebbero presentate in maniera comprensibile e in un modo che aiuti il lettore dello studio LCA a valutare la robustezza delle conclusioni e comprendere le potenziali limitazioni dello studio.

L'interpretazione si sviluppa secondo tre attività che seguono l'ordine in cui sono presentate:

- Identificare le criticità significative (processi chiave, parametri, assunzioni, ecc.);

- Valutate le criticità rispetto alla loro sensibilità o influenza sui risultati totali. Questo prevede una valutazione della completezza e della coerenza con cui sono stati gestite le criticità;

- Alla fine, i risultati delle valutazioni vengono tradotti nelle conclusioni e raccomandazioni.

- 

#### 1) Identificazione delle criticità

- Elementi dell'inventario: fasi, processi, flussi che contribuiscono maggiormente. Si ricavano attraverso analisi di contributo (contribution analysis);

- Categorie di impatto: categorie di impatto che contribuiscono maggiormente;

- Scelte di modellazione e metodi di assunzione: scelte di modellazione rilevanti, come criteri di allocazione, assunzioni fatte in fase di raccolta dati o in fase di inventario per i processi o i flussi chiave, uso di dati secondari, ecc.;

- Committente e parti interessate: influenza del committente e delle parti interessate sulle decisioni e sulla definizione dello scopo e del campo di applicazione nonché sulle modalità di modellazione attuate. Esplicitare tale ed eventuale influenza nelle conclusioni.

#### 2) Valutazione delle criticità

- Controllo della completezza: determinare il grado di aderenza del modello a quanto espresso nella fase di definizione degli obiettivi (determinare se le regole di cut-off, di allocazione, ecc. combaciano con quanto dichiarato nel primo step dello studio LCA;

- Controllo della sensibilità: valuta l'affidabilità dei risultati finali e (se presenti) delle conclusioni e delle raccomandazioni;

- Controllo della coerenza: verifica che le assunzioni, i metodi e i dati siano stati applicati e utilizzati coerentemente attraverso tutte le fasi dello studio.

#### 3) Conclusioni, limitazioni e raccomandazioni

- Sulla base di quanto eseguito e appurato in precedenza, nella parte finale di quest'ultima fase si trarranno ed esporranno le conclusioni e le limitazioni dello studio, oltre che sviluppare le raccomandazioni in linea con la definizione degli

obiettivi. Le conclusioni dicono se alle domande poste in fase di formulazione della definizione degli obiettivi si può rispondere sulla base dei risultati ottenuti.

- Deve essere elencata ognuna delle eventuali limitazioni presenti all'interno degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio.
- Le raccomandazioni basate sulle conclusioni finali dell'LCA devono essere logicamente, razionalmente e plausibilmente fondate, nonché strettamente collegate alle applicazioni previste come definito negli obiettivi dello studio.
- Per evitare interpretazioni sbagliate da parte dei fruitori dello studio tutte le limitazioni devono essere espresse congiuntamente alle raccomandazioni. Dev'essere evitato, per quanto possibile, che le raccomandazioni possano essere interpretate male dai destinatari dello studio. Questo implica che vada tenuta in considerazione una limitata comprensione tecnica e metodologica dei destinatari, rendendo quindi, almeno questa sezione, fruibile anche ai meno esperti.

### **3. Phragmites australis (Cav.) TRIN. EX STEUD.: caratteristiche agronomiche, ecologiche e applicazione nell'edilizia bio-based**

#### **3.1. Morfologia ed ecologia**

La canna palustre, o *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud., è una pianta erbacea rizomatosa appartenente alla famiglia delle Poaceae. È considerata una specie elofita, poiché l'apparato radicale e la parte basale sono quasi sempre sommersi e i fiori e le foglie emergono dalla superficie dell'acqua. L'habitat naturale di *P. australis* è costituito dalle zone umide, soprattutto palustri. Questa specie cresce abbondantemente lungo le sponde dei laghi e dei fiumi, sia in acque dolci che salmastre. Dalla letteratura si evince come questa specie sia presente in tutti i continenti tranne l'Antartide (Harrington, 1964), avendo un areale di coltivazione vastissimo.

*P. australis* è considerata una pianta fortemente invasiva e di non facile gestione quando si prova a contenerne lo sviluppo ad aree delimitate.

Può sviluppare germogli densi fino a 200 unità/m<sup>2</sup> raggiungendo altezze comprese tra 2 e 4 metri, con picchi di 6 metri nelle regioni più calde, in quest'ultimo caso si verifica una riduzione della densità dei germogli. I culmi presentano mediamente un diametro di 1-1,5 cm, ma possono raggiungere i 2,5 cm. Le foglie sono lisce e alternate, con lunghezza fino a 50 cm e larghezza tra 1 e 5 cm. L'infiorescenza terminale a pannocchia, tipica di questa specie, forma un pennacchio di lunghezza compresa tra i 15 e i 50 cm, con colore viola-grigiastro all'inizio per virare poi verso il marrone chiaro a maturità. A volte la pianta può produrre stoloni.

La sua capacità di adattamento a condizioni pedo-climatiche molto diverse tra loro la rende un concorrente, molto spesso predominante, delle altre specie delle zone umide, come: *Typha*, *Juncus*, *Nymphaea* e altre.

La canna palustre è una specie spontanea che non viene coltivata, se non per scopi estetici ed ornamentali, di conseguenza non necessita di concimi, ammendanti, fitofarmaci né tantomeno di irrigazione. Riprende lo sviluppo vegetale dopo l'inverno e rimane verde fino all'arrivo del gelo nelle regioni temperate. Un problema che si verifica nei canneti, quando questi non sono adeguatamente gestiti, ossia in assenza di asportazione, è che la biomassa necrotica lignificata che si accumula nel letto del canneto alla fine della stagione vegetativa, costituisce la quota maggioritaria della biomassa totale. Questo potrebbe comportare processi di

successione naturale in grado di creare condizioni sfavorevoli per le specie ornitiche palustri (Saetta, 2013).

### **3.2. Aspetti benefici della gestione dei canneti**

La *P. australis* è una specie arborea molto versatile, che può trovare applicazione in diversi settori. In questo studio sarà investigata la sua efficienza come materiale da utilizzare per la coibentazione e la copertura di edifici. Nel primo caso verrà utilizzato sottoforma di pannello, realizzato legando tra loro le canne grazie a del filo zincato (Figure 3.1 e 3.2), di spessore variabile in base alle caratteristiche termiche richieste. Nel secondo caso, le canne verranno disposte a spacio sulla superficie in cui verrà realizzata la copertura, e poi ancorate alle strutture di supporto della parte sottostante la copertura stessa con del filo zincato. Il suo utilizzo come materiale da copertura è datato e ci sono testimonianze molto antiche che lo dimostrano. Tra l'altro, questa sua funzione è tradizionale nel nord Europa e molto probabilmente la più conosciuta (Köbbing, 2013). Secondo uno studio è addirittura stato l'unico materiale disponibile nelle zone costiere del nord Europa per la realizzazione di tetti fino alle fine del 1800 (Iital, 2012).

Il suo utilizzo come pannello fono-assorbente o termo-isolante è più recente, in quanto le necessità dei consumatori sono cambiate col tempo. Questo dimostra come l'ingegno umano e la versatilità di questa specie possano unirsi per soddisfare nuovi bisogni usando materiali da sempre disponibili, che però fino a quel momento erano stati usati per far fronte ad esigenze diverse.



*Figura 3.1 – Vista frontale di un pannello termo-isolante di *P. australis* (Fonte: archivio LACEP)*



*Figura 3.2 – Vista in sezione di una porzione del pannello con strato di intonaco superficiale (Fonte: archivio LACEP)*

Negli anni, i campi di applicazione di questa specie sono aumentati notevolmente, essendo state scoperte nuove proprietà di questa pianta e di conseguenza nuove opportunità di utilizzo.

Una delle funzioni di più recente scoperta e più innovative è la fitodepurazione che essa può svolgere in ambienti contaminati. È stato dimostrato che *P. australis* ha un'elevata capacità di assimilazione dei nutrienti che ne comporta l'alta produttività. È quindi in grado di rimuovere elevate quantità di inquinanti da terreni contaminati e traslocarle nella parte epigea della pianta. Riguardo l'azoto, letti vegetativi e wetland costruite hanno mostrato efficienze di rimozione oltre il 90%

(Luderitz, 2001).

Alcune indagini hanno mostrato come l'incremento della concentrazione di nutrienti, soprattutto nei nitrati, nel suolo e nelle acque sia associato ad un aumento della biomassa epigea. Tuttavia, talvolta l'eutrofizzazione e gli elevati livelli di nitrati possono essere la causa principale del declino delle popolazioni di *Phragmites* in Europa.

Considerando la necessità, crescente negli ultimi anni, di bonifica delle aree contaminate a causa del dilavamento agricolo o degli scarichi dei depuratori delle acque reflue civili, questa funzione della canna potrebbe trovare largo impiego ovunque ce ne fosse la necessità.

Inoltre, data la capacità di accumulo di elementi nutritivi come N, P e K, naturalmente presenti nel terreno e non somministrati dall'uomo, *P. australis* potrebbe trovare impiego come concime e ammendante nel settore agricolo. Un ultimo esempio della sua versatilità e variabilità di applicazione è l'utilizzo come materiale energetico. Si è studiata e si continua a studiare l'applicazione di questa specie vegetale come materiale da combustione (pellet) o per la produzione di biogas e bioetanolo.

Ci sono diversi studi, alcuni dei quali tuttora in corso, a dimostrazione della validità della risorsa, che puntano ad ottimizzare l'utilizzo della canna come materiale da combustione o per la produzione di biogas e bioetanolo.

La validità di questa risorsa è dimostrata dal fatto che sono tuttora in corso degli studi sulla sua valorizzazione. Questa tesi fa parte di un progetto europeo coordinato dal dipartimento di sistemi energetici e ambientali della Riga Technical University, che ha come obiettivo finale quello di valorizzare quanto più possibile la *Phragmites australis* come risorsa versatile e utilizzabile per scopi e campi di applicazione diversi.

Non bisogna però dimenticare i servizi ecosistemici che i canneti di *P. australis* forniscono. Essi infatti, sono molto usati dalle specie ornitiche, e non solo, come nido o come luogo di ricovero, soprattutto durante le stagioni migratorie. Ovviamente anche altre specie giovano della presenza dei canneti e in maniera più costante e non occasionale come gli uccelli migratori. Proprio per questo, ogniqualvolta si ricorra all'utilizzo di questa risorsa, bisognerà tenere in considerazione l'impatto che la rimozione di una parte del canneto provocherà sull'ecosistema locale e quali siano i tempi e le modalità di ricostituzione della biomassa sottratta.

La mappa mostrata in figura 3.3 rappresenta la distribuzione spaziale della canna palustre sul territorio europeo.



*Figura 3.3 – Distribuzione spaziale della specie Phragmites australis sul territorio europeo (Fonte: National library of medicine, disponibile a: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3435523/>)*

Oltre alla distribuzione spaziale è interessante conoscere la superficie che i canneti di *P. australis* occupano in Europa. Considerando soltanto 12 paesi del nord ed est Europa, più Ucraina e Inghilterra, la superficie raccogliabile arriva ad essere di 647.000 ettari; se a questi aggiungiamo anche le zone della Russia europea, il Kazakistan, l'Uzbekistan, il Turkmenistan e l'Azerbaijan si raggiungono i 7.140.000 di ettari (Köbbing, 2013). Se si pensa che la produzione media di un canneto è di 1 tonnellata di sostanza secca per ettaro, ci si rende conto di che preziosa risorsa possa essere la *Phragmites australis* se diventasse di uso comune anche solo per uno degli usi precedentemente elencati.

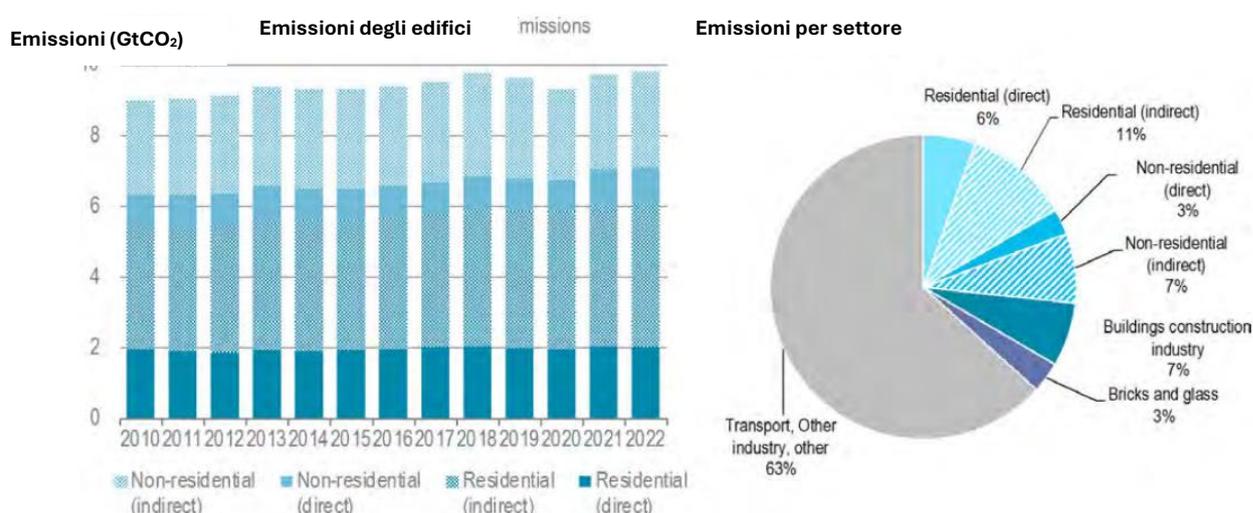
### **3.3. Edilizia bio-based**

Il settore edile è tra i più impattanti in assoluto e secondo il report annuale prodotto dall'UNEP (United Nations Environment Programme) il trend è in peggioramento (UNEP, 2023). Considerando tutto l'indotto del settore, il dato relativo alle emissioni di CO<sub>2</sub> si attesta intorno al 37% delle emissioni globali totali, in maniera concorde secondo diverse organizzazioni di livello mondiale come la stessa UNEP o il World Economic Forum.

Il settore è legato indissolubilmente all'aumento demografico che si sta registrando a livello globale, soprattutto nei paesi che una volta venivano definiti in via di sviluppo e che ora stanno entrando a pieno titolo tra le più importanti economie

mondiali, basti pensare alla Cina e all'India in primis.

Se è vero che il patrimonio immobiliare continua ad aumentare anche per soddisfare le necessità della popolazione in continua crescita, è altrettanto vero che questa è solo una delle innumerevoli ragioni per cui ogni anno si consumano migliaia di chilometri quadrati di suolo, convertendoli da terreni rurali a superfici edificate (infrastrutture, edifici, ecc.). Solo in Italia il consumo di suolo relativo all'anno 2022-2023 è stato di 72,5 km<sup>2</sup>, corrispondenti a circa 20 ettari al giorno, mentre il valore di impermeabilizzazione del terreno si attesta a 26,2 km<sup>2</sup> (Munafò, 2024). Come si può vedere nel grafico a torta della *Figura 3.4*, quando si parla di edilizia non si tratta soltanto di edifici residenziali, ossia quelli adibiti ad abitazioni, ma di tutta una serie di costruzioni funzionali allo svolgimento delle attività umane in generale (ospedali, uffici, negozi, industrie, strade ecc.).



*Figura 3.4 – Emissioni di CO<sub>2</sub> in edilizia tra il 2010 e il 2020 (sinistra) e apporto di emissioni diviso per settore nel 2022 (destra) (Fonte: Global status report for buildings and constructions, UNEP)*

È quindi evidente come questo settore cresca esponenzialmente rispetto all'incremento demografico. Proprio questo tasso di crescita lo rende un settore per il quale c'è bisogno di trovare delle soluzioni che evitino l'aumento esponenziale delle emissioni che produce.

È da questa consapevolezza che, a diversi livelli (governi, aziende private, ecc.), si è iniziato a creare interesse intorno al tema dell'efficientamento energetico in edilizia e quindi allo sviluppo di nuove tecnologie da adottare per ridurre l'impatto che l'intero settore provoca nei confronti dell'ambiente.

A tal proposito, diverse leggi sono state promulgate al fine di aumentare l'efficienza energetica degli edifici. Alcune di queste sono state direttamente redatte ed emanate

dall'Italia, mentre altre sono state recepite e quindi trasformate in legge dopo l'emanazione di direttive europee.

A livello comunitario, si ricordano le due direttive più importanti: una è la n. 844, emanata nel 2018. Tale direttiva non riporta aspetti prettamente legati all'efficientamento energetico degli edifici, ma ha una portata più ampia e generale. Essa infatti, pone l'ambizioso obiettivo di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> del 40% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, aumentare la quota di energia derivante da fonti di energia rinnovabile, aumentare la sicurezza energetica dell'Unione nonché la sostenibilità dell'Europa.

La seconda, sicuramente più nota per l'obiettivo che si pone ma anche per la risonanza mediatica che ha assunto, è il Green Deal. Il Green Deal europeo è la strategia di crescita dell'UE. Lanciato nel 2019, consiste in un pacchetto di iniziative strategiche che hanno avviato l'UE sulla strada di una transizione verde, con l'obiettivo ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Si tratta del contributo dell'UE all'accordo di Parigi, che l'UE e tutti i suoi Stati membri hanno ratificato e che ha stabilito l'obiettivo di mantenere il riscaldamento globale entro +1,5°C rispetto ai livelli preindustriali. Il Green Deal sostiene la trasformazione dell'UE in una società equa e prospera con un'economia moderna e competitiva. Sottolinea la necessità che tutti i settori di intervento contribuiscano alla lotta contro i cambiamenti climatici. La strategia sostiene misure in vari settori economici tra cui l'energia, i trasporti, l'industria, l'agricoltura, la finanza sostenibile e altri ancora.



#### Neutralità climatica

Drastica riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per rendere l'UE la prima zona al mondo a impatto climatico zero



#### Economia circolare

Nuovo modello economico in cui i prodotti sono riutilizzati, riparati e riciclati, riducendo i rifiuti e conservando le risorse



#### Industria pulita

Promozione di industrie più pulite, più sostenibili e più efficienti sul piano energetico che prosperino nei mercati dell'UE e mondiali



#### Ambiente più sano

Piano per ripristinare la natura e adoperarsi per l'azzeramento dell'inquinamento in modo da garantire un ambiente sano per le generazioni future



#### Agricoltura più sostenibile

Pratiche agricole più verdi per proteggere l'ambiente, fornendo nel contempo alimenti sani e a prezzi accessibili



#### Giustizia ed equità climatica

Piano per rendere la transizione equa e inclusiva, in modo da aiutare le persone più colpite dalla transizione e non lasciare indietro nessuno

**Figura 3.5 – Principali obiettivi perseguiti dal Green Deal europeo (Fonte: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/european-green-deal/>)**

Nella figura 3.5 sono presentati in forma schematica i principali obiettivi che il Green Deal si pone di raggiungere entro il 2050.

Per l'Italia la prima legge concernente l'efficientamento energetico degli edifici (*con esclusione di quelli adibiti ad attività industriali o artigianali*) è stata la Legge n. 373/1976 che recita: *Al fine di contenere il consumo energetico per usi termici negli edifici, sono regolate dalla presente legge le caratteristiche di prestazione dei componenti, la installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari, alimentati da combustibili solidi, liquidi o gassosi negli edifici pubblici e privati, con esclusione di quelli adibiti ad attività industriali o artigianali.*

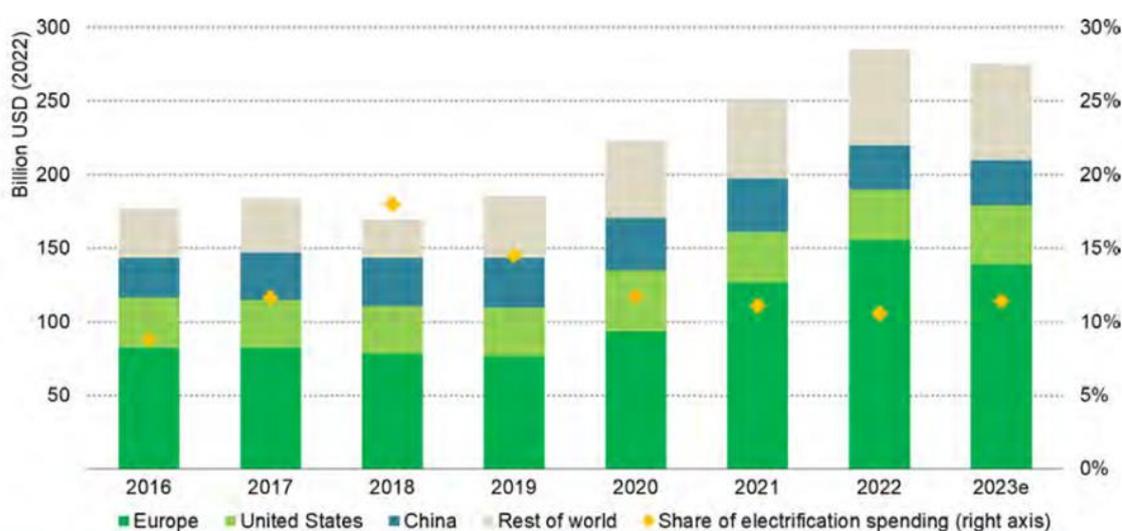
In quel periodo l'efficientamento energetico era stato tenuto in considerazione non tanto per la preoccupazione nei confronti dell'impatto ambientale del settore edilizio, ma più per una problematica congiunturale: la crisi del petrolio che determinò un aumento repentino dei prezzi della risorsa stessa. La prima legge italiana che mira a promuovere il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici per fini di mitigazione degli impatti ambientali fu la Legge n. 10 del 1991. Questa imponeva la verifica della "tenuta" dell'isolamento termico delle pareti e dei solai per contenere le dispersioni termiche e aumentare il risparmio di energia. Addirittura, la legge prevedeva che il proprietario dell'edificio o chi ne avesse titolo depositasse in comune, insieme alla dichiarazione di inizio lavori, anche una relazione tecnica che ne attestasse la rispondenza ai requisiti definiti dalla legge stessa.

Un'importante normativa che promuove norme di efficientamento energetico e di risparmio nell'uso delle risorse è il cosiddetto "Ecobonus", normato dal decreto legge n. 63 del 2016, specificatamente agli articoli 14 e 16. Tale decreto prevede di migliorare l'efficienza energetica degli edifici attraverso l'installazione di componenti strutturali e non con caratteristiche migliori rispetto a quelli correntemente installati. Tra questi figurano: finestre comprensive di infissi, schermature solari, impianti di climatizzazione come caldaie a condensazione e altri. Inoltre, viene prevista l'installazione dei pannelli coibentanti. Precisamente nel comma 2-quater dell'articolo 14 vengono menzionati *interventi di*

*riqualificazione energetica di parti comuni degli edifici condominiali, che interessino l'involucro dell'edificio.* Nel linguaggio comune l'espressione "involucro" è stata sostituita da "cappotto termico". Con questi termini si indicano quelle soluzioni che, grazie a coperture realizzate con pannelli termo-isolanti applicate sulle pareti (solitamente esterne) degli edifici, aumentano la stabilità termica dell'edificio, riducendo il trasferimento dei flussi di energia termica tra l'interno e l'esterno dello stesso. Il decreto precedentemente citato e il n. 34 del 2020, meglio noto come "Superbonus 110%", hanno dato un forte impulso all'efficientamento energetico del patrimonio immobiliare nazionale, migliorandone le performance di impatto ambientale.

Il progetto di questa tesi si concentra proprio sui materiali utilizzati per la realizzazione dell'involucro degli edifici.

Questo progetto di tesi punta ad investigare una delle tante soluzioni che potrebbero contribuire al raggiungimento degli obiettivi che l'Unione Europea ha indicato nelle direttive precedentemente citate. Possiamo considerare l'Europa un esempio virtuoso nel perseguimento di azioni (e politiche) volte alla salvaguardia dell'ambiente. A livello globale è considerata la prima in termini temporali ed economici (per questo secondo aspetto leggermente in calo rispetto agli anni precedenti) ad impegnarsi a ridurre o mitigare gli impatti ambientali generati sul proprio territorio. Nella *Figura 3.6* sono presentati gli investimenti, per area geografica, stanziati per l'efficientamento energetico degli edifici e delle costruzioni a livello globale.



*Figura 3.6 – Investimenti per l'efficientamento energetico di edifici e costruzioni (Fonte: Global status report for buildings and constructions, UNEP)*

Il settore dell'edilizia ha iniziato ad adottare soluzioni più sostenibili anche in risposta ad un interesse generale più orientato verso la salvaguardia del pianeta in generale. In questo percorso, che si può considerare ancora in fase embrionale, si colloca la nascita della bio-edilizia. Questa "disciplina" attualmente è una branca marginale dell'edilizia, con l'auspicio che diventi la soluzione ordinaria negli anni a venire. Non si può definire una sua specifica data d'inizio né è stata coniata una definizione unanimemente accettata, ma ci sono degli elementi comuni che ne definiscono le caratteristiche essenziali e distintive.

La bio-edilizia o green building è costituita da tutti i tipi di edifici che seguono il principio di una coscienziosa gestione delle risorse naturali in ogni fase del processo. Questo si traduce nel creare la minore interferenza ambientale possibile, l'uso di materiali environmentally-friendly che non costituiscono un pericolo per la salute, soluzioni indoor che facilitino la comunicazione (spazi comunicanti), necessità di basse quantità di energia, uso di energia rinnovabile, alta qualità e longevità come principi portanti e non ultimo un'adeguata gestione economica (Bauer, 2010).

La bio-edilizia rappresenta un moderno approccio alla progettazione e costruzione di edifici che pone in primo piano la compatibilità ambientale e il benessere di chi vi abita. Questa filosofia costruttiva integra l'utilizzo di materiali naturali e non tossici con tecniche edilizie sostenibili, mirando a creare spazi abitativi salubri e in armonia con l'ambiente circostante. Il concetto si fonda sulla consapevolezza dell'impatto che gli edifici hanno sull'ecosistema, promuovendo soluzioni che minimizzano il consumo energetico e privilegiano l'uso di risorse rinnovabili. L'attenzione si estende all'intero ciclo di vita dei materiali, dalla loro produzione fino allo smaltimento, considerando anche aspetti come la traspirazione naturale delle pareti, l'isolamento termico e acustico, e la qualità dell'aria interna. La bio-edilizia non si limita quindi alla sola fase costruttiva, ma abbraccia una visione olistica dell'abitare che tiene conto del benessere psicofisico degli occupanti e della salvaguardia dell'ambiente. Inoltre, a questi elementi, molto spesso si integrano nella costruzione degli edifici anche delle specie vegetali erbacee o arbustive di piccola taglia che possono essere disposte direttamente sulle facciate o sulle parti orizzontali esterne.

In Italia sono diversi gli esempi di bio-edilizia. Tra i più noti figura sicuramente il

Bosco Verticale di Milano, realizzato dall'architetto Stefano Boeri (*Figura 3.7*), anche se non mancano altri esempi virtuosi in cui l'edilizia si integra con elementi volti a ridurre l'impatto ambientale e ad aumentare l'armonia con l'ambiente circostante.

Questo tipo di edilizia è definito "bio" (abbreviazione di biologico) proprio perché trae ispirazione dalla natura. Quest'ultima ci viene in soccorso in quanto è foriera di meccanismi o materiali che, se attentamente studiati, possono essere adattati e applicati in campi diversi da quelli originali.



*Figura 3.7 – Bosco Verticale di Milano realizzato da Stefano Boeri (Fonte: <https://www.stefano-boeri-architetti.net/project/bosco-verticale/>)*

Trattando l'argomento della bio-edilizia è doveroso introdurre altri due neologismi che con essa hanno a che fare ed indicano rispettivamente una caratteristica dei materiali e un concetto:

- Bio-based: viene attribuito questo aggettivo a tutti quei materiali che sono ricavati da fonti naturali. Per esempio, i pannelli isolanti realizzati in sughero o le bioplastiche derivate dall'amido.

- Biomimesi: è l'approccio scientifico e progettuale che studia e imita le strategie, i meccanismi e i principi presenti in natura per sviluppare soluzioni innovative a problemi umani (BiomimicryInstitute, s.d.). Un esempio ne è l'Eastgate Centre ad Harare, in Zimbabwe. È una struttura che si ispira deliberatamente alla struttura dei termitai per favorire l'aerazione e ridurre la quantità di energia necessaria per la climatizzazione dello stabile.

Benchè siano concetti ben distinti con definizioni specifiche, non è raro che in progetti incentrati sullo sviluppo di soluzioni sostenibili essi vengano considerati e utilizzati contemporaneamente, confermando il carattere olistico della sostenibilità (Verbrugghe, et al., 2023).

Il fulcro di questa tesi riguarda lo studio di due soluzioni per l'edilizia bio-based confrontate con due soluzioni equivalenti ma realizzate con materiali fossili. L'obiettivo è dimostrare che utilizzando le soluzioni bio-based al posto di quelle fossili, rimanendo inalterate le funzioni e l'efficienza, si riduca l'entità dell'impatto che esse provocano sull'ambiente. La trattazione dettagliata verrà svolta nel capitolo successivo.

#### **4. Casi studio: confronto tra un pannello termo isolante in *Phragmites australis* e uno in polistirene espanso (EPS); confronto tra una copertura in *Phragmites australis* e una in tegole di terracotta**

Sulla base delle considerazioni espresse nei capitoli precedenti, si è deciso di condurre un'analisi che permettesse di confrontare gli impatti ambientali di due prodotti equivalenti dal punto di vista funzionale ma diversi nei materiali utilizzati per la loro realizzazione. Nello specifico, i prodotti per i quali è stato eseguito il confronto sono i pannelli termo-isolanti usati per realizzare i rivestimenti esterni degli edifici, funzionali ad aumentare l'efficienza energetica degli stessi (per la minore dispersione di energia tra l'interno e l'esterno) e le coperture come tetti, tettoie o porticati svolgenti funzione di copertura.

La metodologia usata per calcolare gli impatti di questi prodotti è il metodo LCA (Life Cycle Assessment), che è stato condotto secondo le relative norme e procedure (ISO 14040 e ISO14044/2006).

L'iter metodologico che un tale studio richiede è stato ampiamente descritto nel Capitolo 2, di seguito verrà presentata altrettanto dettagliatamente l'applicazione di tale metodologia al caso studio.

##### **4.1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (goal and scope definition)**

La finalità dello studio, come è già stato anticipato nel capitolo introduttivo, è quella di ricercare prodotti innovativi ed investigare come la loro applicazione, in sostituzione di quelli tradizionali, possa contribuire a ridurre l'impatto ambientale nel settore dell'edilizia. L'obiettivo è anche quello di dare visibilità a prodotti environmentally-friendly e cercare di diffonderne il più possibile la conoscenza, mostrandone e dimostrandone gli effetti positivi concreti. È importante portare all'attenzione della comunità come tali soluzioni siano realmente applicabili e che la ricerca della sostenibilità non sia solo mera retorica ma un modo di migliorare le soluzioni esistenti, integrandole con tecniche e materiali ugualmente performanti ma meno impattanti ed inquinanti.

Nel dettaglio questo studio LCA mira a determinare se l'utilizzo di pannelli coibentanti e di coperture (tetti, portici, verande ecc.) realizzati con *Phragmites*

*australis*, in sostituzione rispettivamente ai pannelli in polistirene espanso (EPS) e alle coperture in tegole di terracotta, comporti una riduzione degli impatti ambientali, considerando quelli generati lungo tutto il ciclo di vita dei prodotti stessi.

Lo studio condotto è un confronto tra prodotti che vengono già realizzati ed utilizzati in contesti operativi. Non si tratta di prototipi sviluppati in laboratorio di cui si deve testare l'efficacia per immetterli nel mercato. Lo scopo è quello di evidenziare i benefici ambientali derivanti dall'utilizzo dell'uno piuttosto che dell'altro. Il campo di applicazione per i prodotti qui trattati è duplice: dal momento che l'oggetto di studio è una specie vegetale con applicazioni nel mondo dell'edilizia, è evidente come siano implicati almeno due campi di applicazione, l'agricoltura e il settore delle costruzioni. In questa sede l'attenzione verrà posta sulla funzione che questi prodotti svolgono in campo edilizio.

#### **4.1.1. Unità funzionale**

L'elemento fondamentale dello studio che permette un confronto tra i due prodotti è l'unità funzionale. Grazie ad essa è possibile valutare e confrontare prodotti alternativi ma che svolgono una stessa esatta funzione, così da renderli confrontabili (G. Rebitzer, 2004). Per i pannelli isolanti è stata utilizzata l'unità funzionale che viene riconosciuta a livello europeo dal consiglio dei produttori europei di materiali da costruzione come ufficiale per l'analisi di prodotti termo-isolanti (CEPMC, s.d.), ed è la seguente:

$$R \cdot \lambda \cdot \rho \cdot A$$

dove:

R: resistenza termica di  $(1\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;

$\lambda$ : conducibilità termica del materiale  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$\rho$ : densità del materiale  $(\text{Kg}/\text{m}^3)$ ;

A: estensione superficiale dell'unità funzionale  $(1\text{m}^2)$ .

Questa formula permette di determinare la quantità di materiale necessario a svolgere una funzione isolante pari a  $R=1$  per un'area di un metro quadro ( $A=1\text{m}^2$ ), conoscendo la resistenza termica del materiale ( $\lambda$ ) e la densità dello stesso ( $\rho$ ).

Il pannello di *P. australis* ha una resistenza termica di 0,055 W/m<sup>2</sup>°K e una densità di 190 kg/m<sup>3</sup>, questo si traduce in un peso di 10,45 Kg e uno spessore di 5,5 cm.

Il pannello in polistirene espanso (EPS) ha una resistenza termica di 0,040 W/m<sup>2</sup>°K e una densità di 30 kg/m<sup>3</sup>, per cui il peso risulterà essere di 1,2 Kg e lo spessore di 4 cm.

L'unità funzionale dichiarata è quindi quella di garantire un isolamento termico pari a R=1 e questo si traduce in una quantità di massa, espressa in chilogrammi, pari a 10,45 Kg per il pannello in *P. australis* e 1,2 kg per il pannello in EPS.

Per la seconda tipologia di prodotti analizzati, le coperture, l'unità funzionale scelta è l'unità di superficie, precisamente 1m<sup>2</sup> di superficie coperta.

L'unità funzionale della copertura realizzata in *Phragmites australis* corrisponde ad un peso di 45,45 kg, mentre la soluzione tradizionale, che prevede l'utilizzo di tegole in terracotta, è risultata pesare 45,86 kg.

Unità funzionale				
	Pannelli termo-isolanti		Canne per coperture	
	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
<b>Unità dichiarata</b>	1	m <sup>2</sup>	1	m <sup>2</sup>
<b>Peso</b>	10,45	Kg	45,45	Kg/m <sup>2</sup>
	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
<b>Unità dichiarata</b>	1	m <sup>2</sup>	1	m <sup>2</sup>
<b>Peso</b>	1,2	Kg	45,86	Kg/m <sup>2</sup>

Tabella 4.1 –Unità funzionali dei due prodotti bio-based studiati (Fonte: elaborazione propria)

#### 4.1.2. Modello dell'analisi del ciclo di vita

Per lo studio si è utilizzato l'approccio metodologico cradle-to-grave, ossia dalla culla alla tomba, intendendo con questa dicitura che tutti i processi ai quali il prodotto viene sottoposto prima, durante e dopo la sua fase di utilizzo, sono stati presi in considerazione. A seconda del tipo di analisi e del pubblico al quale lo studio si rivolge le fasi possono essere distinte in modo diverso. Non costituendo questa tesi di per sé una certificazione ambientale che pretende di certificare i prodotti che analizza, è lasciata all'arbitrio dell'autore la scelta della suddivisione delle fasi costituenti l'intero ciclo di vita.

Nell'ambito di questa tesi la suddivisione è stata eseguita in base a quanto fosse ritenuto più appropriato per il tipo di prodotti trattati. Riducendo al minimo la distinzione delle fasi del ciclo di vita se ne possono individuare almeno tre: fase a

monte (upstream), fase centrale (core) e fase a valle (downstream). La fase a monte inizia nel momento in cui è eseguita la prima operazione necessaria alla produzione/realizzazione di un prodotto o di un servizio e termina quando il prodotto verrà installato o il servizio inizierà a svolgere la propria funzione. La fase d'uso comprende l'orizzonte temporale durante il quale il prodotto o servizio inizia a svolgere o ad erogare la propria funzione fino al momento in cui, per ragioni di varia natura (obsolescenza, scadenza, rottura, ecc.), il prodotto o servizio cessa di svolgere o erogare la propria funzione. La fase a valle inizia dal momento subito successivo alla cessazione dello svolgimento della propria funzione del prodotto o servizio, fino al momento in cui questo venga sottoposto ad un trattamento di fine vita (incenerimento, riciclo, riuso, ecc.).

I sistemi in materiale bio-based studiati, comprendenti i dati di input, di output, i relativi processi e i confini del sistema sono stati rappresentati graficamente, attraverso dei diagrammi di flusso nelle figure 4.1 (rappresentante il ciclo di vita dei pannelli termo-isolanti) e 4.2 (rappresentante il ciclo di vita delle coperture) nel paragrafo successivo; entrambi i prodotti sono quindi realizzati con canne palustri.

## **4.2. Analisi di inventario dei prodotti bio-based**

In questo paragrafo verrà descritto nel dettaglio il processo che è stato seguito per lo svolgimento dell'analisi di inventario necessario a raccogliere i dati che sono stati usati come input nel modello LCA. Questo studio è stato condotto in collaborazione con due aziende operanti nel settore della bio-edilizia. Una di queste, la *LACEP*, con sede a S. Savino nel comune di Magione (PG), ha come core business la realizzazione di prodotti bio-based a base di *Phragmites australis* e la loro posa in opera. I prodotti vanno da semplici stuoie fino a pannelli termo-isolanti e veri e propri tetti di edifici. La seconda azienda è *La banca della calce*, con sede a Bologna (BO), che si occupa della realizzazione di materiali edili, soprattutto calce, intonaci e malte necessarie alle operazioni di intonacatura e isolamento degli edifici. Entrambe le aziende producono materiali categorizzabili come bio-based, in quanto *LACEP* realizza prodotti che sono costituiti esclusivamente da *P. australis* (solo nei pannelli c'è una piccola parte di filo zincato che serve a tenere insieme le canne), mentre il prodotto considerato nello studio e fornito da *La banca della calce* è CalceCanapa®, una calce arricchita di canapa geomineralizzata, che presenta proprietà termo-isolanti. I pannelli bio-based e CalceCanapa® sono spesso

utilizzati congiuntamente, combinando insieme due soluzioni bio-based per la realizzazione dei rivestimenti termo-isolanti; questo perchè le due aziende condividono una stessa visione che punta all'utilizzo di soluzioni meno impattanti per l'ambiente ma ugualmente valide dal punto di vista tecnico. Non è escluso però che CalceCanapa® possa essere usata anche in combinazione con pannelli di tipo tradizionale.

Per facilitare la comprensione delle fasi e dei processi che costituiscono il ciclo di vita dei due prodotti analizzati in questo studio, sono proposti di seguito due diagrammi di flusso, che rappresentano graficamente il ciclo di vita e i relativi confini di ognuno dei due.

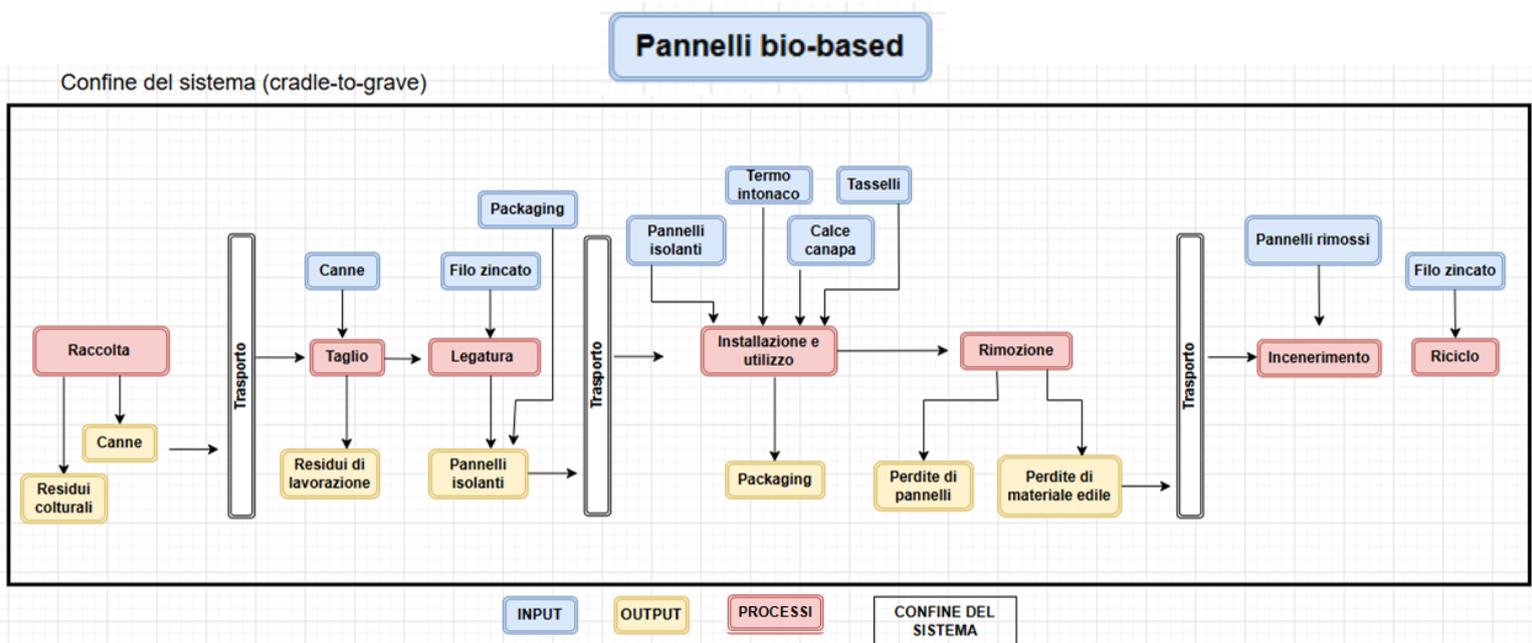


Figura 4.1 - Diagramma di flusso del ciclo di vita dei pannelli termo-isolanti bio-based (Fonte: elaborazione propria su diagrams.net)



è stato possibile reperire dati primari. Per la fase di raccolta è stato usato un dato secondario, ossia un dataset fornito dal software. Specificatamente, il dato è fornito dal database Ecoinvent v. 3.10, ed è *Combine harvesting {EU}| market for combine harvesting / Cut-off, U*. Questo dato considera il consumo medio di un macchinario per la raccolta agricola all'interno del territorio europeo. I consumi relativi a questo dataset sono quelli generati durante la fase di utilizzo del macchinario, nello specifico il macchinario considerato consuma 15 litri di diesel per la raccolta di un ettaro di coltura, mentre il trasporto e le perdite durante la fase d'uso sono considerati trascurabili.

Per il quantitativo da raccogliere il riferimento è stato trovato nella letteratura scientifica. Le operazioni di raccolta devono essere eseguite tra gennaio e aprile per avere un tasso ottimale di umidità. Considerando che la specie *P. australis* ha una produttività media di 10 tonnellate ad ettaro (Sluis, 2013), per ottenere il quantitativo necessario per l'unità funzionale è stata considerata la raccolta di:

- 0,0014 ettari per i pannelli termo-isolanti, ossia 14 kg;
- 0,00562 ettari per le coperture, ossia 56,2 Kg.

Gli output di questa fase sono le canne che andranno in azienda per essere trasformate in base all'utilizzo che se ne farà; i residui di raccolta che rimangono in campo in seguito alle operazioni colturali, si attestano intorno al 10% (Ash, 2010). Inoltre, ci sarà una perdita sottoforma di vapore acqueo da parte della canna che tenderà a ridurre il proprio tasso di umidità.

In questa fase, oltre al sequestro di CO<sub>2</sub>, sono state considerate le altre sostanze chimiche che le canne prelevano dal terreno durante la fase di crescita. Questo è stato possibile grazie ad una certificazione EPD (Høeg, 2017). L'emissione in atmosfera di tutte le sostanze verrà considerata nella fase di fine vita del prodotto (Tabella 4.2).

Elementi e nutrienti prelevati dal suolo		
Sostanza	Quantità	Unità
CO <sub>2</sub>	1.723	Kg/Kg di s.s.
Azoto	0.005	Kg/Kg di s.s.
Azoto (denitrificazione)	0.025	Kg/Kg di s.s.
Fosforo	0.001	Kg/Kg di s.s.
Potassio	0.01	Kg/Kg di s.s.
Magnesio	0.0015	Kg/Kg di s.s.
Calcio	0.005	Kg/Kg di s.s.
Sodio	0.001	Kg/Kg di s.s.
Zolfo	0.003	Kg/Kg di s.s.
Boro	10	mg/Kg di s.s.
Rame	3	mg/Kg di s.s.
Ferro	70	mg/Kg di s.s.
Manganese	75	mg/Kg di s.s.
Molibdeno	2.5	mg/Kg di s.s.
Zinco	16	mg/Kg di s.s.

Tabella 4.2 – Tabella riassuntiva delle sostanze sottratte dalle canne durante la fase di crescita (Fonte: elaborazione propria su dati di EPDDanmark)

\*s.s. = sostanza secca

Pannelli termo-isolanti				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Occupazione del suolo	14	m <sup>2</sup>	Occupation, cropland fallow (non-use)
	Macchina raccogliatrice e relativi consumi	0,0014	ha	Combine harvesting {GLO}  market for combine harvesting   Cut-off, U
OUTPUT	Canne raccolte	14	Kg	
	Canne (sequestro di CO <sub>2</sub> )*	-23,3	Kg CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide, in air
	Residui colturali	1,3	Kg	Waste, organic
	Vapore acqueo	0,65	Kg	Water (evapotranspiration)

Tabella 4.3 – Fase di raccolta (Fonte: elaborazione propria)

Canne per coperture				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Occupazione del suolo	56,25	m <sup>2</sup>	Occupation, cropland fallow (non-use)
	Macchina raccogliatrice e relativi consumi	0,00562	ha	Combine harvesting {GLO}  market for combine harvesting   Cut-off, U
OUTPUT	Canne raccolte	56	Kg	
	Canne (sequestro di CO <sub>2</sub> )*	-78,3	Kg CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide, in air
	Residui colturali	5,6	Kg	Waste, organic
	Vapore acqueo	2,8	Kg	Water (evapotranspiration)

Tabella 4.4 – Fase di raccolta (Fonte: elaborazione propria)

\*La riemissione in atmosfera della CO<sub>2</sub> sottratta durante la fase di crescita delle canne sarà considerata a fine vita.

#### 4.2.2. Fase di lavorazione delle canne

Una volta che le canne raggiungono lo stabilimento (vedi “Fase di trasporto” più avanti), verranno sottoposte ad una lavorazione con sega circolare che permetterà di ottenere canne della lunghezza richiesta. Il macchinario usato per questa operazione è stato individuato nel database Ecoinvent v. 3.10 ed è *Power sawing, with catalytic converter {GLO}| market for power sawing, with catalytic converter / Cut-off, U*. Il dataset rappresenta il servizio generato da una sega a motore per un’ora di lavoro ed è stato scelto perché non erano presenti dataset di seghe circolari ad alimentazione elettrica. Sulla base dei dati ottenuti dal produttore, per entrambi i prodotti è stato considerato un tempo di taglio di mezz’ora. In questa fase si è considerata una perdita del 5% della materia prima dovuta a perdite dovute all’operazione di taglio.

Da questo momento le canne che serviranno per la realizzazione di coperture sono pronte per essere imballate, mentre le canne per la realizzazione dei pannelli dovranno essere sottoposte alla legatura con filo zincato. Il processo di legatura avviene attraverso un macchinario ad hoc che intreccia il filo zincato intorno alle canne, creando un pannello di forma rettangolare rigido e coeso. In questo caso non essendo presente il macchinario specifico nei database disponibili in SimaPro, è stato considerato solo il consumo energetico del macchinario, usando il mix energetico della Romania (sede dello stabilimento di produzione), ed è stato attribuito il valore di 0,001 Kwh per la produzione di un’unità funzionale di pannello termo-isolante. Il dataset è *Electricity, low voltage {RO}| market for electricity, low voltage / Cut-off, S*. Tutte le operazioni appena descritte sono riportate nelle tabelle 4.5 e 4.6.

Concluse le operazioni di manifattura si procede all’imballaggio dei prodotti. Questa fase prevede soltanto operazioni manuali per cui tra gli input figurano soltanto i materiali utilizzati e nessun consumo di energia (*Tabella 4.7*). In questa fase si utilizza un muletto per la movimentazione delle merci all’interno dello stabilimento e del magazzino ma il suo utilizzo è molto contenuto e può essere considerato trascurabile.

Pannelli termo-isolanti				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Taglio a misura delle canne	30	minuti	<i>Power sawing, with catalytic converter {RER}  power sawing, with catalytic converter   Cut-off, U</i>
	Elettricità del macchinario per la realizzazione dei pannelli	0,001	kWh	<i>Electricity, low voltage {RO}  market for electricity, low voltage   Cut-off, S</i>
	Filo zincato	5	metri	<i>Aluminium around steel bi-metal wire, 3.67mm external diameter {GLO}  market for aluminium around steel bi-metal wire, 3.67mm external diameter   Cut-off, U</i>
OUTPUT	Residui dovuti al taglio	0,6	Kg	<i>Waste, organic</i>

Tabella 4.5 – Fase di lavorazione delle canne per la realizzazione dei pannelli (Fonte: Elaborazione propria)

Canne per coperture				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Taglio a misura delle canne	30	minuti	<i>Power sawing, with catalytic converter {RER}  power sawing, with catalytic converter   Cut-off, U</i>
OUTPUT	Residui dovuti al taglio	2,4	Kg	<i>Waste, organic</i>

Tabella 4.6 – Fase di lavorazione delle canne per la realizzazione delle coperture (Fonte: Elaborazione propria)

Il packaging utilizzato per imballare i due prodotti è costituito da un pallet e da strati di film plastico trasparente per proteggere i prodotti da urti accidentali o altri agenti esterni; le fascette di plastica, visibili nella figura 4.3 sono state considerate trascurabili per via del peso irrisorio rispetto all'unità funzionale. In SimaPro i datasets scelti per rappresentare le componenti del packaging sono i seguenti:

Packaging				
Materiale	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset	
Pallet	0,0328	p	<i>EUR-flat pallet {GLO}  market for EUR-flat pallet   Cut-off, U</i>	
Film plastico	0,175	Kg	<i>Packaging film, low density polyethylene {RER}  packaging film production, low density polyethylene   Cut-off, U</i>	

Tabella 4.7 –Packaging dei prodotti realizzati in *P. australis* (Fonte: elaborazione propria)

Una volta imballati, i prodotti vengono spediti in Italia (vedi “Fase di trasporto” più avanti), dove verranno installati.



*Figura 4.3 – Pannelli termo-isolanti impilati senza film plastico (Fonte: foto scattata nell’azienda LACEP)*

### **4.2.3. Fase di posa in opera e fase d’uso**

Nella fase di posa in opera (*Tabelle 4.8 e 4.9*) si svolgono le operazioni di installazione dei prodotti, e una volta completata, questi inizieranno a svolgere la loro funzione, quest’ultima è detta “fase di uso”. Per i prodotti oggetto di studio non è previsto nessun impatto sull’ambiente durante la fase d’uso, in quanto non ci sarà né consumo di risorse né di energia per il loro funzionamento in questa fase. Nel caso dei pannelli termo-isolanti, essi verranno applicati sulle pareti esterne degli edifici, con la funzione di aumentare la coibentazione degli stessi. I materiali utilizzati in questa fase sono: i pannelli termo-isolanti, i tasselli di plastica o ferro per ancorare i pannelli alle pareti, termointonaco CalceCanapa®, finitura e tinteggiatura. L’operazione di installazione inizia con il posizionamento dei pannelli sulla parete dell’edificio. Questi si ancorano alla parete grazie a dei tasselli, ad avvitarlo o a percussione, in numero variabile da 4 a 8 per pannello. Questa operazione richiede l’esecuzione di un foro con un trapano per l’inserimento del tassello. I pannelli vanno posizionati con le canne in verticale, così che eventuale umidità residua possa traspirare e dal basso verso l’alto.



*Figura 4.4 – Ancoraggio del pannello alla parete  
(Fonte: archivio LACEP)*

Completato il fissaggio dei pannelli, si procede allo smussamento o al riempimento degli angoli in quei punti in cui si congiungono in maniera non perfetta due pannelli; l'arrotondamento dell'angolo si realizza posizionando delle canne sciolte nei punti di non perfetta aderenza tra due pannelli. Successivamente si procede alla posa del termintonaco CalceCanapa®. Si stende una prima mano di circa 1 cm lasciando la superficie scabrosa. Una volta asciugato si potrà procedere a stendere la seconda mano di intonaco di 2-4 cm di spessore.



Dopodiché si applicheranno due mani di finitura. L'ultimo passaggio da eseguire è la stesura della tinteggiatura, e su parete esterna anche di un idrorepellente traspirante non filmogeno.

Pannelli termo-isolanti				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Finitura	3,5	Kg	<i>Cover plaster, mineral {GLO}  market for cover plaster, mineral   Cut-off, U</i>
	Stucco	32	Kg	<i>Stucco {GLO}  market for stucco   Cut-off, U</i>
	Vernice	0,3	Kg	<i>Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RER}  market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state   Cut-off, U</i>
	Tasselli	0,21	Kg	<i>Steel, low-alloyed {GLO}  market for steel, low-alloyed   Cut-off, U</i>
	Elettricità per sega elettrica	0,318	Kg	<i>Electricity, low voltage {IT}  market for electricity, low voltage   Cut-off, U</i>
OUTPUT	Film plastico	0,18	Kg	<i>Waste polyethylene {IT}  market for waste polyethylene   Cut-off, U</i>
	Pallet	0,0328	p	<i>Waste wood, untreated {GLO}  treatment of waste wood, untreated, municipal incineration   Cut-off, U</i>

Tabella 4.8 – Fase di posa in opera dei pannelli termo-isolanti (Fonte: elaborazione propria)

Per i fasci con cui si realizzano le coperture invece, è necessario meno materiale. Infatti, l'operazione prevede di disporre i fasci necessari sulla struttura portante della copertura e poi grazie ad un'operazione manuale disporre le singole canne in modo omogeneo su tutta la superficie da coprire. Oltre alle canne è necessario del filo zincato per l'ancoraggio delle stesse alla struttura. La chiusura del filo zincato è eseguita grazie ad un avvitatore che arrotola su stesso il filo affinché rimanga ben saldo e trattiene le canne nella posizione in cui sono state disposte. In SimaPro è stato usato il dataset *Aluminium around steel bi-metal wire, 3.67mm external diameter {GLO}| market for aluminium around steel bi-metal wire, 3.67mm external diameter | Cut-off, U*, per rappresentare il filo zincato e il valore inserito per unità funzionale è di 3 metri. Per l'avvitatore ed eventuali utilizzi di una smerigliatrice per tagliare le canne a misura, si è preso in considerazione il loro consumo elettrico, di 0,318 Kwh, per dieci minuti di utilizzo. Il dataset selezionato è *Electricity, low voltage {IT}| market for electricity, low voltage | Cut-off, U*, che rappresenta il mix energetico medio per il mercato italiano.

Nella tabella 4.8 nella sezione degli output i materiali a cui si fa riferimento sono quelli del packaging che in questa fase vengono rimossi dal prodotto e smaltiti.

Canne per coperture				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Avvitatore	0,16	Kwh	Electricity, low voltage {IT}  market for electricity, low voltage   Cut-off, U
	Filo zincato	3	m	Aluminium around steel bi-metal wire, 3,67mm external diameter {GLO}  market for aluminium around steel bi-metal wire, 3,67mm external diameter   Cut-off, U
OUTPUT	Film plastico	0,175	Kg	Packaging film, low density polyethylene {RER}  packaging film production, low density polyethylene   Cut-off, S
	Pallet	0,0328	p	EUR-flat pallet {RER}  market for EUR-flat pallet   Cut-off, U

Tabella 4.9 - Fase di posa in opera delle canne per coperture (Fonte: elaborazione propria)



Figura 4.6 – Vista frontale di un tetto realizzato dall’azienda LACEP (Fonte: archivio LACEP)

Tutti i dati menzionati nel paragrafo 4.2.3. sono stati forniti direttamente dalle aziende, sono quindi considerati dati primari. Nella trasposizione dei dati nel modello di SimaPro, non tutti i materiali avevano un corrispettivo identico a quello usato nella realtà, ma si è fatto ricorso al dataset più simile. Per esempio, il termointonaco CalceCanapa® è costituito da calce e canapa geomineralizzata che non è presente nel database utilizzato ma si è fatto ricorso al dataset Stucco {GLO}| market for stucco | Cut-off, U.

Dato che l'azienda non ha ancora mai dismesso nessuno degli involucri coibentanti o delle coperture finora realizzate, si è scelto di assumere 50 anni come vita utile di riferimento per entrambi i prodotti, così da rendere i prodotti bio-based confrontabili con i rispettivi prodotti ordinari, nelle cui EPD risultano questi come valori di vita utile. Durante questo arco temporale, per i pannelli termo-isolanti non sono previste perdite di alcun tipo, visto che gli stessi si trovano protetti da un lato dalla parete dell'edificio e dall'altro dallo strato di rivestimento costituito dai diversi materiali edili (termointonaco, finitura e vernice). Per le canne che costituiscono le coperture invece, essendo esposte alle intemperie e agli agenti esterni, è stata stimata una perdita durante l'intero ciclo di vita di circa la metà del peso totale, per usare un approccio conservativo (Høeg, 2017). La degradazione progressiva delle canne da copertura non influisce negativamente sulle funzioni strutturali o di isolamento e copertura che queste sono chiamate a svolgere, per cui non sono previsti interventi ulteriori e successivi rispetto a quelli di posa in opera. L'unico aspetto che potrebbe peggiorare è quello estetico, dovuto ad un leggero scolorimento delle canne. Su richiesta del cliente potrebbe essere applicato uno strato superficiale per ovviare a questo problema e ricostituire il colore originario della copertura.



*Figura 4.7 – Vista di un tetto realizzato interamente in P. australis (Fonte: <https://buildifyltd.co.uk/how-much-does-a-thatched-roof-cost/>)*

#### **4.2.4. Fase di smaltimento**

La fase di smaltimento o di fine vita del prodotto (*Tabella 4.10 e 4.11*) è la fase che inizia dal momento in cui il prodotto termina di svolgere la sua funzione, a prescindere dalla causa. La cessazione della funzione di un prodotto può avvenire

per normale decorso del ciclo di vita, per danneggiamento, per obsolescenza tecnica, ecc. Quando un prodotto viene dismesso può essere avviato ad un processo di smaltimento come il riuso, il riciclo, la discarica, l'incenerimento o altri. Per lo scenario di fine vita non è stato possibile attingere a dati primari in quanto, ancora nessuno dei prodotti realizzati dall'azienda è stato dismesso, questo perché l'orizzonte temporale reale dei prodotti è superiore a quello ipotizzato, e quindi lo scenario di smaltimento scelto per questo studio è stato ipotizzato. In particolare, è stato scelto come scenario di smaltimento quello dell'incenerimento, adducendo come motivazione quella di adottare un approccio conservativo, che prendesse in considerazione il processo supposto essere il più impattante tra quelli disponibili. Il processo di fine vita contiene al suo interno la fase di smantellamento, che per entrambi i prodotti è costituita solamente da operazioni manuali che quindi non vengono conteggiate come impattanti a livello ambientale. In seguito alle operazioni di smantellamento i prodotti devono essere caricati su un camion e trasportati nel luogo dove avverrà il processo di smaltimento, in questo caso l'incenerimento. Siccome i trasporti verranno descritti in un paragrafo a parte, in questo ci si limiterà ad esporre gli impatti ambientali relativi al processo di trattamento individuato.

Il processo di smaltimento per i pannelli termo-isolanti prevede che sia eseguito uno smantellamento di tutto lo strato esterno dell'edificio su cui si era stato realizzato lo strato coibentante. Questa operazione viene svolta completamente a mano e con strumenti meccanici che non necessitano alcun tipo di alimentazione elettrica o a combustione. In seguito allo smantellamento si avrà una perdita dovuta allo sgretolamento del materiale edile costituente lo strato più esterno del rivestimento (vernice, termointonaco, ecc.) nonché una perdita dovuta allo sgretolamento dei pannelli. Si suppone di avere il 10% di perdite sia per i materiali edili che per le canne dei pannelli. Di conseguenza le perdite sono state considerate come output inquinante, e sono state modellate in Simapro con i dataset *Chemical waste, inert* per i materiali edili e *Waste, organic* per le canne costituenti i pannelli, con un peso rispettivamente di 3,5 Kg e 1,04 Kg.

Una volta eseguito lo smantellamento i materiali di risulta si caricano sul camion e vengono trasportati nello stabilimento di incenerimento. In questa fase è stata considerata l'emissione in atmosfera di tutte le sostanze, elencate nella Tabella 4.2, che erano state sottratte dalla pianta durante la sua fase di crescita. Per l'incenerimento delle canne di *P. australis* è stato scelto il dataset *Waste wood*,

*untreated {GLO}| treatment of waste wood, untreated, municipal incineration | Cut-off, U*, che considera l'incenerimento di legno non trattato, ossia il materiale più simile a quello della canna palustre disponibile in Simapro. Il peso del materiale organico incenerito è di 9,41 Kg, ossia il peso riferito all'unità funzionale meno 1,04 Kg di perdite della fase di smantellamento. Per i materiali edili è stato invece scelto il dataset *Waste cement-fibre slab, dismantled {GLO}| treatment of waste cement-fibre slab, dismantled, municipal incineration | Cut-off, U*, con un peso di 32 Kg, risultanti dai 35,5 Kg usati in fase di costruzione meno i 3,5 Kg persi durante la fase di smantellamento. Infine, per il filo zincato che costituisce i pannelli è stato considerato come scenario di smaltimento il riciclo, data la facilità di disassemblaggio del componente dal pannello. Il suo peso per unità funzionale è di 0,25 Kg e il dataset è *Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, U*.

Pannelli termo-isolanti				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
OUTPUT	Perdite di canne durante lo smantellamento	1,04	Kg	<i>Waste, organic</i>
	Perdite di materiale edile durante lo smaltimento	3,5	Kg	<i>Chemical waste, inert</i>
	Inceenerimento canne	9,41	Kg	<i>Waste wood, untreated {GLO}  treatment of waste wood, untreated, municipal incineration   Cut-off, U</i>
	Inceenerimento materiale edile	32	Kg	<i>Waste cement-fibre slab, dismantled {GLO}  treatment of waste cement-fibre slab, dismantled, municipal incineration   Cut-off, U</i>
	Filo zincato	0,25	Kg	<i>Steel and iron (waste treatment) {GLO}  recycling of steel and iron   Cut-off, U</i>

Tabella 4.10 – Fase di smaltimento per i pannelli termo-isolanti (Fonte: elaborazione propria)

Per le canne che costituiscono le coperture il processo è pressoché lo stesso, quello che cambia è il tipo di lavoro che deve essere svolto per lo smantellamento, che comunque prevede soltanto operazioni manuali, e la quantità di materiali, dato che per le coperture è previsto soltanto l'utilizzo di canne e filo zincato. Un aspetto importante che distingue il prodotto da copertura rispetto a quello coibentante è che durante la fase d'uso il primo va incontro a depauperamento a causa dell'esposizione ad intemperie e agenti esterni in generale. Nella modellazione infatti, si è considerata una perdita di materiale da copertura pari alla metà del suo peso; inoltre, si è considerata l'emissione in atmosfera delle sostanze catturate dalla pianta durante la sua fase di crescita. Metà di queste sono state rilasciate durante la fase d'uso del prodotto e l'altra metà durante la fase di

smaltimento.

Nella modellazione in Simapro è stato quindi utilizzato il dataset *Waste wood, untreated {GLO}| treatment of waste wood, untreated, municipal incineration | Cut-off, U* per indicare il processo di incenerimento delle canne palustri, con un peso di 22,72 Kg (metà dell'unità funzionale) e il dataset *Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, U* per indicare il riciclo del filo zincato, pari a 0,15 Kg.

Il dataset usato per rappresentare il depauperamento delle canne è *Waste, organic*, con un peso di 22,73 Kg.

Canne per coperture				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
OUTPUT	Perdite di canne durante la fase d'uso	22,73	Kg	<i>Waste, organic</i>
	Incenerimento canne	22,72	Kg	<i>Waste wood, untreated {GLO}  treatment of waste wood, untreated, municipal incineration   Cut-off, U</i>
	Filo zincato	0,15	Kg	<i>Steel and iron (waste treatment) {GLO}  recycling of steel and iron   Cut-off, U</i>

Tabella 4.11 – Fase di smaltimento per le canne per coperture (Fonte: elaborazione propria)

#### 4.2.5. Fase di trasporto

Si è deciso di inserire la fase di trasporto alla fine di tutte le altre fasi perché essendo i prodotti trasportati più volte da e per siti diversi si è preferito unire i diversi trasporti all'interno di un unico paragrafo. Tale fase è mostrata graficamente nelle tabelle 4.12 e 4.13.

Come si è visto nel paragrafo 4.2.1. la prima fase del ciclo di vita dei prodotti è la fase di raccolta. Secondo i dati forniti dall'azienda non c'è un'unica zona dalla quale essa si approvvigiona della materia prima (le canne) ma ce ne sono diverse e in diverse nazioni dell'Europa dell'est. Una delle zone più ricche e vocate per la crescita del *P. australis* in Europa è la foce del Danubio. Parte dell'approvvigionamento aziendale deriva dalla foce del Danubio della parte romena. È proprio la Romania che è stata quindi presa in considerazione come paese in cui si raccolgono le canne e in cui si realizzano i prodotti che verranno poi spediti in Italia.

Le tratte inserite nel modello con i relativi chilometri e il tipo di veicolo sono gli stessi per entrambi i prodotti, ciò che cambia è invece il peso trasportato. Le quattro tratte individuate sono riassunte come segue:

- 1) Trasporto dal luogo di raccolta allo stabilimento in cui verranno lavorate le canne, 50 Km;
- 2) Trasporto dal luogo di lavorazione in Romania allo stabilimento italiano, 1250 Km;
- 3) Trasporto dallo stabilimento italiano al luogo di installazione dei prodotti, 200 Km;
- 4) Trasporto dal sito di installazione al sito di smaltimento, 100 Km.

I dati 1 e 2 sono stati forniti dall'azienda e sono quindi dati primari, mentre i 3 e 4 sono dati secondari, presi da un report di una certificazione EPD (Environmental Product Declaration) con verifica esterna di terza parte (Høeg, 2017). Per il mezzo di trasporto si è fatto ricorso ad un camion Euro 4 con capacità di carico tra le 7,5 e le 16 tonnellate, corrispondente al dataset di Simapro *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 {RER}/ market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 | Cut-off, U*.

Per i pannelli termo-isolanti il peso trasportato, riferito all'unità funzionale, è il seguente:

<b>Pannelli termo-isolanti</b>			
	<b>Materiale trasportato</b>	<b>Peso trasportato (Kg)</b>	<b>Distanza percorsa (Km)</b>
<b>Dal sito di raccolta allo stabilimento in Romania</b>	<b>Canne</b>	<b>13,50</b>	<b>50</b>
<b>Dallo stabilimento in Romania allo stabilimento in Italia</b>	<b>Pannelli</b>	<b>10,45</b>	<b>1250</b>
	<b>Packaging</b>	<b>0,9</b>	<b>1250</b>
<b>Dallo stabilimento italiano al sito di installazione</b>	<b>Pannelli</b>	<b>10,45</b>	<b>200</b>
	<b>Packaging</b>	<b>0,9</b>	<b>200</b>
	<b>Materiale edile</b>	<b>35,5</b>	<b>200</b>
<b>Dal sito di installazione al centro di smaltimento</b>	<b>Pannelli</b>	<b>9,41</b>	<b>100</b>
	<b>Packaging</b>	<b>32</b>	<b>100</b>
	<b>Materiale edile</b>	<b>0,9</b>	<b>100</b>

Tabella 4.12 - Pesi trasportati e distanze percorse per i pannelli termo-isolanti (Fonte: elaborazione propria)

Per le canne da copertura il peso trasportato, riferito all'unità funzionale, è il seguente:

<b>Canne per coperture</b>			
	<b>Materiale trasportato</b>	<b>Peso trasportato (Kg)</b>	<b>Distanza percorsa (Km)</b>
<b>Dal sito di raccolta allo stabilimento in Romania</b>	<b>Canne</b>	<b>47,85</b>	<b>50</b>
<b>Dallo stabilimento in Romania allo stabilimento in Italia</b>	<b>Fasci di canne</b>	<b>45,45</b>	<b>1250</b>
	<b>Packaging</b>	<b>0,9</b>	<b>1250</b>
<b>Dallo stabilimento italiano al sito di installazione</b>	<b>Fasci di canne</b>	<b>45,45</b>	<b>200</b>
	<b>Packaging</b>	<b>0,9</b>	<b>200</b>
	<b>Filo zincato</b>	<b>0,15</b>	<b>200</b>
<b>Dal sito di installazione al centro di smaltimento</b>	<b>Canne</b>	<b>22,72</b>	<b>100</b>
	<b>Packaging</b>	<b>0,9</b>	<b>100</b>
	<b>Filo zincato</b>	<b>0,15</b>	<b>100</b>

*Tabella 4.13 – Pesi trasportati e distanze percorse per le canne da coperture (Fonte: elaborazione propria)*

### **4.3. Analisi di inventario dei prodotti tradizionali (non bio-based)**

Per eseguire il confronto tra prodotti bio-based e prodotti ordinari, è stato necessario modellare anche questi ultimi nel software Simapro, facendo attenzione che fosse rispettata la stessa unità funzionale. Non avendo accesso a dati primari per questo tipo di prodotti si è fatto ricorso alla documentazione tecnica e scientifica disponibile. Per entrambi i prodotti è disponibile molto materiale scientifico, a cui si può attingere. Per la modellazione in Simapro si sono prese come riferimento alcune certificazioni ambientali, soprattutto report ed EPD verificate da terza parte, grazie alle quali è stato possibile ricreare il ciclo di vita dei prodotti. Ovviamente i dati presi dalle certificazioni ambientali non riguardano gli impatti ambientali generati dai prodotti, ma solo i dati relativi alle tipologie di processi a cui i prodotti vengono sottoposti o le loro caratteristiche fisiche (peso, densità, ecc.). Il ciclo di vita di ognuno dei due prodotti è rappresentato graficamente dai diagrammi di flusso (*Figure 4.8 e 4.9*)

Per i pannelli è stata selezionata una certificazione ambientale verificata da un ente terzo, ossia una EPD (Environmental Product Declaration) di tipo III<sup>1</sup>, che avesse come oggetto di studio un pannello realizzato in EPS (polistirene espanso). Il

<sup>1</sup> <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/0b74c28e-90ec-44e7-f130-08dbf976d236/Data>

polistirene espanso, a parità di spessore, ha una resistenza termica migliore rispetto al pannello in *P. australis*, perciò per rendere i valori di resistenza termica uguali tra il prodotto in EPS e quello bio-based, per quest'ultimo è stato necessario considerare uno spessore di 5,5 cm. Lo spessore del pannello in polistirene espanso è invece di 4 cm. I rispettivi pesi variano notevolmente, si va infatti dai 10,45 kg dei pannelli bio-based ad 1,2 kg dei pannelli in EPS.

Per i trasporti è stato considerato di utilizzare la stessa tipologia di veicolo usata per il pannello bio-based e per le operazioni di installazione lo stesso tipo e lo stesso quantitativo di materiale edile, nonché lo stesso scenario di smaltimento. Ciò che non è stato possibile assumere come equivalente è stata la distanza percorsa per i trasporti. Questo è dovuto al fatto che in Italia non è permesso raccogliere la specie *Phragmites australis* e quindi è necessario importarla dall'estero, mentre le materie prime per la produzione di pannelli in polistirene espanso (EPS) sono reperibili in Italia senza bisogno di importarle. Per ovviare a questa marcata differenza di distanza percorsa, verrà presentata successivamente un'analisi di sensibilità (calcolando un "sensitivity ratio"), in cui si mostrerà il variare degli impatti al variare della distanza percorsa.

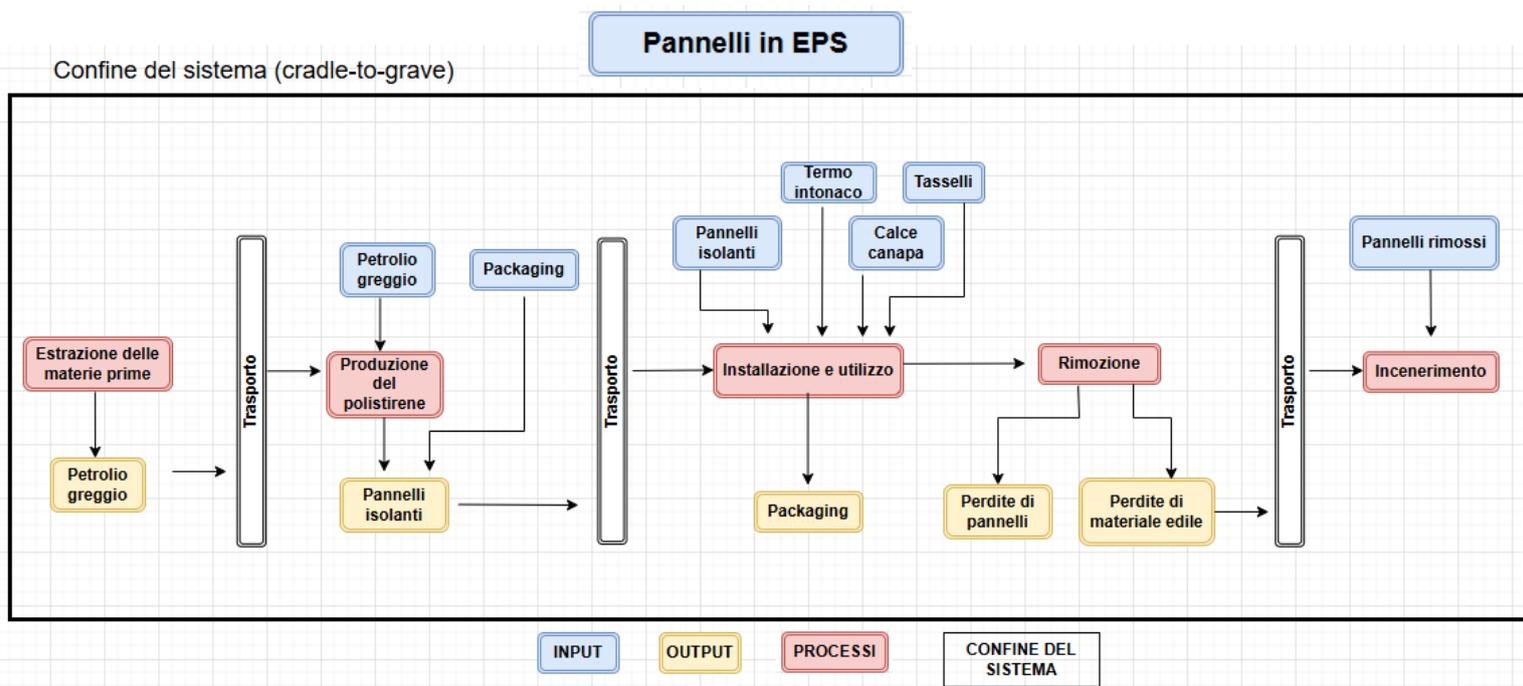


Figura 4.8 - Diagramma di flusso del ciclo di vita dei pannelli termo-isolanti in EPS (Fonte: elaborazione propria su diagrams.net)

Così come per i pannelli, anche per le coperture in canna palustre è stato individuato un corrispettivo tradizionale e non bio-based, ossia le tegole in terracotta. Anche

per questa tipologia di prodotto è stato possibile reperire molta documentazione tecnico-scientifica, nello specifico è stata presa come riferimento una certificazione ambientale verificata da un ente terzo, ossia una EPD (Environmental Product Declaration) di tipo III<sup>2</sup>.

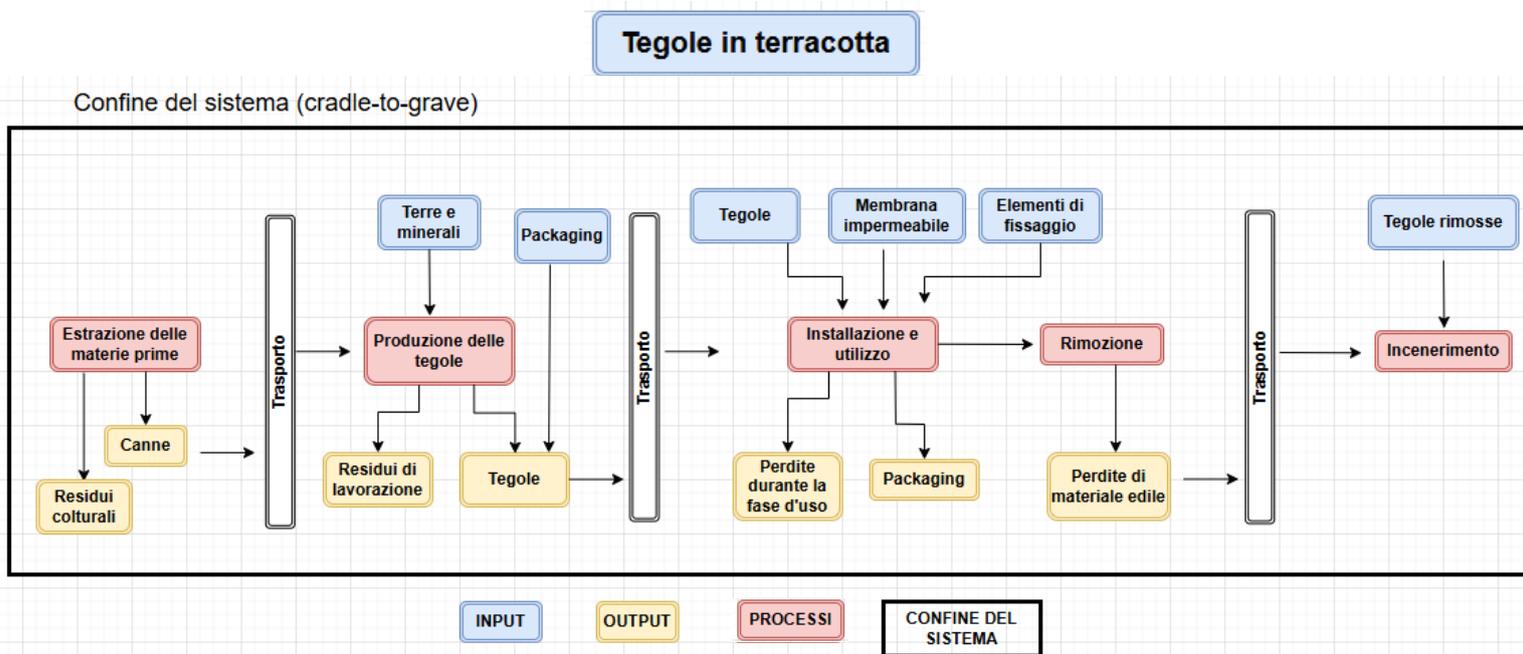


Figura 4.9 - Diagramma di flusso del ciclo di vita delle tegole (Fonte: elaborazione propria su diagrams.net)

Le stesse considerazioni sul trasporto, la fase di installazione e lo smaltimento fatte per i pannelli in EPS, sono valide anche per le tegole in terracotta.

#### 4.3.1. Fase di estrazione delle materie prime

Il polistirene espanso (EPS) è un derivato del petrolio, quindi il ciclo di vita di questo prodotto inizia con l'estrazione del greggio. Per questa operazione è stato selezionato in Simapro un dataset che rappresenta tutti i processi che vanno dall'estrazione del petrolio fino alla consegna dello stesso al cancello dell'impianto di lavorazione, in cui in seguito ad altri processi di lavorazione si otterrà il polistirene. Il dataset in questione è: *Polystyrene, expandable {RER}/ polystyrene production, expandable | Cut-off, U.*

<sup>2</sup> [https://www.randerstegl.de/files/Images/products-v2/rt870/epd/RT870-EPD.pdf?srsItd=AfmBOoom5zRUZ\\_IeHSFALvu\\_oXh8zUdYyFOMKsibN8NoqibJ52dX85](https://www.randerstegl.de/files/Images/products-v2/rt870/epd/RT870-EPD.pdf?srsItd=AfmBOoom5zRUZ_IeHSFALvu_oXh8zUdYyFOMKsibN8NoqibJ52dX85)

Pannelli in EPS				
	Processo	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Estrazione materie prime fino a impianto di trasformazione	2,5	Kg	<i>Polystyrene, expandable {RER}  polystyrene production, expandable   Cut-off, U</i>

Tabella 4.14– Fase di estrazione delle materie prime per i pannelli in EPS (Fonte: elaborazione propria)

Anche per le tegole in terracotta è prevista un'operazione di estrazione delle materie prime, ma in questo caso si tratta di un'operazione che si svolge in miniera, in quanto i componenti della tegola oggetto di studio sono la terracotta come elemento principale e altri minerali in percentuali più ridotte. Il dataset usato per questa operazione di estrazione mineraria è *Clay {CH}| clay pit operation | Cut-off, U* e il quantitativo estratto è di 50,8 Kg, con una perdita del 5% pari a 2,54 Kg.

Tegole in terracotta				
	Processo	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Estrazione materie prime fino a impianto di trasformazione	50,8	Kg	<i>Clay {CH}  clay pit operation   Cut-off, U</i>
OUTPUT	Perdite in fase di estrazione	2,54	Kg	<i>Final waste flow</i>

Tabella 4.15 – Fase di estrazione delle materie prime per le tegole in terracotta (Fonte: elaborazione propria)

### 4.3.2. Fase di lavorazione

Le fasi di lavorazione, che iniziano quando le materie prime grezze vengono consegnate allo stabilimento, sono molte, complesse e specifiche. Per questo motivo non verranno elencate una per una, ma vi si farà riferimento come ad una unica lavorazione che inizia dal momento in cui la materia prima sarà disponibile nell'impianto di trasformazione fino all'ottenimento del prodotto finale finito. Questo modo di procedere è dettato sia da ragioni di sintesi che da ragioni pratiche: nel software tutti i processi a cui le materie prime vengono sottoposte fino ad ottenere il prodotto finale, sono aggregate in un unico dataset.

Per i pannelli il dataset selezionato è *Polystyrene, extruded {RER}| polystyrene production, extruded, HFC-152a blown | Cut-off, U*, con un quantitativo di 1,2 kg. Si noti che è stata considerata l'estrazione di 2,5 Kg di petrolio greggio mentre in fase di lavorazione il quantitativo di polistirene ottenuto è di 1,2 Kg, questo perché il livello tecnologico di cui attualmente si dispone permette di ottenere un'efficienza

di trasformazione del 50%, ossia 1 kg di polistirene a partire da 2 kg di petrolio greggio.

<b>Pannelli in EPS</b>				
	<b>Processo</b>	<b>Quantità</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Simapro dataset</b>
<b>INPUT</b>	<b>Produzione del pannello a partire dal greggio</b>	1,2	Kg	<i>Polystyrene, extruded {RER}  polystyrene production, extruded, HFC-152a blown   Cut-off, U</i>
<b>OUTPUT</b>	<b>Perdite di greggio durante la lavorazione</b>	1,25	Kg	<i>Final waste flow</i>

Tabella 4.16 – Fase di lavorazione delle materie prime per i pannelli in EPS (Fonte: elaborazione propria)

Per le tegole è stato scelto il dataset *Clay roof tile {RER}| clay roof tile production / Cut-off, U*, anch'esso contenente tutte le operazioni necessarie affinché si ottenga il prodotto finito. Il quantitativo di tegole ottenute dalla serie di processi a cui il materiale minerale verrà sottoposto è di 48,26 Kg, con perdite di acqua e di materiale minerario di 1,2 Kg ognuno.

<b>Tegole in terracotta</b>				
	<b>Processo</b>	<b>Quantità</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Simapro dataset</b>
<b>INPUT</b>	<b>Produzione della tegola a partire dalle materie prime</b>	48,26	Kg	<i>Clay roof tile {RER}  clay roof tile production   Cut-off, U</i>
<b>OUTPUT</b>	<b>Perdite di acqua durante la lavorazione</b>	1,20	Kg	<i>Water</i>
	<b>Perdite di materiale minerario durante la lavorazione</b>	1,20	Kg	<i>Final waste flow</i>

Tabella 4.17 - Fase di lavorazione delle materie prime per le tegole in terracotta (Fonte: elaborazione propria)

In questa fase viene considerato anche il packaging che differisce per i due prodotti. Per i pannelli in EPS il packaging è costituito dal pallet e dal film plastico che avvolge i pannelli.

Packaging dei pannelli in EPS			
Materiale	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
Pallet	0,0328	p	<i>EUR-flat pallet {RER}  market for EUR-flat pallet   Cut-off, U</i>
Film plastico	0,18	Kg	<i>Packaging film, low density polyethylene {GLO}  market for packaging film, low density polyethylene   Cut-off, U</i>

Tabella 4.18 - Packaging dei pannelli in EPS (Fonte: elaborazione propria)

Le tegole invece sono imballate con cartone, film plastico che avvolge tegole e cartone e delle fascette di plastica per tenere l'imballaggio saldo.

Packaging delle tegole in terracotta			
Materiale	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
Fascette di plastica	0,073	p	<i>Polyethylene, linear low density, granulate {RER}  polyethylene production, linear low density, granulate   Cut-off, U</i>
Film plastico	0,062	Kg	<i>Packaging film, low density polyethylene {GLO}  market for packaging film, low density polyethylene   Cut-off, U</i>
Cartone	0,015	Kg	<i>Corrugated board box {RER}  market for corrugated board box   Cut-off, U</i>

Tabella 4.19 - Packaging delle tegole in terracotta (Fonte: elaborazione propria)

### 4.3.3. Fase di posa in opera e fase d'uso

La fase di posa in opera differisce per i due prodotti. Nel caso dei pannelli in EPS il processo di installazione è lo stesso che è stato descritto per i pannelli bio-based, mentre per le tegole, questo differisce rispetto a quello per l'installazione delle coperture bio-based.

Nel primo caso si eseguirà quindi l'ancoraggio dei pannelli al muro tramite dei tasselli, tipo fischer. Dopodichè, si procederà alla realizzazione della copertura con stucco, finitura e vernice, come spiegato ampiamente nel paragrafo 4.2.3..

Pannelli in EPS				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
INPUT	Finitura	3,5	Kg	<i>Cover plaster, mineral {GLO}   market for cover plaster, mineral   Cut-off, U</i>
	Stucco	32	Kg	<i>Stucco {GLO}   market for stucco   Cut-off, U</i>
	Vernice	0,3	Kg	<i>Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RER}   market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state   Cut-off, U</i>
	Tasselli	0,21	Kg	<i>Steel, low-alloyed {GLO}   market for steel, low-alloyed   Cut-off, U</i>
	Elettricità per sega elettrica	0,318	Kg	<i>Electricity, low voltage {IT}   market for electricity, low voltage   Cut-off, U</i>
OUTPUT	Film plastico	0,18	Kg	<i>Waste polyethylene {IT}   market for waste polyethylene   Cut-off, U</i>
	Pallet	0,0328	p	<i>Waste wood, untreated {GLO}   treatment of waste wood, untreated, municipal incineration   Cut-off, U</i>

Tabella 4.20 - Fase di installazione dei pannelli in EPS (Fonte: elaborazione propria)

Per l'installazione delle tegole il procedimento prevede la stesura di uno strato impermeabile sopra la struttura in legno del tetto. Al di sopra di questo strato verranno posizionate le tegole, che verranno poi ancorate alla struttura portante tramite dei chiodi o altri elementi di ancoraggio. Inoltre, viene considerato l'utilizzo di una sega che permetta di tagliare le tegole per ottenere la dimensione richiesta, soprattutto per parti della copertura come angoli o in prossimità delle grondaie.

<b>Tegole in terracotta</b>				
	<b>Processi/materiali</b>	<b>Quantità</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Simapro dataset</b>
<b>INPUT</b>	<b>Guaina impermeabile</b>	<b>4,7</b>	<b>Kg</b>	<i>Bitumen adhesive compound, hot {GLO}  market for bitumen adhesive compound, hot   Cut-off, U</i>
	<b>Chiodi o altri elementi di ancoraggio</b>	<b>0,06</b>	<b>Kg</b>	<i>Steel, low-alloyed {GLO}  market for steel, low-alloyed   Cut-off, U</i>
	<b>Sega per tagliare le tegole a misura</b>	<b>0,23</b>	<b>Kwh</b>	<i>Electricity, low voltage {IT}  market for electricity, low voltage   Cut-off, U</i>
<b>OUTPUT</b>	<b>Parte cartacea del packaging</b>	<b>0,015</b>	<b>Kg</b>	<i>Waste paperboard {IT}  market for waste paperboard   Cut-off, U</i>
	<b>Parti plastiche del packaging</b>	<b>0,135</b>	<b>Kg</b>	<i>Waste plastic, mixture {IT}  market for waste plastic, mixture   Cut-off, U</i>

Tabella 4.21 - Fase di installazione delle tegole in terracotta (Fonte: elaborazione propria)

Per nessuno dei due prodotti sono previste perdite durante la fase d'uso.

#### 4.3.4. Fase di smaltimento

La fase di smaltimento è l'ultima fase che ricade all'interno dei confini del ciclo di vita considerato per questo studio.

La quantità di prodotto che verrà smaltita sarà leggermente inferiore rispetto alla quantità iniziale, in quanto si è considerato che durante la fase di smantellamento una porzione verrà dispersa a seguito di sgretolamento, rotture, ecc.

I pannelli e i materiali edili che costituiscono lo strato coibente dell'edificio su cui erano stati installati verranno avviati ad incenerimento, così come anche le tegole e i componenti necessari alla loro corretta installazione.

Pannelli in EPS				
	Processo	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
OUTPUT	Perdite di pannello	0,12	Kg	<i>Polyethylene waste</i>
	Perdite di materiale edile	3,6	Kg	<i>Chemical waste, inert</i>
	Incenerimento del pannello	1,08	Kg	<i>Waste polystyrene {GLO}  treatment of waste polystyrene, municipal incineration   Cut-off, U</i>
	Incenerimento del materiale edile di risulta	32	Kg	<i>Waste cement-fibre slab, dismantled {GLO}  treatment of waste cement-fibre slab, dismantled, municipal incineration   Cut-off, U</i>
	Riciclo dei tasselli in acciaio	0,021	Kg	<i>Steel and iron (waste treatment) {GLO}  recycling of steel and iron   Cut-off, U</i>

Tabella 4.22 - Fase di smaltimento dei pannelli in EPS (Fonte: elaborazione propria)

Tegole in terracotta				
	Processi/materiali	Quantità	Unità di misura	Simapro dataset
OUTPUT	Perdite di tegole	4,6	Kg	<i>Waste, final, inert</i>
	Incenerimento della guaina impermeabile	4,7	Kg	<i>Waste sealing sheet, polyethylene {RoW}  market for waste sealing sheet, polyethylene   Cut-off, U</i>
	Chiodi o altri elementi di ancoraggio	0,06	Kg	<i>Steel and iron (waste treatment) {GLO}  recycling of steel and iron   Cut-off, U</i>
	Tegole avviate ad incenerimento	41,3	Kg	<i>Damaged clay roof tile, glazed {EC}  market for damaged clay roof tile, glazed   Cut-off, U</i>

Tabella 4.23 - Fase di smaltimento delle tegole in terracotta (Fonte: elaborazione propria)

#### 4.3.5. Fase di trasporto

Per i pannelli le tratte di trasporto considerate sono soltanto due e sono quella che va dal sito di produzione al sito di installazione e quella che va dal sito di installazione al sito di smaltimento. Tutti gli altri trasporti attraverso i quali i prodotti vengono movimentati sono inclusi all'interno dei dataset selezionati nel software e quindi non sono stati inseriti manualmente, altrimenti sarebbero stati conteggiati due volte (double counting).

Il mezzo di trasporto scelto è lo stesso che è stato usato per i prodotti bio-based, ossia Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 {RER} | market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 | Cut-off, U.

Pannelli in EPS			
	Materiale trasportato	Peso trasportato (Kg)	Distanza percorsa (Km)
Dalla fabbrica al sito di installazione	Pannello	1,2	200
	Materiale edile	36,21	200
Dal sito di installazione al sito di incenerimento	Pannello	1,08	100
	Materiale edile di risulta	32	100

Tabella 4.24 - Fase di trasporto dei pannelli in EPS (Fonte: elaborazione propria)

Nel caso delle tegole, la tratta da inserire all'interno del modello è soltanto una, in quanto i datasets scelti per lo smaltimento dei prodotti, contengono già al loro interno il processo di trasporto dei prodotti stessi verso l'impianto di smaltimento.

Tegole in terracotta			
	Materiale trasportato	Peso trasportato (Kg)	Distanza percorsa (Km)
Dalla fabbrica al sito di installazione	Tegole	45,86	200
	Packaging	0,15	200
	Membrana impermeabile	4,7	200

Tabella 4.25 - Fase di trasporto delle tegole in terracotta (Fonte: elaborazione propria)

#### 4.4. Analisi degli impatti ambientali

Dopo aver presentato nel dettaglio la fase di inventario e avere a disposizione tutti i dati necessari, in questo paragrafo si passerà ad analizzare gli impatti ambientali generati durante il ciclo di vita di ognuno dei prodotti oggetto di studio.

Si procederà prima, a presentare gli impatti ambientali dei singoli prodotti, e poi si eseguirà un confronto tra il prodotto bio-based e il corrispettivo prodotto tradizionale, ossia si confronteranno gli impatti del pannello in *P. australis* con il pannello in EPS e poi quelli della copertura in *P. australis* con la copertura in tegole di terracotta.

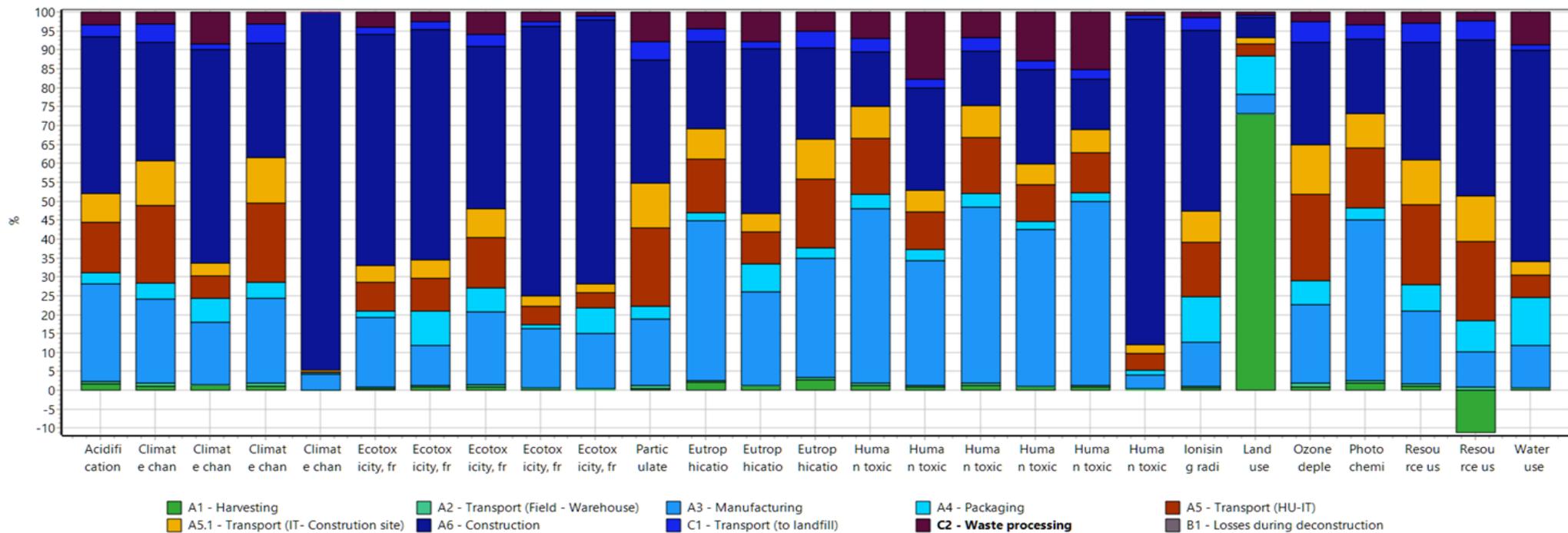
Per condurre questo studio è stato utilizzato il software Simapro versione 9.6, mentre per analizzare gli impatti ambientali è stato scelto un metodo rappresentativo per il territorio europeo e adattato ai dataset contenuti nel database ecoinvent, *Environmental Footprint 3.1 (adapted for SimaPro substances)*.

All'interno di questo metodo sono contenute le categorie di impatto più utilizzate a livello internazionale. La categoria più utilizzata è sicuramente il GWP (Global Warming Potential) o potenziale di riscaldamento globale (in questo caso specifico chiamato *Climate Change*), che è espresso in Kg CO<sub>2</sub> equivalente. Questo è basato sull'indicatore di impatto *Global Warming Potential 100 years* sviluppato dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) nel 2021 (Prè, 2022). Per citarne solo alcuni, in questo metodo sono presenti l'*ozone depletion*, che calcola gli effetti negativi sullo strato dell'ozono stratosferico nell'arco di 100 anni, *acidificazione terrestre e delle acque dolci*, che calcola come varia l'eccesso di sostanze pericolose all'interno di un eco-sistema sensibile terrestre o di acqua dolce. I risultati verranno presentati secondo due modalità di calcolo degli impatti: caratterizzazione (characterization) o middle point e punteggio singolo (single score) o end point.

La prima permette di tradurre gli impatti di ogni flusso (emissione di CO<sub>2</sub>, uso di acqua, ecc.) in categorie di impatto ambientale specifiche. Ogni flusso viene "caratterizzato" in base al suo contributo a queste categorie di impatto. Per esempio il flusso di CO<sub>2</sub> viene attribuito alla categoria del riscaldamento globale. La seconda può essere definita come una sintesi numerica degli impatti ambientali di un prodotto o di un processo, ottenuta combinando tutte le categorie di impatto in un singolo valore numerico. Questo rappresenta una valutazione complessiva dell'impatto ambientale e viene ottenuto dando un valore relativo ad ognuna delle categorie di impatto (per esempio attribuendo al riscaldamento globale un valore maggiore dell'eutrofizzazione). In questo modo si facilita la comparazione con altri prodotti o servizi valutati.

#### **4.4.1. Valutazione degli impatti ambientali dei pannelli termo-isolanti**

Il *grafico 4.1*, rappresenta gli impatti di caratterizzazione (middle point) del pannello termo-isolante in *P. australis*, e viene mostrato quanto ogni fase contribuisce alla determinazione di ogni categoria di impatto (acidificazione, eutrofizzazione, ecc.). mentre nel secondo (*Grafico 4.2*) si vede in termini assoluti quale fase del ciclo di vita impatta di più e su quale categoria di impatto esercita un'incidenza maggiore.



Method: Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.01 / EF 3.1 normalization and weighting set / Characterization  
 Analyzing 1 p 'Bio-based Boards';

Grafico 4.1 – Impatti del ciclo di vita del pannello in *P. australis*, caratterizzazione (middle point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

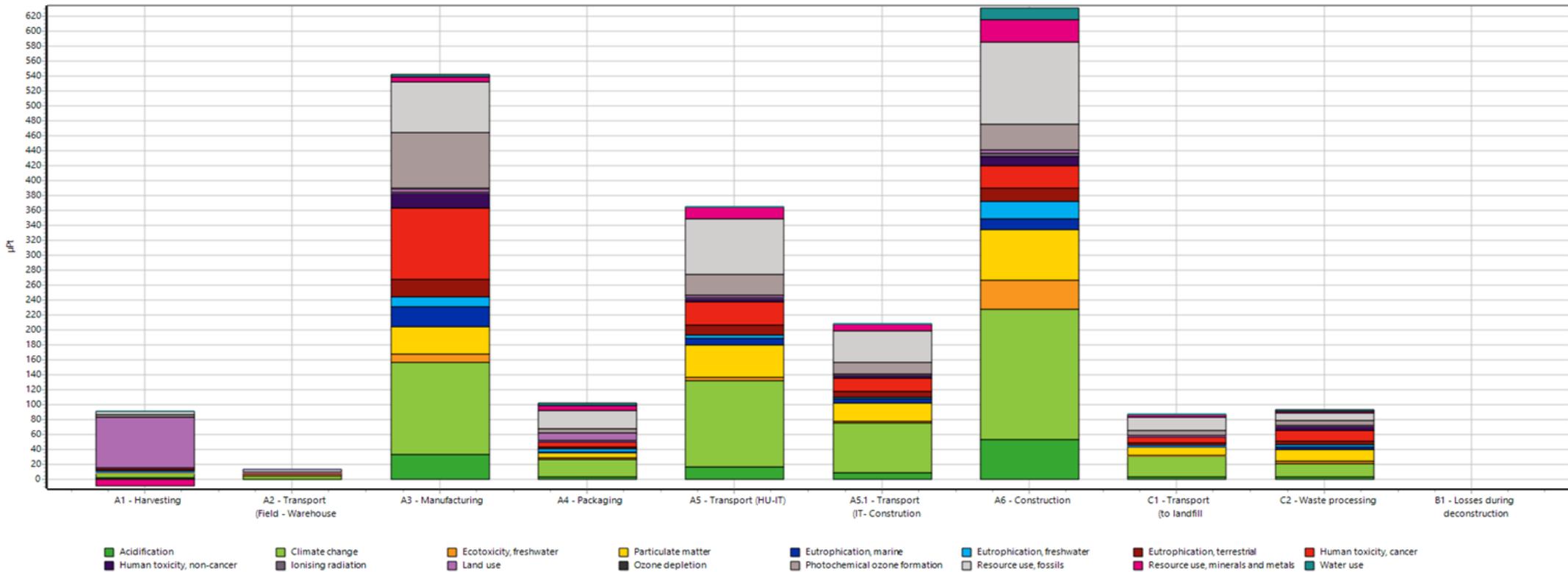


Grafico 4.2 – Impatti del ciclo di vita del pannello in *P. australis*, single score (end point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

I grafici 4.3 e 4.4 rappresentano lo stesso tipo di informazione dei grafici 4.1 e 4.2 ma applicati al pannello in EPS. Essi identificano quindi la ripartizione dell'incidenza delle fasi del ciclo di vita per ogni categoria di impatto (4.3) e l'impatto di ogni singola fase del ciclo di vita, suddivisa per la tipologia di impatto che la costituisce.

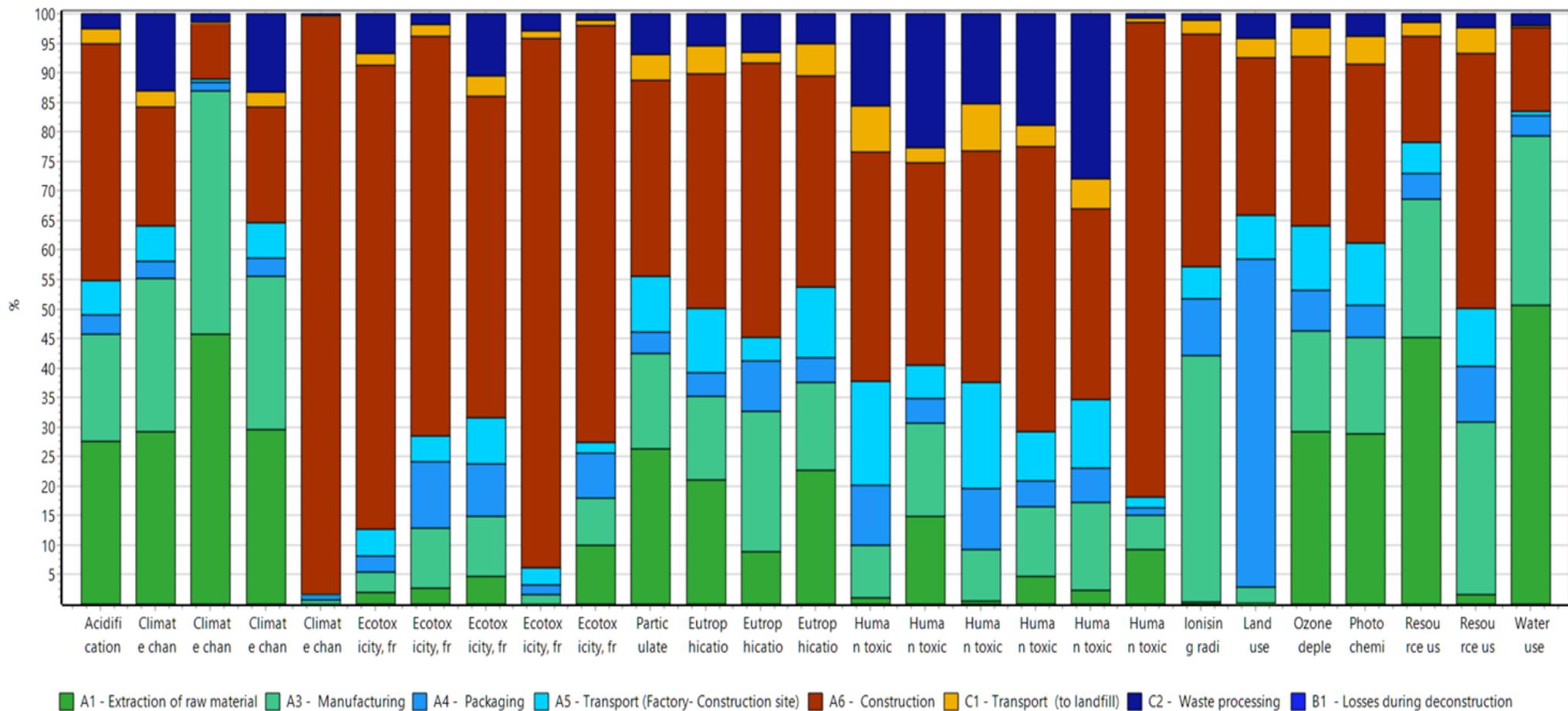


Grafico 4.3 – Impatti del ciclo di vita del pannello in EPS, Characterization (middle point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

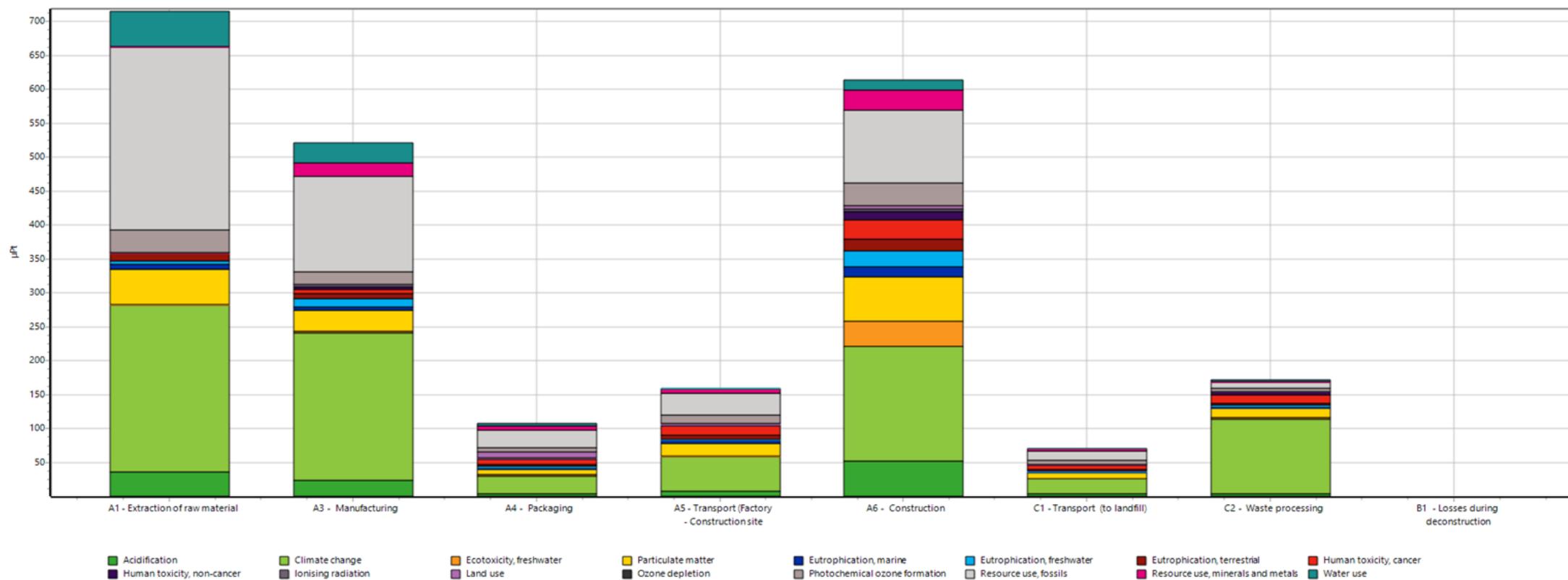


Grafico 4.4 – Impatti del ciclo di vita del pannello in EPS, single score (end point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

Infine, i grafici che rappresentano il confronto tra i due tipi di pannello sono il 4.5 e il 4.6. Nel primo (4.5) si nota come il confronto sia eseguito singolarmente per ogni categoria di impatto considerata, ossia per ognuna di esse quale delle due soluzioni comporta un impatto maggiore. Nel secondo grafico invece (4.6), definito “punteggio singolo”, ognuna delle due soluzioni paragonate è rappresentata da una colonna, dando un riferimento più immediato su quale sia la soluzione più impattante. Inoltre, ognuna delle due colonne è divisa in colori, rappresentanti ognuno una categoria di impatto. Da questa suddivisione si può notare quale categoria d’impatto contribuisce maggiormente alla generazione degli impatti ambientali.

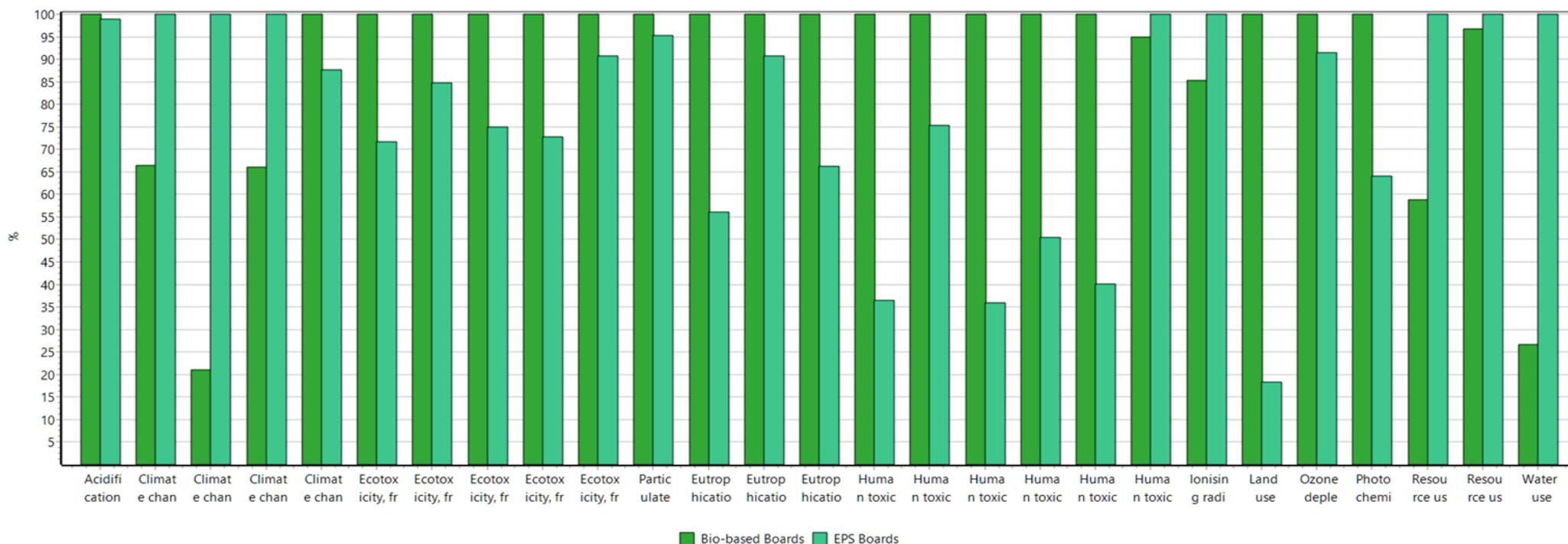


Grafico 4.5 – Confronto tra gli impatti del ciclo di vita del pannello in P. australis e quello in EPS, Characterization (middle point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

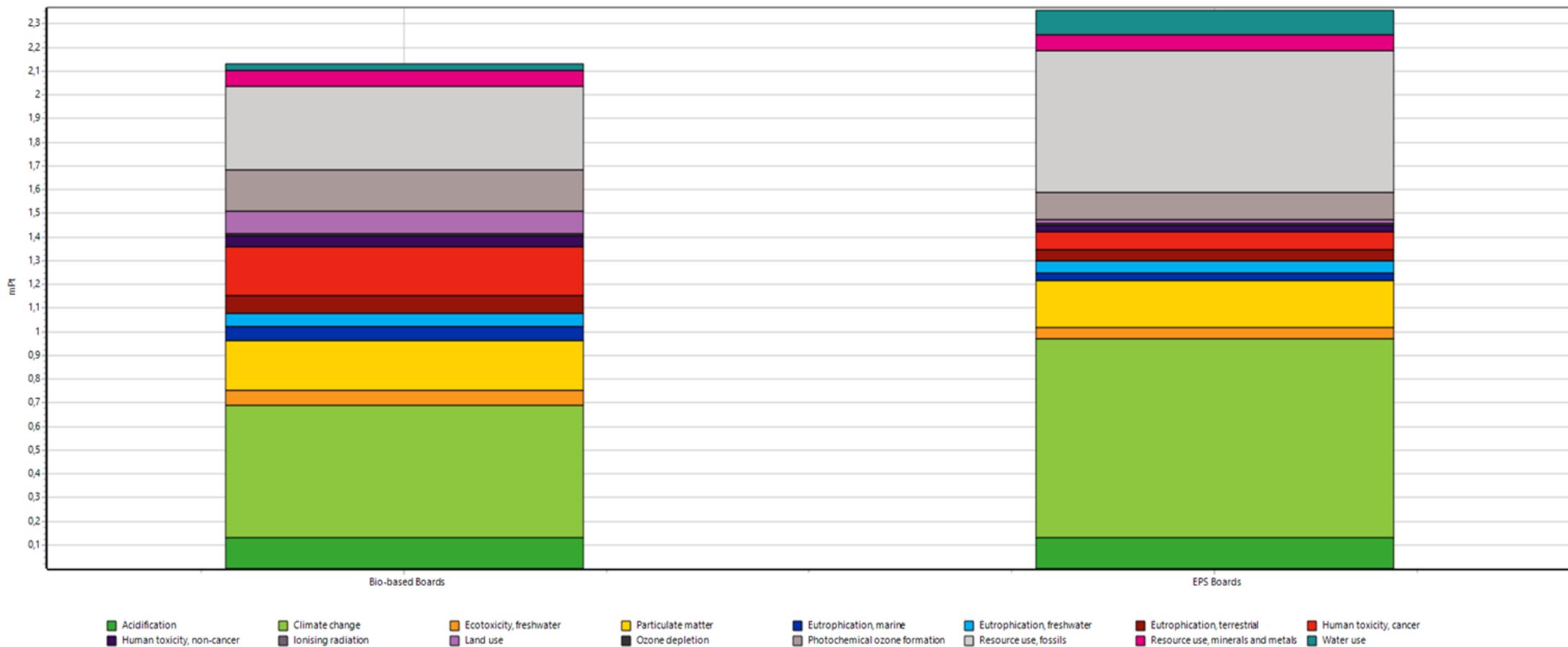


Grafico 4.6 – Confronto tra gli impatti del ciclo di vita del pannello in *P. australis* e quello in EPS, Single score (end point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

#### **4.4.2. Interpretazione degli impatti ambientali dei pannelli termo-isolanti**

Dal *grafico 4.2* si evince come la fase di raccolta delle canne comporti un impatto ambientale abbastanza contenuto rispetto alle altre fasi, se non per un elevato contributo nella categoria di impatto dell'utilizzo del suolo. Le due fasi più impattanti sono quella di *manufacturing* e *construction*, ossia quella in cui viene lavorato e assemblato il pannello e quella in cui questo viene installato. Nel primo caso la maggior parte dell'impatto proviene dal filo di ferro zincato che ha a monte dei processi per la sua produzione che incidono molto sugli impatti ambientali, le categorie che accrescono maggiormente gli impatti di questa fase appartengono alle categorie *potenziale di riscaldamento globale (GWP)* e *tossicità cancerogena per l'Uomo (Human toxicity, cancer)*; nel secondo caso invece l'impatto ambientale si deve soprattutto ai materiali edili (stucco, finitura, vernice) utilizzati per la realizzazione dell'isolamento termico; infatti il maggior contributo è dato dalla categoria *uso delle risorse fossili*, seconda solo alla categoria *potenziale di riscaldamento globale (GWP)*. Infine i trasporti svolgono un ruolo centrale nella determinazione degli impatti, soprattutto la tratta che dall'est Europa porta il prodotto in Italia.

Nel caso dei pannelli in polistirene espanso (EPS) la determinazione degli impatti è distribuita in modo diverso: la fase di estrazione delle materie prime è la fase che più contribuisce alla generazione degli impatti, nelle categorie *potenziale di riscaldamento globale (GWP)* e *uso delle risorse fossili*. Le altre due fasi più impattanti sono la fase di *manufacturing*, ossia quella di lavorazione e produzione del polistirene e quella di *construction*, ovvero quella di installazione. Per quest'ultima i materiali usati per entrambi i pannelli sono gli stessi. La fase di trasporto è molto contenuta dato che tutte le operazioni del ciclo di vita si svolgono sul territorio italiano, senza la necessità di trasporti di lungo raggio.

Mentre dal *grafico 4.5* non è facile stabilire quale delle due soluzioni sia la migliore dal punto di vista degli impatti ambientali, dal *grafico 4.6 (single score)* è immediatamente individuabile quella con la performance ambientale migliore, ossia quella bio-based, nonostante la differenza tra i pannelli in *Phragmites australis* e i pannelli in EPS, non sia così netta. In entrambi i prodotti il rapporto di impatto dovuto alle categorie *potenziale di riscaldamento globale (GWP)* e *uso delle risorse fossili* è pressoché equivalente; nel prodotto

bio-based una parte consistente dell'impatto totale è dovuta alla categoria *tossicità cancerogena per l'Uomo (Human toxicity, cancer)*, che si ritrova abbondantemente nella fase di manufacturing e nei trasporti. Nell'impatto totale del pannello in EPS c'è una parte di impatto legata alla categoria *Uso dell'acqua* che è molto più abbondante rispetto al pannello bio-based, questa infatti è usata per lo più nelle fasi di estrazione della materia prima e nella sua successiva lavorazione, fasi assenti nel ciclo di vita del pannello in *P. australis*.

### 4.4.3. Valutazione degli impatti ambientali dei prodotti per coperture

Per le coperture in *Phragmites australis* e per le coperture realizzate con tegole in terracotta, verrà proposta la stessa struttura e lo stesso procedimento usato per l'analisi degli impatti svolta nel paragrafo precedente.

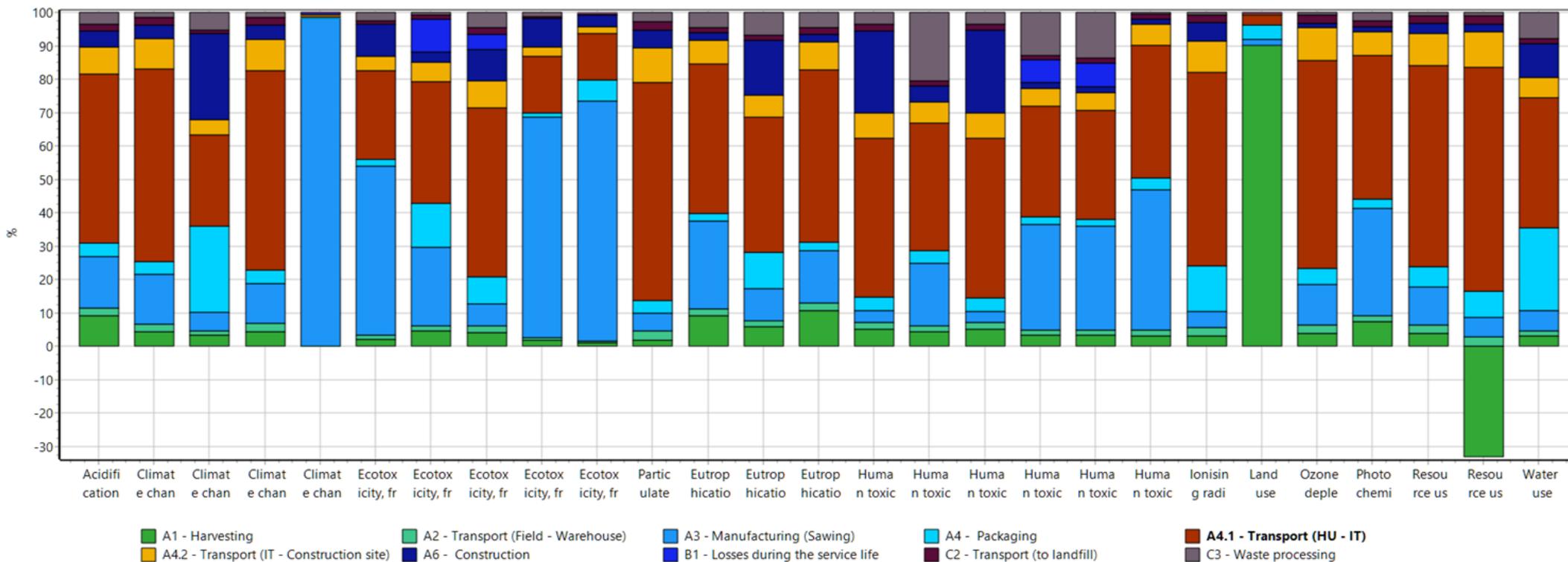


Grafico 4.7 – Impatti del ciclo di vita delle coperture in *P. australis*, Characterization (middle point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

I grafici 4.7 e 4.8 rappresentano gli impatti generati dalle coperture in *P. australis*. Nello specifico nel primo le emissioni sono distinte per categoria di impatto e i colori rappresentano le fasi del ciclo di vita che contribuiscono a generare l'impatto della categoria stessa. Nel 4.7 si nota come l'impatto prevalente sia generato dal trasporto di lunga distanza dalla Romania all'Italia. Nel grafico 4.8 invece, la suddivisione è fatta in base alle fasi che costituiscono il ciclo di vita del prodotto e i colori rappresentano le categorie di impatto che si sviluppano durante la fase stessa. In questo caso le categorie di impatto prevalenti sono *l'uso del suolo* nella fase di raccolta, il *GWP* in quantità variabile in tutte le fasi, ed infine la *tossicità per l'essere umano*.

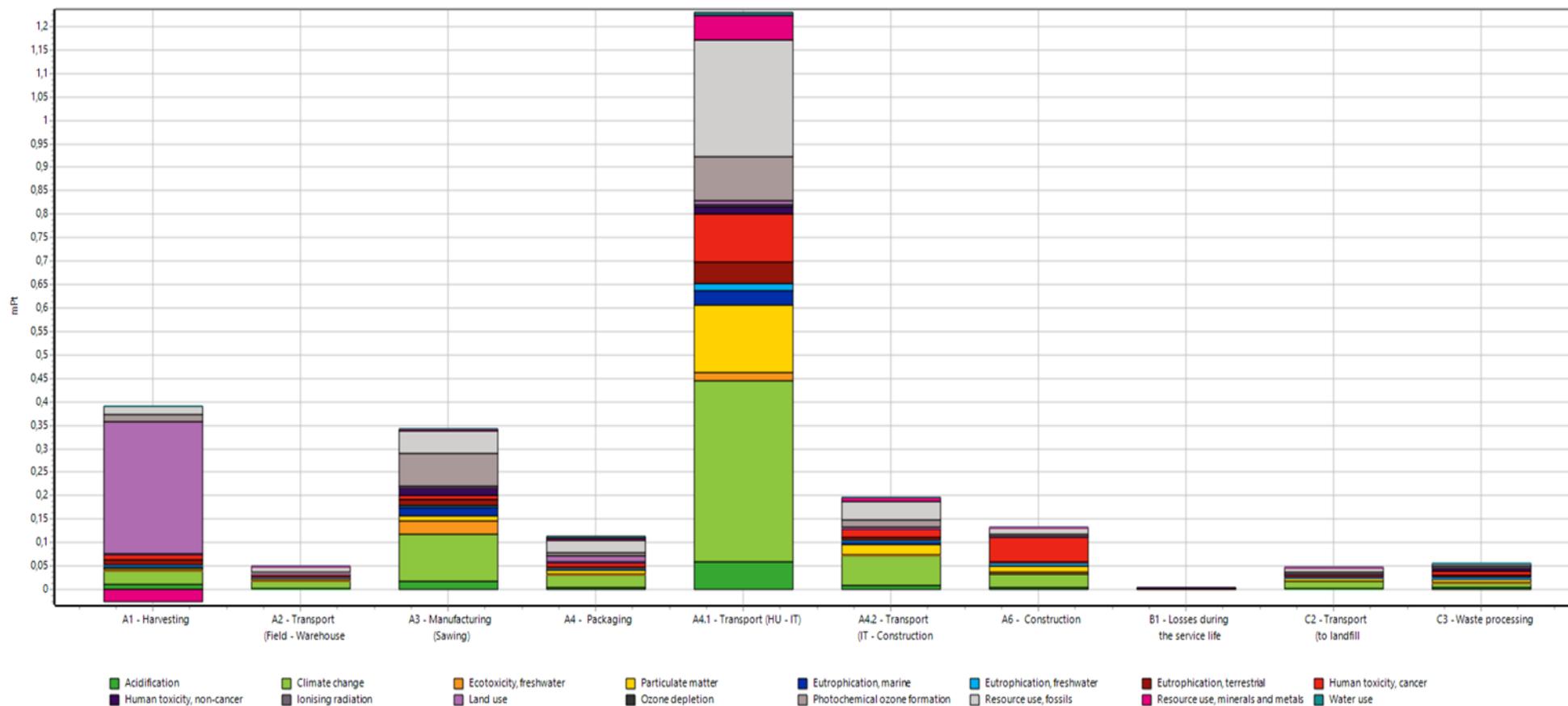


Grafico 4.8 – Impatti del ciclo di vita delle coperture in *P. australis*, Single score (end point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

I grafici 4.9 e 4.10 sono riferiti alle tegole in terracotta. Nel 4.9, definito “punto medio” (*middle point*), si apprezza come la maggior parte dell’impatto sia dovuto alla fase di *manufacturing*, mentre in maniera minore contribuiscono la fase di trasporto e quella di installazione (*Construction*). Questo è confermato anche nel grafico 4.10 che mostra come sia la fase di *manufacturing* a generare la maggior parte delle emissioni del ciclo di vita, seguita in ordine decrescente dalla fase di *manufacturing* e trasporto. Non indifferente è

la fase di smaltimento. Nel *grafico 4.10* inoltre si nota una prevalenza dell’impatto sul *potenziale di riscaldamento globale* e dell’*uso di risorse fossili*

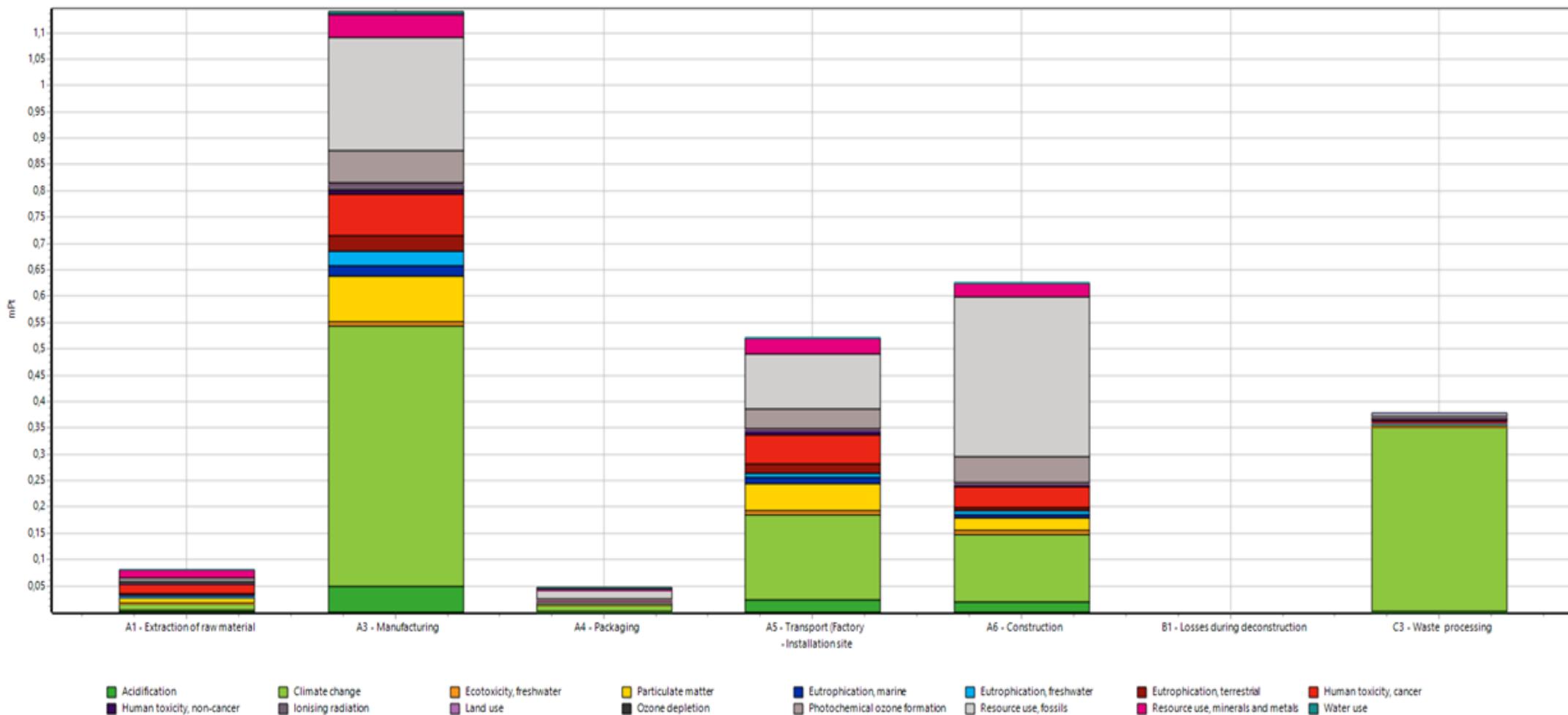


Grafico 4.10 – Impatti del ciclo di vita delle coperture in tegole di terracotta, Single score (end point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

Il confronto tra la copertura bio-based e le tegole in terracotta è rappresentata dai grafici 4.11 e 4.12. Dal primo grafico si nota che non c'è una netta differenza tra gli impatti generati dal prodotto bio-based e quello tradizionale, tant'è che dalla lettura di questo si fatica a determinare quale sia il meno impattante. Dal grafico 4.12 invece, si nota come la soluzione tradizionale contribuisca a generare un impatto ambientale maggiore della soluzione bio-based, anche se la differenza è minima. Le categorie che contribuiscono maggiormente a creare l'impatto sono il *potenziale di riscaldamento globale (GWP)* e *l'uso di risorse fossili*, quest'ultima categoria soprattutto nel caso delle tegole di terracotta. La soluzione bio-based ha invece un impatto importante per la categoria *uso del suolo*.

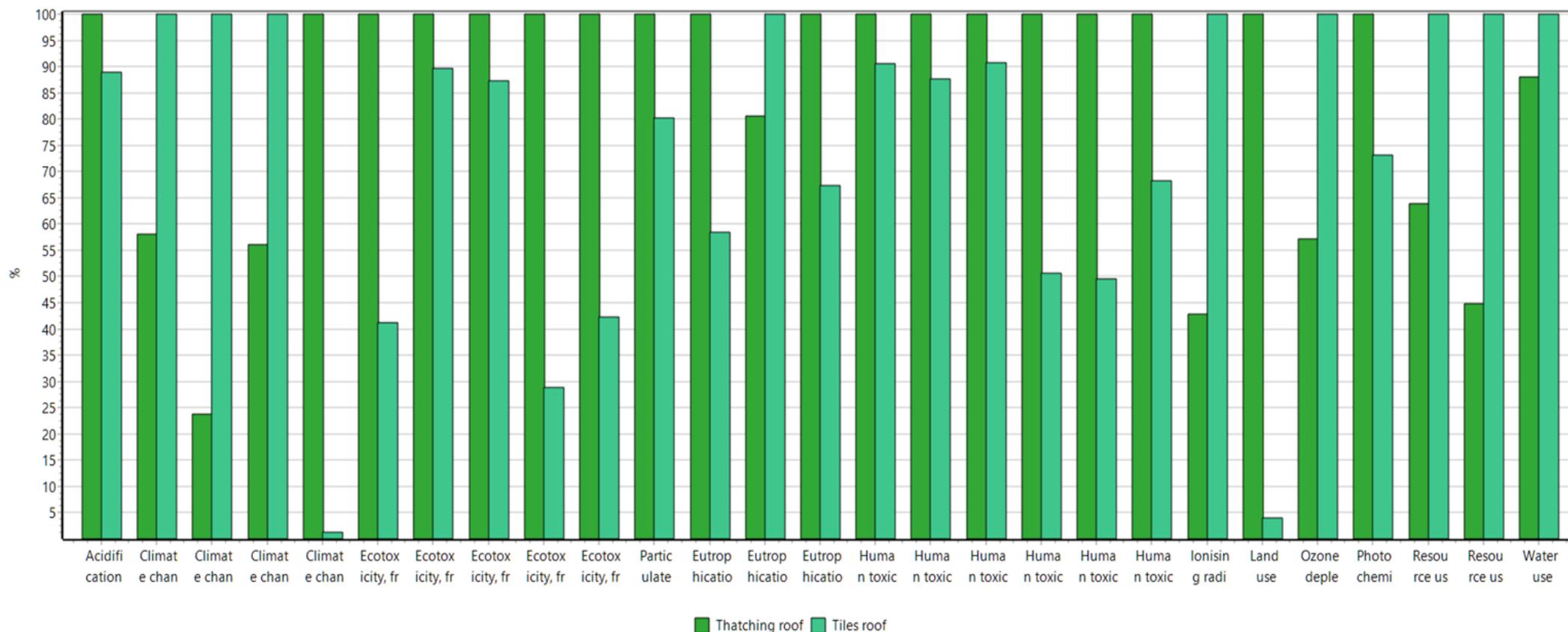


Grafico 4.11 – Confronto tra gli impatti del ciclo di vita delle coperture in P. australis e quelle in tegole di terracotta, Characterization (middle point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

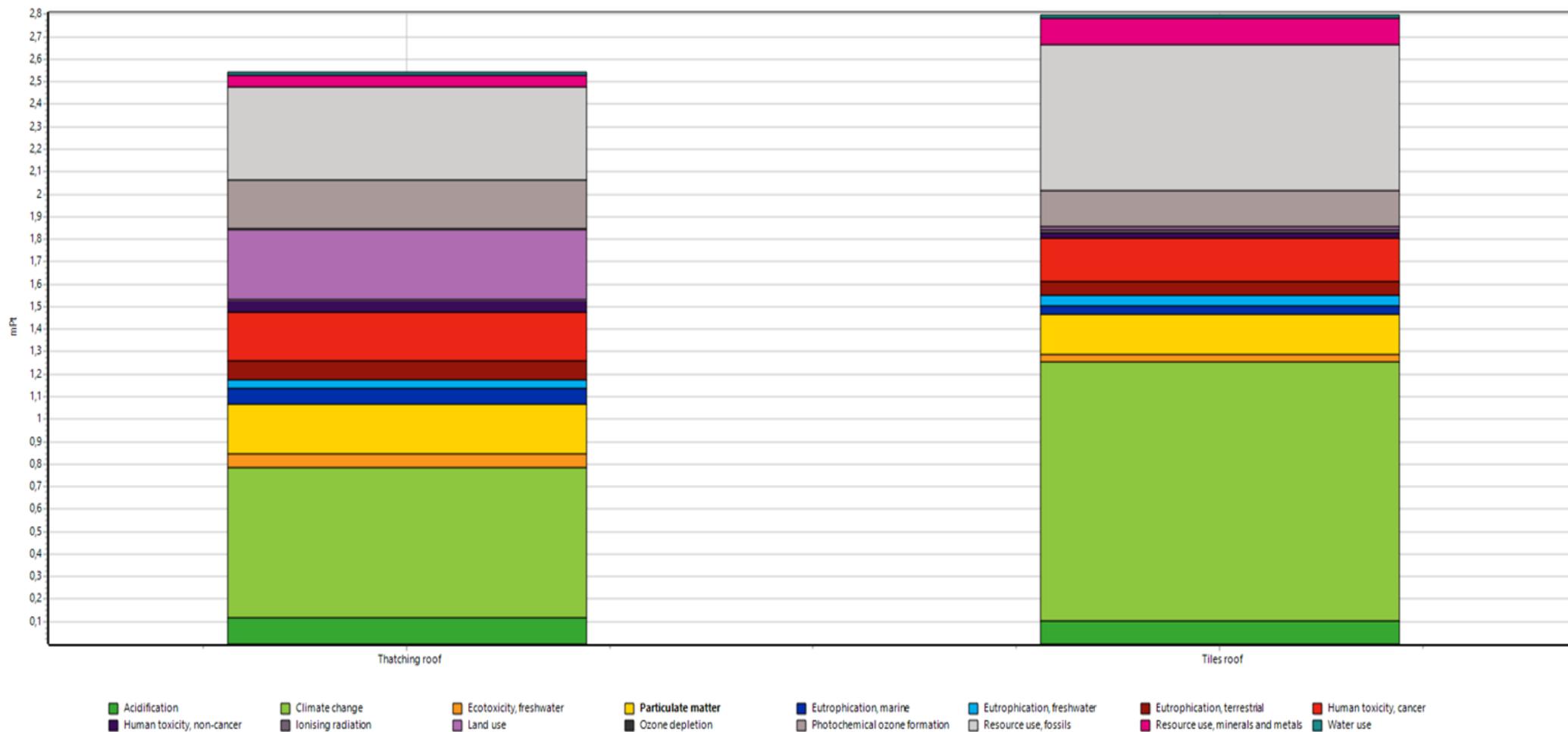


Grafico 4.12 – Confronto tra gli impatti del ciclo di vita delle coperture in *P. australis* e quelle in tegole di terracotta, Single score (end point) (Fonte: elaborazione propria in Simapro)

#### 4.4.4. Interpretazione degli impatti ambientali dei prodotti da copertura

Il ciclo di vita delle coperture risulta avere degli impatti più bassi in termini assoluti rispetto a quello dei pannelli, principalmente per l'utilizzo di meno componenti necessari per la posa in opera del prodotto. Guardando il *grafico 4.8* si nota subito la preponderanza degli impatti generati dalla fase di trasporto dalla Romania allo stabilimento italiano, rispetto a tutti gli altri. Le altre due fasi che contribuiscono maggiormente alla generazione degli impatti sono la raccolta delle canne e la lavorazione delle canne nello stabilimento romeno.

Il *grafico 4.10* presenta gli impatti di punteggio singolo per le coperture realizzate con tegole di terracotta. In questo caso le fasi più impattanti differiscono da quelle del prodotto bio-based. Infatti, per le tegole in terracotta la fase più impattante è quella di *manufacturing*, ossia quella fase che racchiude i processi che vanno dal conferimento della materia prima allo stabilimento di lavorazione, fino all'ottenimento del prodotto finito. In questa fase la quota maggiore d'impatto è riferita al *potenziale di riscaldamento globale (GWP)*. La seconda fase più impattante è quella di installazione, in cui viene utilizzata una guaina impermeabile da posizionare tra la struttura portante del tetto e le tegole, determinando un notevole innalzamento dell'impatto. Le altre due fasi che maggiormente contribuiscono alla generazione degli impatti sono quella di trasporto e quella di smaltimento. La prima contribuisce agli impatti ambientali con valori ripartiti principalmente tra *potenziale di riscaldamento globale (GWP)*, *tossicità cancerogena per l'Uomo (Human toxicity, cancer)* e *uso delle risorse fossili (resource use, fossils)*. La seconda invece contribuisce per la quasi totalità dell'impatto attraverso la categoria *potenziale di riscaldamento globale (GWP)*, dovuto al processo di incenerimento del materiale dismesso.

Dal confronto diretto tra i due prodotti (*grafici 4.11 e 4.12*), si nota che gli impatti generati dalla soluzione tradizionale (tegole in terracotta) sono superiori rispetto a quelli generati dal prodotto realizzato in *P. australis*. Nel dettaglio, le tegole in terracotta risultano avere un punteggio molto più alto nelle categorie *potenziale di riscaldamento globale (GWP)* e *uso delle risorse fossili (resource use, fossils)*. Nel prodotto bio-based c'è invece un contributo elevato per le categorie di *particolato (particulate matter)* e *uso del suolo (land use)*, rispettivamente generati dai trasporti e dall'utilizzo di suolo caratteristico delle specie vegetali, come appunto è *Phragmites australis*.

In seguito all'analisi e all'interpretazione degli impatti per ognuno dei prodotti oggetto di studio, è stata condotta una analisi di sensibilità andando ad individuare anche un sensitivity ratio (rapporto di sensibilità). Questa può essere usata per determinare la sensibilità di un modello LCA al cambiamento di un parametro. È espressa dalla seguente equazione:

$$SR = \frac{\frac{\Delta \text{ risultato}}{\text{risultato iniziale}}}{\frac{\Delta \text{ parametro}}{\text{parametro iniziale}}}$$

*Figura 4.1 – Equazione del rapporto di sensibilità (sensitivity ratio)*

L'equazione valuta il rapporto tra le variazioni relative dei risultati e dei parametri. Per esempio, se un parametro ha un rapporto di sensibilità uguale a 1, significa che aumentando il suo valore del 10%, il risultato finale aumenterà del 10%, concludendo così che i risultati sono sensibili alla variazione del parametro specifico. Perciò, questo strumento permette di capire quale parametro influenza sensibilmente i risultati finali dell'LCA (Clavreul, 2012).

Avendo chiara la struttura dell'intero ciclo di vita dei prodotti bio-based, si è giunti alla conclusione che l'unico parametro su cui si potesse avere un margine significativo di miglioramento in termini di impatto fossero le fasi di trasporto. Per questa ragione è stata condotta l'analisi del rapporto di sensibilità sul parametro distanza e sul risultato in Kg di CO<sub>2</sub> equivalente emesse durante il trasporto.

Nella *tabella 4.26* vengono rappresentate le variazioni del parametro, ossia la distanza percorsa, e del risultato finale.

Rapporto di sensibilità		
Risultati in % (Kg CO2 eq.)	Parametro in % (Km)	Valore di sensibilità
Asse X	Asse Y	
78,91	190,91	0,413
55,78	136,36	0,409
32,65	81,82	0,399
19,73	45,45	0,434
7,48	18,18	0,411

Tabella 4.26 – Valori percentuali dei risultati e degli input e valori assoluti di sensibilità

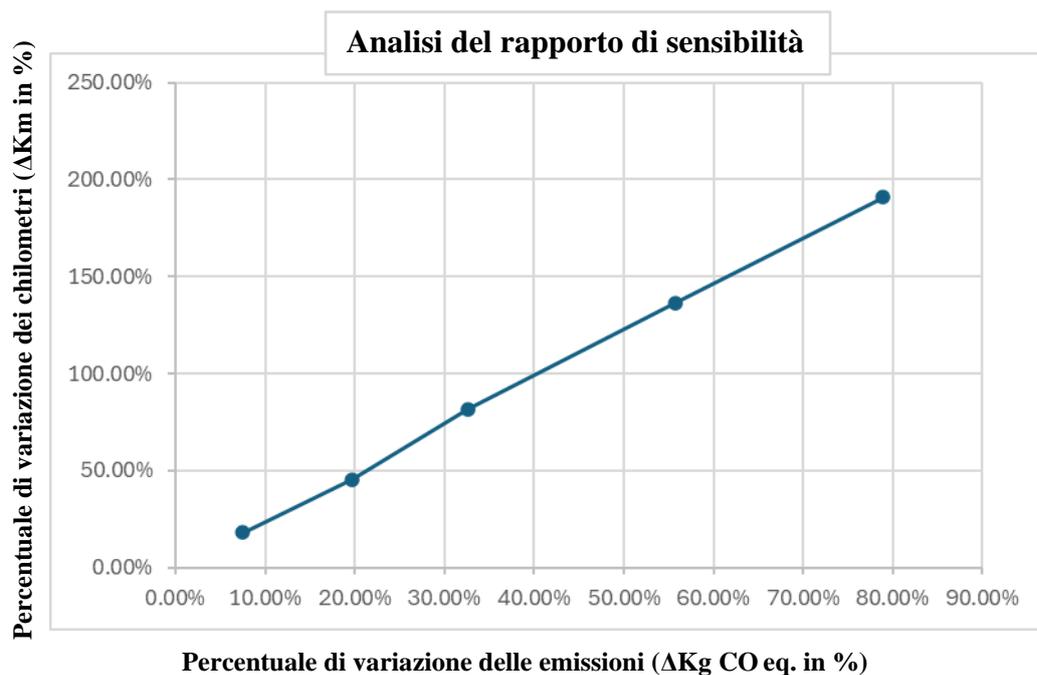


Grafico 4.13 – Rappresentazione grafica dell'analisi del rapporto di sensibilità

L'analisi è stata condotta individuando alcune distanze intermedie che simulassero una riduzione delle tratte necessarie al trasporto delle merci. Il *grafico 4.13* mostra come variano le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente al variare della distanza, mentre nella *tabella 4.26* sono riportati i valori percentuali del parametro (Km) e dei risultati (Kg CO<sub>2</sub>) ottenuti grazie all'equazione in *figura 4.1*. Dall'analisi si evince che il modello non è sensibile al parametro distanza, per cui anche una riduzione della distanza non comporterebbe un miglioramento in termini di impatti ambientali.

Sebbene l'analisi del rapporto di sensibilità mostra che il modello non è sensibile alla riduzione della distanza, è pur vero in seguito alla riduzione della stessa si potrebbero avere dei vantaggi in termini assoluti. Ipotizzando che venga abrogato il divieto di raccolta sul territorio italiano della specie *Phragmites australis*, non si dovrebbe più

ricorrere a raccogliere questa specie nelle zone dell'est o del nord Europa, comportando un vantaggio notevole, sia in termini di impatti ambientali che di costi. I suddetti vantaggi potrebbero contribuire ad incentivare l'utilizzo dei prodotti bio-based piuttosto che degli omologhi tradizionali.

## 5. Conclusioni e prospettive future

In questo progetto l'obiettivo prefissato, come descritto nel paragrafo 1.1, era determinare se e quanto l'impatto dei prodotti bio-based sarebbe stato inferiore a quello dei prodotti omologhi tradizionali. In seguito alla valutazione svolta e grazie ai risultati ottenuti, si può affermare che l'obiettivo iniziale è stato dimostrato. L'ipotesi su cui questa tesi si fonda può quindi essere confermata, grazie ai risultati ottenuti attraverso uno strumento di calcolo basato sul metodo scientifico: la metodologia di analisi del ciclo di vita (LCA), attuata tramite il software Simapro ed il relativo database.

I pannelli e le coperture in *Phragmites australis* possono dunque essere considerate soluzioni migliori rispetto ai pannelli in EPS e alle coperture realizzate con tegole di terracotta, secondo il punteggio aggregato "Single score" (mentre nel caso dei risultati ottenuti in fase di caratterizzazione ci sono alcune categorie di impatto per cui sono più impattanti i materiali tradizionali, mentre per altre risultano più impattanti le soluzioni biobased).

Nonostante questo, è doveroso sottolineare che la differenza tra gli impatti generati dai due prodotti non è elevata, benchè riducendo la distanza di trasporto i valori di impatto ambientale delle soluzioni bio-based tendono a ridursi in termini assoluti.

Inoltre, il settore della produzione dei derivati del petrolio da cui l'EPS deriva e il settore delle fornaci che producono le tegole, hanno uno sviluppo tecnico molto elevato, essendo dei settori sviluppati da molti decenni. Lo stesso grado tecnologico e tecnico non è invece presente nel settore della raccolta o della manifattura della specie *Phragmites australis*. Non esiste un modo univoco di raccogliere la pianta (Covaliov, 2023), ma dipende molto dalle condizioni del terreno; inoltre anche la fase di manifattura è ancora ad un grado di automazione embrionale. Questo non tanto perché sia una specie di recente utilizzo, nel nord Europa è infatti usata da secoli (Köbbing, 2013), ma il suo utilizzo limitato non ne permette la scalabilità dei processi, non favorendone quindi la convenienza economica. Questo si traduce in un approccio più artigianale e meno industriale nella produzione dei prodotti bio-based analizzati, determinando una minore efficienza dei processi e quindi un maggiore impatto rispetto a quello che si avrebbe nel caso di processi più meccanizzati e automatizzati.

Perciò il margine di miglioramento nell'utilizzazione di questa pianta è molto elevato, passando dallo studio delle tecniche di raccolta e lavorazione (gestione dei canneti, modalità e periodi di raccolta, aumento della meccanizzazione delle varie

operazioni), fino allo studio di impieghi alternativi a quelli investigati in questa sede (fitodepurazione di aree inquinate, produzione di pellet per combustione o di bio-carburante, realizzazione di mobili, ecc.). Il progetto Reed Revolution si propone di investigare parte di questi temi, cercando di rendere appetibile una risorsa che attualmente è utilizzata ben al di sotto delle proprie potenzialità. Questo progetto potenzialmente contribuirà ad immettere sul mercato una risorsa in più, da utilizzare come alternativa più sostenibile di altre. Ovviamente, il suo utilizzo dovrà sottostare ad una serie di norme e buone pratiche agricole e ambientali che ne determineranno un utilizzo responsabile, non ne comprometteranno la disponibilità né comporteranno il danneggiamento dell'integrità delle aree che la ospitano, che in molti casi costituiscono gli habitat naturali di diverse specie animali.

Questo studio si rivolge al mondo accademico e al settore edilizio. Il primo è stato promotore ma è anche destinatario di questo progetto; il secondo, al quale appartengono sia i prodotti analizzati che le due aziende con cui l'autore ha collaborato, è lo sbocco naturale e operativo di questa tesi. L'ambizione dello studio è quello di introdurre innovazione e sostenibilità all'interno del mercato oltre che nel mondo della ricerca, per fare in modo che i risultati ottenuti possano generare un reale impegno ed interesse degli attori operanti nel settore e potenzialmente suscitare l'interesse di altri portatori di interessi.

## 6. Acknowledgments

This work has been supported by research and development grant No. RTU-PA-2024/1-0077 under the EU Recovery and Resilience Facility funded project No. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 “Implementation of consolidation and management changes at Riga Technical University, Liepaja University, Rezekne Academy of Technology, Latvian Maritime Academy and Liepaja Maritime College for the progress towards excellence in higher education, science, and innovation”.



Via Case Sparse, 52 - S. SAVINO  
06063 Magione (Pg), Italia



Via Francesco Albani 1/3  
40129 Bologna, Italia

# Bibliografia

ISO 14001: Certificazione del sistema di gestione ambientale, International Organization for Standardization, Geneva, 2006

ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, International Organization for Standardization, Geneva, 2006

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

Baldo, G., 2008. *Analisi del ciclo di vita LCA*. s.l.:Edizioni ambiente.

Bauer, M., 2010. *Green Building - Guidebook for Sustainable Architecture*. 2nd a cura di s.l.:Springer.

BiomimicryInstitute, s.d. *Biomimicry institute*. [Online]

Available at: <https://biomimicry.org/inspiration/what-is-biomimicry/>

Brundtland, G. H., 1987. *Our Common Future*. s.l.:s.n.

Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL), 2024. *What is COP?*.

[Online]

Available at: [https://www.cisl.cam.ac.uk/cop-climate-change-conference#:~:text=COP%20stands%20for%20Convention%20of,Parties'\)%20to%20the%20UNFCCC](https://www.cisl.cam.ac.uk/cop-climate-change-conference#:~:text=COP%20stands%20for%20Convention%20of,Parties')%20to%20the%20UNFCCC).

D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens III, 1972. *I limiti dello sviluppo*. s.l.:Alfieri & Lacroix spa.

Direttiva2022/2464, 2022. *Direttiva (UE) 2022/2464 / Direttiva CSRD*

"*Corporate Sustainability Reporting Directive*". [Online]

Available at: <https://certifico.com/component/attachments/download/31951>

European Environmental Bureau, s.d. *About EEB*. [Online]

Available at: <https://eeb.org/about/>

Füchsl, S., 2022. Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A. *Cleaner materials*.

G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema, D.W. Pennington, 2004. Life cycle assessment -

- Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, Issue 30, pp. 701-720.
- Harrington, 1964. *Manual of the plants of Colorado*. 2nd a cura di Chicago: The Swallow Press.
- Hauschild, M. Z., 2018. *Life Cycle Assessment*. s.l.:Springer.
- Hey, C., 2007. *EU Environmental Policies: A short history*, s.l.: German Advisory Council on the Environment.
- Iital, A., 2012. Compendium: An Assessment of Innovative and Sustainable Uses of Baltic Marine Resources. *Reed harvesting*, pp. 103-124.
- IPCC, 2018. *History of IPCC*. [Online]  
Available at:  
[https://www.ipcc.ch/about/history/#:~:text=The%20Intergovernmental%20Panel%20on%20Climate%20Change%20\(IPCC\)%20was%20established%20by,UN%20General%20Assembly%20in%201988.](https://www.ipcc.ch/about/history/#:~:text=The%20Intergovernmental%20Panel%20on%20Climate%20Change%20(IPCC)%20was%20established%20by,UN%20General%20Assembly%20in%201988.)
- Köbbing, J. F., 2013. The utilisation of Reed (*Phragmites australis*) – a review. *Mires and Peat*, Issue October.
- Luderitz, V., 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 2 December, pp. 157-171.
- M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, S. I. Olsen, 2017. *Life Cycle Assessment, Theory and practice*. s.l.:Springer.
- Munafò, M., 2024. *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*, Roma: ISPRA.
- Saetta, Y., 2013. *VALUTAZIONE DELLA PRODUTTIVITA'*. Padova: s.n.
- Siebenhüner, B., 2000. Homo oeconomicus and homo politicus in *Ecological and Economics*, 40(3), pp. 17-18.
- Sluis, T. v. d., R.P. Poppens, P. Kraisvitnii, O. Rii, J.P. Lesschen, M. Galytska, H.W. Elbersen, 2013. *Reed harvesting from wetlands for bioenergy : technical aspects, sustainability and economic viability of reed harvesting in Ukraine*, Wageningen: s.n.

Enciclopedia Treccani, s.d. *La rivoluzione industriale*. [Online]

Available at: <https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-industriale/>

Enciclopedia Treccani, *Consumismo*. [Online]

Available at: <https://www.treccani.it/enciclopedia/consumismo/>

Enciclopedia Treccani, *Homo oeconomicus*. [Online]

Available at: <https://www.treccani.it/enciclopedia/homo-oeconomicus/>

Gazzetta ufficiale, 1976. *Gazzetta ufficiale della repubblica italiana*. [Online]

Available at: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1976/06/07/076U0373/sg>

UNEP, 2022. *UNEP: 50 years of Environmental Milestones*. [Online]

Available at: <https://www.unep.org/environmental-moments-unep50-timeline#:~:text=Founded%20in%201972%20following%20the,to%20the%20world's%20environmental%20challenges.>

UNEP, 2023. *Global status report for buildings and constructions*, s.l.: UNEP.

UNRIC, 2016. *Obiettivi per lo sviluppo sostenibile*. [Online]

Available at: <https://unric.org/it/agenda-2030/>

Verbrugghe, N., Rubinacci, E. & Khan, A. Z., 2023. Biomimicry in Architecture: A Review of Definitions, Case Studies, and Design Methods. *Biomimetics*, 8(1).