



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA E BIOTECNOLOGIE “L. SPALLANZANI”

Direttore Chiar.mo Prof. Antonio Torroni

LAUREA MAGISTRALE IN BIOTECNOLOGIE AVANZATE

*Verso business model sostenibili: il caso Bin2Bean.
Best practice e indicatori sociali e ambientali*

Relatore:
Prof.ssa Daniela Ubiali

Correlatori:
Dott.ssa Sara Daniotti
Dott.ssa Maria Elena Saija



Tesi di Laurea Magistrale di
Claudia Coretti

Anno Accademico 2024/2025

Indice

Riassunto	4
Glossario	5
Lista abbreviazioni	6
1 Introduzione	9
1.1 Il paradigma dell'economia lineare	9
1.2 Bioeconomia ed economia circolare come opportunità	10
1.3 La gestione dei rifiuti organici: da problema ambientale a risorsa strategica	11
1.3.1 Dati di produzione e raccolta	11
1.3.2 Impatti della gestione inadeguata della FORSU	13
1.3.3 La valorizzazione della frazione organica	14
1.3.4 Criticità della Filiera	15
1.4 Suolo in Europa e ruolo dei <i>soil improver</i> da <i>biowaste</i>	16
1.4.1 Stato dei suoli in Europa: evidenze, <i>driver</i> e implicazioni	16
1.4.2 <i>Soil improver</i> da <i>biowaste</i> : tipologie e applicazioni	17
1.5 Il progetto Bin2Bean	20
1.5.1 Consorzio Italtotec.....	23
1.6 Business model	24
1.6.1 <i>Business Model Canvas (BMC)</i>	25
1.6.2 <i>Sustainable Business Model Canvas (SBMC)</i>	26
2 Scopo del lavoro	28
2.1 Analisi di casi studio e identificazione di <i>best practice</i>	28
2.2 Selezione di indicatori sociali e ambientali	28
3 Materiali e metodi	29
3.1 Fonti di informazione e criteri di selezione	29
3.1.1 Fonti primarie: iniziative progettuali e locali.....	31
3.1.2 Fonti secondarie: letteratura scientifica e rapporti tecnici	32
3.1.3 Fonti terziarie: normative e linee guida ufficiali.....	34
3.1.4 Limiti della metodologia.....	34
4 Risultati	35
4.1 Casi studio per la valorizzazione del <i>biowaste</i>	35
4.1.1 Analisi quantitativa.....	35
4.1.2 Analisi qualitativa	38
4.1.3 <i>Best practice</i> da case study	50
4.2 Indicatori nei modelli di business	57
4.2.1 Indicatori sociali	57
4.2.2 Indicatori ambientali	63

4.3 Principi fondamentali della politica e normativa Europea sui rifiuti	67
4.3.1 La direttiva quadro sui rifiuti: direttiva 2008/98/CE	68
4.3.2 La Direttiva sulle Discariche (1999/31/CE): il punto di partenza per la riduzione dello smaltimento.....	69
4.3.3 Verso una gestione circolare dei rifiuti: dal CEAP al Pacchetto Economia Circolare.....	70
4.3.4 La legislazione per i suoli e prodotti fertilizzanti	73
5 <i>Discussione</i>	74
5.1 Analisi dei casi studio	74
5.1.1 Impatti per la bioeconomia circolare	75
5.1.2 Implicazioni per i modelli di business.....	80
5.2 Analisi degli indicatori sociali e ambientali	82
6. <i>Conclusioni</i>.....	83
6.1 Raccomandazioni per lo sviluppo di business model sostenibili	83
<i>Bibliografia e sitografia</i>	88

Riassunto

La crescente pressione sulle risorse naturali e gli impatti ambientali associati al modello lineare di produzione e consumo rendono necessaria la transizione verso sistemi economici più sostenibili. In questo contesto, la bioeconomia e l'economia circolare offrono nuove opportunità per trasformare i rifiuti organici da problema ambientale a risorsa strategica.

Il presente lavoro, sviluppato nell'ambito del progetto europeo Bin2Bean (<https://www.bin2bean.eu/>), analizza le potenzialità della valorizzazione dei rifiuti organici attraverso lo studio di casi studio nel settore della gestione e valorizzazione dei *biowaste*. L'analisi ha un duplice obiettivo: da un lato individuare e analizzare casi di successo, dall'altro identificare indicatori sociali e ambientali utili a supportare, attraverso specifiche raccomandazioni, la progettazione e l'implementazione di modelli di *business* sostenibili e circolari.

L'analisi dei casi studio evidenzia come la valorizzazione della frazione organica dei *biowaste* possa contribuire alla produzione di ammendanti organici, come i *soil improver*, utili per migliorare la qualità dei suoli agricoli sempre più soggetti a fenomeni di degradazione e perdita di sostanza organica. In questo senso, la crescente produzione di rifiuti organici rappresenta una sfida ambientale e gestionale per i sistemi di raccolta e trattamento ma, allo stesso tempo, anche una potenziale risorsa per il ripristino della fertilità dei suoli.

I modelli più efficaci risultano essere quelli in grado di garantire un'elevata qualità e quantità della frazione organica raccolta, attraverso sistemi di raccolta efficienti e strategie di sensibilizzazione dei cittadini. Il coinvolgimento attivo degli attori locali, in particolare cittadini, enti pubblici, operatori della filiera e comunità locali, emerge come un elemento fondamentale nel garantire il successo dei modelli di valorizzazione circolare del *biowaste*. Parallelamente, l'analisi degli indicatori ha consentito di individuare un set di indicatori sociali e ambientali utili per integrare la dimensione socio-ambientale nei modelli di *business*, rappresentando uno strumento fondamentale per supportare lo sviluppo di sistemi più sostenibili, resilienti e replicabili nel contesto della transizione verso un'economia sempre più circolare.

Glossario

Soil improver: materiali aggiunti al terreno per migliorarne le proprietà fisiche, chimiche e biologiche come struttura, fertilità e ritenzione idrica creando condizioni migliori per la crescita delle piante e promuovendo la salute del suolo a lungo termine [1].

Entrepreneurship empowerment: processo che potenzia individui e gruppi fornendo loro consapevolezza, risorse e autonomia per partecipare attivamente nella creazione e gestione di imprese, favorendo l'innovazione, la crescita personale e l'autodeterminazione [2].

FORSU: è la parte biodegradabile dei rifiuti domestici (scarti alimentari, umido da cucina e verde da giardino) raccolta in modo differenziato, che grazie a processi di trattamento come il compostaggio (aerobico) o la digestione anaerobica può essere trasformata in compost per l'agricoltura o in biogas/biometano [3].

Stakeholder: individui o gruppi di persone che hanno un interesse o una preoccupazione in un'organizzazione, in un progetto o in un processo decisionale [4].

Value proposition: elemento unico di vendita di un prodotto o servizio, rappresenta l'insieme dei benefici che i clienti otterranno e le ragioni fondamentali per cui dovrebbero scegliere una specifica offerta. [5]

Value chain: attività che definisce il percorso di un prodotto o servizio, dalle materie prime fino al consumatore finale [6].

Pay-As-You-Throw: modello economico di gestione dei rifiuti in cui gli utenti pagano una tariffa proporzionale alla quantità effettiva di rifiuti indifferenziati prodotti [7].

LCA (Life Cycle Assessment): processo oggettivo di valutazione dei carichi ambientali connesso con un processo, un prodotto o un'attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale [8].

Lista abbreviazioni

BMC – Business Model Canvas

CEAP – Circular Economy Action Plan

ECN – European Compost Network

EEA – European Environment Agency

EU – European Union

FORSU – Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano

GHG – Greenhouse Gas

ITB – Consorzio Italbiotec

JRC – Joint Research Centre

LCA – Life Cycle Assessment

MSW – Municipal Solid Waste

SBM – Sustainable Business Model

SBMC – Sustainable Business Model Canvas

TBL – Triple Bottom Line

PAYT – Pay-As-You-Throw

WTP – Willingness To Pay

DQR – Direttiva Quadro sui Rifiuti

EoW – End-of-Waste

RSU – Rifiuti Solidi Urbani

GPP – Green Public Procurement

TARIP – Tariffa Puntuale

LLs – Living Labs

TRL – Technology Readiness Level

GIS – Sistema Informativo Geografico

IoT – Internet of Things

MNC – Materiali Non Compostabili

PFC – Categorie Funzionali del Prodotto

CMC – Categorie di Materiali Costituenti

HTP – Potenziale di tossicità umana

POCP – Potenziale di creazione di ozono fotochimico

EP – Potenziale di eutrofizzazione

AP – Potenziale di acidificazione

THSAD – Digestione termofila ad alti solidi

SCP – Proteine derivate da cellule singole

PHA – Polioidrossialcanoato

PLA – Acido Polilattico

WEN – Azoto estraibile in acqua

TOC – Carbonio totale

MDCA – Metodologie di Valutazione Strutturata e Multi-Criterio

TLBMC –Triple Layered Business Model Canvas

CTLBMC – Circular Triple-Layered Business Model Canvas

BMCS – Business Model Canvas for Sustainability

CDW –Rifiuti da costruzione e demolizione

1 Introduzione

1.1 Il paradigma dell'economia lineare

L'uso non sostenibile delle risorse naturali rappresenta una delle principali cause della crisi ambientale contemporanea, in particolare del cambiamento climatico e della perdita di biodiversità. Le conseguenze si traducono già oggi in gravi impatti socio-economici, che includono costi significativi e un aumento della mortalità prematura associata agli effetti del cambiamento climatico e del degrado ambientale [9].

La produzione globale di rifiuti solidi urbani, stimata a 2,3 miliardi di tonnellate nel 2023, è destinata a raggiungere 3,8 miliardi di tonnellate entro il 2050 [10]. L'incremento dei rifiuti è una conseguenza strutturale dell'economia lineare, basata sul modello *Cradle-to-Grave*: estrazione delle materie prime, produzione e consumo, e smaltimento finale. Questo approccio considera le risorse come illimitate e a basso costo, senza valorizzare i materiali a fine vita, generando inevitabilmente rifiuti. [11]. Negli ultimi 50 anni, l'utilizzo globale di risorse è triplicato [12] e, secondo le proiezioni dell'OCSE, potrebbe quasi raddoppiare nuovamente entro il 2060 [13], esercitando una pressione intollerabile sugli ecosistemi.

La produzione di rifiuti rappresenta un indicatore diretto e inequivocabile dei modelli di consumo e produzione che caratterizzano le società contemporanee, costituendo non solo un problema logistico, ma una questione economica e ambientale di primaria importanza. Tra le conseguenze più gravi risaltano le emissioni di gas serra, in particolare il metano, pari al 3% delle emissioni totali in Europa [14]. I principali flussi di rifiuti ad alto impatto e/o maggiore diffusione, che costituiscono una sfida ambientale e gestionale di primaria importanza, comprendono: apparecchiature elettriche ed elettroniche [15], tessili [16], plastiche [17] e *biowaste*.

Ogni fase del modello lineare è caratterizzata da profonde inefficienze e dal sistematico spostamento dei costi sulla collettività. L'estrazione incontrollata di materie prime causa deforestazione, inquinamento idrico e contaminazione del suolo su vasta scala, con conseguente perdita di biodiversità nelle zone interessate. Le fasi successive di questo sistema, produzione e trasformazione industriale e smaltimento, aggravano la crisi globale dei rifiuti [18]. Ad oggi, oltre il 93% dei materiali estratti non viene introdotto nuovamente nell'economia [13], contribuendo all'aumento di produzione di rifiuti urbani.

Oltre agli effetti ambientali, l'economia lineare genera profonde disuguaglianze economiche e sociali, a causa della concentrazione delle risorse [19], dei costi volatili delle materie prime e dei gravi impatti

sulle popolazioni locali [20], che contribuiscono a generare una crescente instabilità geopolitica [21]. Basti pensare che i Paesi ad alto reddito, pur ospitando solo circa il 17% della popolazione mondiale, consumano circa un quarto delle materie prime globali [22] e producono un impatto climatico dieci volte maggiore rispetto ai Paesi a basso reddito [12]. Inoltre, la gestione del “fine di vita” di un prodotto è spesso delocalizzata verso paesi a basso e medio reddito [23], dove pratiche di smaltimento informali, come la combustione di cavi elettrici per il recupero del rame o l’interramento dei rifiuti [24–26], espongono le comunità a gravi rischi sanitari, come mostrano diversi rapporti dell’Organizzazione Mondiale della Sanità [23].

È quindi necessario superare il modello lineare e adottare un’economia circolare basata sulla valorizzazione dei rifiuti e sull’estensione del ciclo di vita dei prodotti. Queste strategie non solo consentono di prolungare il ciclo di vita dei prodotti, ma rappresentano anche una via concreta per preservare le risorse naturali, ridurre gli impatti ambientali e contenere la pressione sugli ecosistemi.

1.2 Bioeconomia ed economia circolare come opportunità

La Commissione Europea ha introdotto politiche in materia di economia circolare e bioeconomia, ritenendoli strumenti essenziali per la transizione ecologica. L’Agenzia Europea dell’Ambiente (EEA) sottolinea come la loro implementazione migliorerebbe l’efficienza nell’uso delle risorse e ridurrebbe le pressioni ambientali, gravati dalla crescente domanda globale di cibo, mangimi, biomateriali e risorse bioenergetiche [27].

Economia circolare e **bioeconomia** rappresentano due pilastri complementari della transizione verso modelli economici sostenibili. La prima mira a mantenere il valore dei prodotti, dei materiali e delle risorse il più a lungo possibile all’interno del sistema economico, riducendo la produzione di rifiuti e superando il paradigma lineare “prendere-produrre-smaltire” e passando invece al principio “prendere-usare-riutilizzare” [11]. Nell’economia circolare, i rifiuti diventano risorse da reintegrare in nuovi cicli produttivi, attraverso pratiche di riparazione, riuso, rigenerazione e riciclo, come previsto dal *Circular Economy Action Plan* (Commissione Europea, 2020). Parallelamente, la bioeconomia valorizza risorse biologiche rinnovabili, trasformandole in alimenti, mangimi, biomateriali e bioenergia, favorendo l’integrazione tra agricoltura, industria e ricerca [28].

Secondo i dati più recenti, il tasso di circolarità nell’Unione Europea ha raggiunto l’11,8% nel 2023 [29], collocando l’Europa al di sopra di molte altre regioni del mondo.

Accanto agli indicatori economici e ambientali, la dimensione sociale svolge un ruolo sempre più centrale: il 78% dei cittadini europei percepisce un impatto diretto dei problemi ambientali sulla propria vita quotidiana [30], alimentando così la domanda di soluzioni più sostenibili e la promozione di un'economia maggiormente circolare. In questo contesto, strumenti come Ecolabel EU, disciplinato dal Regolamento (CE) n. 66/2010 e riconosciuta nei 27 stati membri e nei paesi SEE (spazio economico europeo), aiutano i consumatori a identificare prodotti e servizi a basso impatto e incentivando le imprese ad innovare in chiave più responsabile [31].

L'economia circolare si configura inoltre come un settore occupazionale in espansione: nel 2021 ha generato 4,3 milioni di posti di lavoro in Europa, con un incremento dell'11 % rispetto al 2015 [32].

Questi dati dimostrano come la combinazione di economia circolare e bioeconomia rappresenti non solo una necessità ecologica, ma anche un'opportunità economica e sociale.

Nel complesso, economia circolare e bioeconomia non sono percorsi paralleli ma complementari. La loro integrazione consente di affrontare simultaneamente la riduzione dei rifiuti e la valorizzazione delle risorse biologiche, aprendo la strada a soluzioni innovative come la produzione di *soil improver* da *biowaste*, che rappresentano un punto di incontro concreto tra tutela del suolo, riduzione dell'impatto ambientale e nuove opportunità di mercato.

1.3 La gestione dei rifiuti organici: da problema ambientale a risorsa strategica

1.3.1 Dati di produzione e raccolta

La Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano (FORSU), ovvero la componente biodegradabile dei rifiuti urbani, rappresenta una delle componenti più rilevanti e in rapida crescita della raccolta differenziata in Europa, costituendo circa il 37% dei rifiuti urbani totali [33], e rivestendo dunque un ruolo strategico nella transizione verso modelli di economia circolare. Tale sviluppo è sostenuto dall'introduzione di politiche e normative comunitarie che ne promuovono la separazione e il recupero.

La FORSU è costituita principalmente da due flussi: (i) la componente che in gergo comune viene definita "umido", ovvero gli **scarti alimentari (*food waste*)**, che comprende rifiuti di cucina di origine domestica, della ristorazione e della GDO ed è il flusso con il più alto contenuto di umidità e di sostanza organica facilmente biodegradabile, e (ii) la **frazione verde (*green waste*)** che comprende scarti

provenienti da giardini e parchi, includendo sfalci d'erba, fogliame e potature [34]. Studi europei sulla composizione dei rifiuti solidi urbani indicano che, in media, il 30% è costituito da scarti alimentari e 12% dalla frazione verde [35]. Secondo i dati Eurostat del 2022 in Europa sono stati generati, in media, 132 kg di rifiuti alimentari per abitante, per un totale di 59 milioni di tonnellate di massa fresca [36]. Da quest'analisi, le famiglie sono risultate la principale fonte di spreco contribuendo per il 54% del totale, pari a 72 kg per abitante [37]. Più della metà dello spreco alimentare in Europa avviene quindi tra le mura domestiche. La parte restante dello spreco, circa il 46%, avviene lungo tutta la catena di approvvigionamento: trasformazione e produzione alimentare (19%), ristoranti e servizi di ristorazione (11%), vendite al dettaglio e altre forme di distribuzione (8%), produzione primaria (agricoltura e pesca) (8%) [36, 37]. Le statistiche evidenziano un punto cruciale: il successo della strategia europea sui rifiuti organici dipende in larga misura dalle azioni e dai comportamenti dei singoli cittadini. Proprio per questo le soluzioni tecnologiche e le normative industriali, sebbene necessarie, non sono sufficienti se non vengono supportate da politiche efficaci che influenzano il comportamento dei cittadini come le campagne di sensibilizzazione capillari e sistemi di raccolta comodi e accessibili.

Nel 2023, i cittadini europei hanno generato in media 511 kg di rifiuti urbani pro capite, per un totale di circa 229 milioni di tonnellate [38]. Il dato mostra una lieve riduzione rispetto all'anno precedente, dove sono stati registrati 513 kg di rifiuti urbani pro capite [38], suggerendo una tendenza alla stabilizzazione nella produzione di rifiuti. Di questi rifiuti circa il 34% è costituito da *biowaste*, pari a circa 75 milioni di tonnellate nell'Unione Europea [14]. Tuttavia, solo il 40% di questa frazione viene raccolta separatamente e trattata, e quindi appena il 17% del totale dei rifiuti urbani è effettivamente valorizzato [14]. Tuttavia, è importante sottolineare che questi valori rappresentano una media europea, dietro la quale si nasconde una notevole eterogeneità tra gli Stati Membri: l'Austria è il maggior produttore di rifiuti annui pro capite (827 kg nel 2022), mentre la Romania si colloca in ultima posizione con 301 kg di rifiuti annui per abitante [39].

A differenza dei rifiuti alimentari, la quantificazione della componente verde è molto meno precisa. Attualmente *Eurostat* non presenta un set di dati armonizzato per questo flusso [38], che nelle statistiche ufficiali viene incluso nella categoria dei rifiuti "compostati", pari al 17% del trattamento totale dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU) [14]. Questa lacuna informativa ostacola una strategia di gestione mirata e di valutazione accurata del potenziale di recupero

Sul fronte del trattamento, i dati *Eurostat* mostrano progressi sostanziali nella riduzione del conferimento in discarica: tra il 1995 e il 2023 la percentuale di rifiuti smaltiti in discarica è passata dal 61% al 22% [38]. Entro il 2030, la Commissione Europea punta a ridurre del 58% i rifiuti alimentari conferiti in discarica, da 121 a 51 milioni di tonnellate. La discarica rimane però la soluzione meno sostenibile, causando emissioni di gas serra, contaminazione del suolo e perdita di materiali preziosi. Per una gestione circolare efficace, è necessario potenziare la raccolta differenziata, ampliare la rete impiantistica e aumentare la responsabilizzazione dei cittadini.

1.3.2 Impatti della gestione inadeguata della FORSU

Il confinamento in discarica è dunque l'opzione posta all'ultimo gradino della gerarchia europea di gestione dei rifiuti poiché in grado di innescare una serie di processi biochimici che la trasformano in una vera e propria "fabbrica" di inquinamento, con impatti ambientali che persistono per decenni, presentando non solo un fallimento ambientale, ma anche un profondo fallimento economico e strategico.

Ogni tonnellata di FORSU che finisce in discarica rappresenta una perdita di risorse sotto molteplici punti di vista:

- **Perdita di nutrienti per l'agricoltura:** i rifiuti organici sono ricchi di elementi nutritivi fondamentali per la crescita delle piante, come azoto, fosforo e potassio. Gettarli in discarica significa sottrarre questi preziosi elementi al ciclo agronomico, costringendo il settore agricolo a fare un ricorso massiccio a fertilizzanti chimici di sintesi.
- **Perdita di sostanza organica e fertilità del suolo:** oltre ai nutrienti, il rifiuto organico è una fonte insostituibile di sostanza organica. Si stima infatti che ogni tonnellata di compost derivata da rifiuti organici può contenere in media: 6 kg di azoto; 3 kg di fosforo e 8 kg di potassio [14]. Il suo recupero permette di migliorare la struttura fisica dei terreni agricoli, aumentando la capacità di trattenere l'acqua e riducendo così il fabbisogno di irrigazione.
- **Perdita di potenziale energetico:** la frazione organica possiede un significativo contenuto energetico. Se la sua decomposizione avviene in modo controllato, è possibile produrre biogas, una fonte di energia rinnovabile. Questo biogas può essere convertito in energia elettrica e termica tramite cogenerazione, oppure può essere purificato per ottenere biometano, un biocombustibile del tutto equivalente al gas naturale fossile.

- **Perdita economica:** la mancata valorizzazione energetica della frazione organica dei rifiuti rappresenta, inoltre, una notevole perdita economica per l'Europa. La Commissione Europea stima che lo spreco alimentare generi una perdita annuale di circa 132 miliardi di euro considerando l'intero ciclo di vita dei nutrienti [40].

Nel quadro dell'economia circolare, i rifiuti organici sono visti come un flusso di materia ed energia che deve essere reimmesso nei cicli biologici ed economici, in un'ottica di chiusura dei cicli. Questo cambio di paradigma trasforma un costo (lo smaltimento) in un'opportunità (la produzione di nuove risorse), allineando la gestione dei rifiuti con i principi di sostenibilità e di efficienza nell'uso delle risorse.

1.3.3 La valorizzazione della frazione organica

Per trasformare la FORSU da rifiuto in risorsa, sono disponibili tecnologie mature ed efficienti. Le due principali filiere di trattamento biologico sono il compostaggio, focalizzato sul recupero di materia, e la digestione anaerobica, che permette un recupero congiunto di materia ed energia. Entrambe le soluzioni rappresentano un'alternativa virtuosa alla discarica, consentendo di chiudere il ciclo dei nutrienti e di produrre valore aggiunto.

Il **compostaggio** avviene in presenza di condizioni controllate di umidità e ossigeno ed è un processo durante il quale batteri, funghi e altri microrganismi decompongono materiale organico per trasformarlo in compost, un ammendante naturale, stabile e ricco di sostanze nutritive. È una delle tecniche più diffuse per il trattamento della frazione dei rifiuti solidi urbani, in particolare della componente "umida". Questo processo è in grado di trasformare i rifiuti organici grezzi in un composto stabile, sicuro e friabile che restituisce nutrienti preziosi alle colture vegetali. Avviene in fasi distinte: (i) *fase mesofila* che, con una temperatura di circa 20-40 °C, favorisce la crescita di batteri e funghi che si nutrono di composti semplici come zuccheri, aminoacidi e lipidi per rilasciare energia metabolica. Aumentando la temperatura, il processo entra nella (ii) *fase termofila* (40-70 °C) durante la quale i microrganismi termofili degradano le principali molecole strutturali della materia organica e il calore elevato aiuta a disinfettare il compost inattivando molti agenti patogeni. Alla fine, mentre l'attività microbica rallenta, il processo di compostaggio entra nella (iii) *fase di raffreddamento e maturazione* in cui il materiale viene raffinato in una forma stabile che è sicura e ha un alto valore agronomico per il suolo [41] (paragrafo 1.4.2).

La **digestione anaerobica** avviene in assenza di ossigeno ed è un processo in cui specifici microrganismi riescono a scomporre i rifiuti organici producendo biogas, una miscela di metano e anidride carbonica ed è particolarmente efficace per trattare rifiuti organici ad alto valore energetico. Coinvolge quattro fasi metaboliche: (i) idrolisi, (ii) acidogenesi, (iii) acetogenesi e (iv) metanogenesi. Le interazioni tra i microrganismi coinvolti in queste fasi sono estremamente complesse e possono influenzare le prestazioni e la stabilità del processo di digestione anaerobica. Il processo genera due principali prodotti: biogas, una fonte di energia rinnovabile costituita principalmente da metano e anidride carbonica e digestato, il sottoprodotto residuo ricco di nutrienti [42].

Grazie a questi due approcci, dal 2009 al 2022 il recupero dei *biowaste* è cresciuto di circa il 90% [14].

1.3.4 Criticità della Filiera

Le principali sfide nella gestione della FORSU sono due: la qualità del materiale raccolto e la capacità di trattamento.

Un problema pervasivo è la **presenza di contaminanti**, ovvero materiali non compostabili (MNC) che vengono erroneamente conferiti insieme all'organico. Tra questi, i più comuni sono i sacchetti di plastica non compostabile, ma anche frammenti di vetro, metalli e altri materiali non biodegradabili. Un'elevata percentuale di contaminanti ha un duplice effetto negativo: da un lato, aumenta significativamente i costi di trattamento, poiché gli impianti devono sostenere oneri aggiuntivi per le operazioni di pretrattamento e "pulizia" del materiale in ingresso; dall'altro, compromette la qualità del prodotto finale, il compost, riducendo il suo valore agronomico e commerciale.

La seconda criticità è il **deficit impiantistico**, la carenza di impianti di trattamento biologico (compostaggio e digestione anaerobica) costringe i comuni a trasportare la FORSU raccolta su lunghe distanze, verso impianti più organizzati. Questo fenomeno, oltre a rappresentare un controsenso logistico e ambientale che annulla parte dei benefici della raccolta differenziata a causa delle emissioni legate al trasporto, viola il principio di autosufficienza e prossimità nella gestione dei rifiuti. Inoltre, genera un aggravio dei costi a carico dei comuni e, di conseguenza, dei cittadini. Il sistema appare quindi sbilanciato: l'enfasi sulla quantità della raccolta ha superato l'attenzione sulla qualità e sullo sviluppo di un'infrastruttura di trattamento adeguata e capillare sul territorio.

1.4 Suolo in Europa e ruolo dei *soil improver* da *biowaste*

1.4.1 Stato dei suoli in Europa: evidenze, *driver* e implicazioni

Il rapporto *The State of Soils in Europe* del *Joint Research Center* (2024) evidenzia come il degrado del suolo generi gravi impatti: perdita di produttività agricola, riduzione della resilienza degli ecosistemi, peggioramento della qualità dell'acqua, declino della biodiversità e rischi per la salute umana. Il documento sottolinea l'urgenza di strategie integrate di gestione del suolo e di maggiore coinvolgimento dei cittadini in attività di monitoraggio e conservazione. La pedodiversità europea, che comprende oltre 20 tipologie di suolo secondo la *World Reference Base for Soil Resources*, deriva da fattori come geologia, clima e vegetazione e costituisce la base della ricchezza ecosistemica del continente, fornendo servizi essenziali per biodiversità, regolazione climatica, purificazione delle acque e produttività agricola.

Il ruolo dei suoli diventa ancora più cruciale in un contesto di crescita della domanda globale di risorse alimentari e industriali. Essi sono infatti la fonte principale di materie prime per il settore agroalimentare e per i numerosi comparti produttivi, rendendo la loro tutela una priorità non solo ambientale, ma anche economica e sociale. Proprio per questi motivi, proteggere il patrimonio culturale del suolo è fondamentale per migliorare la sua sicurezza.

Le evidenze indicano un progressivo deterioramento dello stato dei suoli europei negli ultimi vent'anni, causato da molteplici *driver* naturali e antropici interconnessi tra loro:

- cambiamento climatico, con l'aumento delle temperature che accelera la decomposizione della sostanza organica, riducendo la fertilità del terreno;
- eventi meteorologici estremi, come siccità e piogge intense, che aggravano la desertificazione e l'erosione, la minaccia più evidente per la salute dei suoli europei. Secondo il *Joint Research Centre*, circa il 24% del territorio europeo è affetto da un'erosione idrica superiore al livello tollerabile (2 tonnellate/ettaro all'anno) [43]. La perdita di strato fertile superficiale è quasi irreversibile e compromette la produttività a lungo termine [44].
- uso intensivo del suolo e urbanizzazione, che hanno causato una crescente impermeabilizzazione del territorio e alla conversione di aree agricole e naturali, compromettendo le funzioni ecosistemiche del suolo. I suoli agricoli europei sono diventati una fonte netta di emissioni di CO₂ [45], poiché la sostanza organica, fondamentale per la fertilità, la struttura e la capacità di trattenere

l'acqua, è in costante calo [46]. La conversione di pascoli e foreste in terreni coltivati e pratiche agricole intensive (come l'aratura profonda) accelerano l'ossidazione del carbonio, impoverendo il suolo e contribuendo al cambiamento climatico [46–48]. Inoltre, l'industrializzazione e le pratiche agricole moderne hanno lasciato un segno profondo. Si stima infatti che in Europa esistano circa 2.8 milioni di siti potenzialmente contaminati [49, 50] principalmente da: metalli pesanti; pesticidi e inquinanti emergenti come microplastiche o residui farmaceutici.

- calamità come incendi, tempeste e venti forti: si stima che solo nel 2022, circa 900.000 ettari sono stati bruciati, il 43% in aree Natura 2000, con perdita di sostanza organica e aumento del rischio erosivo [51].

Le conseguenze di questi fenomeni sono allarmanti: circa il 24% dei suoli europei è soggetta ad erosione moderata o grave, con la perdita ogni anno di 1 miliardo di tonnellate di suolo, soprattutto in aree agricole [52], e la presenza di squilibri nutrizionali significativi nel 74% delle terre [53].

Il valore economico della preservazione del suolo è evidente: il degrado attuale costa all'UE circa 50 miliardi di euro all'anno ed è stato stimato che il 60% dei suoli europei siano in cattive condizioni, con contaminazione da pesticidi presente nell'80% dei campioni analizzati [54].

1.4.2 Soil improver da biowaste: tipologie e applicazioni

I *soil-improver* rappresentano uno degli esempi più significativi di applicazione della bioeconomia applicata al settore dei *biowaste* e giocano un ruolo fondamentale nell'agricoltura sostenibile e nel ripristino del territorio. Si tratta di sostanze organiche applicate periodicamente al suolo con l'obiettivo primario di migliorarne le caratteristiche fisiche, chimiche o biologiche, aumentando così la fertilità, la ritenzione idrica, l'aerazione e l'attività microbica permettendo di conseguenza la generazione di piante più sane (Deliverable 5.2).

Tra le alternative *bio-based* più diffuse e utilizzate rientrano: il compost e il digestato. Attualmente stanno però emergendo anche altri tipi di ammendanti organici come il *biochar* e il vermicompost.

- **Compost:** è un ammendante del suolo naturale e ricco di sostanze nutritive creato attraverso un processo di decomposizione biologica aerobica controllata dei rifiuti organici. Si forma quando materiali come scarti di cibo, ritagli da giardino, residui di colture o letame vengono decomposti

da microrganismi (per lo più batteri e funghi) in presenza di ossigeno [41]. Inoltre, il compost non solo supporta l'incremento di una comunità microbica diversificata e attiva che contribuisce alla fertilità del suolo e alla resistenza alle malattie [55] ma è stato stimato avere anche un potenziale di sequestro di carbonio, con una stima di circa 160 kg all'anno [56]. Nonostante i numerosi vantaggi, permane l'emissione di prodotti impattanti, come l'ammoniaca prodotta durante la fase termofila e che rappresenta circa il 50% dell'azoto totale presente inizialmente nel processo, contribuendo anche alle emissioni di odori che dovrebbero essere attentamente controllati durante queste procedure [57]. Ad oggi, il compostaggio rimane comunque il metodo più utilizzato per trattare i rifiuti organici raccolti separatamente, con circa 3.800 impianti di compostaggio in tutta Europa [14].

- **Digestato:** sottoprodotto della digestione anaerobica di sostanze organiche (rifiuti alimentari, residui agricoli, fanghi di depuro o letame di bestiame) caratterizzato da una composizione ricca di sostanze nutritive che bilancia macro e micronutrienti essenziali per la crescita delle piante [58]. Il processo si traduce in due uscite principali: (i) biogas, una fonte di energia rinnovabile composta principalmente da metano, anidride carbonica e digestato, e un (ii) sottoprodotto residuo ricco di sostanze nutritive [59]. Il contenuto di nutrienti del digestato varia a seconda della materia prima utilizzata, ma in genere contiene quantità significative di azoto, fosforo, potassio e materia organica. Rispetto al compost ha un maggiore contenuto di azoto in forma minerale, di conseguenza i nutrienti sono più immediatamente accessibili alle piante, ma ha un contenuto di umidità più elevato rispetto al compost e di solito richiede la separazione solido-liquido per ridurre questo parametro [59, 60].
- **Biochar:** materiale stabile e ricco di carbonio ottenuto dalla biomassa (residui di colture, trucioli di legno, letame) utilizzando la combustione termica in condizioni di carenza di ossigeno attraverso pirolisi [61], ma nel quale rientrano anche altri processi che includono la carbonizzazione idrotermale, la gassificazione, la carbonizzazione flash e la torrefazione [62]. La struttura del *biochar* è altamente porosa, con una grande superficie caratterizzata da gruppi funzionali essenziali che gli conferiscono notevoli proprietà fisiche e chimiche che avvantaggiano la salute del suolo. Quando incorporato nel terreno, il *biochar* migliora la ritenzione di acqua e nutrienti soprattutto nei terreni sabbiosi o degradati e i suoi pori forniscono anche un habitat per microrganismi benefici del suolo, sostenendo una rete alimentare del suolo diversificata e attiva [61–64]. A

differenza del compost o del digestato, il carbonio nel *biochar* resiste al decadimento microbico, permettendogli di persistere nel suolo per secoli e ciò rende il *biochar* uno strumento efficace per il sequestro del carbonio, contribuendo alla mitigazione dei cambiamenti climatici soprattutto se prodotto dalla biomassa di scarto. È stato stimato che ogni anno il *biochar* potrebbe catturare efficacemente da 1 a 35 gigatonnellate (GtCO₂) di CO₂ e da 78 a 477 GtCO₂ in questo secolo [65].

Nonostante i suoi vantaggi, la produzione di *biochar* dipende dal design del reattore e dal contenuto di umidità delle materie prime e può mostrare un bilancio energetico sfavorevole [66].

- **Vermicompost:** fertilizzante organico finemente strutturato e ricco di sostanze nutritive prodotto attraverso la lavorazione biologica non termofila dei rifiuti organici da lombrichi e microbi associati [67]. In questo processo, noto come *vermicomposting*, specie come *Eisenia fetida* (*wigglers* rossi) o *Lumbricus rubellus* consumano materia organica in decomposizione come scarti di cibo, letame e residui vegetali [68]. Mentre il materiale passa attraverso il tratto digestivo dei vermi, viene digerito e arricchito con muco, enzimi e microbi benefici, risultando in una sostanza scura e friabile nota come fusioni di vermi o *vermicast* [69]. Ciò che lo distingue dal compost tradizionale è sia la sua complessità biologica che la disponibilità di nutrienti. È particolarmente alto in azoto, fosforo, potassio e micronutrienti disponibili per le piante, oltre a contenere una vasta gamma di microrganismi benefici che supportano la salute del suolo e sopprimono gli agenti patogeni dannosi [69] ed è in grado di proteggere le piante dallo stress ossidativo supportando il sistema di difesa antiossidante delle piante [67].

La qualità di questi prodotti dipende dalla composizione dei rifiuti organici da cui derivano. Un corretto equilibrio di carbonio e azoto si traduce in un prodotto stabile e ricco di sostanze nutritive, mentre contaminanti come metalli pesanti e plastica possono degradarne la qualità [70].

L'impiego di *soil improver* consente di massimizzare il valore ambientale ed economico dei rifiuti organici permettendo una riduzione della quantità di rifiuti conferiti in discarica con conseguente riduzione dell'impatto ambientale complessivo, riducendo del 78% le emissioni di gas serra [71] e contenendo i costi legati all'uso di ammendanti classici. Uno studio europeo pubblicato su MDPI - Agriculture [72] analizza il vantaggio economico che potrebbe generare il digestato come sostituto dei fertilizzanti sintetici. Dallo studio è emerso che, su una quantità di digestato di 3000 tonnellate, il valore medio di

sostituzione si aggira intorno agli 11,88€ per tonnellata, suggerendo un risparmio significativo. Nonostante i numerosi aspetti positivi, la diffusione di questi prodotti incontra ancora alcune barriere, tra cui i costi di applicazione e di distribuzione, la disponibilità non uniforme sul territorio europeo e la variabilità qualitativa tipica dei materiali *bio-based*, che richiede controlli regolari per garantire sicurezza e affidabilità. Attualmente, il loro utilizzo risulta prevalentemente consolidato in Italia, Francia, Germania, Polonia, Paesi Bassi e Belgio [72, 73].

Per essere immessi sul mercato europeo, i *soil-improver* devono rispettare i requisiti stabiliti dal Regolamento (UE) 2019/1009 sui prodotti fertilizzanti, che ne definisce i parametri di sicurezza, qualità e composizione. Ulteriori standard di eccellenza, come i criteri dell'Ecolabel UE, stabiliscono limiti specifici per contaminanti e contenuti nutritivi, con l'obiettivo di garantire un impatto ambientale ridotto lungo l'intero ciclo di vita.

Numerosi studi e applicazioni dimostrano come compost e digestato in agricoltura possano contribuire a migliorare la fertilità e la struttura del suolo, incrementando il contenuto di carbonio organico e riducendo la dipendenza da fertilizzanti chimici di sintesi.

In questo senso, i *soil improver* derivati da *biowaste* non solo offrono una soluzione concreta al problema della gestione dei rifiuti organici, ma costituiscono anche uno strumento strategico per contrastare il degrado del suolo e rafforzarne la resilienza ecologica.

1.5 Il progetto Bin2Bean

In questo contesto nasce il progetto Bin2Bean (*Boosting the market deployment of safe, effective and sustainable innovation for soil improvement from bio-waste towards regenerative soil systems*), coordinato da Consorzio Italbiotec (ITB). Il progetto, della durata di 36 mesi (settembre 2023 - agosto 2026), rientra nelle *Innovation Actions* finanziate dal programma *Horizon Europe*, nell'ambito della missione "*A soil deal for Europe*".



Figura 1: Rappresentazione schematica del contesto in cui opera il progetto Bin2Bean. La figura mette in risalto, da un lato, il progressivo degrado a cui è sottoposto il suolo europeo e, dall'altro, l'ingente produzione di rifiuti organici urbani che attualmente vengono valorizzati solo in piccola parte. In questo scenario, i rifiuti possono essere convertiti in ammendanti per il suolo attraverso diverse soluzioni già esistenti lungo tutta la catena del valore come: sistemi di raccolta e trasporto, compostaggio, produzione di biochar e digestione anaerobica con l'obiettivo di contribuire al miglioramento della salute del suolo e al sostegno verso modelli di economia circolare (la figura è stata adattata dal concept note del progetto Bin2Bean).

Il progetto Bin2Bean mira a supportare le città europee nella transizione verso sistemi del suolo rigenerativi, promuovendo il riciclo dei rifiuti organici e il loro utilizzo nella produzione di ammendanti sicuri, efficaci e sostenibili, tramite catene del valore innovative e sostenibili sia economicamente che socialmente. Gli obiettivi affrontano le principali sfide del settore: il degrado dei suoli europei e la gestione inefficiente dei rifiuti organici. La conversione dei biowaste in ammendanti lungo la catena del valore rappresenta un'opportunità strategica per sistemi del suolo rigenerativi ed economie urbane più circolari. Dal punto di vista metodologico, il progetto adotta un approccio multi-attoriale e replicabile, sperimentato in tre Living Labs urbani, dove amministrazioni, enti di ricerca, imprese e cittadini collaborano per co-progettare e testare soluzioni innovative:

1. Egaleo (Grecia) - Coordinato dal comune di Egaleo (DIMOS EGALIO), rappresenta un contesto in fase di transizione nella gestione dei rifiuti organici. Sebbene siano stati introdotti sistemi di raccolta differenziata e compostaggio domestico, permane un quadro normativo poco solido e consolidato, con significativi *gap* di conoscenze tecniche nel settore;
2. Amburgo (Germania) - Gestito da *Stadtreinigung Hamburg* (SRH), si concentra sull'ottimizzazione di un sistema già consolidato di trattamento del biowaste con sistemi di compostaggio e produzione del biogas, attivo dal 1994. In questo caso le sfide riguardano principalmente l'aumento della quantità di rifiuti organici intercettati e sottratti alle discariche, oltre che la riduzione delle contaminanti, in particolare le plastiche erroneamente conferite come biodegradabili.
3. Amsterdam (Paesi Bassi) - Coordinato dall'*AMS Institute* che si focalizza su sistemi di raccolta innovativi. La sfida principale è quella di una scarsa raccolta differenziata (20-

30%), affrontata tramite la sperimentazione di un sistema di trituratori (*grinder*) integrato direttamente negli edifici per incrementare la raccolta dei rifiuti alimentari. Le difficoltà principali riguardano i costi di gestione elevati e la sostenibilità economica del modello operativo.

Questi “laboratori viventi” costituiscono elementi centrali del progetto, poiché consentono di mappare i flussi locali di materiali, risorse, ed economie del territorio, per creare soluzioni concrete e replicabili.

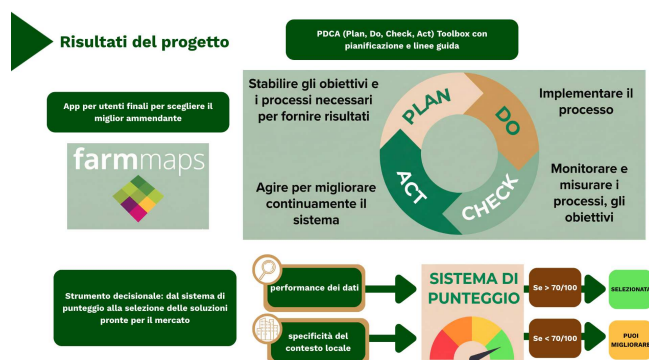


Figura 1: Schema dei principali risultati del progetto Bin2Bean e dell'approccio metodologico adottato. Il progetto si basa su un ciclo di miglioramento continuo Plan–Do–Check–Act (PDCA) che guida la pianificazione, l'implementazione, il monitoraggio e l'ottimizzazione delle soluzioni per la valorizzazione dei biorifiuti in ammendanti del suolo. I risultati includono lo sviluppo di strumenti decisionali a supporto degli utenti finali, quali un'applicazione digitale per la selezione dell'ammendante più idoneo e un sistema di punteggio basato sulle prestazioni ambientali, di sicurezza e socioeconomiche delle soluzioni, integrato con le specificità del contesto locale, al fine di identificare le opzioni più mature e pronte per il mercato o i margini di miglioramento necessari (la figura è stata adattata dal concept note del progetto Bin2Bean).

L'intero processo operativo si basa sul Ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) (figura 2), un modello di miglioramento continuo articolato in quattro fasi:

- **Plan (pianificare):** Mappatura dei contesti locali, dei flussi di rifiuti e delle esigenze degli *stakeholder*.
- **Do (agire):** Sviluppo di un quadro di valutazione per la sicurezza e le prestazioni ambientali degli ammendanti.
- **Check (verificare):** Test sul campo, valutazione dell'accettazione da parte degli utenti e sviluppo di un **sistema di punteggio (*scoring system*)** per selezionare le soluzioni più promettenti.
- **Act (agire):** Sviluppo di modelli di business locali e creazione di linee guida e roadmap politiche per l'adozione su larga scala.

Il progetto, in collaborazione con i suoi partner, concorre per il raggiungimento dell'obiettivo UE di riciclare il 65% del *biowaste*, configurandosi come un catalizzatore per l'innovazione, dimostrando come

la collaborazione tra scienza, politica e attori locali sia fondamentale per affrontare le sfide ambientali che il mondo ci pone.

ITB svolge un ruolo centrale all'interno del progetto Bin2Bean, con un ruolo di coordinamento e partner tecnico, responsabile di attività chiave relative alla definizione delle strategie di mercato e alla valutazione socioeconomica.

1.5.1 Consorzio Italbiotec

Consorzio Italbiotec è un ente privato fondato il 23 febbraio 1998 dall'Università degli Studi di Bologna, dall'Università degli Studi di Palermo e da Biosearch Italia ed è la prima società biotecnologica italiana quotata in borsa. Oggi, Italbiotec rappresenta la principale organizzazione no profit italiana nel settore delle biotecnologie industriali, promuovendo la cooperazione tra 25 università e istituti di ricerca italiani, 15 fondazioni e associazioni e 173 aziende e start-up che hanno collaborato in più di 150 progetti finanziati.

L'obiettivo del Consorzio Italbiotec è creare un ecosistema di innovazione all'avanguardia, dove la cooperazione e lo scambio di conoscenze tra start-up biotecnologiche, aziende e università garantiscono crescita e innovazione sostenibile.

Nel 2021, a fianco di Consorzio Italbiotec, nasce anche Italbiotec srl, una società “*for profit*” e Benefit dal 2022, che realizza utili in maniera sostenibile, sia da un punto di vista ambientale che sociale.

I servizi offerti riguardano principalmente tre aree di business:

- Europrogettazione: Italbiotec supporta start-up, aziende e università nella valutazione, progettazione e sviluppo di progetti di ricerca e innovazione, individuando le migliori opportunità di finanziamento in base alle esigenze del partner, con l'obiettivo finale di trasformare idee all'avanguardia in innovazione sostenibile.
- *Innovation Management*: Italbiotec analizza il posizionamento strategico di un nuovo prodotto sul mercato, valutando il mercato reale e potenziale, i clienti e la percezione del marchio.
- Formazione e comunicazione: Italbiotec ha una comprovata esperienza in attività di comunicazione e diffusione di risultati scientifici, attraverso lo sviluppo di piani specifici per diversi target e la progettazione di strumenti ed eventi. Italbiotec inoltre organizza programmi e corsi di formazione a complemento della tradizionale formazione universitaria.

In qualità di coordinatore, ITB si occupa della corretta gestione amministrativa, scientifica e tecnica del progetto.

Dal punto di vista tecnico, Italtotec gioca un ruolo fondamentale nel tradurre i risultati tecnici e scientifici in applicazioni economicamente sostenibili, guidando il Work Package 5 “*Development of local business models and go-to-market strategies for solutions selected through the scoring system*”, finalizzato allo sviluppo di modelli di business sostenibili e replicabili basati sui diversi contesti sociali e ambientali dei *Living Labs*. L’approccio non si limita ad una semplice analisi di mercato, bensì porta avanti un processo strutturato che prevede specifici step:

1. Sviluppo di *Sustainable Business Model Canvas*, ossia una metodologia e un modello (canvas) innovativi che permetta di includere elementi di sostenibilità ambientale e sociale all’interno del modello di business, andando oltre le sole considerazioni di carattere economico.
2. Applicazione del modello sviluppato a casi studio concreti, ossia alle soluzioni più rilevanti implementate all’interno di ciascun LLs.
3. I modelli di business individuati vengono testati e validati per garantire la loro efficacia e accettabilità, tramite interviste con gli utenti finali (es. dipartimenti finanziari di alcune città europee) per testare l’adozione a livello urbano e con gli investitori per capire la fattibilità economica e il potenziale di *scale-up* nel modello.
4. I modelli di business più promettenti vengono poi sviluppati ulteriormente in *business plan*, con l’obiettivo di implementare 1 *business plan* per Living Lab entro la fine del progetto.

Per concludere, ITB fornisce strumenti avanzati per l’***entrepreneurship empowerment***, includendo l’analisi dei bisogni formativi, la sintesi delle pratiche di successo e l’organizzazione di webinar di *peer-learning* e workshop industriali.

1.6 *Business model*

Il concetto di *business model* ha un ruolo centrale nella definizione delle strategie aziendali e nella capacità di adattamento ai mutamenti di mercato; infatti, non va inteso come un semplice piano finanziario o una strategia di profitto, ma come la logica complessiva che descrive come un’organizzazione crea, distribuisce e cattura valore all’interno del proprio ecosistema [74, 75]. Rappresenta dunque la traduzione operativa di una visione strategica, il ponte tra l’idea imprenditoriale e la sua concretizzazione in un

sistema sostenibile e competitivo, ponendo gli imprenditori davanti a domande essenziali: chi sono i clienti che usufruiranno del prodotto? Quale valore unico viene offerto? Attraverso quali canali è possibile interagire con i clienti? Come si può monetizzare questo valore? [74].

Un modello di *business* che funziona deve infatti essere in grado di rispondere alle nuove tecnologie, ai cambiamenti nei bisogni dei clienti e alle pressioni del mercato [6, 75]. Proprio per questo motivo, un modello di *business* efficace deve presentare quattro caratteristiche fondamentali: **chiarezza**, per consentire una comprensione condivisa della logica aziendale; **replicabilità e scalabilità** per permetterne la crescita senza un aumento proporzionale dei costi; e **adattabilità**, per seguire la dinamicità del mercato. Queste caratteristiche consentono di prevenire la dispersione di risorse e di garantire una verifica preliminare della sostenibilità economica di un progetto prima della fase di investimento.

Il modello di *business* rappresenta però non solo uno strumento di analisi oggettiva, ma anche una “rappresentazione soggettiva” di come un’organizzazione si interfaccia con il proprio ambiente competitivo [76]. Infatti, due imprese operanti nello stesso settore, con prodotti apparentemente simili, possono avere modelli di *business* radicalmente diversi perché i loro leader percepiscono il mercato, i clienti e le leve del valore in modi distinti. Per questo motivo è possibile affermare che l’innovazione del modello di *business* non è solo un processo tecnico, ma un profondo cambiamento di mentalità, cultura organizzativa e filosofia strategica, capace di ridefinire la missione stessa dell’impresa [76].

È quindi chiaro come un’analisi precisa del proprio modello di *business* aiuta a identificare e mitigare i rischi più comuni che portano al fallimento delle nuove iniziative imprenditoriali. Un modello di *business* ben costruito non si limita a descrivere come un’azienda opera, ma dimostra come un’azienda crea e fornisce valore ai propri clienti, offrendo un quadro logico e verificabile della sostenibilità del proprio vantaggio competitivo.

Le aziende devono essere più incentrate sul cliente e rivalutare secondo questa linea le proprie proposte di valore, strutturando architetture coerenti di ricavi, costi e profitti [77].

1.6.1 Business Model Canvas (BMC)

Tra i principali strumenti di analisi e progettazione strategica, il **Business Model Canvas (BMC)** rappresenta oggi una delle metodologie più diffuse e versatili per analizzare, progettare, scomporre e rinnovare

la struttura di un modello di business. Elaborato da Alexander Osterwalder, la sua principale forza è la versatilità e capacità di rappresentare visivamente la logica del valore all'interno di un'organizzazione e le interconnessioni tra i diversi componenti del modello di business, evidenziando come ciascun elemento influenzi e venga a sua volta influenzato dagli altri. Questo approccio integrato facilita la comprensione delle dinamiche aziendali interne promuovendo una partecipazione attiva e interdisciplinare, coinvolgendo i diversi *stakeholder* nel processo decisionale.

Il BMC identifica nove "blocchi" fondamentali, che coprono le quattro macroaree essenziali di un'organizzazione, ovvero i *clienti*, l'*offerta*, la *struttura* e la *sostenibilità finanziaria* [74]. I nove blocchi costitutivi sono: segmenti di clientela, proposta di valore, canali, relazioni con i clienti, flussi di ricavi, risorse chiave, attività chiave, partner chiave e struttura dei costi.

Il *Business Model Canvas* è uno strumento strategico utilizzato per rappresentare e analizzare i principali elementi di un modello di business [78]. Il miglior approccio di sviluppo di un BMC è quello collaborativo, che riunisce un *team* multidisciplinare per raccogliere prospettive diverse e creare così un modello più robusto e realistico. Infine, potrebbe potenzialmente essere adattato per progettare modelli di *business* più sostenibili integrando tre dimensioni essenziali: economica, sociale e ambientale [79].

Per tutti questi motivi, ad oggi, il BMC si è affermato come un modello fondamentale a livello globale per qualsiasi tipo di organizzazione [74].

1.6.2 Sustainable Business Model Canvas (SBMC)

Durante gli ultimi vent'anni, i modelli di business sono diventati sempre più popolari all'interno di organizzazioni e aziende ma, ad oggi, la crescente consapevolezza delle sfide ambientali e sociali ha spinto verso una revisione profonda del concetto di modello di *business* classico, lasciando spazio ad una visione sempre più rivolta alla sostenibilità.

Infatti, per decenni il successo di un'azienda è stato quantificato prevalentemente in termini di profitto finanziario, che rappresentava la così detta *Bottom line*, paradigma sempre più inadeguato per affrontare le sfide del XXI secolo, come il cambiamento climatico, l'esaurimento delle risorse e le crescenti disuguaglianze sociali, richiedendo una prospettiva più ampia e integrata [80].

La nuova frontiera della strategia aziendale è rappresentata dal *Sustainable Business Model*, un'estensione del BMC, che mira ad affiancare ai classici indicatori economici, anche aspetti sociali, culturali, ambientali etc [81]. In questo senso la sostenibilità non viene considerata come un limite, bensì il punto di partenza per l'innovazione e la creazione di valore a lungo termine [82, 83].

Il termine che esplicita al meglio questo cambio di paradigma è la *Triple Bottom Line (TBL)*, termine coniato nel 1994 dal consulente e pioniere della sostenibilità John Elkington che basa la valutazione delle performance di un'azienda su tre pilastri interconnessi: *People* (impatto sociale), *Planet* (impatto ambientale) e *Profit* (impatto economico/prosperità). Un modello di *business* sostenibile è un processo che segue fasi specifiche [84]:

1. Progettazione di un valore sostenibile che incorpori benefici economici, sociali e ambientali concettualizzati come forme di valore.
2. Creazione di un sistema di flussi di valore sostenibili tra più parti interessate in cui l'ambiente naturale e la società diventano gli *stakeholder* primari.
3. Generazione di una rete di valori con un nuovo scopo, *design* e *governance*.
4. Considerazione sistematica degli interessi e delle responsabilità delle parti interessate per la creazione di valore reciproco.
5. Internalizzazione delle esternalità attraverso il *Product Service System* consente anche l'innovazione verso modelli di business sostenibili.

L'integrazione della *Triple Bottom Line* dev'essere intesa come un modello strategico per rivelare nuove e interessanti opportunità di business. Infatti, a differenza della visione tradizionale che percepisce le normative ambientali e sociali come vincoli e costi da minimizzare, questa nuova prospettiva ribalta completamente questa idea, trasformando quello che generalmente è concepito come un rifiuto in una risorsa, ovvero una materia prima a basso costo che rientra perfettamente nel modello circolare.

Possiamo dunque affermare che le aziende che oggi ignorano la sostenibilità non stanno solo affrontando crescenti rischi reputazionali e normativi ma stanno attivamente trascurando una delle più grandi fonti di innovazione di processo, di prodotto e di modello di *business* del nostro tempo [82, 83].

2 Scopo del lavoro

Alla luce delle premesse analizzate nei capitoli precedenti, il presente elaborato si inserisce nell'ambito delle attività condotte dal Consorzio Italbiotec per il **progetto europeo Bin2Bean** – *Boosting the market deployment of safe, effective and sustainable innovations for soil improvement from bio-waste* con lo scopo di analizzare le potenzialità del mercato della rivalorizzazione dei rifiuti organici, attraverso l'identificazione e l'analisi di casi studio di successo, e di selezionare e valutare gli indicatori sociali e ambientali utili per la progettazione e l'implementazione di modelli di business sostenibili e circolari.

2.1 Analisi di casi studio e identificazione di *best practice*

Questa prima parte dell'elaborato intende raccogliere e analizzare esempi concreti di rivalorizzazione dei rifiuti organici, a livello internazionale, europeo e locale, con l'obiettivo di evidenziare le *best practice* maggiormente efficaci e replicabili. L'analisi si concentra sull'individuare gli elementi chiave di successo, i modelli organizzativi e tecnologici applicati e le strategie di rivalorizzazione adottate, che ne hanno favorito l'attuazione. I risultati intendono delineare un quadro più ampio della valorizzazione del *biowaste*: lo stato dell'arte, i *trend* emergenti, le normative e politiche coinvolte, e i principali *driver* e/o barriere allo sviluppo del settore, con lo scopo finale di supportare l'implementazione dei *business model* nel progetto Bin2Bean, offrendo eventuali processi di replicabilità e scalabilità a livello europeo.

2.2 Selezione di indicatori sociali e ambientali

Il secondo obiettivo del lavoro riguarda l'identificazione, la selezione e la valutazione di indicatori sociali e ambientali già applicati e impiegati in modelli di business sostenibili a livello europeo e internazionale.

Attraverso questo processo si mira a proporre un set di indicatori socio-ambientali a supporto della sostenibilità dei modelli di *business* sviluppati da Bin2Bean, con l'obiettivo di analizzare non solo la fattibilità economica prevista nei classici modelli di *business*, ma valutare anche le *performance* ambientali e sociali, parte integrante degli obiettivi progettuali.

Gli indicatori selezionati potranno fungere da linee guida operative per la progettazione e il monitoraggio dei modelli di *business* sostenibili che saranno sviluppati nel contesto del progetto, contribuendo a

orientare le decisioni strategiche di *policy* e di investimento nell'ambito delle *value chain* per la valorizzazione dei rifiuti organici in *soil improver*.

3 Materiali e metodi

3.1 Fonti di informazione e criteri di selezione

Questo studio si basa su un'analisi metodologica integrata, strutturata per fornire una visione completa, multidimensionale, e validata del settore europeo della rivalorizzazione dei rifiuti organici urbani e della produzione di *soil improver*. La complessità del tema, che coinvolge dimensioni tecnologiche, normative, economiche e sociali, richiede infatti un metodo capace di mettere in relazione prospettive eterogenee, superando l'analisi settoriale e restituendo un quadro sistemico e interconnesso. L'analisi non si limita dunque a una semplice raccolta di informazioni, ma si configura come un processo interpretativo e comparativo volto a restituire un quadro coerente e aggiornato del contesto nel quale si inserisce il progetto europeo Bin2Bean.

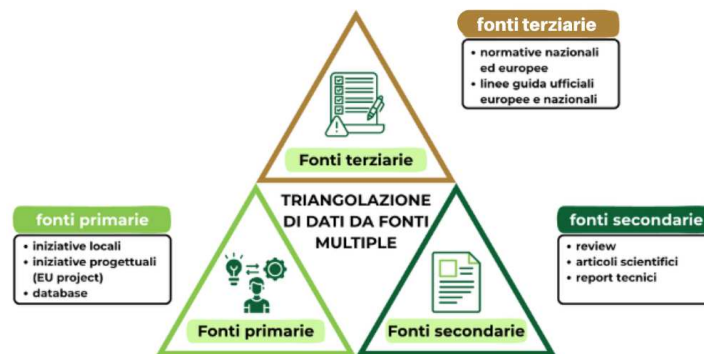


Figura 3: Rappresentazione della metodologia della triangolazione dei dati utilizzata per l'analisi del contesto. L'approccio combina fonti primarie (iniziative locali e progettuali e database); fonti secondarie (review, articoli scientifici e report tecnici) e fonti terziarie (normative nazionali ed europee e linee guida ufficiali europee e nazionali).

L'indagine ha preso in considerazione i principali fattori che influenzano lo sviluppo e le potenzialità del settore, con particolare attenzione al quadro normativo a livello europeo e nazionale, e allo stato della ricerca scientifica, delle tecnologie emergenti e dei modelli di *business* ad oggi consolidati.

Per permettere la valutazione di tutti i fattori sopra indicati e garantire la robustezza dei risultati, lo studio è basato sulla **triangolazione dei dati (Figura 3)**, una strategia di ricerca che consiste nell'incrociare informazioni provenienti da fonti eterogenee, al fine di rafforzare la validità della ricerca, riducendo il rischio di distorsioni derivanti dall'utilizzo di un'unica prospettiva o categoria di dati. In questo lavoro,

tale approccio si è concretizzato attraverso l'utilizzo coordinato di fonti primarie, secondarie e terziarie, ognuna delle quali contribuisce a definire un tassello complementare dell'analisi complessiva.

L'integrazione di questi tre livelli informativi permette di validare i risultati attraverso un confronto incrociato, rafforzando la qualità scientifica dello studio e garantendo una visione d'insieme più completa.

Infatti, come precedentemente dimostrato, la rivalorizzazione del *biowaste* rappresenta un tema intrinsecamente interdisciplinare, che non può essere compreso attraverso un'unica lente di analisi. Essa implica la valutazione congiunta di processi tecnologici, dinamiche economiche (legate alla creazione di filiere circolari e nuovi modelli di *business*), aspetti politico-normativi (regolamentazioni europee e nazionali) e dimensioni sociali (accettabilità pubblica, consapevolezza ambientale e azione dei cittadini). La triangolazione, incrociando queste diverse dimensioni, consente di superare la frammentarietà delle singole analisi e di costruire un quadro sistemico coerente.

Tale metodo si allinea alla filosofia multi-attore e *value-based* promossa dal progetto europeo Bin2Bean, che si propone di integrare competenze scientifiche, normative, economiche e sociali, considerando tutta la catena del valore, per la co-creazione e sviluppo di modelli di *business* circolari, sostenibili e replicabili nel settore della bioeconomia circolare.

Per garantire una **raccolta e un'analisi sistematica dei dati**, sono stati elaborati due *database* in formato Excel, strutturati in modo da consentire l'organizzazione e la comparazione delle informazioni in maniera chiara e coerente con gli obiettivi della ricerca:

1. il primo database è stato utilizzato per identificare ed esaminare i *case study* nel campo della valorizzazione del *biowaste*. A tale scopo, è stata realizzata una tabella contenente diversi parametri descrittivi: titolo del caso di studio, fonte, tipologia di fonte, elementi di successo, elementi di miglioramento e principali limiti.
2. il secondo database è stato sviluppato per l'identificazione e la classificazione degli indicatori sociali e ambientali rilevanti ai fini dello sviluppo di *business case* sostenibili nel progetto. In questo caso, le variabili considerate includono: nome dell'indicatore, tipo di indicatore (sociale o ambientale), fonte, tipologia di fonte, unità di misura, vantaggi generali, vantaggi per Bin2Bean.

3.1.1 Fonti primarie: iniziative progettuali e locali

Le fonti primarie rappresentano la base dell'analisi svolta, poiché permettono di osservare la traduzione concreta dei principi dell'economia circolare e della bioeconomia nel contesto reale, attraverso l'esame di progetti e iniziative a livello europeo, nazionale e locale. Esse costituiscono il primo livello della triangolazione metodologica adottata e forniscono elementi essenziali per comprendere **come i concetti di valorizzazione del *biowaste* e di produzione di *soil improver* siano stati applicati operativamente**, con quali risultati e attraverso quali strategie di gestione, *partnership* e modelli economici.

Le fonti primarie includono informazioni e dati derivanti da progetti europei, iniziative locali e consorzi o amministrazioni pubbliche coinvolte nella gestione e valorizzazione del *biowaste* e nella produzione di *soil improver*. Questo tipo di fonti, spesso raccolte sotto forma di *deliverable*, report, piani d'azione o documenti strategici, consente di cogliere le dinamiche concrete di implementazione, le criticità incontrate, i risultati raggiunti e il potenziale di replicabilità delle soluzioni sperimentate.

Il primo livello di analisi ha considerato i **progetti finanziati dall'Unione Europea** nell'ambito del programma *Horizon 2020*, valido dal 2014 al 2020 con un budget di quasi 80 miliardi di euro, e *Horizon Europe*, valido dal 2021 al 2027 con un budget di circa 95,5 miliardi di euro. I progetti analizzati sono principalmente iniziative che condividono obiettivi analoghi a Bin2Bean, come il miglioramento della qualità del suolo e la promozione di modelli di economia circolare urbana. Ne sono un esempio progetti di rilievo come **Tech4Biowaste** (*A dynamic database of relevant technologies of bio-waste utilisation*) [85], **HOOP** (*Hub Of Circular Cities Boosting Platform To Foster Investments For The Valorisation Of Urban Biowaste And Wastewater*) [86] e **SCALIBUR** (*Scalable Technologies For Bio-Urban Waste Recovery*) [87], che hanno fornito casi di studio e metriche utili alla valutazione comparativa delle diverse strategie di valorizzazione dei rifiuti organici urbani.

È stata effettuata un'analisi degli *output* principali grazie alla consultazione di diverse piattaforme:

1. **CORDIS** (*European Commission – Project Databases, EEA*): piattaforma ufficiale della Commissione europea in merito ai risultati dei progetti finanziati dai programmi quadro dell'UE per la ricerca e innovazione;
2. **Open Research Europe**: della piattaforma di pubblicazione *open access* della Commissione Europea destinata ai progetti finanziati, per l'analisi dei report tecnici e articoli scientifici e

deliverable direttamente collegati alle politiche e ai progetti europei sull'economia circolare e sulla gestione del biorifiuto;

3. Siti ufficiali dei progetti: sono state estratte informazioni sulle tecnologie adottate, le strategie di *business*, le forme di cooperazione tra enti pubblici e privati e gli indicatori di impatto ambientale e sociale utilizzati nei modelli di *business* finalizzati nei diversi progetti.

Un secondo livello di analisi ha riguardato iniziative territoriali sviluppate a scala comunale o regionale, con *focus* su strategie di raccolta e trattamento dei biorifiuti adattate alle caratteristiche locali. Sono stati analizzati approcci differenziati in base alla densità abitativa, modelli orientati alla sostenibilità ambientale ed economica, esperienze di compostaggio comunitario e piani regionali per individuare pratiche virtuose e modelli gestionali efficaci.

Completano le fonti primarie i **database istituzionali europei con un *focus* su quelli italiani**, che rappresentano strumenti fondamentali per la raccolta e la validazione di dati quantitativi. Tra questi, i maggiormente utilizzati sono stati: (i) EUROSTAT; (ii) ISTAT e (iii) ISPRA.

Questi database hanno consentito di quantificare la dimensione economica e ambientale del settore, integrando le informazioni qualitative provenienti da progetti e iniziative locali con evidenze statistiche ufficiali. L'incrocio tra dati empirici e quantitativi ha permesso di valutare la consistenza dei risultati, individuare le principali differenze territoriali e comprendere le tendenze evolutive del mercato europeo dei *soil improver*.

L'approfondimento di questi dati ha permesso di traslare lo studio in un contesto reale, fornendo la base metodologica per l'identificazione di casi di successo e indicatori di sostenibilità sociale e ambientale, in linea con il progetto Bin2Bean.

3.1.2 Fonti secondarie: letteratura scientifica e rapporti tecnici

Le **fonti secondarie** hanno rappresentato la base bibliografica di questo lavoro, fornendo gli elementi necessari per comprendere l'evoluzione scientifica, tecnologica e socioeconomica del settore della valorizzazione del *biowaste* e della produzione di *soil improver*. L'analisi di tali fonti è stata fondamentale

per definire il quadro entro cui si colloca lo studio, identificare le principali tendenze di ricerca e valutare in modo critico le opportunità e i limiti associati ai processi di recupero della frazione organica.

Al fine di analizzare i vantaggi e i limiti dei processi per la valorizzazione del *biowaste*, è stata condotta una revisione della letteratura scientifica non sistematica, orientata all'individuazione dei principali *trend* scientifici, tecnologici, di mercato e socioeconomici connessi alla valorizzazione del *biowaste*.

La ricerca bibliografica è stata condotta principalmente attraverso l'uso di **database bibliografici internazionali ad accesso libero**, con un *focus* su quelli più autorevoli e interdisciplinari (PubMed, Scopus, Open Research Europe).

La selezione delle pubblicazioni è stata orientata sulla base di criteri specifici:

- Tipologia di documento: articoli, *review peer-reviewed* e capitoli di libri di testo in lingua inglese;
- Periodo di pubblicazione: ultimi 7 anni (2019-2026), con una particolare attenzione sui contributi degli ultimi 5 anni (2021-2026) per assicurare la pertinenza temporale e l'aggiornamento dei contenuti;
- Tematica: sono stati selezionati soltanto i lavori strettamente connessi agli obiettivi del presente elaborato e del progetto Bin2Bean, tramite l'uso di parole chiave ottenute dalla combinazione di termini specifici legati al settore di riferimento. In particolare, la ricerca è stata perfezionata combinando il termine "*biowaste valorisation*" con i termini "*soil improver*", "*circular economy*" e "*management*".

Sono stati inoltre consultati report e documenti tecnici di enti europei (EEA, JRC, Eurostat, ECN). Questa integrazione ha fornito dati quantitativi indispensabili per descrivere la produzione di rifiuti urbani in Europa, lo stato di degrado dei suoli e l'avanzamento delle politiche di riciclo, permettendo non solo di validare le argomentazioni teoriche emerse dalla letteratura, ma anche di contestualizzare i risultati in un'ottica europea ed evidenziare differenze significative tra Stati membri e aree geografiche.

Nel contesto della triangolazione dei dati, le fonti secondarie assumono un ruolo intermedio e di connessione tra la dimensione empirica delle fonti primarie e la cornice normativa fornita dalle fonti terziarie.

Esse costituiscono il fondamento scientifico della tesi, consentendo di interpretare i dati raccolti nei progetti e nelle iniziative locali alla luce delle evidenze accademiche più recenti.

Attraverso l'analisi critica della letteratura e dei rapporti tecnici, è stato possibile individuare le lacune di conoscenza, i fattori critici di successo e le opportunità di innovazione per la creazione di modelli di *business* sostenibili nel settore della valorizzazione del *biowaste*.

3.1.3 Fonti terziarie: normative e linee guida ufficiali

L'analisi delle fonti terziarie ha preso in considerazione principalmente il **quadro normativo e strategico europeo e nazionale** che regola la gestione dei rifiuti, la tutela e rigenerazione del suolo e la commercializzazione dei prodotti fertilizzanti. L'inclusione di queste fonti si è rivelata cruciale per comprendere il **contesto politico e regolatorio** all'interno del quale si sviluppano le pratiche di valorizzazione del *biowaste* e la produzione di *soil improver*. Le norme e le linee guida europee, infatti, non rappresentano solo strumenti di conformità giuridica, ma agiscono come veri e propri catalizzatori della transizione verso un modello di economia circolare, orientando l'innovazione tecnologica attraverso vincoli, obiettivi e incentivi per tutta la catena di valore.

L'analisi delle fonti terziarie ha collegato i dati primari e secondari al quadro istituzionale e normativo europeo, fornendo coerenza e allineamento delle proposte di business ai principi e agli obiettivi comunitari. Le politiche europee influenzano (i) ricerca, (ii) pratiche industriali, (iii) *governance* e (iii) competitività, definendo obiettivi vincolanti, criteri tecnici e strumenti economici per l'economia circolare. Le fonti principali includono testi ufficiali della **Gazzetta Ufficiale dell'UE** e siti della **Commissione Europea**, selezionati in base a rilevanza lungo la catena del valore, importanza economica e vigore normativo attuale.

3.1.4 Limiti della metodologia

Nonostante l'attenta analisi è importante metterne in evidenza i limiti ai fini dell'interpretazione dei risultati dello studio.

Per prima cosa, la revisione della letteratura è stata condotta attraverso un'analisi mirata delle principali fonti scientifiche e istituzionali. La selezione dei contributi è basata sulla loro pertinenza rispetto agli obiettivi della ricerca e ciò implica che, nonostante siano state presi in considerazione i principali studi e temi rilevanti, non è possibile escludere che alcuni studi specifici non siano stati inclusi nell'analisi.

Secondariamente, la selezione dei casi studio è stata fatta sulla base di una scelta dell'autore supportata da un'analisi esplorativa condotta manualmente sulle fonti e non tramite un campionamento statistico. Di conseguenza, pur offrendo interessanti spunti di riflessione e *best practice*, i dati raccolti non possono essere automaticamente generalizzati in ogni contesto europeo. Questo perché ogni iniziativa di recupero e valorizzazione dei rifiuti organici è inevitabilmente influenzata da fattori locali (normativi, economici e sociali) che ne determinano la riuscita.

Infine, l'analisi si basa soprattutto sulla revisione di fonti documentali (*report*, articoli, siti web, normative) e, sebbene l'approccio di triangolazione miri a incrociare diverse fonti, questo studio non include dati empirici diretti.

4 Risultati

4.1 Casi studio per la valorizzazione del *biowaste*

Un caso di studio è un esempio concreto di applicazione di una soluzione o strategia in un contesto reale. In questo elaborato, i casi studio analizzano diverse modalità di valorizzazione e gestione del *biowaste* nei territori analizzati.

L'analisi dei casi studio considera sia aspetti quantitativi come localizzazione geografica, anno di pubblicazione, tecnologie impiegate e analisi del ciclo di vita dei rifiuti organici, sia dimensioni qualitative legate al contesto. I dati quantitativi da soli non definiscono pienamente le dinamiche sociali, le condizioni abilitanti e le ricadute socio-ambientali ma l'integrazione di queste due prospettive (sociale e ambientale) ha permesso di ottenere una visione più completa della raccolta e del trattamento della frazione organica dei rifiuti e del suo utilizzo nella produzione di ammendanti.

4.1.1 Analisi quantitativa

Lo studio è partito da un'analisi quantitativa delle fonti, basata su tre criteri fondamentali: (i) localizzazione geografica dei casi studio, (ii) evoluzione nel tempo dell'interesse scientifico sull'argomento e (iii) distribuzione tematica delle tecnologie.

L'analisi geografica ha evidenziato come le innovazioni nel campo della gestione e valorizzazione dei rifiuti organici non si concentrano esclusivamente nei paesi europei, tradizionalmente più avanzati nel campo del recupero dei rifiuti solidi urbani, ma coinvolgono anche aree in via di sviluppo, come Sud America e Cina, che rappresentano complessivamente il 18,5% dei casi studio analizzati (Figura 4). Questi paesi, infatti, stanno emergendo per il forte investimento nella ricerca di soluzioni tecnologiche volte ad affrontare la crescente produzione di rifiuti urbani. Nonostante questa evidenza, l'analisi dei casi studio del presente lavoro si focalizza prevalentemente nell'ambito Europeo, in linea con il contesto del progetto Bin2Bean.

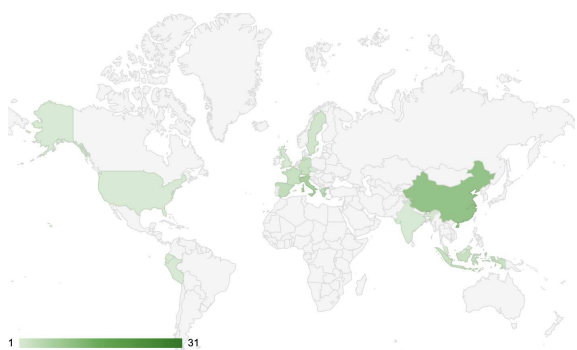


Figura 4: Distribuzione geografica delle fonti analizzate. L'intensità del colore indica il numero di studi o pubblicazioni per ciascun Paese (N min = 1, N max = 31)

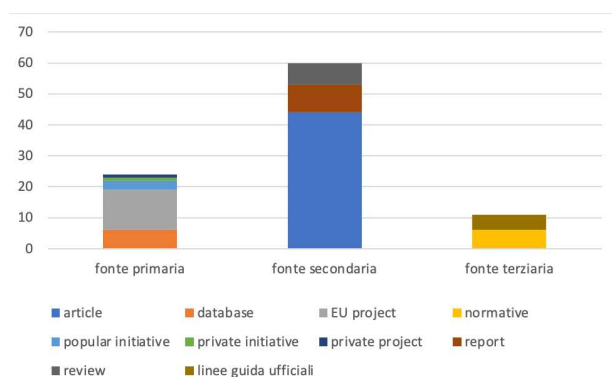


Figura 5: Analisi quantitativa delle fonti bibliografiche. Ripartizione delle referenze per categoria principale (primaria, secondaria, terziaria) e sottotipo di documento. Il grafico evidenzia la prevalenza di articoli come fonti secondarie.

Nello specifico, 31 casi studio (32,6%) riguardano l'Europa, mentre un numero minore di casi si è focalizzato su specifiche aree geografiche, tra cui l'Italia (7), la Spagna (4), la Grecia (4), la Germania (3) e la Francia (3).

Secondo la classificazione fornita in Materiali e Metodi (Sezione 3) e come evidenziato nella Figura 5, i casi studio analizzati derivano per una netta preponderanza da fonti secondarie, rappresentando circa il 63,2% dell'intera analisi (60), per il 25,3% da fonti primarie (24). Tra queste prevalgono i progetti europei (13) e i database (6).

In misura minore sono stati presi in considerazione progetti privati (1) e iniziative private (1) e popolari (3). Le informazioni ricavate dalle fonti secondarie, sono essenzialmente basate su articoli scientifici (44), report (9) e review (7). Le fonti terziarie includono invece in modo uniforme normative (6) e linee guida ufficiali (5).

Dal punto di vista temporale, si osserva (Figura 6) un evidente aumento dei contributi di indirizzo e ricerca in quest'ambito tra il 2020 e il 2022 (30) ed una recente crescita nel 2025 (14).

La distribuzione tematica delle tecnologie analizzate consente di individuare due macrocategorie principali (Figura 7):

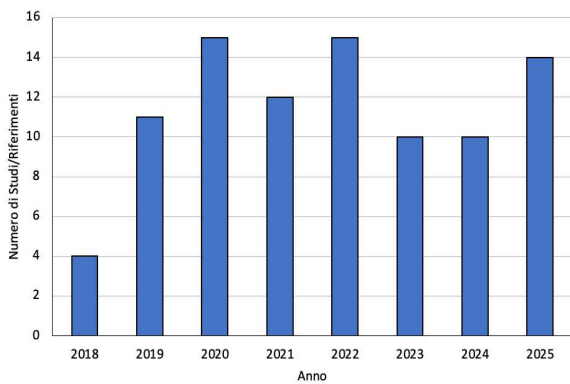


Figura 6: Distribuzione temporale degli studi e dei riferimenti inclusi nella revisione bibliografica

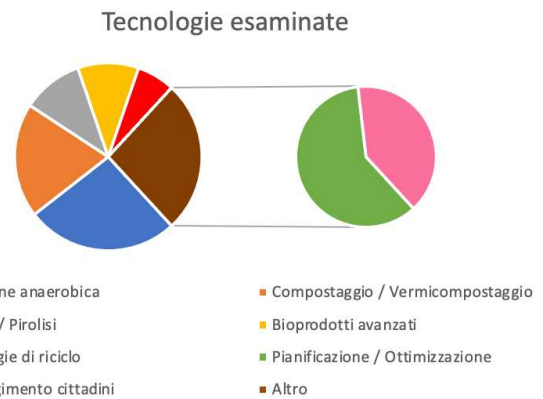


Figura 7: Ripartizione delle tecnologie e metodologie esaminate. Le tecnologie consolidate rappresentano quasi la metà degli studi (46%), con una netta prevalenza per la digestione anaerobica (26,3%) e il compostaggio / vermicompostaggio (19,7%). Altri temi rilevanti includono la pianificazione/ottimizzazione (15,8%) e il coinvolgimento dei cittadini (10,5%)

- **tecnologie consolidate**, che rappresentano quasi la metà degli studi (46%), concentrandosi in particolare sulla digestione anaerobica (26,3%), il compostaggio e il vermicompostaggio (19,7%).
- **tecnologie innovative ed emergenti** (21% considerando la somma tra *biochar*, pirolisi e bioprodotti avanzati), che riguardano principalmente settori più innovativi, ancora in fase di sviluppo e diffusione, come processi per la produzione di bioplastiche e composti bioattivi, che mirano alla trasformazione dei rifiuti organici in prodotti ad altissimo valore aggiunto come ingredienti cosmetici o farmaceutici.
- Le **strategie di pianificazione** (15,8%) e quelle per il **coinvolgimento del pubblico** (10,5%) giocano anch'esse un ruolo importante per il quadro strategico della valorizzazione del *biowaste*.

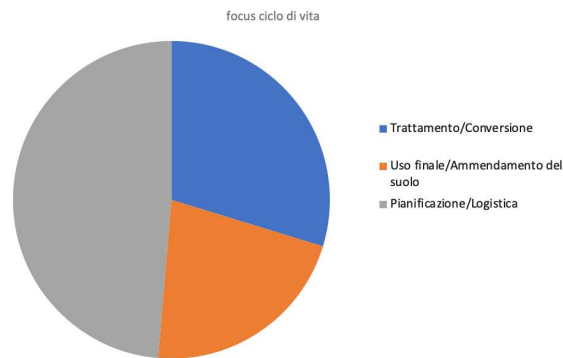


Figura 8: Ripartizione percentuale del focus degli studi sulle fasi del ciclo di vita. La pianificazione/logistica (48,6%) rappresenta la fase preponderante, seguita dal trattamento/conversione (29,7%) e dall'uso finale/ammendamento del suolo (21,6%)

Considerando la fase del ciclo di vita all'interno della catena di trasformazione dei rifiuti in ammendanti (Figura 8), la maggior parte dei casi studio analizzati fa riferimento alla fase di raccolta con *focus* sulla pianificazione, incentrata sull'organizzazione teorica e strategica del sistema di recupero e la logistica che si occupa della parte operativa e del monitoraggio dei flussi dei materiali (48,6%), per seguire con le procedure di trattamento e conversione (29,7%). L'uso finale dei prodotti derivati da *biowaste* (come ammendanti, *soil improver* e prodotti ad alto valore aggiunto) rappresenta invece solo il 21,6% delle analisi, suggerendo la necessità di ampliare la ricerca e l'applicazione industriale verso le fasi terminali della catena di valore, per chiudere efficacemente il ciclo dei nutrienti e promuovere la transizione verso sistemi pienamente circolari.

4.1.2 Analisi qualitativa

L'approccio qualitativo ha permesso di superare una lettura meramente descrittiva dei dati, individuando modelli vincenti replicabili e scalabili per la gestione circolare dei rifiuti organici in diverse aree geografiche e contesti sociali.

Dall'analisi emergono quattro dimensioni principali, che caratterizzano l'evoluzione e il funzionamento delle filiere di valorizzazione del *biowaste*: (i) le tecnologie impiegate, (ii) le logiche organizzative, (iii) le condizioni territoriali e legislative, e (iv) le strategie di coinvolgimento degli attori locali che ne hanno determinato l'efficacia o, in alcuni casi, le criticità.

Evoluzione dei modelli di valorizzazione: dal riciclo alla produzione di prodotti ad alto valore aggiunto

L'analisi della letteratura evidenzia un percorso evolutivo nella modalità di valorizzazione dei rifiuti organici nel tempo. Se in una prima fase la gestione della frazione organica si è concentrata prevalentemente sulla riduzione dell'impatto ambientale attraverso il compostaggio tradizionale, negli ultimi anni si osserva una progressiva transizione verso strategie più complesse e orientate alla creazione di valore.

La forma più consolidata di valorizzazione dei rifiuti organici è infatti rappresentata dalla loro trasformazione in **ammendanti per il suolo**, applicazione che consente di chiudere il ciclo della materia organica. Tra le tecnologie più utilizzate a tale scopo rientrano tecniche consolidate come (i) il compostaggio, (ii) la digestione anaerobica (sezione 1.3.3) e tecnologie più innovative (iii) il *bokashi* e (iv) il vermicompostaggio. In particolare, il *bokashi*, si configura come un'alternativa altamente efficiente al compostaggio tradizionale. Questo processo, basato sulla fermentazione di tipo aerobico o semi-anaerobico mediato da microrganismi, permette di convertire il *biowaste* in un fertilizzante in grado di aggiungere nutrienti e migliorare la tessitura del suolo, evitando dispersioni gassose e preservando una maggior quantità di energia e carbonio nel prodotto finale [88].

Il vermicompostaggio invece, che utilizza lombrichi per la decomposizione della materia organica, presenta un elevato grado di *stabilità organica* (misurata in Indice di Carbonio Organico Recalcitrante - IROC) che si riferisce al grado di decomposizione della sostanza organica e indica il livello di attività biologica residua in un materiale, come il compost o il digestato. Questo permette di ottenere un prodotto con un'azione prevalentemente fertilizzante e allo stesso tempo duraturo [89]. Anche il vermicompostaggio da scarti alimentari che utilizza lombrichi per la decomposizione della materia organica, si afferma come un processo ad alta efficienza per la produzione di ammendanti di qualità superiore: studi condotti con la specie *Eudrilus eugeniae* hanno mostrato una significativa riduzione della massa dei rifiuti e un aumento della popolazione di lombrichi, con un incremento di peso del 26,2%. Il prodotto finale (vermicompost) raggiunge un rapporto C/N ideale (tra 11,2 e 14,5) e si arricchisce di nutrienti essenziali, contenendo fino al 2,1% di azoto totale, 1,2% di fosforo totale e 1,6% di potassio totale [90].

Oltre al tradizionale rapporto C/N, emerge la rilevanza dell'azoto estraibile in acqua (**WEN > 0,4%**) e del rapporto tra carbonio totale e azoto estraibile (**TOC/WEN**), il cui intervallo ottimale deve attestarsi

tra 40 e 80 per garantire la maturità del compost e l'efficace abbattimento dei patogeni [91]. Relativamente alla digestione anaerobica, le fonti indicano una netta superiorità delle configurazioni **termofile ad alti solidi (THSAD)** a ~55°C, che garantiscono una disinfezione e una stabilità biologica del digestato superiori rispetto ai sistemi mesofili standard [91].

Accanto alla produzione di ammendanti tradizionali, nel corso del tempo si è sviluppato un crescente interesse verso prodotti fertilizzanti più specializzati come **biofertilizzanti** e **biostimolanti**. Questi ultimi sono prodotti principalmente a partire dalla frazione organica dei rifiuti urbani o dai fanghi di depurazione [92] che, pur non fornendo direttamente composti naturali al terreno, migliorano i processi metabolici del suolo e delle piante, facilitando l'assorbimento dei nutrienti, favorendo la crescita vegetale e l'aumento della produttività [93]. In questo contesto anche prodotti biologici come il *frass*, costituito da escrementi larvali derivati dall'allevamento di insetti [94], stanno emergendo come fertilizzanti alternativi in grado di contribuire alla circolarità dei sistemi agricoli. Dal punto di vista agronomico il *frass* si distingue per un elevato profilo nutrizionale e per l'abbondante presenza di *chitina*, derivante dai resti delle larve stesse. Questa sostanza agisce come un vero e proprio biostimolante e promotore della crescita per le piante, trasformando il residuo in un ammendante ad alto valore aggiunto.

In maniera parallela alle applicazioni agronomiche, l'utilizzo di **processi ottimizzati per la produzione di bioenergia e biocarburanti** rappresenta un secondo filone rilevante nella traiettoria evolutiva della valorizzazione del *biowaste*. La digestione anaerobica di reflui e rifiuti organici è una tecnologia ormai matura e consolidata per la produzione di biogas, utilizzato come fonte di energia rinnovabile. Negli ultimi anni la ricerca si sta però focalizzando sull'ottimizzazione del processo, in particolare attraverso l'impiego di materiali in grado di migliorare la cinetica e la resa. Tra questi, l'aggiunta di *carbone attivo granulare (GAC)* ha permesso di ridurre i tempi di produzione e aumentare la resa di metano, specialmente a basse temperature [95]. Contemporaneamente, nel tentativo di migliorare la produzione di biocarburanti da residui agricoli e forestali - un procedimento complesso e caratterizzato dalla necessità di numerosi pretrattamenti per abbattere la resistenza della lignina - la ricerca si sta concentrando sull'*ottimizzazione dell'idrolisi enzimatica* di cellulosa ed emicellulosa. Questa procedura renderebbe sostenibile la conversione su larga scala di scarti lignocellulosici a basso costo in combustibili ad alto valore aggiunto [96].

Successivamente la ricerca si è progressivamente concentrata su modelli di valorizzazione più avanzati nei quali i flussi da *biowaste* diventano materie prime per la produzione di bioprodotti ad alto valore aggiunto. A livello europeo, diversi progetti finanziati nell'ambito di *Horizon Europe* cercano di tradurre queste tecnologie in soluzioni concrete per il mercato agricolo, volte alla produzione di fertilizzanti organici in grado di sostituire quelli sintetici, promuovendo l'industrializzazione di questi processi. Il progetto FENIX, per esempio, lavora sulla combinazione di sottoprodotti della produzione di biogas (digestato e *biochar*) per la creazione di ammendanti organici. Questa strategia, supportata da evidenze scientifiche, sfrutta le sinergie tra due materiali derivati da processi complementari di valorizzazione del rifiuto permettendo al *biochar* di ottimizzare le prestazioni ambientali del digestato per creare un ammendante ibrido che supera i limiti dei componenti presi singolarmente. In quest'ambito si colloca, per esempio, anche la produzione di *biochar* derivato da scarti vegetali, materiale carbonioso ottenuto tramite processi di pirolisi che trova applicazione sia come ammendante sia come materiale adsorbente per la rimozione di contaminanti dalle acque reflue, inclusi residui farmaceutici [97, 98].

Un ulteriore livello evolutivo di queste tecnologie riguarda sistemi in cui gli intermedi energetici derivati dai rifiuti organici vengono utilizzati come *input* per produzioni industriali avanzate. Un esempio è la produzione di **Proteine derivate da cellule singole (Single Cell Protein, SCP)**, dove il biometano a partire da biogas purificato viene utilizzato come fonte di energia per nutrire specifici batteri metanotrofi all'interno di reattori di fermentazione [73]. A seguito di un processo di *downstream* ed essiccazione, si ottiene un prodotto solido granulare con un contenuto proteico compreso tra il 70% e il 73% su base secca, permettendo al contempo la riduzione delle emissioni di CO₂ e la produzione di energia da biogas [73].

In modo analogo, l'allevamento di **larve di mosca soldato nera (*Hermetia illucens*)**, organismi in grado di convertire un'ampia gamma di scarti in prodotti ad alto valore (proteine, lipidi e chitina), si è dimostrato particolarmente robusto per il trattamento di biorifiuti di scarsa qualità, dal momento che i materiali impropri (plastica, vetro e metalli), vengono naturalmente ignorati dagli insetti senza influenzarne il metabolismo [73]. I materiali che possono essere valorizzati sono anche i biopolimeri, come il PHA (poliidrossialcanoato) e il PLA (acido Polilattico), utilizzati in numerosi settori, da quello del packaging fino all'industria farmaceutica, biomedica e cosmetica.

Questi esempi dimostrano chiaramente come i flussi di scarto possono essere considerati come vere e proprie materie prime per un'industria all'avanguardia, in grado di generare un'ampia varietà di prodotti ad alto valore aggiunto, contribuendo alla sostenibilità ambientale ed economica.

Modelli organizzativi e gestione della raccolta

In tutta Europa, la produzione e l'applicazione di prodotti ad alto valore aggiunto da rifiuti organici è resa possibile da una pluralità di modelli organizzativi e di business distinti, che cercano di coordinare strutture di *governance* locale, domanda del mercato, infrastrutture disponibili e incentivi normativi. Sebbene i processi tecnici come il compostaggio, la digestione anaerobica e la pirolisi siano ben consolidati, i casi studio analizzati evidenziano come i loro modelli economici e operativi variano considerevolmente in funzione del contesto territoriale, della scala di intervento e del livello di integrazione tra fasi di raccolta, trattamento e utilizzo finale. Esistono tre ampie categorie di modelli di business che dominano attualmente il settore [99]:

- **Impianti di valorizzazione gestiti da imprese commerciali:** modello che coinvolge impianti di trattamento su media e grande scala che ricevono rifiuti organici da aziende agricole, industrie alimentari e/o comuni, convertendoli in compost o digestato. Questi operano spesso con molteplici flussi di entrate, tra cui le tasse di *gate* (per l'accettazione dei rifiuti), la vendita di compost e/o prodotti fertilizzanti e, nel caso della digestione anaerobica, i ricavi associati a biogas, biometano o alla generazione di elettricità. Un esempio di questo modello è rappresentato dalla Calabria Maceri e Servizi S.p.A. che opera in Italia dal 2018. L'azienda lavora circa 50.000 tonnellate/anno di rifiuti organici urbani, in un impianto di digestione anaerobica secca che produce circa 4,2 milioni di Sm³/anno di biometano, che viene iniettato nella rete nazionale del gas per un consumo di energia a basse emissioni di carbonio. Il digestato risultante viene mescolato con materiale strutturante prima di maturare ed essere trasformato in 8.000 tonnellate di compost di alta qualità all'anno, venduto con il nome di *Terrasana Bio*;
- **Partenariati pubblico-privato per rifiuti urbani:** la produzione di compost e digestato in contesti urbani è spesso integrata nei sistemi di gestione dei rifiuti, gestiti da autorità locali o da fornitori di servizi convenzionati. Questi modelli sfruttano le infrastrutture esistenti per la raccolta differenziata dei rifiuti organici, consentendo la produzione di compost come parte della strategia

di circolarità e clima di una città. Un esempio notevole è quello della città di Milano, che gestisce uno dei sistemi di raccolta dei rifiuti alimentari urbani di maggior successo in Europa. Attraverso il subappalto ad AMSA, la città raccoglie effettivamente il 62% dei suoi rifiuti organici tramite un sistema di raccolta porta a porta. I rifiuti organici vengono poi trasportati e trattati presso l'impianto di *Montello AD*, che gestisce oltre 130.000 tonnellate/anno di rifiuti organici (circa 110 kg/abitante). L'impianto produce circa 26.000 tonnellate di compost all'anno dalla frazione di digestato, di cui il 20% viene dato gratuitamente agli agricoltori e ai cittadini per promuoverne l'uso, oltre a 11,2 milioni di m³ di biogas, impiegato per alimentare i veicoli di raccolta dei rifiuti della città. Questo modello integrato verticalmente è reso possibile da un'elevata partecipazione pubblica, dal monitoraggio dei rifiuti digitali e da uno schema di raccolta basato su incentivi;

- **Sistemi decentralizzati e comunitari:** Nelle regioni carenti di infrastrutture su larga scala o in cui gli obiettivi di circolarità mirano al coinvolgimento dei cittadini, modelli di compostaggio o vermicompostaggio su scala ridotta stanno emergendo soprattutto in regioni dove mancano infrastrutture su larga scala o con obiettivi di circolarità basati sul coinvolgimento del cittadino. Questi modelli sono spesso guidati o dalla comunità (*community-driven*) in cui l'obiettivo primario non è il profitto economico ma la coesione sociale, la partecipazione attiva e l'educazione ambientale o dal prodotto (*product-driven*) in cui l'attenzione è focalizzata sulla creazione di valore economico e funzionale attraverso una logica di micro-imprenditoria locale. Il motore dell'iniziativa è l'ottimizzazione del processo per ottenere un prodotto finale di altissima qualità e purezza, dotato di un valore commerciale tangibile, in grado di sostituire fertilizzanti chimici o substrati commerciali nell'agricoltura locale e di generare nuove fonti di reddito per la comunità. Spesso si basano su sistemi modulari e logistica a basso costo, e sono particolarmente adatti alle impostazioni urbane e all'agricoltura periurbana. Per supportare i cittadini in questo nuovo ruolo operativo, le municipalità introducono spesso una figura chiave: il "Maestro Compostatore" (*Compost Master*) che non solo si occupa del monitoraggio tecnico e logistico delle compostiere ma agisce come educatore e punto di incontro tra le famiglie coinvolte e l'azienda di gestione dei rifiuti trasformando la percezione del materiale da scarto a risorsa [88].

In Italia, il gruppo operativo **FertiSele** nella pianura di Sele ha dimostrato una versione agricola di questo modello. Attraverso questa iniziativa i rifiuti vegetali vengono raccolti dalle aziende di trasformazione che li incanalano in sistemi di vermicompostaggio, producendo un ammendante

del suolo di alta qualità ed economico per l'uso agricolo locale. Questo modello enfatizza la simbiosi agro-industriale e la circolarità all'interno dei sistemi alimentari locali;

- **Drop-off points o sistemi di container stradali:** Prevede l'utilizzo di contenitori di diverse forme e volumi, in cui gli utenti ripongono i diversi tipi di rifiuti differenziati. In questo caso, gli utenti possono smaltire separatamente i diversi tipi di spazzatura 24 ore al giorno, e, nel caso in cui i contenitori dovessero riempirsi, vengono rilevati automaticamente e svuotati all'interno dei camion preposti per questo sistema;
- **Pneumatic system:** Il sistema pneumatico di raccolta dei rifiuti consente agli utenti di conferire i rifiuti in appositi contenitori collegati a tubi sotterranei che trasportano i materiali fino alla stazione di raccolta, prelevandoli automaticamente quando il container è pieno. Rispetto alla raccolta tradizionale porta a porta, questo metodo riduce gli impatti negativi sui servizi di raccolta e rende la separazione dei rifiuti più attrattiva per le famiglie. Il sistema è stato implementato nella città di Santander, in Spagna, integrandosi nel sistema municipale di gestione dei rifiuti della Cantabria. Dal modello analizzato emerge che i sistemi pneumatici permettono di ridurre i costi operativi, grazie a minore personale necessario e minori spese legate a veicoli, carburante e manutenzione.

Queste forme di gestione partecipativa possono inoltre integrarsi con modelli imprenditoriali locali orientati alla valorizzazione del *biowaste*, dando origine a filiere circolari in cui la raccolta, il trattamento e l'utilizzo dei prodotti derivati avvengono all'interno dello stesso territorio.

Un esempio calzante di come questi principi si integrino in un modello di business reale è quello dell'azienda italiana Biomatrix Srl [100], fortemente orientata all'economia circolare locale e che si distingue per la completezza del servizio che offre. Infatti, a differenza di altre realtà che si concentrano su un'unica fase, l'azienda copre pienamente l'intera catena del valore, raccogliendo i rifiuti organici sul territorio, eseguendo il processo di compostaggio nei propri impianti e occupandosi infine della commercializzazione del prodotto finito. In questo modo l'azienda dimostra come sia possibile creare un modello "*waste-to-value*" che non si limita alla trasformazione del rifiuto ma costruisce un vero e proprio ponte tra chi produce lo scarto organico e le aziende agricole che necessitano di rigenerare i propri suoli, trattando e distribuendo il valore economico e ambientale all'interno del territorio.

Un altro elemento che è risultato essenziale per l'efficienza, la fattibilità e la sostenibilità della raccolta differenziata è il **modello multi-contenitore**, che si basa sull'utilizzo di contenitori differenziati, specifici per la composizione del rifiuto che conterranno. Attraverso un'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment, LCA*) applicata a diversi sistemi di raccolta in aree urbane densamente abitate, è stato dimostrato come l'utilizzo di questo modello generi un impatto ambientale complessivo minore [101]. Nel caso di territori con una bassa densità di popolazione invece, che sono caratterizzati da contenitori per la raccolta più distanziati tra loro e una minore produzione di rifiuti, la letteratura suggerisce di utilizzare un approccio ibrido, basato su sistemi di raccolta differenziata porta a porta o stradale, promuovendo in questo modo il compostaggio domestico per le aree più urbanizzate e il compostaggio di comunità per le aree rurali [102].

L'efficacia dei sistemi di raccolta differenziata dipende tuttavia non solo dalla tipologia di contenitori utilizzati, ma anche dalle modalità organizzative della raccolta e dal grado di coinvolgimento degli utenti. A queste strategie di raccolta viene infatti integrato il **modello porta a porta** (*Door-to-Door Collection*) riconosciuto come il metodo più efficace per ridurre la quantità di contaminanti nella frazione organica dei rifiuti e contenere i tassi di scarto negli impianti di compostaggio rispetto ai contenitori stradali. Tale approccio favorisce inoltre un aumento del coinvolgimento degli utenti, che sviluppano una più consapevole e diretta partecipazione alla gestione dei propri rifiuti [103]. Ne rappresenta un esempio il caso di studio di Albano Laziale [7]: il passaggio da un sistema di raccolta basato su grandi contenitori stradali a un modello porta a porta non solo ha migliorato la qualità dei rifiuti raccolti, ma ha determinato anche un aumento significativo della capacità dei cittadini di effettuare una corretta separazione dei rifiuti, con un aumento stimato dal 25% al 52%. Un ulteriore vantaggio di questo sistema risiede nella maggiore capacità di gestire gli odori derivanti dai rifiuti, riducendo così il disagio nella quotidianità dei cittadini.

Tra le modalità di gestione dei rifiuti urbani, è importante evidenziare come i sistemi basati sui contenitori stradali (*curbside bins*) o interrati (*underground bins*) presentano diverse sfide e criticità strutturali. In primo luogo, si registra una qualità inferiore della raccolta, dovuta, in parte, anche alla dimensione ridotta delle bocche di conferimento dei contenitori di raccolta, che rendono più complessa la distinzione del contenitore appropriato per ogni frazione [103]. A ciò si aggiungono problematiche di natura logistica e gestionale. I contenitori stradali sono maggiormente esposti ad atti di vandalismo o danni causati da

agenti atmosferici; inoltre, l'elevata quantità di rifiuti che possono accumulare al loro interno, talvolta per periodi prolungati, favorisce l'insorgenza di cattivi odori e disagi per la popolazione.

Oltre alla scelta del modello organizzativo, l'efficienza dei sistemi di raccolta può essere ulteriormente migliorata attraverso l'introduzione di strumenti tecnologici e soluzioni di ottimizzazione logistica. Tra queste, l'utilizzo di sistemi IoT (*Internet of Things*) e *Smart Bins*, dotati di sensori in grado di monitorare in tempo reale il livello di riempimento dei cassonetti, consente di ottimizzare e automatizzare i processi di raccolta, migliorando la pianificazione degli interventi. Un esempio significativo è quello della città di Bergen (Norvegia) [88], dove la piattaforma *WasteIQ* integra sensori intelligenti nei bidoni per fornire dati sui volumi di smaltimento, funzionali anche all'implementazione di sistemi di tariffazione personalizzata. Tra gli strumenti più innovativi a supporto della modernizzazione logistica vi è inoltre il GIS (Sistema Informativo Geografico), che permette di ottimizzare il sistema di raccolta analizzando i percorsi di raccolta dei rifiuti e il posizionamento dei contenitori [104], consentendo un posizionamento più strategico dei cassonetti e una riduzione dei costi operativi, attraverso la definizione di itinerari di raccolta più efficienti e sostenibili.

Il miglioramento dei sistemi di raccolta non riguarda però esclusivamente la fase operativa, ma coinvolge anche la pianificazione territoriale dell'intera filiera di gestione dei rifiuti. L'ottimizzazione di questo processo, può essere perseguita con il bilanciamento tra i costi di raccolta e la convenienza per l'utente, misurata in termini di **distanza massima di percorrenza** tra le abitazioni e il punto di raccolta [104]. E' stato osservato che i costi di raccolta diminuiscono rapidamente all'aumentare della distanza massima di cammino; tuttavia, oltre una specifica soglia - compresa tra i 95 e i 203 metri - i risparmi marginali tendono ad appiattirsi, rendendo dunque poco vantaggioso aumentare ulteriormente la distanza e rischiando, al contempo, di compromettere la partecipazione attiva dei cittadini [104]. Da questa evidenza, emerge un'ulteriore necessità: ridurre la distanza tra il luogo di produzione del rifiuto e il suo utilizzo finale. Diversi studi [101, 105, 106] sottolineano infatti che nonostante il compostaggio permetta di ridurre notevolmente le emissioni di gas serra rispetto allo smaltimento in discarica, il trasporto del prodotto finale su lunghe distanze può incidere pesantemente sull'impronta di carbonio complessiva [105]. Questa teoria è supportata da uno studio che stima un aumento dell'impatto climatico già a partire da una distanza di percorrenza di 11 km [107]. Risulta fondamentale, dunque, lavorare su impianti di trattamento

decentralizzati e su scala regionale, per ridurre l'impatto ambientale della logistica e favorire la chiusura del ciclo di vita del prodotto a livello locale.

Infine, una svolta significativa in questo sistema è avvenuta con l'introduzione di sistemi tariffari basati sul concetto di "**chi inquina paga**" (*Polluter Pays Principle*), adottato formalmente nella politica europea sui rifiuti nel 1991 [108]. Questo principio stabilisce che i costi della gestione e dello smaltimento dei rifiuti devono essere sostenuti da chi li genera, costituendo la base filosofica ed economica per la transizione verso sistemi di tariffazione più equi ed efficaci [109]. In linea con la Gerarchia dei Rifiuti dell'UE (prevenzione, preparazione per il riutilizzo, riciclo, recupero di altro tipo e smaltimento), il principio "chi inquina paga" trova applicazione anche attraverso strumenti come il **Sistema Pay-As-You-Throw (PAYT)**, noto in Italia come **Tariffazione Puntuale**, concepito per incentivare la prevenzione e il riciclo rendendo economicamente svantaggioso lo smaltimento. Questi sistemi sono ideali per supportare l'adozione di **modelli di tariffazione precisi**, strategie vincenti per incentivare comportamenti virtuosi da parte dei cittadini e aumentare l'equità nella distribuzione dei costi, garantendo loro vantaggi economici diretti. Un esempio è il caso di studio di Albano Laziale che nel 2019 [7] ha integrato alla strategia porta a porta un sistema di tariffazione denominato *TARIP (Tariffa Puntuale)*, basato sul concetto del *pay-as-you-throw*. L'imposta è calcolata in funzione del numero di componenti del nucleo familiare e si basa sull'assegnazione di un contenitore dedicato ai rifiuti non riciclabili, di dimensioni ridotte e dotato di un microchip informatico per la tracciabilità degli svuotamenti. Più nello specifico, nel caso di un nucleo familiare composto da una sola persona, la tassa TARIP include un numero prestabilito di 16 svuotamenti annui del contenitore per il rifiuto indifferenziato. Qualora la soglia venga superata, per ogni ulteriore svuotamento è previsto un costo aggiuntivo di 1,10 €. Al contrario, se il nucleo familiare riesce a ridurre la quantità di svuotamenti a meno di 13, verrà concesso uno sconto di 1,10 € per ciascun svuotamento non effettuato. Naturalmente, il sistema prevede deroghe speciali per nuclei familiari che includono bambini (fino a tre anni) e persone anziane o malate. Altri comuni, come quello di Casalgrande [88], offrono una riduzione fino al 20% sulla tariffa dei rifiuti per coloro che praticano il compostaggio domestico.

In questo contesto, le scelte infrastrutturali e politiche adottate nella fase iniziale di sviluppo dei sistemi di gestione dei rifiuti possono influenzare profondamente la loro evoluzione futura. Uno studio socio-tecnologico [10] confronta il sistema maturo della Svezia con quello in fase di consolidamento della

Grecia, introducendo il concetto di “**dipendenza dal percorso**” (*path-dependencies*), dove viene indicato come spesso le scelte politiche adottate possono generare fenomeni di “**lock-in**”: blocchi in grado di limitare l’innovazione e l’adattabilità futura del sistema. Un’eccessiva focalizzazione su una singola tecnologia già matura e consolidata, infatti, rischia di ostacolare l’adozione di soluzioni più efficienti e innovative.

Dimensione sociale e sensibilizzazione dei cittadini

Il cambiamento comportamentale e l’innovazione sociale sono stati valutati qualitativamente attraverso l’analisi del grado di consapevolezza degli attori coinvolti. Questa analisi ha permesso di comprendere come viene promossa la consapevolezza sociale e il cambiamento dei modelli comportamentali, per rispondere in modo coerente con le specificità e necessità culturali, normative e abitudinarie delle comunità. Nello specifico, i principali impatti attesi sono:

1. miglioramento della percezione dei cittadini sull’utilizzo dei biorifiuti come risorsa locale e non come semplice scarto;
2. aumento della partecipazione attiva dei cittadini alla raccolta differenziata selettiva dei biorifiuti, raggiungendo obiettivi ambiziosi quali il superamento del 60% di raccolta
3. miglioramento dell’accettazione da parte dei consumatori dei prodotti *bio-based*

Dall’analisi della letteratura emerge chiaramente che le strategie utilizzate non si adattano in maniera uniforme a tutti i cittadini e a tutte le comunità. Uno studio condotto a Dolisie (Repubblica del Congo) [70] ha dimostrato come le abitudini sulla gestione dei rifiuti vengono fortemente influenzate dal *background* sociale ed economico del cittadino. Ad esempio, circa il 90% delle famiglie ad alto reddito pratica la raccolta differenziata, a differenza di quelle appartenenti alla fascia di reddito medio-bassa.

Oltre al reddito, altri fattori importanti da tenere in considerazione sono l’età e il grado d’istruzione, che possono influenzare la propensione a adottare pratiche sostenibili o innovative, fenomeno osservato in diversi ambiti legati alla gestione delle risorse e all’adozione di nuove tecnologie. Ad esempio, uno studio condotto in Indonesia sugli agricoltori [110] ha evidenziato come i contadini più giovani e istruiti, sono più inclini ad adottare tecnologie digitali per migliorare le loro coltivazioni a differenza di cittadini più anziani e meno istruiti. Queste evidenze sottolineano la necessità di progettare campagne di

sensibilizzazione che tengano conto delle specificità culturali, sociali e demografiche dei contesti di riferimento [111].

La scelta di includere evidenze provenienti da contesti extra-europei risponde alla necessità metodologica di analizzare scenari dove le criticità nella gestione dei rifiuti sono più accentuate e i *driver* socio-economici risultano maggiormente isolabili [111]. Tali contesti offrono una letteratura scientifica particolarmente ricca e recente, permettendo di convalidare l'universalità di variabili quali il reddito e il grado di istruzione all'interno di *framework* consolidati [111].

Per concretizzare operativamente queste strategie, sono emersi diversi modelli organizzativi (sezione 4.1.2) che variano in base alla scala di intervento e al livello di integrazione territoriale. Una categoria di particolare rilievo è rappresentata dai **sistemi decentralizzati e comunitari**. All'interno di quest'ultima categoria, spiccano le **iniziative guidate dai cittadini** (*community-driven*): l'iniziativa *Brimscombe & Thrupp Community Composters* (BATCOM) [112] nel Regno Unito è il caso più rilevante di impegno comunitario. L'obiettivo è quello di risolvere un problema logistico comune, ovvero l'impossibilità di accedere alle strade strette e ripide della *Golden Valley* da parte dei camion di raccolta dei rifiuti, costringendo i residenti a bruciare gli scarti biologici o a trasportarli in auto per chilometri. Da qui, la comunità di *Stroud* si è impegnata a distribuire il compost prodotto dalla raccolta dei propri rifiuti ai soci per utilizzarli in orti e giardini personali, chiudendo il ciclo della materia prima nel luogo stesso in cui viene creata ed eliminando completamente le emissioni per il trasporto a lungo raggio. Per rendere possibile questo modello di governance cooperativa, i residenti non sono trattati come semplici clienti, bensì si affermano come comproprietari, acquistando una quota al costo simbolico di £1 e creando così un forte senso di appartenenza e responsabilità. Il modello economico dell'iniziativa mira a mantenere una sostenibilità finanziaria ibrida che si regge su tre pilastri:

1. **Abbonamenti annuali:** permettono ai soci di conferire i propri scarti con una quota più vantaggiosa rispetto a quella comunale.
2. **Waste Credits:** l'amministrazione locale paga a BATCOM una somma per ogni tonnellata di rifiuto distolta dal circuito tradizionale, riconoscendo il risparmio sui costi di smaltimento e trasporto.
3. **Crowdfunding:** La comunità ha raccolto £26.060 attraverso piattaforme di *crowdfunding* locale, dimostrando un'adesione tangibile al progetto

Questo modello dimostra come, la gestione comunitaria possa essere economicamente più efficiente e ambientalmente superiore rispetto ai servizi centralizzati e che un coinvolgimento sistematico degli attori sociali, attuato tramite strumenti di co-progettazione o incentivi economici mirati, è associato a un aumento misurabile dell'adesione e della partecipazione, nonché a una maggiore efficacia nel supportare la transizione verso l'economia circolare.

È chiaro come tutti gli studi precedentemente citati dimostrano come il coinvolgimento attivo dei cittadini si conferma un elemento chiave per concretizzare le strategie ambientali.

4.1.3 Best practice da case study

L'analisi dei casi studio ha permesso di estrapolare un set di *best practice* ricorrenti, osservate in contesti territoriali differenti e associate a performance più solide lungo la filiera (raccolta–trattamento–*output*). Al di là dell'eterogeneità tecnologica, composta da soluzioni più consolidate e alternative più innovative, e la loro capacità di generare una vasta gamma di prodotti ad alto valore aggiunto, emerge un filo conduttore: la necessità di garantire la produzione di un *output* di qualità che sia sicuro, efficiente e conforme agli standard richiesti, per permettere la sua accessibilità al mercato.

A concorrere a questo obiettivo, è possibile raggruppare le *best practice* identificate in tre macrocategorie: (i) la gestione della materia prima; (ii) l'efficienza tecnologica e (iii) il coinvolgimento degli attori sociali.

Gestione della materia prima: qualità del rifiuto e performance di raccolta

Dalla revisione dei casi studio emerge che i sistemi più efficaci sono quelli in grado di agire “a monte”, garantendo una raccolta differenziata che massimizzi quantità intercettata e soprattutto qualità (basso livello di contaminanti).

Il modello di raccolta che si è dimostrato più efficiente al raggiungimento di tali obiettivi è il ***Door-to-Door o kerbside collection***, dove la raccolta differenziata avviene direttamente davanti all'abitazione del cittadino tramite l'uso di contenitori appositi. I rifiuti vengono successivamente raccolti da dipendenti municipali in giornate prestabilite attraverso l'utilizzo di camion dedicati. Il modello emerge come

configurazione frequentemente associata ai risultati migliori in termini di (i) quantità di materiale raccolto, (ii) qualità dei rifiuti organici e (iii) riduzione dei costi/inefficienze legate agli scarti di processo, affermandosi quindi come il sistema ideale per i comuni che desiderano raccogliere rifiuti organici di alta qualità. Attraverso questo modello di raccolta, è possibile aumentare significativamente la partecipazione dei cittadini: ne è un esempio il caso di Altamura [88], dove il tasso di riciclo è aumentato dal 25% al 70% in pochi mesi, favorendo una parallela riduzione dei contaminanti presenti nei rifiuti urbani raccolti.

Efficienza tecnologica e operativa: digitalizzazione e ottimizzazione dei processi

L'efficacia dei sistemi di raccolta differenziata può essere notevolmente potenziata dall'uso di tecnologie digitali avanzate, in grado di supportare decisioni basate su dati oggettivi e modelli previsionali. Un caso emblematico è quello di Ústí nad Labem [104], un comune della Repubblica Ceca, che ha integrato un sistema GIS (*Geographic Information System*) per posizionare in maniera strategica i bidoni per la raccolta differenziata. L'identificazione delle potenziali collocazioni per i contenitori dei rifiuti è stata inizialmente generata da 1,27 milioni di punti distribuiti casualmente all'interno del confine comunale, ai quali è stato imposto un vincolo spaziale che prevedeva una distanza minima di 10 metri l'uno dall'altro. Successivamente, a ciascun punto sono stati attribuiti dei punteggi supplementari, calcolati in base alla loro intersezione spaziale con specifici set di dati. Tali valori sono poi stati assegnati valutando diversi fattori chiave, tra cui (i) le caratteristiche dell'infrastruttura stradale (come la qualità della superficie, la larghezza, la pendenza e la presenza di ponti o gallerie), (ii) lo stato di proprietà del suolo, con una preferenza per quelle pubbliche, (iii) l'attrattività legata all'uso dello spazio pubblico (come la vicinanza a scuole, ospedali o fermate dell'autobus), (iv) la destinazione d'uso urbano del territorio e (v) la presenza di isole ecologiche preesistenti per altre frazioni di rifiuto.

Infine, i punti che hanno registrato un punteggio nullo in almeno uno dei fattori valutati sono stati rimossi dall'analisi finale, riducendo l'insieme iniziale a un sottoinsieme di collocazioni ottimali. In questo caso, infatti, il valore zero rappresenta un fattore "esclusivo", ossia una condizione di totale inidoneità logistica, come i punti situati direttamente sui marciapiedi o all'interno di corsie e lotti di parcheggio. La decisione definitiva dell'ubicazione dei bidoni è stata effettuata utilizzando *ArcGIS Network Analyst* (ESRI, 2020),

con l'obiettivo di massimizzare la copertura del servizio. In particolare, sono stati considerati i punti di indirizzo popolati, e per ciascuno di essi, è stata individuata la localizzazione potenziale più vicina lungo la rete stradale, privilegiando quelle con il punteggio complessivo più elevato. La ricerca della posizione più vicina è stata supportata dalla definizione di un vincolo di distanza massima percorribile a piedi (*cut-off*) variabile tra i 15 e i 300 m con incrementi di 5 m ponderando ulteriormente i risultati in funzione del numero di abitanti per ciascun indirizzo. In sintesi, con l'aumentare del vincolo per la distanza a piedi, aumenta contestualmente la probabilità che un contenitore venga utilizzato da più di un punto di indirizzo popolato. La selezione finale ha dunque favorito le posizioni prossime ai punti con maggiore densità abitativa, migliorando l'efficienza complessiva del sistema.

Similmente, in altri contesti urbani, sono stati adottati *sistemi IoT (Internet of Things)* e *Smart Bins* in grado di ottimizzare la gestione e la raccolta dei rifiuti urbani. Nel contesto del progetto CityLoops [113], nella città di Nitra (Slovacchia) sono stati implementati sensori direttamente sul bidone di raccolta, in grado di rilevare il livello di riempimento in tempo reale. Questi dati vengono poi integrati in un software analitico in grado di favorire l'automazione e l'ottimizzazione del processo di raccolta all'interno della città, riducendo costi logistici ed emissione associate al trasporto.

Oltre all'ottimizzazione della fase di raccolta, l'innovazione tecnologica riguarda anche la fase di valorizzazione dei biorifiuti, che si è evoluta dal semplice riciclo della materia verso complesse strategie di bioraffineria. Inoltre, l'uso di software predittivi come '*Compost-recipe*' [114] consente di formulare miscele ottimali bilanciando porosità e umidità, riducendo i costi di approvvigionamento. Questo strumento non si limita all'analisi del classico rapporto C/N, ma considera un set di cinque parametri fondamentali: (i) il rapporto C/N totale, (ii) l'umidità, (iii) la disponibilità di ossigeno, (iv) il pH, (v) il rapporto tra il carbonio effettivamente biodisponibile e l'azoto totale al fine di prevedere con precisione se la miscela sarà in grado di raggiungere le temperature termofile necessarie alla sanificazione.

Dopodiché, l'utente può scegliere tra tre diverse modalità operative a seconda delle proprie esigenze gestionali:

1. ***Use the whole quantities***: verifica se, mescolando tutte le quantità di scarti disponibili, si rispettano i vincoli chimico-fisici.
2. ***Maximize the mix quantity***: identifica la massima quantità di miscela ottenibile utilizzando le risorse locali, cercando di evitare l'aggiunta di materiali esterni.

3. **Minimize procurement cost:** calcola la combinazione di materiali che garantisce il costo di fornitura più basso pur rispettando tutti i parametri tecnici.

Successivamente, il *software* genera un report con la massa totale della miscela, la proporzione esatta di ogni componente e una previsione delle sue caratteristiche. Se i vincoli non sono rispettati, il sistema emette un **alert** indicando quale parametro impedisce la soluzione ottimale e suggerisce l'aggiunta di materiali correttivi.

Parallelamente, è stato applicato il sistema **FER-PLAY** [115] come metodologia pratica in due fasi per valutare la selezione di catene di valore adatte nel mercato dei fertilizzanti circolari. La prima fase, basata su un approccio binario **GO/NO-GO**, consente di scartare le opzioni con basso livello di TRL, contenuto nutritivo insufficiente o potenziale tossicità, riducendo il rischio di investimenti su soluzioni non mature per l'industrializzazione. La seconda fase prevede, invece, l'applicazione del quadro **MDCA** (Metodologie di Valutazione Strutturata e Multi-Criterio) per la validazione delle soluzioni selezionate, permettendo la valutazione di 48 catene del valore attraverso 16 criteri predefiniti, che comprendono: (i) la fattibilità tecnica, (ii) il TRL, (iii) la sostenibilità finanziaria, (iv) le performance ambientali e (v) l'accettazione sociale.

L'applicazione combinata delle due fasi consente di identificare le catene di valore più performanti per la produzione e l'utilizzo agricolo su scala europea, garantendo allineamento con le normative europee sui fertilizzanti.

Coinvolgimento degli attori sociali

Le *best practice* individuate in questo campo dimostrano come un *engagement* strutturato genera benefici tangibili sotto il profilo comportamentale, economico e ambientale, consolidando la legittimazione sociale dei progetti e migliorando le performance operative. Un esempio concreto è dimostrato dai risultati del progetto CityLoops [113], che ha come obiettivo la trasformazione di 7 città pilota, caratterizzate da contesti ed esigenze eterogenee (Apeldoorn, Bodø, Mikkeli, Porto, Siviglia, Høje-Taastrup e Roskilde), in vere e proprie "città circolari", ovvero sistemi urbani dove nessuna risorsa viene sprecata attraverso l'implementazione di soluzioni volte a chiudere il ciclo di due flussi critici di rifiuti urbani: la frazione organica e i rifiuti derivanti da attività di costruzione e demolizione di edifici, infrastrutture stradali e

vecchi impianti urbani. Dal momento che la transizione verso un modello circolare richiede un cambiamento sistemico, la pianificazione delle attività di coinvolgimento all'interno del progetto ha richiesto l'adozione di metodologie specifiche per: identificare gli *stakeholder*, comprenderne relazioni e interdipendenze, e integrarli efficacemente in un processo decisionale e di sviluppo condiviso. Le città dimostrative, utilizzate come *case study* del progetto, hanno identificato alcune strategie di coinvolgimento facilmente replicabili anche in altri contesti:

- È fortemente consigliata la collaborazione con altri dipartimenti, progetti e iniziative che condividano l'obiettivo di coinvolgimento degli *stakeholder* e dei cittadini nei processi di sviluppo urbano.
- Le parti interessate devono essere coinvolte durante tutte le fasi del progetto, favorendo la condivisione delle informazioni tra le organizzazioni coinvolte.
- Prima di scegliere quale strumento o metodo di partecipazione impiegare, è importante conoscere il target di riferimento, ovvero valutare le caratteristiche degli *stakeholder*, calibrando la metodologia sulle caratteristiche sociodemografiche e culturali del pubblico di riferimento.
- Il coinvolgimento dei cittadini potrebbe anche essere usato come strumento per creare attenzione e sostegno politico e locale di un progetto. I cittadini, come potenziali utenti degli spazi oggetto di indagine, possono fornire contributi preziosi per segnalare criticità sulla funzionalità e apportare nel progetto nuove competenze, conoscenze e prospettive diverse.
- Coinvolgere le parti interessate in riunioni ricorrenti durante i progetti crea fiducia e aiuta a prevedere e risolvere criticità e superare le barriere nel momento in cui si presentano.
- Le competenze e conoscenze apportate dai diversi attori e *stakeholder* sono fondamentali per gestire la responsabilità e i rischi del progetto.

Nello specifico, CityLoops ha adottato un approccio di pianificazione partecipativo strutturato sviluppando strumenti concreti di co-progettazione, tra cui:

- ***CityLab Stakeholder Platform***: la città di Bodø, in Norvegia, ha avviato l'utilizzo di una piattaforma fisica e virtuale per il coinvolgimento degli stakeholder nello sviluppo della città. Questa strategia integra la visualizzazione 3D per stimolare l'immaginazione e le opinioni sul futuro della città e offre un portale informativo per raccogliere input dai cittadini, dalle organizzazioni della società civile e dalle imprese locali. L'obiettivo è il loro coinvolgimento nella pianificazione e

nel processo decisionale per lo sviluppo di un nuovo quartiere, denominato “*New City/New Airport*”, che verrà edificato a seguito dello smantellamento di un vecchio aeroporto con lo scopo di costruire una nuova città nell’area. Questo laboratorio viene affiancato da una strategia di comunicazione per reclutare parti interessate e cittadini.

- **Processo di co-progettazione per lo spazio pubblico:** Apeldoorn (NL) ha utilizzato la co-progettazione con lo scopo di sviluppare un percorso di processo, ovvero una panoramica degli attori coinvolti per fase di processo, con i rispettivi ruoli e compiti per ogni risultato.
- **Piattaforma di simulazione della città:** Siviglia (ES) ha sviluppato una piattaforma virtuale centralizzata che integra strumenti software e set di dati per supportare gli obiettivi di sostenibilità della città. includendo:
 - Strumento di ottimizzazione del flusso CDW (*Construction and Demolition Waste*), che supporta i manager nell’individuazione di nuove posizioni per i futuri “punti puliti”, offrendo ai cittadini l’accesso a una mappa contenente la posizione degli spazi ottimali riscontrati.
 - Strumento di monitoraggio del benessere, che determina la relazione tra benessere e azioni dimostrative. Lo strumento si concentra sulla circolarità, dando ai gestori l’accesso a un quadro di simulazione che quantifica le influenze delle azioni circolari sul benessere, fornendo ai cittadini dati sull’indicatore di circolarità del benessere, azioni dimostrative e stime di impatto sul benessere della città.

La combinazione di questi strumenti in un’unica piattaforma supporta il dialogo intersettoriale e facilita lo scambio di dati tra dipartimenti municipali, istituti di ricerca e partner commerciali pertinenti.

L’analisi dei progetti europei, con particolare riferimento a CityLoops, evidenzia il ruolo cruciale dell’ente pubblico nel successo dei modelli circolari locali. In particolare, la trasformazione delle pubbliche istituzioni da semplici regolatori a ‘*Market Maker*’ consente, tramite il **Green Public Procurement (GPP)**, di stabilizzare la domanda di bioprodotti in mercati ancora immaturi. Questo strumento è particolarmente strategico in ambito di politica ambientale poiché consente alle autorità pubbliche di utilizzare il proprio **potere d’acquisto** per favorire la transizione verso un’economia circolare e sostenibile. Attraverso questo meccanismo, le amministrazioni integrano criteri ambientali e requisiti di

circularità all'interno dei bandi di gara per l'acquisto di beni, servizi o lavori. All'interno dei casi studio di Bodø (Norvegia) e Mikkeli (Finlandia) viene confermata l'efficacia di questa strategia:

- **Bodø:** l'adozione di una strategia di *procurement* sostenibile formalizzata nel 2022 ha permesso di confrontare i bandi di gara tra il 2019 e il 2022. Così facendo è stato osservato un aumento dei requisiti vincolanti di circolarità, passando da 3 a 15 annunci di gara con criteri ambientali espliciti.
- **Mikkeli:** l'introduzione di linee guida per la demolizione selettiva ha orientato il mercato verso criteri qualitativi, riducendo l'influenza del solo criterio del prezzo più basso.

Queste pratiche hanno contribuito a ridurre significativamente i rischi per gli investimenti privati, incentivando le aziende a innovare e a investire in tecnologie *bio-based*, con la certezza di uno sbocco commerciale istituzionale garantito.

Un altro esempio della crescita della consapevolezza sociale è rappresentato dal concorso imprenditoriale per le idee circolari FoodLoop, lanciato a Porto per promuovere la transizione circolare dei rifiuti organici e del sistema alimentare, in linea con gli obiettivi per l'economia circolare 2030. Il concorso è stato ideato per offrire agli imprenditori la possibilità di convertire le problematiche ambientali e sociali in opportunità di *business* nell'ambito dell'economia circolare, stimolando al contempo la collaborazione tra i vari attori. Focalizzandosi sul sistema alimentare, il concorso ha attratto un'ampia gamma di partecipanti, tra cui cittadini, enti sociali e imprenditori locali, grazie alla sua natura inclusiva. Le proposte vincitrici hanno evidenziato l'importanza di creare sinergie intersettoriali, promuovere una gestione innovativa dei rifiuti alimentari, prevenire gli sprechi attraverso schemi di donazione e recupero, rispondere ai bisogni nutrizionali delle popolazioni più vulnerabili e ottimizzare le filiere agroalimentari a livello locale e regionale. In sostituzione ai classici premi economici, il concorso ha offerto formazione e tutoraggio, dimostrando risultati positivi nell'attrazione di idee in fase iniziale, per accompagnarle verso una strutturazione più solida.

Altri risultati rilevanti sono emersi dal progetto SCALIBUR [87], attraverso iniziative di coinvolgimento comunitario di successo. Ad esempio, ad Albano Laziale la *Circular Economy Week*, un evento organizzato a maggio 2022, ha rappresentato un'importante attività di *engagement* del progetto mirato all'informazione, all'educazione e al coinvolgimento della comunità e degli investitori sulle potenzialità della

bioeconomia urbana e sui risultati dei progetti europei in corso. Sono stati svolti diversi incontri e seminari basati sui concetti di bioeconomia ed economia circolare a livello cittadino e regionale con lo scopo di promuovere e migliorare la comprensione delle tecnologie emergenti del settore e la loro utilità per la generazione di prodotti a base organica. La settimana si è conclusa con la *Mostra dei “Local Champions”* che esponeva i modelli di business innovativi e i prodotti dei “*local champions*” italiani che hanno aderito al progetto, un gruppo diversificato che comprendeva (i) *start-up*, (ii) associazioni e (iii) piccole imprese impegnate a sostenere la transizione verso un’economia circolare attraverso l’adozione di pratiche di produzione e consumo più sostenibili.

Un ulteriore esempio virtuoso nell’ambito dello stesso progetto, è stata la promozione della *Climate Neutral Week* a Kozani, in Grecia. Durante questa settimana sono state svolte diverse attività con lo scopo di accrescere la consapevolezza dei cittadini in materia di riciclo e riuso. Eventi che hanno riscosso particolare interesse nella comunità locale sono stati il laboratorio di bricolage “riduci-riusa-ricicla” e sessioni di storytelling per introdurre i bambini ai concetti di economia circolare.

4.2 Indicatori nei modelli di business

L’analisi della letteratura e, più specificatamente dei casi studio, mette in risalto come l’integrazione della sostenibilità nei modelli di *business* richieda il passaggio da una logica puramente economica a una prospettiva multidimensionale che incorpori, esplicitamente, indicatori sociali e ambientali. Per visualizzare e misurare queste dimensioni, risulta fondamentale avvalersi di strumenti come il *Triple Layered Business Model Canvas* (TLBMC) e il *Business Model Canvas for Sustainability* (BMCS), permettendo così di identificare tensioni, benefici e opportunità di innovazione [116].

4.2.1 Indicatori sociali

Gli indicatori sociali rappresentano strumenti chiave per valutare l’impatto dei modelli di *business* circolari sul benessere delle persone, dei lavoratori e delle comunità locali. Nei modelli sostenibili, la dimensione sociale va oltre la tradizionale responsabilità d’impresa, diventando un elemento centrale di creazione di valore, governance e relazione con il territorio. Essa include non solo l’accettazione di mercato dei prodotti, ma anche gli effetti su inclusione, qualità del lavoro e partecipazione. Integrare

indicatori sociali consente così di analizzare i modelli di business in maniera multidimensionale, considerando aspetti economici, ambientali e sociali.

Un indicatore qualitativo trasversale riguarda la capacità del modello di *business* di agire come catalizzatore sociale per la comunità, trasformando i luoghi di consumo o produzione in spazi di forte interazione sociale. Nel caso del settore della moda sostenibile, ad esempio, alcune aziende non puntano solo a consolidare la base clienti, ma mirano a costruire vere e proprie comunità di persone con valori condivisi (*like-minded people*) attraverso l'organizzazione di eventi e attività collettive. In questo contesto, si inserisce il “*full moon swims*”, che non rappresenta solo un'attività di *marketing*, ma anche un'occasione di generazione di capitale sociale, favorendo l'incontro tra individui e rafforzando il senso di appartenenza alla comunità. Più nello specifico, indicatori sociali come inclusione, equità ed *empowerment* permettono di valutare come un modello di *business* affronta la tematica della disuguaglianza, sia da un punto di vista della forza lavoro che dal punto di vista dei consumatori e produttori.

Un forte indicatore di successo sociale è l'integrazione di gruppi emarginati: il caso *Refished*, azienda con sede a Vienna che produce accessori tramite *upcycling*, dimostra valore sociale impiegando vittime di mine antiuomo e persone con disabilità fisiche in Cambogia, una categoria che in quel contesto geografico faticerebbe enormemente a trovare un impiego formale. Il modello di business è strutturato per restituire dignità e riconoscimento ad una categoria di lavoratori vulnerabili tramite la firma dell'artigiano sul prodotto per combattere l'anonimato tipico della produzione tessile di massa. Oltre al salario equo, il valore sociale generato risiede nel riconoscimento pubblico del lavoratore e, per garantire ciò, i profili dei lavoratori sono presentati sul sito web dell'azienda conferendo loro un'identità professionale e una voce.

Analogamente ma con un approccio differente, *RubyMoon*, marchio britannico di costumi da bagno e abbigliamento sportivo, investe il 100% dei propri profitti in micro-prestiti per donne imprenditrici nei paesi di sviluppo, misurando il successo in termini di numero di donne supportate [116]. La letteratura e i dati delle Nazioni Unite evidenziano come l'accesso delle donne a una fonte di reddito stabile generi effetti positivi a livello familiare e comunitario. In particolare, il reddito femminile tende a essere destinato con maggiore probabilità a bisogni essenziali quali nutrizione, alloggio e istruzione dei figli, creando un effetto a cascata con benefici diffusi per le comunità. Un elemento distintivo di questo modello è rappresentato dalla cosiddetta "circularità del capitale": quando i prestiti vengono rimborsati dalle

imprenditrici, il capitale non torna come profitto agli azionisti, ma viene invece reinvestito in nuovi prestiti per altre donne, creando un ciclo virtuoso in cui lo stesso capitale continua a generare impatto sociale ripetutamente nel tempo.

Il modello di business della “Cooperativa X” (un'organizzazione non-profit rimasta anonima) evidenzia come uno degli elementi centrali della proposta di valore è l'inclusività alimentare. Il mercato agroalimentare convenzionale, fortemente influenzato dagli standard della grande distribuzione organizzata, come calibro, forma, e colore, portano all'esclusione di ingenti quantità di frutta e verdura perfettamente commestibili ma non conformi da un punto di vista estetico. Il caso di studio mostra che il successo dell'indicatore sociale deriva dalla ridefinizione della qualità, privilegiando il valore nutraceutico e l'accessibilità economica rispetto all'estetica. Il modello educa i consumatori ad accettare prodotti imperfetti, riducendo lo spreco alimentare, mentre le aziende agricole beneficiano della riduzione dei costi di smaltimento, garantendo sostenibilità economica e sociale.

Per i modelli di business basati su nuove tecnologie o sulla valorizzazione dei biorifiuti, l'accettazione sociale è un prerequisito qualitativo per l'operatività. Spesso nel contesto della bioeconomia, in particolare quando si tratta di trasformare rifiuti in prodotti nutrizionali (come proteine da insetti o da microbi) o fertilizzanti, l'accettazione sociale è inevitabilmente condizionata da barriere psicologiche e culturali. Lo studio condotto nelle città di Murcia (Spagna) e Kalundborg (Danimarca) [117] ha rivelato che l'accettazione di nuovi prodotti derivati da biorifiuti non è uniforme e, sebbene i cittadini siano generalmente informati, mancano di esperienza diretta: prerogativa essenziale per contrastare l'incertezza riguardante l'utilizzo di prodotti *bio-based*. Studi dimostrano che l'accettazione sociale dipenda in gran parte dalla fiducia nelle istituzioni e dalla percezione della sicurezza sanitaria del prodotto, di conseguenza, questo indicatore viene fortemente influenzato dal livello di istruzione dei cittadini: maggiore è la comprensione del processo scientifico che porta alla creazione di un determinato prodotto, minore sarà la percezione del rischio. Tuttavia, l'educazione non ha uno scopo esclusivamente informativo ma si afferma come un vero e proprio strumento operativo per migliorare la qualità tecnica del modello di business. Un esempio tangibile dell'impatto dell'educazione proviene da un progetto pilota nazionale in Irlanda, citato nel progetto europeo SCORE [118]: attraverso una campagna "porta a porta" e la fornitura di strumenti adeguati come contenitori da cucina e sacchetti compostabili, il tasso di contaminazione nei rifiuti organici è crollato dal 18% all'1%. Tutto ciò va a sostegno della tesi secondo cui il cittadino, se educato e supportato,

diventa un *partner* attivo nella catena del valore, migliorando direttamente l'efficienza economica e tecnica degli impianti di trattamento a valle. Le fonti, infatti, sottolineano che evitare i contaminanti alla fonte, nel rifiuto non trattato, è il modo più efficace per garantire la qualità del prodotto finale.

Durante la revisione dei modelli di *business* sostenibili presenti nei casi studio, figurano altri indicatori sociali fondamentali: la qualità delle relazioni e la struttura di potere. Essere in grado di dimostrare la provenienza locale delle proprie materie prime rappresenta un indicatore di integrità etica che costruisce fiducia, mitigando lo scetticismo verso un presunto fenomeno di *greenwashing* [116].

Il caso di *Da Tribu* [119], un'impresa di bio-gioielli in Amazzonia, rappresenta un esempio paradigmatico di come un modello di *business* sostenibile possa essere costruito attorno al rispetto profondo delle "tecnologie sociali" ancestrali, rifiutando le logiche estrattive e coloniali tipiche di molti approcci economici nella regione. Le "tecnologie sociali" ancestrali devono essere intese come un processo politico e sociotecnico che include metodi organizzativi e saperi tramandati, l'esempio più importante è quello dell'estrazione del lattice, definito come l'oro bianco dell'Amazzonia.

In questo caso, il sapere ancestrale delle comunità indigene insegna che l'albero della gomma deve far fluire il lattice all'esterno per rimanere sano e, se così non fosse, si genererebbero accumuli che potrebbero compromettere la vitalità della pianta. Tale prospettiva, radicata nell'osservazione quotidiana delle popolazioni della foresta, si pone in netto contrasto con le pratiche tipiche delle monocolture intensive – come quelle diffuse nello Stato di San Paolo – nelle quali l'albero viene trattato unicamente come una risorsa da sfruttare fino al suo esaurimento [119]. Questa pratica, dunque, si traduce in una strategia di gestione sostenibile che garantisce la sopravvivenza biologica dell'albero e la qualità della materia prima, rappresentando una "tecnologia sociale protetta" passata di generazione in generazione.

Lo studio mette in risalto come l'approccio canonico alla bioeconomia rischi spesso di ricorrere a modelli coloniali di imprenditorialità, dove le comunità locali sono viste unicamente come fornitrici di materie prime a basso costo. *Da Tribu* inverte questa logica attraverso decisioni operative specifiche: (i) mantenere produzione e macchinari all'interno della comunità anziché spostare l'attività a Belém, la capitale. Mantenere la produzione in loco comunica ai residenti che esistono modi per emanciparsi preservando il proprio territorio: (ii) il modello non impone metodi esterni ma integra l'estrazione tradizionale con le tecnologie contemporanee sviluppate in co-creazione. Questo processo di adattamento permette di riprendere l'estrazione del lattice in territori dove era stata abbandonata da decenni, rivitalizzando una

pratica culturale ed economica; (iii) la valorizzazione del sapere locale trasforma la comunità da fornitore passivo a protagonista attivo del modello di *business*.

Il successo del modello si misura nella capacità di non separare la conoscenza locale dalla concezione del *business*. Le comunità partecipano attivamente allo sviluppo del prodotto, inserendosi in processi a maggior valore aggiunto che pagano un prezzo più alto, evitando di conseguenza lo sfruttamento delle risorse.

In conclusione, l'analisi dimostra che la dimensione sociale nei modelli di *business* sostenibili trascende la semplice responsabilità d'impresa per divenire una leva strategica di resilienza e legittimazione, in cui la capacità di co-creare valore con le comunità locali, integrando saperi tradizionali e garantendo l'inclusività, non rappresenta solo un imperativo etico, ma una condizione strutturale indispensabile per assicurare la vitalità sociale ed economica a lungo termine dell'impresa.

L'analisi comparativa dei casi studio presentati precedentemente ha permesso di individuare un insieme ricorrente di indicatori utilizzati per valutare la dimensione sociale dei modelli di valorizzazione del *biowaste*. A partire da tali evidenze, è stato possibile raggruppare gli indicatori sociali in due macrocategorie principali: (i) indicatori relativi all'**accettazione sociale e di mercato** (60%) e (ii) indicatori che misurano l'**impatto diretto sulla forza lavoro e sulla comunità coinvolta** (40%).

Per quanto concerne la prima categoria, gli indicatori individuati sono:

1. **Social acceptance**: rappresenta il grado di consenso e di accettazione da parte della popolazione nei confronti di tecnologie o pratiche legate alla bioeconomia circolare. Viene misurata attraverso delle *survey* come % di cittadini o *stakeholder* che dichiarano un atteggiamento favorevole verso l'utilizzo di scarti agricoli o di materiali derivati dal *biowaste*. Questo parametro consente di valutare il livello di legittimazione sociale delle innovazioni proposte e di identificare eventuali resistenze o criticità legate alla percezione pubblica
2. **Political acceptance**: viene misurata attraverso il livello di supporto politico e mira a valutare l'appoggio delle istituzioni per le soluzioni di bioeconomia circolare. Valuta, inoltre, la presenza di un quadro normativo favorevole, evitando barriere burocratiche legate ai criteri di cessazione della qualifica di rifiuto che possono bloccare l'implementazione tecnologica

3. **Market acceptance:** riflette la maturità di un mercato nel recepire i bioprodotti rispetto alle alternative fossili consolidate ed è espressa come % di consumatori disposti ad acquistare/adottare bioprodotti
4. **Willingness to pay (WTP):** rappresenta il valore monetario (espresso in € o altre valute) che i consumatori sono disposti a pagare per prodotti con caratteristiche specifiche. L'indicatore consente quindi di identificare segmenti di mercato disposti a pagare un sovrapprezzo per prodotti ad alto valore ambientale e/o sociale
5. **Consumption willingness:** Valuta l'intenzione d'uso di materiali derivati da *biowaste* da parte di attori specifici della filiera. Viene spesso misurata tramite *survey* basate su scale di gradimento (ad esempio, scala *Likert* da 1-5 o 1-7) che permette di determinare il grado di propensione di agricoltori e consumatori all'uso e adozione di materiali provenienti da *biowaste*
6. **Consapevolezza:** indicatore qualitativo misurato attraverso la presenza di campagne di sensibilizzazione o tramite la percentuale di rispondenti che dichiarano di conoscere i prodotti e i processi circolari.

Da un punto di vista più prettamente sociale è possibile misurare gli impatti diretti sulla forza lavoro e sulle comunità attraverso i seguenti indicatori:

1. **Creazione di occupazione:** Numero di posti di lavoro generati nell'ambito della sostenibilità e numero di imprese coinvolte nella filiera.
2. **Educazione e competenze:** Misurata in numero di ore di formazione o corsi completati, per valutare il miglioramento delle competenze della comunità e l'accrescimento del capitale umano
3. **Salute e sicurezza (H&S):** Monitorata tramite il Numero di incidenti (*LTI - Lost Time Injuries*) sul lavoro e le ore di formazione sulla sicurezza (H&S), oltre ai livelli di esposizione a patogeni, per quantificare i costi sociali evitati
4. **Inclusività:** Monitorata tramite la % di donne in posizioni di *leadership* e la % di minoranze impiegate, per assicurare equità nella nuova filiera.

L'uso di indicatori normalizzati permette la comparabilità scientifica con i fertilizzanti sintetici, mentre le metriche sociali trasformano la percezione pubblica in dati analizzabili. Questo approccio *data-driven*,

supportato dai riferimenti bibliografici e dai casi studio analizzati, fornisce la base per validare la sostenibilità economica e ambientale della filiera proposta.

4.2.2 Indicatori ambientali

La dimensione ambientale è monitorata attraverso indicatori convenzionali che valutano l'efficienza del processo, la qualità del prodotto finale e l'impatto sul cambiamento climatico con lo scopo di assicurare una base scientificamente solida nel confronto tra i prodotti Bin2Bean e le alternative convenzionali. Per essere certi di valutare ogni aspetto della sostenibilità ambientale, sono stati considerati diversi indicatori quantitativi. Tali indicatori consentono di confrontare le prestazioni dei diversi processi di valorizzazione del biowaste: valori inferiori degli impatti ambientali e una maggiore efficienza nell'uso delle risorse indicano una maggiore sostenibilità del sistema analizzato.

- **Indicatori normalizzati (35,7%):** sono parametri quantitativi che permettono di fare un confronto scientifico tra prodotti derivati da *biowaste* e i corrispettivi prodotti di sintesi con lo scopo di misurare l'impronta ambientale relativa e i benefici sistemici;
- **Indicatori per l'operatività degli impianti (35,7%):** vi rientrano gli indicatori fondamentali per monitorare l'efficienza e la performance operativa dei processi produttivi all'interno degli impianti di trattamento;
- **Indicatori di sicurezza (28,6%):** valutano la sicurezza ecologia e umana del prodotto finale attraverso rigide soglie quantitative garantendo che l'ammendante sia sicuro per l'uso agricolo e rispetti i limiti di legge.

Nello specifico, per quanto concerne gli indicatori normalizzati è possibile quantificare:

1. **Aumento del carbonio organico nel suolo:** viene misurato attraverso i kg di CO₂ equivalente evitati per tonnellata di rifiuto trattato ed è in grado di quantificare la riduzione delle emissioni legate alla produzione di fertilizzanti chimici, nello specifico emissioni di N₂O e CO₂, dimostrando la minore impronta di carbonio del compost e del digestato rispetto alle opzioni sintetiche
2. **Potenziale di eutrofizzazione (EP):** viene misurato attraverso i kg di ione fosfato eq/ton e valuta l'impatto sul rilascio di nutrienti (fosforo e azoto) per confrontare la dispersione dei fertilizzanti *bio-based* rispetto a quelli chimici

3. **Potenziale di acidificazione (AP):** viene misurato in kg di SO₂ eq/ton ed è in grado di quantificare le emissioni acidificanti come NO_x, NH₃, SO₂ verificando, al contempo, la riduzione dell'impatto dei processi di digestione e compostaggio
4. **Potenziale di creazione di ozono fotochimico (POCP):** viene misurato in kg di C₂H₄ eq/ton monitorando la formazione di ozono troposferico dovuta alle emissioni di composti volatili, stimando i benefici del compostaggio controllato
5. **Sequestro di carbonio:** viene misurato in tonnellate di carbonio per ettaro o kg di CO₂ equivalenti sequestrati per tonnellata di *feedstock*. Quantifica la rimozione di CO₂ atmosferica stoccata nel suolo tramite l'ammendante.

Altri parametri fondamentali sono quelli utilizzati per monitorare l'operatività degli impianti, gli indicatori emersi dallo studio della letteratura sono:

1. **Recupero di risorse:** espresso come % di materiali recuperati o compostati, indicando l'efficienza nell'uso delle risorse e l'utilizzo di materiali riciclati
2. **Consumo energetico:** stimato in Megawattora (MWh) o kilowattora (kWh), permettendo di monitorare e ottimizzare l'utilizzo di energia nei processi operativi
3. **Ottimizzazione idrica ed energetica:** viene monitorata attraverso i metri cubi di acqua e la % di riduzione dei consumi per misurare l'eco-efficienza del processo produttivo
4. **Capacità di trattamento:** espressa in tonnellate/anno, definisce la quantità di *biowaste* che l'impianto è in grado di processare e deviare dalla discarica
5. **Riduzione rifiuti in discarica:** misurata in tonnellate di rifiuti ridotti o deviati in discarica, quantificando il successo del modello nel trasformare un output negativo in un input di valore.

Infine, viene valutata anche sicurezza ecologica e umana del prodotto finale attraverso rigide soglie quantitative:

1. **Concentrazione di contaminanti:** misurati in mg/kg di DM (*Dry Matter*) per attestare il rispetto dei limiti di legge nei prodotti finali
2. **Contaminazione da microplastiche:** la quantificazione avviene tramite un parametro definito "abbondanza" che indica il numero di particelle per kg di peso secco o, in alternativa, attraverso

la percentuale in peso (% w/w). È prevista, inoltre, una caratterizzazione dimensionale (< 1 mm) e polimerica.

3. **Potenziale di tossicità umana (HTP):** misurato in kg di 1,4-diclorobenzene eq / ton e stima gli effetti delle emissioni tossiche convertendole in quantità equivalenti della sostanza di riferimento.
4. **Riduzione dilavamento nitrati:** viene misurato in tonnellate/anno e calcola la quantità di nitrati non assorbiti che rimangono nelle falde, dimostrando il rilascio graduale di azoto nei fertilizzanti *biobased*

Complessivamente, l'insieme di questi indicatori consente una valutazione integrata e scientificamente solida delle prestazioni ambientali, operativi e di sicurezza dei sistemi di valorizzazione del *biowaste*, fornendo basi quantitative per orientare soluzioni strategiche e permettendo di promuovere soluzioni circolari realmente sostenibili.

I risultati qualitativi relativi alla dimensione ambientale dimostrano che le imprese che adottano questi strumenti non si limitano a mitigare gli impatti negativi ma si impegnano attivamente nella rigenerazione delle risorse attraverso strategie di circolarità e innovazione di processo.

Un aspetto cruciale riguarda la capacità del modello di *business* di riconfigurare i rifiuti come risorse, in coerenza con i principi dell'economia circolare. Esempi virtuosi di indicatori che ricalcano questi principi arrivano prevalentemente dal settore della gestione dei rifiuti urbani dove l'innovazione qualitativa del modello di business risiede nel passaggio da un approccio lineare ad uno rigenerativo: la classica produzione di *biochar* attraverso residui di potatura non viene più vista esclusivamente come metodo di smaltimento bensì si traduce in una strategia in grado di quantificare conseguentemente il *sequestro di carbonio* migliorando al contempo la qualità del suolo urbano e trasformando un onere gestionale in un servizio ecosistemico ad alto valore ambientale [120]. Analogamente, è emerso che le cooperative impegnate nel settore agroalimentare optano per modelli basati sul recupero di prodotti esteticamente imperfetti, permettendo di definire uno degli indicatori cardine di questo elaborato: il *recupero delle risorse* lungo tutta la catena del valore e promuovendo la cultura del riutilizzo [121].

Una pratica consolidata per le strategie di rivalorizzazione è l'adozione di tecnologie avanzate che emergono chiaramente come *driver* qualitativo per la sostenibilità ambientale. Ne è un esempio l'utilizzo di nanotecnologie: studi recenti hanno esplorato l'utilizzo di bio-nano fertilizzanti utilizzando materiali

come il chitosano, un biopolimero estratto dagli scarti alimentari, la cui matrice polimerica viene rinforzata mediante l'aggiunta di micro-cellulosa e micro-carbonio (materiale carbonioso a scala micrometrica) derivati dai residui fibrosi della palma da olio. In questo contesto, tali componenti agiscono come materiali di rinforzo (*reinforcing materials*), contribuendo a migliorare le proprietà fisiche e funzionali del materiale. In particolare, il loro inserimento nella matrice di chitosano consente di aumentarne la resilienza meccanica e di controllare il rilascio dei nutrienti, evitando che vengano dilavati troppo rapidamente nel suolo. Attraverso questi processi, è infatti possibile "ingegnerizzare" il fertilizzante su scala nanometrica per garantire un rilascio controllato dei nutrienti, ottenendo al tempo stesso prestazioni maggiori rispetto ai prodotti convenzionali riducendo (i) fenomeni di lisciviazione, (ii) migliorando l'efficienza nell'assorbimento dei nutrienti e (iii) permettendo una minor frequenza di applicazione. Il valore ambientale, però, non si limita al mero riciclo dello scarto delle fasi di produzione dell'olio di palma ma, al contrario, viene traslato in modo significativo sulla fase d'uso del prodotto agricolo, determinando vantaggi ambientali diretti che si generano nel momento in cui il fertilizzante viene effettivamente applicato e utilizzato nel terreno. Grazie al rilascio controllato, infatti, è possibile controllare al meglio la *lisciviazione dei nutrienti*, fenomeno responsabile dell'inquinamento delle acque. Così facendo, è possibile evitare applicazioni ripetute ed eccessive di fertilizzanti chimici, proteggendo la salute del suolo a lungo termine [122].

L'impiego di tecnologie avanzate consente inoltre di monitorare in modo accurato l'efficienza energetica e l'operatività degli impianti. Sulla base di questo indicatore è stato possibile condurre un'analisi comparativa tra differenti sistemi di compostaggio, dalla quale il compostaggio in cumuli rivoltati emerge come la soluzione più efficiente, con un consumo energetico pari a 33 MJ/t [107]. Dai casi studio analizzati, l'esempio più esemplificativo di ottimizzazione energetica risulta essere quello del parco eco-industriale di Kalundborg (Danimarca) [123], dove attraverso un ecosistema industriale a ciclo chiuso completo, le aziende partecipanti sono in grado di acquistare e vendere materiali residui, acqua ed energia tra loro riducendo i rifiuti, l'inquinamento e generando reddito aggiuntivo e risparmi economici per le imprese coinvolte.

Dalla disamina dei modelli di *business* sostenibili nel settore della ristorazione, invece, emerge che la localizzazione geografica delle catene di fornitura non fa unicamente parte di una scelta logistica ma diventa parte integrante della proposta di valore ambientale. L'approvvigionamento di materie prime a

livello locale viene percepito dagli imprenditori orientati verso pratiche sostenibili non solo come un modo diretto per ridurre *l'impronta di carbonio* ma come un vero e proprio imperativo etico. Nel contesto della caffetteria di Bandung, in Indonesia [124], la scelta consapevole di impiegare chicchi di caffè provenienti da agricoltori locali è esplicitamente citata come una strategia per ridurre le distanze di trasporto e le emissioni associate. Questo approccio risulta perfettamente in linea con le filiere agricole specializzate, dove l'approvvigionamento di materia prima locale favorisce un'impronta di trasporto minima e relazioni dirette con i produttori. Nel complesso, l'analisi qualitativa dei casi studio evidenzia come tali pratiche riflettano una trasformazione più ampia nel modo in cui la sostenibilità ambientale viene integrata nei modelli di valorizzazione del *biowaste*.

I risultati qualitativi relativi alla dimensione ambientale delineano un cambio di paradigma fondamentale: la sostenibilità non è più intesa come banale "eco-efficienza" o conformità normativa ma evolve verso una logica rigenerativa e circolare.

4.3 Principi fondamentali della politica e normativa Europea sui rifiuti

La politica dell'Unione Europea in materia di rifiuti si fonda su un insieme di principi giuridici e strategici che ne definiscono la logica e gli obiettivi. Questi principi hanno guidato una profonda evoluzione, trasformando la gestione dei rifiuti da un problema di sanità pubblica e ambientale a un pilastro fondamentale della strategia per un'economia circolare e un uso efficiente delle risorse [125, 126].

La gestione dei rifiuti urbani comprende diverse fasi interconnesse: raccolta, trasporto, trattamento e smaltimento. Le tecnologie di trattamento, pur essendo indispensabili, possono generare a loro volta forme di inquinamento secondario e sottoprodotti che richiedono ulteriori operazioni di gestione, come il gas di discarica (LFG), le scorie da incenerimento, il biogas e il digestato derivante dalla digestione anaerobica. Per questo motivo, la gestione dei rifiuti organici urbani deve essere affrontata secondo una prospettiva sistemica e integrata, basata su un approccio analitico e quantitativo multi-obiettivo, capace di valutare e ottimizzare le interazioni tra le diverse componenti del sistema al fine di individuare soluzioni sostenibili ed efficienti a livello ambientale, economico e sociale [127].

4.3.1 La direttiva quadro sui rifiuti: direttiva 2008/98/CE

La Direttiva 2008/98/CE, nota come Direttiva Quadro sui Rifiuti (DQR), rappresenta l'atto legislativo fondamentale che consolida e struttura l'approccio moderno dell'UE alla gestione dei rifiuti. La DQR ha introdotto e formalizzato specifici concetti fondamentali in materia: ha stabilito la gerarchia dei rifiuti a cinque livelli come principio guida vincolante, ha fornito le definizioni legali di "rifiuto", "recupero", "smaltimento" e ha definito e introdotto per la prima volta i criteri per la cessazione della qualifica di rifiuto (*end-of-waste*) e di sottoprodotto.

In particolare, l'efficacia del quadro normativo dipende da definizioni giuridiche precise che determinano l'ambito di applicazione delle norme:

- **Rifiuto:** "qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi" (articolo 3, punto 1).
- **Rifiuti Urbani:** Definiti dalla Direttiva (UE) 2018/851, includono i rifiuti domestici (indifferenziati e differenziati) e i rifiuti provenienti da altre fonti (come commercio, uffici, istituzioni) che sono simili per natura e composizione ai rifiuti domestici. La definizione elenca specificamente carta, vetro, metalli, plastica, rifiuti organici, tessili e imballaggi. Esclude esplicitamente i rifiuti della produzione, dell'agricoltura, della silvicoltura e della pesca.
- **Sottoprodotto:** Un residuo di produzione può non essere considerato un rifiuto se soddisfa quattro condizioni cumulative (articolo 5): è certo il suo ulteriore utilizzo; può essere utilizzato direttamente senza trattamenti diversi dalla normale pratica industriale; è prodotto come parte integrante di un processo di produzione; il suo ulteriore utilizzo è legale.
- **Cessazione della qualifica di rifiuto (*End-of-Waste - EoW*):** Un rifiuto che ha subito un'operazione di recupero (incluso il riciclaggio) cessa di essere tale se soddisfa quattro condizioni (articolo 6): la sostanza o l'oggetto è destinato a scopi specifici; esiste un mercato o una domanda; soddisfa i requisiti tecnici e le norme applicabili ai prodotti; il suo utilizzo non comporterà impatti negativi sulla salute o sull'ambiente

La gerarchia dei rifiuti non è solo una linea guida, ma una preferenza di valore legalmente sancita, e le definizioni di "sottoprodotto" e "*End-of-Waste*" offrono percorsi legali chiari per consentire ai materiali di uscire dal regime dei rifiuti e rientrare nel ciclo economico come prodotti a tutti gli effetti. Questo

sistema non si limita a regolamentare il rifiuto come un problema da gestire, ma lo ridefinisce attivamente come una potenziale risorsa, costruendo un vero e proprio motore legale che spinge l'intera catena del valore verso la circolarità.

Questa gerarchia stabilisce un ordine di priorità per le politiche e le azioni di gestione dei rifiuti, basato sulla loro desiderabilità ambientale. L'ordine di priorità è il seguente:

- **Prevenzione:** Misure volte a ridurre la quantità di rifiuti prodotti, anche attraverso la progettazione ecologica, il riutilizzo dei prodotti e l'estensione della loro vita utile.
- **Preparazione per il riutilizzo:** Operazioni di controllo, pulizia e riparazione attraverso cui prodotti o componenti diventati rifiuti sono preparati per essere reimpiegati senza altro pretrattamento.
- **Riciclaggio:** Qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di scarto sono ritrattati per ottenere nuovi prodotti, materiali o sostanze. Include il compostaggio ma esclude il recupero energetico.
- **Recupero di altro tipo:** Include operazioni come l'incenerimento con recupero di energia, a condizione che avvenga con un elevato livello di efficienza energetica.
- **Smaltimento:** L'opzione meno desiderabile, che comprende il conferimento in discarica e l'incenerimento senza recupero di energia. È considerata qualsiasi operazione che non sia di recupero.

Gli obiettivi di questo principio sono duplici: minimizzare gli impatti negativi della produzione e gestione dei rifiuti sulla salute umana e sull'ambiente, e migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse. La Direttiva Quadro sui Rifiuti (DQR) stabilisce che gli Stati membri debbano discostarsi da questa gerarchia solo se giustificato da un'analisi del ciclo di vita (*Life-Cycle Thinking*) per specifici flussi di rifiuti.

4.3.2 La Direttiva sulle Discariche (1999/31/CE): il punto di partenza per la riduzione dello smaltimento

Adottata quasi un decennio prima della DQR, la Direttiva 1999/31/CE sulle discariche ha rappresentato il primo, decisivo passo per allontanare l'Europa dal modello basato sullo smaltimento. Il suo scopo era prevenire o ridurre il più possibile gli effetti negativi delle discariche sull'ambiente e sulla salute umana. Per raggiungere questo obiettivo, la direttiva ha introdotto requisiti tecnici rigorosi per la progettazione, la gestione e la chiusura delle discariche, come i sistemi di impermeabilizzazione, la raccolta del

percolato e la captazione del biogas. Fondamentalmente, ha agito come un potente "fattore di spinta" (*push factor*), rendendo il conferimento in discarica, l'opzione più bassa nella gerarchia, più complesso e costoso. L'elemento più innovativo è stata l'introduzione, all'articolo 5, di obiettivi vincolanti per la progressiva riduzione della quantità di rifiuti urbani biodegradabili da collocare in discarica. Questa misura mira specificamente a contrastare la produzione di metano, un potente gas serra generato dalla decomposizione anaerobica dei rifiuti organici in discarica.

4.3.3 Verso una gestione circolare dei rifiuti: dal CEAP al Pacchetto Economia Circolare

Il quadro legislativo è stato progressivamente consolidato con l'adozione del **Piano d'Azione per l'Economia Circolare (CEAP)** (CEAP, 2020) strumento principale per l'attuazione concreta del *Green Deal* europeo. Il piano definisce obiettivi quantitativi e concreti tra cui: il raggiungimento di un tasso di riciclaggio dei rifiuti municipali pari al 55% entro il 2025 con un incremento progressivo fino al 65% entro il 2035, un limite massimo del 10% dei rifiuti urbani conferiti in discarica entro la stessa data e l'introduzione dell'obbligo di raccolta differenziata dei rifiuti organici entro il 21 dicembre 2023 e dei tessili entro il 2025.

Questi traguardi si collocano all'interno di una più ampia strategia dell'*European Green Deal*, che mira alla neutralità climatica entro il 2050 e ad una crescita sostenibile capace di conciliare competitività economica, riduzione delle emissioni e rigenerazione delle risorse naturali.

Nel febbraio 2025 è stato raggiunto un accordo provvisorio per rivedere il *Waste Framework Directive* (WFD), che segna un significativo passo avanti nell'ambizione dell'Unione di passare a una bioeconomia circolare e capace di adattarsi ai cambiamenti climatici. Al centro di questa revisione ci sono i nuovi obiettivi vincolanti per la riduzione degli sprechi alimentari, che includono un taglio del 10% nei settori della trasformazione e della produzione alimentare e una riduzione pro capite più ambiziosa del 30% nei settori della vendita al dettaglio di prodotti alimentari, dei servizi alimentari e delle famiglie, tutti da raggiungere entro il 2030.

Aumentare le misure per ridurre gli sprechi alimentari attraverso la catena del valore (prevenzione, ridistribuzione e una migliore separazione alla fonte) permetterà un aumento significativo del volume e della qualità dei rifiuti organici separati che entrano nel sistema di raccolta.

Il 2018 ha segnato una svolta decisiva con l'adozione del **Pacchetto Economia Circolare**, un insieme di direttive che hanno profondamente modificato la legislazione esistente per allinearla a una visione più ambiziosa. Le due modifiche principali sono state:

- **Direttiva (UE) 2018/850:** Ha modificato la Direttiva sulle discariche, introducendo un obiettivo cruciale: la riduzione del collocamento in discarica di tutti i rifiuti urbani a un massimo del 10% del totale prodotto entro il 2035
- **Direttiva (UE) 2018/851:** Ha modificato la DQR, rafforzando la gerarchia dei rifiuti e introducendo nuovi e ambiziosi obiettivi di riciclaggio per i rifiuti urbani, con scadenze progressive fino al 2035. Ha inoltre reso obbligatoria la raccolta differenziata per specifici flussi, tra cui i rifiuti organici.

Nello specifico, la direttiva (UE) 2018/851 introduce per la prima volta il termine *biowaste*, con il quale si vanno ad indicare: rifiuti biodegradabili di giardini e parchi, rifiuti alimentari e di cucina prodotti da nuclei domestici, uffici, ristoranti, attività all'ingrosso, mense, servizi di ristorazione e punti vendita al dettaglio e rifiuti equiparabili prodotti dagli impianti nell'industria alimentare.

La direttiva europea impone agli Stati membri di garantire entro il 31 dicembre 2023 la raccolta differenziata dei rifiuti organici o, in alternativa, il loro trattamento locale (es. compostaggio domestico). L'obiettivo è ridurre lo smaltimento in discarica, produrre compost e digestato e chiudere il ciclo dei nutrienti tramite ammendanti organici. La direttiva prevede inoltre criteri di *end-of-waste* per garantire qualità e sicurezza dei prodotti derivati dai rifiuti organici. Entro il 2035, almeno il 65% dei rifiuti urbani dovrà essere riciclato e il conferimento in discarica non dovrà superare il 10%. Queste norme stanno stimolando città europee a implementare modelli avanzati di gestione dei *biowaste*, con benefici ambientali significativi, come riduzione delle emissioni, recupero dei nutrienti e creazione di nuove filiere locali.

L'evoluzione legislativa dimostra un chiaro "effetto a cricchetto" (*legislative ratchet effect*). La Direttiva sulle discariche del 1999 ha creato la pressione iniziale, costringendo gli Stati membri a cercare alternative allo smaltimento. La DQR del 2008 ha fornito la visione strategica e gli strumenti giuridici

(gerarchia, EoW) per guidare questo cambiamento. Infine, il Pacchetto Economia Circolare del 2018 ha alzato drasticamente l'asticella, fissando obiettivi non negoziabili e accelerando la transizione. Ogni atto legislativo si è basato sul precedente, rendendo il sistema progressivamente più stringente e ambizioso, e orientando in modo irreversibile gli investimenti e le politiche nazionali verso la circolarità.

È importante però notare che le politiche dell'UE possono fungere sia da incentivo che, in alcuni casi, da limitazione alla transizione verso l'uso circolare dei rifiuti organici come ammendanti. Da un lato, il quadro normativo fornisce obiettivi chiari, standard di qualità e strumenti di mercato che stimolano la valorizzazione dei rifiuti organici [128] d'altra parte, le differenze significative tra Stati membri, regioni e città spesso si traducono in un'attuazione irregolare delle direttive e in un panorama politico frammentato [129]. Questa eterogeneità può creare incertezza per i produttori e i consumatori dei *soil-improvers* e potrebbe rallentare lo sviluppo del mercato. Dunque, la dualità che caratterizza questo sistema, potrebbe essere determinante per il successo della transizione circolare in Europa.

Questa eterogeneità normativa si manifesta anche nelle fasi operative iniziali del processo. Un esempio importante è la qualità della raccolta differenziata, che rappresenta un elemento fondamentale per le caratteristiche finali degli ammendanti prodotti. In questo contesto, dove il modello di raccolta “porta a porta” permette di raggiungere tassi di intercettazione elevati con una piccola parte di contaminanti, mentre il sistema dei contenitori stradali risulta meno performante, seppur ancora presente in numerosissime aree, causando una maggiore contaminazione da materiali non compostabili e incentivando l'aumento dei costi per il trattamento e una riduzione della qualità del prodotto finale (ISPRA, 2024).

Questa differenza qualitativa si riversa inevitabilmente sul mercato degli ammendanti, limitando la diffusione dei prodotti che, pur avendo una certa validità a livello agronomico, non raggiungono determinati standard di qualità a causa della mancanza di uniformità dei modelli di raccolta tra i diversi paesi europei quelli che non raggiungono determinati standard di qualità pur avendo una certa validità a livello agronomico. Tali standard dipendono strettamente dalle politiche di “*End-of-waste*” che variano notevolmente nei diversi stati membri. L'incertezza normativa che ne deriva limita gli investimenti in nuovi impianti e ostacola lo sviluppo di un mercato competitivo e transfrontaliero [130].

4.3.4 La legislazione per i suoli e prodotti fertilizzanti

In Europa, la regolamentazione dei fertilizzanti è ormai armonizzata tramite il **Regolamento UE 2019/1009**, che garantisce qualità, sicurezza e marcatura CE anche per prodotti derivati dai rifiuti organici, integrandoli nei cicli di economia circolare. La protezione del suolo ha seguito percorsi separati e solo dal 2022 si sta sviluppando una strategia più concreta, supportata dalla **Direttiva sul Monitoraggio del Suolo**, che raccoglie dati sulla salute del suolo per orientare politiche e pratiche agricole a livello locale e continentale.

Infine, nel quadro della *EU Biodiversity Strategy* per migliorare la gestione del suolo, proteggere la fertilità, ridurre l'erosione e l'impermeabilizzazione, accrescere la sostanza organica e riportare tutti gli ecosistemi in condizioni di buona salute entro il 2050 rientra la **Strategia per il suolo 2030**. Questi regolamenti costituiscono il fulcro di un quadro normativo più ampio, riconducibile agli obiettivi strategici del *Green Deal europeo*, delineando un approccio integrato alla rigenerazione del suolo e alla sicurezza alimentare.

Il quadro normativo precedente, il Regolamento (CE) n. 2003/2003, presentava un campo di applicazione molto ristretto, riguardando quasi esclusivamente i concimi inorganici di origine minerale o sintetica, e lasciando di conseguenza circa la metà dei fertilizzanti presenti sul mercato, inclusi i concimi organici, gli ammendanti e i biostimolanti, priva di un quadro normativo armonizzato e soggetta a regolamentazioni nazionali frammentate. Tale disomogeneità costituiva una barriera alla libera circolazione delle merci e un ostacolo all'innovazione e alla competitività del settore [128].

La principale innovazione del Regolamento 2019/1009 risiede nel suo ambito di applicazione notevolmente ampliato, strutturato attorno a due concetti chiave: le Categorie Funzionali del Prodotto (PFC) e le Categorie di Materiali Costituenti (CMC). Il regolamento definisce sette **Categorie Funzionali del Prodotto (PFC)**, che classificano gli articoli in base alla loro funzione agronomica:

1. **Concime:** Include concimi inorganici, organo-minerali e organici.
2. **Ammendante del suolo:** Materiale che migliora le proprietà fisiche, chimiche o biologiche del suolo.
3. **Correttivo:** Materiale destinato a modificare il pH del suolo.

4. **Substrato di coltivazione:** Materiale diverso dal suolo in cui si coltivano le piante.
5. **Inibitore:** Sostanza che migliora i modelli di rilascio dei nutrienti di un prodotto.
6. **Biostimolante delle piante:** Prodotto che stimola i processi nutrizionali delle piante indipendentemente dal suo contenuto di nutrienti, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza d'uso dei nutrienti, la tolleranza allo stress abiotico, le caratteristiche qualitative o la disponibilità di nutrienti confinati nel suolo o nella rizosfera.
7. **Miscele fisiche di prodotti fertilizzanti:** Combinazione di due o più prodotti appartenenti a diverse PFC.

L'inclusione esplicita di categorie come i **concimi organici** e, soprattutto, i **biostimolanti delle piante** rappresenta una svolta. Riconosce formalmente il ruolo di questi prodotti innovativi nell'agricoltura moderna e fornisce un quadro normativo chiaro per il loro sviluppo e la loro commercializzazione. Parallelamente, il regolamento introduce quindici **Categorie di Materiali Costituenti (CMC)**, che definiscono le materie prime ammissibili per la fabbricazione di un prodotto fertilizzante nell'UE. Questo segna il punto di svolta che consente l'utilizzo di un'ampia gamma di materiali.

Per ottenere la marcatura CE, il prodotto deve attraversare una procedura di valutazione della conformità, la cui complessità varia a seconda della categoria del prodotto e dei materiali costituenti utilizzati.

Infine, il regolamento stabilisce prescrizioni dettagliate per l'etichettatura, volte a garantire la massima trasparenza per l'utilizzatore finale. L'etichetta deve riportare in modo chiaro informazioni sulla composizione, il contenuto di nutrienti, le istruzioni per un uso corretto e sicuro, e i dati del fabbricante. Recentemente, il quadro è stato ulteriormente modernizzato con l'introduzione della possibilità di un'etichettatura digitale volontaria, che potrà integrare le informazioni fornite sull'etichetta fisica [128].

5 Discussione

5.1 Analisi dei casi studio

La discussione interpreta i risultati evidenziando le implicazioni per la **bioeconomia circolare urbana** e la gestione sostenibile delle risorse. I casi di studio mostrano che la transizione verso l'**economia circolare** è complessa e non lineare, con modelli eterogenei e criticità operative e strategiche; l'adozione

effettiva dei principi di circolarità richiede una **trasformazione sistemica** di processi, strutture produttive, organizzative e istituzionali.

In questo contesto, i *soil improver* derivati dai rifiuti organici si configurano come una delle applicazioni della bioeconomia circolare. Grazie ad essi, è possibile restituire sostanza organica ai suoli agricoli contribuendo al miglioramento della qualità del suolo e al sequestro di carbonio.

5.1.1 Impatti per la bioeconomia circolare

Impatti tecnologici

L'innovazione tecnologica è ciò che maggiormente si configura come pilastro della replicabilità dal momento che permette di creare prodotti ad alto valore aggiunto e di mantenere prestazioni stabili nel trattamento di materiale eterogeneo e qualità non uniforme.

Come emerso nei risultati (sezione 4.1.2), il panorama tecnologico delle strategie di valorizzazione dei rifiuti organici è estremamente variegato. In questo contesto, emerge un limite oggettivo legato alla maturità tecnologica: affinché una soluzione possa essere realmente valida per il trasferimento industriale, deve aver raggiunto almeno un *Technology Readiness Level* (TRL) pari a 5. Le tecnologie in fase pilota, infatti, presentano spesso rese ridotte o inefficienti, che influenzano negativamente il punteggio ambientale del modello. Per superare queste criticità, l'innovazione deve muoversi verso sistemi di controllo più all'avanguardia e sistemi di business più inclusivi. Per questo motivo, accanto a tecnologie consolidate, come compostaggio e digestione anaerobica, stanno prendendo piede nuove soluzioni che si distinguono per la capacità di trasformare il *biowaste* in prodotti a più alto valore aggiunto come biomateriali, *biochemicals* e substrati per applicazioni industriali mantenendo la qualità della biomassa lungo tutta la catena del valore. Questo ventaglio di possibilità tecnologiche ha implicazioni rilevanti per lo sviluppo della bioeconomia circolare dal momento che permette di ampliare le possibili modalità di valorizzazione degli scarti alimentari, consentendo di spostare progressivamente l'attenzione dal paradigma lineare (gestione del fine vita del rifiuto) a quello circolare, con la creazione di nuove catene del valore basate su risorse biologiche.

Oltre all'utilizzo di tecnologie innovative, gioca un ruolo cruciale la capacità di utilizzare **metodologie strutturate** per la valutazione e la selezione delle soluzioni tecnologiche. Tra queste, spicca il sistema

FER-PLAY [115], sviluppato specificatamente per gestire la vasta gamma di alternative disponibili nel mercato dei fertilizzanti circolari e permettere l'identificazione di catene di valore più performanti per la produzione e l'uso agricolo su scala europea. L'approccio binario (*GO/NO-GO*) adottato nella prima fase di selezione consente di scartare prontamente le opzioni non ancora strutturate o non ancora adatte per la fase industriale a causa del loro basso livello di TRL, del loro contenuto nutritivo o per la loro eventuale tossicità [115], agendo a tutti gli effetti anche come fattore di protezione degli investimenti. Infine, la successiva validazione attraverso l'applicazione del quadro MDCA (*Metodologie di Valutazione Strutturata e Multi-Criterio*) trasforma la decisione dell'ubicazione ideale delle strutture dedite al trattamento dei biorifiuti da problema logistico a vantaggio strategico, identificando i punti nei quali i cittadini sono più invogliati a differenziare i loro rifiuti.

Consentendo di selezionare tecnologie mature e sicure per la produzione di fertilizzanti biologici, queste metodologie permettono di accelerare i processi decisionali attraverso (i) l'ottimizzazione della localizzazione delle strutture di trattamento, (ii) la massimizzazione della performance ambientale e (iii) la riduzione dei costi. Ciò permette di garantire sostenibilità economica e sociale degli investimenti dando una base solida su cui fondare la fiducia di eventuali nuovi *stakeholder*, generando un impatto particolarmente rilevante per gli attori pubblici e privati coinvolti nello sviluppo di nuove filiere *bio-based*. Queste strategie permettono quindi di ridurre le incertezze associate alla scelta delle tecnologie orientando gli investimenti verso soluzioni che presentano maggiori probabilità di essere implementate su scala industriale.

Nonostante ciò, l'inclusione delle sole metodologie di selezione non è sufficiente. Il vero fattore di successo a lungo termine è il superamento della visione settoriale attraverso un approccio olistico per l'**analisi dell'intero ciclo di vita**. L'integrazione del *Life Cycle Assessment* (LCA) nel processo decisionale è infatti in grado di determinare impatti significativi a livello tecnologico, economico ed ambientale. Consente di identificare i processi più efficienti e sostenibili per il trattamento dei rifiuti organici, favorendo l'adozione di sistemi maturi e altamente performanti garantendo stabilità della qualità dei fertilizzanti e dei bioprodotto e andando, di fatto, a favorire l'utilizzo di questi ultimi a discapito di alternative di sintesi.

In questo scenario intricato, soprattutto per le Piccole e Medie Imprese (PMI), è risultato particolarmente efficace l'utilizzo di sistemi di digitalizzazione in grado di garantire trasparenza e visibilità in tempo reale riguardo (i) tracciabilità e mappatura delle risorse, (ii) monitoraggio delle prestazioni ambientali,

(iii) efficienza operativa e logistica, (iv) precisione dei dati finanziari e di bilancio, (v) *governance* e processi decisionali e (vi) coinvolgimento dei cittadini. Tutto ciò risulta indispensabile per i processi decisionali e la collaborazione tra i diversi enti, validando la spendibilità dei modelli di business circolari, percepiti troppo spesso come rischiosi dagli investitori tradizionali [131].

Tra questi sistemi di pianificazione e logistica strategica rientrano: il sistema informativo geografico (GIS) [104] e modelli di ottimizzazione come “*Compost-recipe*” per ottimizzare le miscele iniziali di compost e agire direttamente sulle caratteristiche di porosità, umidità e costi di approvvigionamento [114]. Anche in questo caso, sarà possibile massimizzare il recupero e la valorizzazione dei rifiuti organici, ottimizzando i flussi di materia e nutrienti e trasformando i *biowaste* in risorse affidabili per la produzione di fertilizzanti e bioprodotti sostenibili garantendo parallelamente *feedstock* più pulito e sicuro.

Attraverso l'utilizzo di queste tecnologie è possibile compiere un primo passo verso la standardizzazione dei prodotti *bio-based* ad alto valore aggiunto, riducendo uno dei principali limiti dell'implementazione di modelli di *business* circolari.

Impatti delle politiche di settore

Uno degli aspetti più rilevanti emersi dall'analisi riguarda il ruolo cruciale delle politiche pubbliche nello sviluppo delle *value chain* per la valorizzazione dei rifiuti organici. Negli ultimi anni l'Unione Europea ha promosso numerose iniziative volte a favorire la transizione verso un'economia circolare, riconoscendo il potenziale dei rifiuti organici come risorsa strategica per la produzione di fertilizzanti, materiali *bio-based* ed energia rinnovabile. Questo sostegno politico si traduce in un impatto diretto per lo sviluppo della bioeconomia, incentivando l'adozione di tecnologie innovative e pratiche sostenibili.

Nonostante ciò, la forte frammentazione legislativa riguardo lo stato di *End-of-Waste* e gli standard qualitativi dei prodotti derivati dai rifiuti organici tra gli Stati Membri, non consente lo sviluppo di un mercato unico di settore. Ciò si configura come una barriera per l'innovazione con ripercussioni anche nel campo economico e tecnologico. Di fatto, questa eterogeneità normativa contribuisce all'aumentare del rischio percepito dagli investitori e al rallentamento dell'adozione di soluzioni alternative ostacolando lo sviluppo di filiere transnazionali.

Una possibile futura evoluzione di questo modello dovrebbe incentrarsi sulla creazione di un quadro normativo armonizzato che permetta di generare impatti su più fronti:

- Economico: una maggiore sicurezza normativa ridurrebbe i rischi d'investimento e stimolerebbe lo sviluppo di infrastrutture e tecnologie per la gestione dei rifiuti organici;
- Tecnologico: favorirebbe l'adozione e la replicabilità di tecnologie innovative particolarmente efficaci come la produzione di bioprodotto da insetti;
- *Governance*: garantirebbe la collaborazione tra attori pubblici e privati lungo l'intera catena del valore, facilitando la sperimentazione di nuovi modelli di business e incentivando pratiche sostenibili a livello locale e comunitario.

Impatti economici

Oltre alle barriere istituzionali, le filiere del *biowaste* incontrano limiti economici legati agli elevati investimenti iniziali e ai costi operativi per infrastrutture, pretrattamento e tecnologie avanzate. Inoltre, le filiere del *biowaste* sono ancora caratterizzate da una forte frammentazione geografica delle fonti di approvvigionamento. Questo contesto richiede sistemi logistici più flessibili e una forte cooperazione tra gli attori coinvolti e, proprio in questo scenario, la valorizzazione dei biorifiuti si inserisce come un'opportunità per la creazione di nuove catene del valore nell'ambito della bioeconomia circolare e per il rafforzamento della competitività dei prodotti *bio-based* sul mercato.

Questo cambiamento implica il passaggio ad un modello economico orientato alla valorizzazione delle risorse con benefici economici misurabili per l'intero settore. Primo tra tutti, la creazione di attività economiche nuove e diversificate legate prevalentemente alla gestione dei rifiuti e all'agricoltura. Tra queste, la produzione dei *soil improver* rappresenta uno degli sbocchi più comuni e rappresentativi che abbassano i costi di smaltimento dei rifiuti e generano nuovi flussi di ricavi grazie alla loro commercializzazione. L'utilizzo di ammendanti organici permetterebbe, inoltre, di recuperare nutrienti e materiali utili, riducendo la dipendenza del settore agricolo da fertilizzanti chimici e dai costi associati all'approvvigionamento di questi ultimi.

Infine, va tenuto in considerazione che, lo sviluppo di nuove filiere legate alla valorizzazione dei rifiuti biologici può concretamente favorire la creazione di opportunità imprenditoriali e occupazionali a livello locale incrementando lo sviluppo dei territori interessati.

Impatti sociali

Se da un lato l'innovazione tecnologica fornisce gli strumenti, è la qualità della *governance* a determinare un successo duraturo per le strategie di valorizzazione del *biowaste* che dipendono in gran parte da una forte *leadership*, in grado di integrare il coinvolgimento attivo degli *stakeholder* nonché l'accettazione da parte dei cittadini e del mercato. In questo senso è fondamentale una forte collaborazione tra enti pubblici e privati, aziende e comunità, permettendo lo sviluppo di catene del valore resilienti [4].

Un aspetto centrale riguarda proprio l'accettabilità sociale delle soluzioni *bio-based* che spesso incontrano resistenze legate alla percezione del rifiuto come semplice materiale di scarto. In quest'ottica si inserisce l'importanza di adottare strategie di comunicazione efficaci, in grado di valorizzare i benefici ambientali ed economici di tali soluzioni. La divulgazione di informazioni chiare e trasparenti sui processi di valorizzazione e sugli standard qualitativi dei prodotti biologici ad alto valore aggiunto può contribuire ad aumentare la fiducia dei diversi *stakeholder* e a favorire l'accettazione delle innovazioni *bio-based*. In particolare, la diffusione di *soil improver* derivati da rifiuti organici dipende principalmente dal grado di fiducia degli agricoltori e dei consumatori nei confronti di questi prodotti.

L'impatto di queste dinamiche si riflette anche sul piano economico, poiché un maggiore livello di consapevolezza da parte dei consumatori può stimolare la domanda di prodotti sostenibili e favorire la crescita di mercati per prodotti derivati dalla valorizzazione dei rifiuti organici.

Un secondo fattore da tenere in considerazione riguarda il ruolo delle iniziative di ricerca e sviluppo, che contribuiscono in maniera significativa al progresso tecnologico, nonché alla diffusione di conoscenze e alla sensibilizzazione del pubblico su temi legati all'economia circolare. Progetti collaborativi tra università, imprese, istituzioni pubbliche e altri attori territoriali possono determinare la creazione di reti di conoscenza e promuovere nuove pratiche di gestione delle risorse biologiche. L'impatto di queste iniziative si traduce quindi nel rafforzamento delle competenze e delle capacità innovative dei territori, contribuendo a facilitare la transizione verso sistemi produttivi più sostenibili.

L'evoluzione dei sistemi di gestione dei rifiuti organici, tuttavia, non è lineare e costruire un piano strategico a lungo termine richiede un approccio sinergico, che permetta di agire simultaneamente su tre obiettivi: i) minimizzare l'inquinamento; ii) valorizzare le risorse e iii) rendere il processo fattibile da un punto di vista economico. In questo contesto, iniziative di volontariato e partecipazione comunitaria

contribuiscono alla creazione di valore sociale, rafforzando la coesione della comunità e favorendo l'educazione ambientale attraverso la diffusione di conoscenze e competenze. In questo senso, uno dei modelli più promettenti emersi dallo studio, è il modello di compostaggio su scala comunitaria che trasforma i cittadini da semplici utenti passivi e produttori di rifiuti a veri e propri responsabili del processo in grado di gestire le risorse locali grazie alle attività di formazione pratica organizzate dalle amministrazioni come nel caso delle città di Porto e Budapest [88]. Il presente studio evidenzia infatti come la sensibilizzazione e la consapevolezza dei cittadini rappresentino elementi fondamentali per l'integrazione efficace di innovazioni tecnologiche e strategie politiche nella gestione dei rifiuti. Questo processo deve partire dal nucleo della società, ovvero dalle abitazioni private, dove le nuove generazioni, riconosciute come attori chiave nei processi di cambiamento, possono apprendere le pratiche di separazione dei rifiuti [111]. A fronte di tali considerazioni, la valorizzazione del *biowaste* può avere effetti positivi anche in termini di sviluppo territoriale e partecipazione degli *stakeholder*. L'impatto sociale di questi processi si traduce nella cooperazione di reti collaborative tra diversi attori e settori che favorisce di conseguenza la diffusione di pratiche più sostenibili incentivando modelli di produzione e consumo più circolari.

5.1.2 Implicazioni per i modelli di business

I risultati analizzati evidenziano come la valorizzazione dei rifiuti organici costituisca un elemento determinante per lo sviluppo di nuovi modelli di *business* nell'ambito della bioeconomia circolare. La valorizzazione del *biowaste* non comporta solamente l'introduzione di nuove tecnologie di trattamento, ma implica una trasformazione più ampia dei modelli di *business* che caratterizzano la gestione delle risorse organiche nelle economie urbane.

In questo contesto, il passaggio da una logica lineare di smaltimento dei rifiuti a una logica circolare di recupero e valorizzazione richiede l'adozione di modelli organizzativi e produttivi in grado di integrare gestione dei rifiuti, produzione industriale e utilizzo finale dei prodotti *bio-based*.

Una prima implicazione riguarda il ripensamento delle filiere associate ai rifiuti organici: dai risultati emerge come le diverse tecnologie di valorizzazione consentano di trasformare il *biowaste* da semplice costo di gestione a risorsa produttiva, generando nuove opportunità economiche lungo la *value chain*. In questo scenario, i modelli di *business* tendono a evolvere verso configurazioni basate sulla valorizzazione a cascata delle biomasse, in cui gli scarti vengono progressivamente convertiti in prodotti a maggiore

valore aggiunto. Ciò consente sia di diversificare le fonti di ricavo che di ridurre la dipendenza da materie prime fossili e, allo stesso tempo, di rafforzare la competitività dei prodotti *bio-based* nei mercati emergenti della bioeconomia. In particolare, la produzione di *soil improver* rappresenta uno dei modelli di *business* più vantaggiosi e affermati per la valorizzazione del *biowaste*, in quanto permettono di trasformare dei semplici rifiuti organici in *input* agricoli utili, creando valore economico e ambientale lungo tutta la filiera.

In secondo luogo, emerge chiaramente il ruolo crescente degli indicatori di sostenibilità come strumenti di supporto alle decisioni strategiche. Gli indicatori ambientali e sociali analizzati nel presente lavoro non rappresentano esclusivamente parametri di valutazione dei risultati ottenuti, ma devono essere integrati direttamente nei modelli di *business* per orientare le scelte tecnologiche, la progettazione dei processi produttivi e la comunicazione del valore dei prodotti *bio-based*. Indicatori legati alla riduzione delle emissioni di gas serra, al sequestro di carbonio nel suolo o alla creazione di occupazione nei settori della bioeconomia, consentono alle imprese di dimostrare in modo quantificabile i benefici ambientali e sociali delle proprie attività, rafforzando la credibilità e l'accettabilità delle strategie di sostenibilità e facilitando l'accesso a strumenti di finanziamento pubblico e privato orientati alla transizione ecologica.

Un'ulteriore implicazione riguarda la dimensione territoriale dei modelli di *business* della bioeconomia. I risultati suggeriscono infatti che la valorizzazione delle biomasse dipenda fortemente dalla capacità di coordinare diversi attori lungo la filiera (sistemi di raccolta dei rifiuti, impianti di trattamento, industrie di trasformazione e settori agricoli o industriali). In questo scenario, i modelli di *business* emergenti assumono sempre più la forma di ecosistemi industriali intrecciati con il territorio, in cui la collaborazione tra attori pubblici e privati diventa un elemento fondamentale per garantire la stabilità dei flussi di biorifiuti e la sostenibilità economica degli impianti di valorizzazione.

Complessivamente, l'analisi evidenzia che lo sviluppo di modelli di *business* sostenibili per la valorizzazione del *biowaste* dipende sicuramente dalla maturità delle tecnologie disponibili, ma richiede l'integrazione tra innovazione tecnologica, strumenti di valutazione della sostenibilità e forme di *governance* capaci di coordinare gli attori coinvolti nelle filiere. In questa prospettiva, la bioeconomia circolare emerge come un nuovo paradigma oltre che un ambito di innovazione economica e organizzativa in grado di generare valore ambientale, sociale ed economico.

5.2 Analisi degli indicatori sociali e ambientali

L'integrazione degli indicatori all'interno di un unico modello di valutazione risulta determinante per misurare il successo e le implicazioni della transizione verso una bioeconomia urbana circolare. È infatti necessario che la sostenibilità venga valutata secondo l'approccio della *Triple Bottom Line* (sezione 1.6.2) dove le prestazioni ambientali vengono allineate all'accettazione e al benessere della comunità [115, 132, 133]. Per comprenderne appieno l'utilità, oltre che i risultati puramente quantitativi, risulta necessario approfondirne l'impatto sui processi decisionali e la loro capacità di orientare traiettorie di sviluppo sostenibile. L'utilizzo di indicatori socio-ambientali consente infatti di indirizzare le scelte di *policy* e investimento, mettendo in evidenza le soluzioni di valorizzazione del *biowaste* più sostenibili a lungo termine.

In questa prospettiva, gli indicatori legati al metabolismo del carbonio rappresentano uno strumento operativo essenziale. Espresso attraverso l'aumento del carbonio organico nel suolo e il sequestro stabile di CO₂ per ettaro, ha un duplice impatto: supportano la definizione di strategie climatiche concrete a livello locale e nazionale e permettono agli operatori di confrontare in modo pragmatico soluzioni alternative, come il confronto diretto con l'impiego di fertilizzanti organici rispetto a quelli chimici mettendone in risalto i benefici ambientali [105, 115, 122]. Allo stesso tempo, però, questo tipo di misurazione necessita l'affiancamento di un'attenta valutazione del ciclo di vita per garantire un'analisi completa. L'integrazione di strumenti di valutazione come il *Life Cycle Assessment* consente infatti di identificare potenziali *trade-off* ambientali (come il rischio di eutrofizzazione, acidificazione o la presenza di contaminanti) [90, 133–135], determinando implicazioni dirette sulla progettazione delle tecnologie e dei modelli di *business* e permettendo di evitare soluzioni teoricamente sostenibili ma che, traslati su scala maggiore, genererebbero effetti negativi sugli ecosistemi.

Nello scenario analizzato, l'analisi tecnica deve necessariamente dialogare con il sistema di accettabilità, dove la legittimazione sociale e politica agisce da vero e proprio catalizzatore per l'innovazione [132, 133]. Infatti, se l'accettazione sul mercato, influenzata dalla *Willingness to Pay* e dalla consapevolezza del consumatore, non raggiunge l'equità nell'accesso ai bioprodotti, la transizione rischia di trasformarsi in un'operazione di nicchia incapace di portare avanti un cambiamento di paradigma [92]. L'impatto di questi indicatori si traduce quindi nella capacità dei modelli di *business* di generare benefici su più livelli

del sistema di valorizzazione dei biorifiuti contribuendo, al tempo stesso, alla crescita economica, alla coesione sociale, alla partecipazione degli *stakeholder* e allo sviluppo di competenze locali.

A favore dell'accettazione generale di pratiche sostenibili, giocano un ruolo cruciale la creazione di posizioni lavorative in settori "ecologici" e lo sviluppo di capitale umano attraverso specifiche ore di formazione dedicate [120]. Questi due parametri si configurano non solo come semplici indicatori occupazionali ma riflettono le possibilità del modello di generare giustizia sociale includendo prospettive di genere e *leadership* locali, valorizzando saperi ancestrali e tecnologie sociali [119].

L'analisi mostra che gli indicatori si configurano come strumenti strategici fondamentali per la diffusione e la scalabilità dei modelli di valorizzazione del *biowaste*. Solo grazie ad essi è possibile rendere misurabile la sostenibilità, supportando decisioni informate e armonizzando gli obiettivi economici, ambientali e sociali.

6. Conclusioni

Il presente elaborato è stato incentrato sull'analisi del ruolo della valorizzazione dei rifiuti organici nel contesto della bioeconomia circolare urbana attraverso la valutazione di numerosi casi studio e l'identificazione di indicatori sociali e ambientali utili alla progettazione di modelli di business sostenibili. Dall'analisi emerge chiaramente che i modelli di successo sono quelli in grado di integrare tre dimensioni chiave: efficienza tecnologica nei processi di trattamento dei biorifiuti, qualità della frazione organica raccolta e partecipazione attiva da parte di tutti gli attori della filiera.

Allo stesso tempo, l'analisi dei casi studio ha evidenziato come la replicabilità di tali modelli dipenda in gran parte dalle tecnologie adottate, ma anche dal contesto normativo, istituzionale e sociale in cui essi vengono implementati.

6.1 Raccomandazioni per lo sviluppo di business model sostenibili

Alla luce dell'analisi dei casi studio e della letteratura, il lavoro svolto ha permesso di evidenziare elementi cruciali per lo sviluppo dei modelli di *business* sostenibili per la valorizzazione dei rifiuti organici. In particolare, questo processo richiede come condizione necessaria un approccio sistemico, in grado di integrare sin dalle prime fasi di progettazione le tre dimensioni della **Triple Bottom Line** (*People, Planet,*

Profit) al fine di garantire la scalabilità delle soluzioni di recupero dei rifiuti organici e di creazione del valore all'interno delle filiere della bioeconomia circolare.

Partendo da tali evidenze, è possibile tracciare delle linee guida operative al fine di orientare la progettazione e l'implementazione di modelli di *business* circolari nel contesto della bioeconomia urbana.

1. **Progettazione del modello di *business* per la valorizzazione del *biowaste*:** in questa fase risulta fondamentale l'adozione di strumenti analitici capaci di valutare contemporaneamente aspetti ambientali, economici e sociali al fine di garantire una sostenibilità del modello nel lungo periodo.

Si raccomanda, in particolare, di:

- Utilizzare **strumenti di progettazione sistemica**: dall'analisi il modello preferenziale risulta essere il *Circular Triple-Layered Business Model Canvas* (CTLBMC). Questo strumento permette infatti di mappare le interdipendenze tra valore economico, impatti ambientali e benefici sociali per la valorizzazione dei rifiuti organici;
- Effettuare un'attenta **analisi preventiva per la maturità delle tecnologie** considerate: privilegiare soluzioni con un *Technology Readiness Level* maggiore o uguale a 5 al fine di garantire la scalabilità dei processi di valorizzazione;
- Utilizzare una metodologia di **analisi multicriterio (LCA)**: questo approccio permette di bilanciare sostenibilità economica, performance ambientali e accettazione sociale nelle decisioni strategiche lungo tutta la *value chain*;
- Integrare **indicatori sociali e ambientali** nei processi decisionali;

2. **Rafforzamento della *governance* e della collaborazione tra *stakeholder*:** i modelli di valorizzazione del *biowaste* più efficaci sono basati su una forte cooperazione tra enti pubbliche, private e comunità locali.

In tal senso è utile:

- Promuovere **partenariati pubblico-privati (PPP)**: questa strategia permette l'integrazione della produzione dei bioprodotto nei sistemi municipali di gestione dei rifiuti;

- Implementare **piattaforme di comunicazione** tra gli *stakeholder*: attraverso queste piattaforme è possibile coinvolgere cittadini, imprese, enti di ricerca e amministrazioni pubbliche favorendo un sistema di co-progettazione;
- Favorire **modelli di integrazione della filiera**: collegare raccolta, trattamento e commercializzazione dei prodotti derivati dai biorifiuti.

Più nello specifico, per favorire il coinvolgimento delle comunità locali si raccomanda di:

- Promuovere **modelli partecipativi** (*Climate Neutral Week, mostra dei Local Champion*): in questo modo è possibile coinvolgere i cittadini nella gestione delle attività di valorizzazione dei biorifiuti;
- Supportare **figure di mediazione tecnica ed educativa** (*Compost Master*): investire in personale specializzato per la divulgazione di pratiche di sostenibilità, in grado di facilitare il dialogo tra *stakeholder*, gestori del sistema e comunità locali;
- Implementare **campagne educative mirate**: al fine di migliorare la qualità della raccolta differenziata e ridurre i livelli di contaminazione dei rifiuti organici, è utile attuare campagne educative in grado di sensibilizzare i cittadini sulle tematiche di circolarità e bioeconomia urbana.

3. Integrare strumenti digitali: l'adozione di tecnologie digitali innovative si configura come un fattore abilitante per migliorare l'efficienza delle filiere di valorizzazione.

In particolare, è opportuno:

- Sviluppare **sistemi digitali di raccolta e gestione dei dati (sistemi IoT)**: queste tecnologie permettono di migliorare la tracciabilità dei flussi di materiale contribuire a processi decisionali più consapevoli;
- Utilizzare **strumenti di modellazione territoriale (GIS)**: tali strumenti permettono di ottimizzare la logistica della raccolta e ridurre le distanze di trasporto dei biorifiuti;
- Adottare **software di ottimizzazione dei processi biologici (Compost Recipe)**: in tal modo è possibile migliorare l'efficienza operativa degli impianti di trattamento

4. **Utilizzare strumenti di mercato e politiche pubbliche di supporto:** le politiche pubbliche svolgono un ruolo cruciale per la creazione di condizioni favorevoli necessarie allo sviluppo della bioeconomia urbana.

Dagli studi [7, 134, 136, 137], gli strumenti più rilevanti sono:

- **Green Public Procurement (PPG):** questa strategia consente alle amministrazioni pubbliche di supportare la domanda di prodotti circolari attraverso l'introduzione di criteri ambientali negli appalti;
- **Sistema di tariffazione puntuale** dei rifiuti: così facendo è possibile incentivare comportamenti virtuosi da parte dei consumatori;
- **Standard di certificazione (Ecolabel, Regolamento (UE) 2019/1009):** questi ultimi risultano cruciali per rafforzare la fiducia dei consumatori nei confronti dei bioprodotto derivati dal recupero dei rifiuti organici.

Questo lavoro contribuisce alla letteratura sulla bioeconomia circolare fornendo un'analisi comparativa di diversi modelli di valorizzazione del *biowaste* e identificando indicatori sociali e ambientali utili alla progettazione di modelli di business sostenibili.

A fronte dell'analisi condotta, è possibile affermare che le potenzialità di questo settore sono imprescindibilmente legate alla maturità tecnologica e alla varietà dei prodotti ad alto valore aggiunto che è possibile creare. Parallelamente, però, la loro diffusione locale e globale va ricercata nelle precise strategie di **scalabilità e replicabilità**.

La scalabilità dei modelli di *business* circolari, ossia la capacità di aumentare i volumi operativi senza incrementare significativamente i costi, dipende in gran parte dalla dimensione sociale. La disponibilità di materiale di qualità derivato da scarti è il risultato della consapevolezza collettiva e della partecipazione attiva dei cittadini, che diventano partner strategici nella filiera. La replicabilità territoriale, invece, è limitata da fattori politici, normativi e infrastrutturali, spesso rappresentando un collo di bottiglia per l'adozione dei modelli di successo. Nonostante ciò, le soluzioni tecniche analizzate mostrano elevata compatibilità con diversi contesti urbani, rafforzando la fiducia nei modelli circolari. In questo contesto, la produzione di ammendanti organici rappresenta una delle applicazioni più mature e consolidate della

bioeconomia circolare urbana. Questa strategia consente infatti di collegare la gestione sostenibile dei rifiuti organici con pratiche di rigenerazione dei suoli.

In questo scenario, l'adozione di indicatori per la bioeconomia urbana e lo sviluppo di *framework* standardizzati risultano determinanti per favorire la diffusione dei modelli circolari.

Nel complesso, i risultati evidenziano che, sebbene le tecnologie dimostrino una capacità industriale già consolidata, ad oggi il successo della transizione circolare risiede prevalentemente nella creazione di un ambiente istituzionale armonizzato e coordinato. Le sfide future, dunque, saranno prevalentemente orientate verso la creazione di una *governance* in grado di integrare standardizzazione normativa, incentivi finanziari mirati e coinvolgimento sociale.

Trasformare i progetti pilota in processi omologati sarà possibile esclusivamente adottando un approccio olistico per la creazione di nuovi ecosistemi industriali resilienti e sostenibili.

- [1] ISPRA. ECOLABEL PER AMMENDANTI E SUBSTRATI DI COLTIVAZIONE.
- [2] Al-Dajani H, Marlow S. Empowerment and entrepreneurship: a theoretical framework. *Int J Entrep Behav Res* 2013; 19: 503–524.
- [3] Il recupero di sostanza organica dai rifiuti per la produzione di ammendanti di qualità.
- [4] CDW circular toolkit for local and regional governments.
- [5] Pranatasari NA, Hardjomidjojo H, Machfud. Development of A Village-Based Organic Vegetable Business Model Using The Business Model Canvas For Sustainability (BMCS). *Indones J Bus Entrep* 2025; 11: 319.
- [6] Zott C, Amit R. Business Model Design: An Activity System Perspective. *Long Range Plann* 2010; 43: 216–226.
- [7] *Multi-level stakeholder engagement analysis, including gender, and impact analysis.*
- [8] Life Cycle assessment (LCA) analisi del ciclo di vita, <https://circularity.com/circularguide/life-cycle-assessment-lca/> (accessed 20 March 2026).
- [9] Commissione europea. *Il Green Deal europeo*. Comunicazione Della Commissione, 2019.
- [10] Ntostoglou E, Martin V, Khatiwada D, et al. Path-dependencies in the transition to sustainable biowaste valorization: Lessons from a socio-technical analysis of Sweden and Greece. *Waste Manag* 2025; 192: 47–57.
- [11] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. *Strategia nazionale per l'economia circolare*. Strategia nazionale, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), 2022.
- [12] UNEP (ed). *Bend the trend: pathways to a liveable planet as resource use spikes*. Nairobi, Kenya: International Resource Panel, 2024.
- [13] OECD. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD. Epub ahead of print 12 February 2019. DOI: 10.1787/9789264307452-en.
- [14] European Compost Network (ECN). *ECN Data Report 2022: Compost and Digestate for a Circular Bioeconomy*. Bochum, Germania, 2022.
- [15] waste statistics.
- [16] European Environment Agency (EEA). *Textiles and the environment: the role of design in Europe's circular economy*. European Environment Agency, 2022.
- [17] European Environment Agency. *Plastics, the circular economy and Europe's environment: a priority for action*. LU: Publications Office. Epub ahead of print 2021. DOI: 10.2800/5847.
- [18] UNEP (ed). *Beyond an age of waste: turning rubbish into a resource*. Nairobi: UNEP, 2024.
- [19] Geopolitics of the energy transition: Critical materials.
- [20] Shiquan D, Amuakwa-Mensah F, Deyi X, et al. The impact of mineral resource extraction on communities: How the vulnerable are harmed. *Extr Ind Soc* 2022; 10: 101090.
- [21] OECD. *Economic Security in a Changing World: NAEC Report*. OECD Publishing. Epub ahead of print 11 September 2025. DOI: 10.1787/4eac89c7-en.
- [22] Circular economy Overview 2024.
- [23] *Children and Digital Dumpsites: E-Waste Exposure and Child Health*. 1st ed. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [24] Abdullah-Al-Mahbub Md, Islam ARMT. Current status of running renewable energy in Bangladesh and future prospect: A global comparison. *Heliyon* 2023; 9: e14308.
- [25] Heacock M, Kelly CB, Asante KA, et al. E-Waste and Harm to Vulnerable Populations: A Growing Global Problem. *Environ Health Perspect* 2016; 124: 550–555.
- [26] Smith WN, Grant BB, Desjardins RL, et al. Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada. *Agric Ecosyst Environ* 2013; 179: 139–150.
- [27] European Environment Agency. *The circular economy and the bioeconomy: partners in sustainability*. LU: Publications Office. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.2800/02937.
- [28] European Commission. Directorate General for Research and Innovation. *The EU's bioeconomy strategy: a policy framework for sustainability*. LU: Publications Office. Epub ahead of print 2022. DOI: 10.2777/787912.
- [29] Agency and EE. *Europe's circular economy in facts and figures*. Publications Office of the European Union, 2024.
- [30] Commission E, Environment D-G for, Kantar. *Attitudes of Europeans towards the environment – Report*. European Commission, 2020. Epub ahead of print 2020. DOI: doi/10.2779/902489.
- [31] EU Ecolabel - Home, https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy-topics/eu-ecolabel_en (2025, accessed 3 February 2026).
- [32] Improved circular economy monitoring framework now live, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/wdn-20230515-1> (2023, accessed 3 February 2026).
- [33] Many EU Member States risk missing waste recycling targets | Press releases | European Environment Agency (EEA), https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/many-eu-member-states?utm_source=chatgpt.com (accessed 3 February 2026).
- [34] DECRETO LEGISLATIVO 3 aprile 2006, n. 152 - Normattiva, <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006%E2%80%91104%E2%80%91152~art182ter%E2%80%91com6=> (accessed 3 February 2026).
- [35] Sulewski P, Kais K, Gołaś M, et al. Home Bio-Waste Composting for the Circular Economy. *Energies* 2021; 14: 6164.
- [36] Food Waste - Food Safety - European Commission, https://food.ec.europa.eu/food-safety/food-waste_en (accessed 3 February 2026).
- [37] Food waste and food waste prevention - estimates, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates (accessed 3 February 2026).
- [38] Municipal waste statistics, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics (accessed 3 February 2026).
- [39] Municipal waste down by 19 kg per person in 2022, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240208-2> (2024, accessed 3 February 2026).
- [40] EU waste prevention checkup: more effective measures needed to tackle food waste, <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/eu-waste-prevention-checkup-more-effective-measures-needed-to-tackle-food-waste> (2025, accessed 3 February 2026).
- [41] Ho TTK, Tra VT, Le TH, et al. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Stud Chem Environ Eng* 2022; 6: 100211.
- [42] Lin D, Hanscom L, Murthy A, et al. Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. *Resources* 2018; 7: 58.
- [43] Panagos P, Ballabio C, Poesen J, et al. A Soil Erosion Indicator for Supporting Agricultural, Environmental and Climate Policies in the European Union. *Remote Sens* 2020; 12: 1365.
- [44] Allen, Brett, Cochran, Verlan, Caesar, Thecan, et al. Long-term Effects of Topsoil Removal on Soil Productivity Factors, Wheat Yield and Protein Content, https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=243402&utm_source=chatgpt.com (accessed 3 February 2026).
- [45] Soil carbon, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/soil-carbon> (2022, accessed 3 February 2026).
- [46] Arias-Navarro C, Baritz R, Jones A, et al. (eds). *The state of soils in Europe: fully evidenced, spatially organised assessment of the pressures driving soil degradation*. Luxembourg: Publications Office, 2024. Epub ahead of print 2024. DOI: 10.2760/5897030.

- [47] 1.7 Soil resources, <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/thematic-briefings/biodiversity-and-ecosystems/soil-resources> (2025, accessed 3 February 2026).
- [48] Wesemael B van, Abdelbaki A, Ben-Dor E, et al. A European soil organic carbon monitoring system leveraging Sentinel 2 imagery and the LUCAS soil data base. *Geoderma* 2024; 452: 117113.
- [49] Industrially contaminated sites, <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/industrially-contaminated-sites> (accessed 3 February 2026).
- [50] Progress in the management of contaminated sites in Europe, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/progress-in-the-management-of> (2022, accessed 3 February 2026).
- [51] Cambiamenti climatici: il 2022 è stato il secondo anno con più incendi boschivi, https://italy.representation.ec.europa.eu/notizie-ed-eventi/notizie/cambiamenti-climatici-il-2022-e-stato-il-secondo-anno-con-piu-incendi-boschivi-2023-11-22_it (accessed 3 February 2026).
- [52] Urgent action needed to reverse soil degradation in Europe - Joint Research Centre, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/urgent-action-needed-reverse-soil-degradation-europe-2024-10-22_en (2025, accessed 3 February 2026).
- [53] 2024 State of Soils in Europe report shows alarming trends of soil degradation in the EU and EEA, <https://easac.eu/news/details/2024-state-of-soils-in-europe-report-shows-alarming-trends-of-soil-degradation-in-the-eu-and-eea> (2024, accessed 3 February 2026).
- [54] Sustainable use of key natural resources - European Commission, https://commission.europa.eu/topics/environment/sustainable-use-key-natural-resources_en (accessed 3 February 2026).
- [55] Anyaoku CC, Baroutian S. Decentralized anaerobic digestion systems for increased utilization of biogas from municipal solid waste. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 90: 982–991.
- [56] Benetto E, Gericke K, Guiton M (eds). *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies: From Science to Innovation*. Cham: Springer International Publishing. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-66981-6.
- [57] Wang S, Zeng Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review. *Bioresour Technol* 2018; 248: 13–19.
- [58] Czekala W, Lewicka A, Pochwatka P, et al. Digestate management in polish farms as an element of the nutrient cycle. *J Clean Prod* 2020; 242: 118454.
- [59] Lin L, Xu F, Ge X, et al. Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 89: 151–167.
- [60] Viancelli A, Schneider TM, Demczuk T, et al. Unlocking the value of biomass: Exploring microbial strategies for biogas and volatile fatty acids generation. *Bioresour Technol Rep* 2023; 23: 101552.
- [61] Yaashikaa PR, Kumar PS, Varjani S, et al. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnol Rep* 2020; 28: e00570.
- [62] Amalina F, Razak ASA, Krishnan S, et al. Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. *J Hazard Mater Adv* 2022; 7: 100134.
- [63] Haider FU, Farooq M, Naveed M, et al. Influence of biochar and microorganism co-application on stabilization of cadmium (Cd) and improved maize growth in Cd-contaminated soil. *Front Plant Sci* 2022; 13: 983830.
- [64] Leng L, Yang L, Lei X, et al. Machine learning predicting and engineering the yield, N content, and specific surface area of biochar derived from pyrolysis of biomass. *Biochar* 2022; 4: 63.
- [65] Shoudho KN, Khan TH, Ara UR, et al. Biochar in global carbon cycle: Towards sustainable development goals. *Curr Res Green Sustain Chem* 2024; 8: 100409.
- [66] Ahmed A, Abu Bakar MS, Sukri RS, et al. Sawdust pyrolysis from the furniture industry in an auger pyrolysis reactor system for biochar and bio-oil production. *Energy Convers Manag* 2020; 226: 113502.
- [67] Manzoor A, Naveed MS, Ali RMA, et al. Vermicompost: A potential organic fertilizer for sustainable vegetable cultivation. *Sci Hortic* 2024; 336: 113443.
- [68] Van Groenigen JW, Lubbers IM, Vos HMJ, et al. Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Sci Rep* 2014; 4: 6365.
- [69] Blouin M, Barrere J, Meyer N, et al. Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agron Sustain Dev* 2019; 39: 34.
- [70] Bassouka-Miatoukantama RK, Lerch T, Enock Bocko Y, et al. Composting Urban Biowaste: A Potential Solution for Waste Management and Soil Fertility Improvement in Dolisie, Congo. *Sustainability* 2025; 17: 560.
- [71] US EPA O. Environmental Value of Applying Compost, <https://www.epa.gov/land-research/environmental-value-applying-compost> (2025, accessed 3 February 2026).
- [72] Tröster MF. Assessing the Value of Organic Fertilizers from the Perspective of EU Farmers. *Agriculture* 2023; 13: 1057.
- [73] Suárez Valdés MÁ, Soriano Disla JM, Gambuzzi E, et al. Innovative Circular Biowaste Valorisation—State of the Art and Guidance for Cities and Regions. *Sustainability* 2024; 16: 8963.
- [74] Osterwalder A, Pigneur Y, Clark T. *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
- [75] Teece DJ. Business Models, Business Strategy and Innovation. *Long Range Plann* 2010; 43: 172–194.
- [76] Massa L, Tucci CL, Afuah A. A Critical Assessment of Business Model Research. *Acad Manag Ann* 2017; 11: 73–104.
- [77] Teece DJ. Business Models, Business Strategy and Innovation. *Long Range Plann* 2010; 43: 172–194.
- [78] Lin Y-L, Wang W-T, Lee I-T. Implementing visual metaphor-supported instructional design in management education: An example of learning a business model canvas. *Int J Manag Educ* 2025; 23: 101256.
- [79] Joyce A, Paquin RL. The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. *J Clean Prod* 2016; 135: 1474–1486.
- [80] Elkington J, Elkington John. *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*. Pbk. ed. Oxford, U.K.: Capstone, 1999.
- [81] Nosratabadi S, Mosavi A, Shamshirband S, et al. Sustainable Business Models: A Review. *Sustainability* 2019; 11: 1663.
- [82] Boons F, Lüdeke-Freund F. Business models for sustainable innovation: state-of-the-art and steps towards a research agenda. *J Clean Prod* 2013; 45: 9–19.
- [83] Schaltegger S, Hansen EG, Lüdeke-Freund F. Business Models for Sustainability.
- [84] Evans S, Vladimirova D, Holgado M, et al. Business Model Innovation for Sustainability: Towards a Unified Perspective for Creation of Sustainable Business Models. *Bus Strategy Environ* 2017; 26: 597–608.
- [85] Tech4BioWaste. *Tech4BioWaste*, <https://tech4biowaste.eu/> (accessed 3 February 2026).
- [86] The HOOP Project | Vitalise Europe's Urban Bioeconomy, <https://hooproject.eu/> (accessed 3 February 2026).
- [87] Scalibur – LEADING A REVOLUTION IN BIOWASTE RECYCLING, <https://scalibur.eu/> (accessed 3 February 2026).
- [88] *The Circular Bio-Waste Management Handbook for Local Authorities (Deliverable 3.11)*.
- [89] Ducasse V, Watteau F, Kowalewski I, et al. The amending potential of vermicompost, compost and digestate from urban biowaste: Evaluation using biochemical, Rock-Eval® thermal analyses and transmission electronic microscopy. *Bioresour Technol Rep* 2023; 22: 101405.
- [90] Stewart-Wade SM. Efficacy of organic amendments used in containerized plant production: Part 1 – Compost-based amendments. *Sci Hortic* 2020; 266: 108856.
- [91] Pezzolla D, Cucina M, Proietti P, et al. The Use of New Parameters to Optimize the Composting Process of Different Organic Wastes. *Agronomy* 2021; 11: 2090.
- [92] *Novel Circular Business Models applied in the value chain of biowaste valorisation*.
- [93] García C, Laborda E, Pérez M. Deliverable 1.5: Catalogue of urban biowaste solutions and good practices examples (final).

- [94] Inagro (Belgium), Consorzio Italiano Compostatori (<https://www.compost.it/>), Centro Tecnológico del Agua, et al. FER-PLAY database. Epub ahead of print 24 April 2024. DOI: 10.5281/ZENODO.11060654.
- [95] Enhancing anaerobic digestion for rural wastewater treatment with granular activated carbon (GAC) supplementation.
- [96] Enzymatic conversion of pretreated lignocellulosic biomass: A review on influence of structural changes of lignin.
- [97] Hwang HY, Kim SH, Shim J, et al. Composting Process and Gas Emissions during Food Waste Composting under the Effect of Different Additives. *Sustainability* 2020; 12: 7811.
- [98] Sokolowski A, Jędruchiewicz K, Kobylecki R, et al. Plant-Waste-Derived Sorbents for Nitazoxanide Adsorption. *Molecules* 2023; 28: 5919.
- [99] *D5.2 – Training guidelines Training guidelines to support Business Models and market uptake of biowaste-derived soil improvers.*
- [100] Trasformazione rifiuti organici | San Ferdinando | Biomatrix, <https://www.biomatrixsrl.it/> (accessed 19 March 2026).
- [101] Serafini LF, Praça PJGM, González-Andrés F, et al. Life cycle approach as a tool for assessing municipal biowaste treatment units: A systematic review. *Waste Manag Res J Sustain Circ Econ* 2025; 43: 1509–1524.
- [102] Vieira J, Cortês A, Santos L, et al. Planning separate collection and recycling of bio-waste in low density territories: a case study in Portugal. *Int J Environ Sci Technol* 2025; 22: 11761–11774.
- [103] Delgado M, López A, Cuartas M, et al. A decision support tool for planning biowaste management systems. *J Clean Prod* 2020; 242: 118460.
- [104] Slavik J, Dolejš M, Rybová K. Mixed-method approach incorporating Geographic information system (GIS) tools for optimizing collection costs and convenience of the biowaste separate collection. *Waste Manag* 2021; 134: 177–186.
- [105] Parodi A, Villamonte-Cunco G, Loboguerrero AM, et al. Embedding circularity into the transition towards sustainable agroforestry systems in Peru. *Sci Total Environ* 2022; 838: 156376.
- [106] Chew KW, Chia SR, Yen H-W, et al. Transformation of Biomass Waste into Sustainable Organic Fertilizers. *Sustainability* 2019; 11: 2266.
- [107] Oviedo-Ocaña ER, Abendroth C, Domínguez IC, et al. Life cycle assessment of biowaste and green waste composting systems: A review of applications and implementation challenges. *Waste Manag* 2023; 171: 350–364.
- [108] Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste.
- [109] Reichenbach J. Status and prospects of pay-as-you-throw in Europe – A review of pilot research and implementation studies. *Waste Manag* 2008; 28: 2809–2814.
- [110] Adana AH, Irham I, Waluyati LR, et al. Intensity, Purposes and Drivers of Digital Technologies Adoption: Lessons from Shallot Farmers at Various Agroecological Zones in Yogyakarta Province, Indonesia. *Pak J Agric Res*; 38. Epub ahead of print 2025. DOI: 10.17582/journal.pjar/2025/38.2.84.91.
- [111] Raab K. A Literature Review on Solid Waste Management and Disposal Behavior at the Base of the Pyramid. *Manag Dyn Knowl Econ* 2024; 12: 1–20.
- [112] Batcom, <https://www.batcom.org.uk/> (accessed 19 March 2026).
- [113] City Loops | Home, <https://cityloops.eu/> (accessed 19 March 2026).
- [114] Calisti R, Regni L, Proietti P. Compost-recipe: A new calculation model and a novel software tool to make the composting mixture. *J Clean Prod* 2020; 270: 122427.
- [115] Inagro (Belgium), Consorzio Italiano Compostatori (<https://www.compost.it/>), Centro Tecnológico del Agua, et al. FER-PLAY database. Epub ahead of print 24 April 2024. DOI: 10.5281/ZENODO.11060654.
- [116] Ebner CE. Sustainable business models in the fashion industry: balancing the tension between sustainability and profitability.
- [117] Eskelinen T, Sydd O, Kajanus M, et al. Fortifying Social Acceptance When Designing Circular Economy Business Models on Biowaste Related Products. *Sustainability* 2022; 14: 14983.
- [118] Smart control of the climate resilience in European coastal cities. *Score*, <https://score-eu-project.eu/> (accessed 19 March 2026).
- [119] Communities and Social Technologies in the Development of Sustainable Business Models in the Amazon: Da Tribu's Case. 12.
- [120] Pavesi R, Orsi L, Zanderighi L. Enhancing Circularity in Urban Waste Management: A Case Study on Biochar from Urban Pruning. *Environments* 2024; 12: 5.
- [121] Teixeira N, Rodrigues R, Antunes T. Circular Economy Models for Reducing Food Waste and Enhancing Sustainability: A Case Study of Cooperative X. *Circ Econ Sustain* 2025; 5: 3529–3549.
- [122] Fadillah A, Hartoyo APP, Solikhin A, et al. Developing a Sustainable Business Model For Bio-Nano Fertilizers to Enhance Peatland Agriculture and Environmental Sustainability. *Bus Rev Case Stud* 2025; 6: 163.
- [123] OECD. *Business Models for the Circular Economy: Opportunities and Challenges for Policy*. OECD Publishing. Epub ahead of print 3 April 2019. DOI: 10.1787/g2g9dd62-en.
- [124] Pane VA, Sirait T, Ramauli J. BUSINESS DEVELOPMENT STRATEGY DESIGN USING TRIPLE LAYERED BUSINESS MODEL CANVAS (DESCRIPTIVE STUDY ON MDC COFFEE HOUSE). *Int J Soc Serv Res*; 4. Epub ahead of print 1 August 2024. DOI: 10.46799/ijssr.v4i7.868.
- [125] EUR-Lex - L:2008:312:TOC - EN - EUR-Lex, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=OJ:L:2008:312:TOC> (accessed 19 March 2026).
- [126] Circular economy - EUR-Lex, <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/glossary/circular-economy.html> (accessed 19 March 2026).
- [127] Fei F, Wen Z, Ri S. Urban biowaste integrated management based on synergy mechanism and multi-objective optimization: A case study in Suzhou, China. *Sci Total Environ* 2022; 823: 153691.
- [128]]>Regolamento (UE) 2019/ del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 giugno 2019, che stabilisce norme relative alla messa a disposizione sul mercato di prodotti fertilizzanti dell'UE, che modifica i regolamenti (CE) n. 1069/2009 e (CE) n. 1107/2009 e che abroga il regolamento (CE) n. 2003/2003.
- [129] Europea CDC. Relazione speciale 20/2024: Piani della politica agricola comune.
- [130] Salvatore V. Il principio della protezione dell'ambiente, una prospettiva di diritto comparato: Italia.
- [131] Huy PQ, Phuc VK. Does effectiveness of digital accounting system intensify sustainable business model innovation with mediating role of digital business ecosystem? *J Innov Entrep* 2025; 14: 3.
- [132] Pereira-Ferrer M, González-Míguez A, Villanueva Rey P, et al. Definition and application of indicators for urban bioeconomy: Analyzing the circularity maturity profile of european cities and regions. *Open Res Eur* 2025; 5: 116.
- [133] Vlachokostas C, Achillas C, Agnantiaris I, et al. Decision Support System to Implement Units of Alternative Biowaste Treatment for Producing Bioenergy and Boosting Local Bioeconomy. *Energies* 2020; 13: 2306.
- [134] Lamolinara B, Pérez-Martínez A, Guardado-Yordi E, et al. Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. *Waste Manag* 2022; 140: 14–30.
- [135] Yu Q, Li H. Moderate separation of household kitchen waste towards global optimization of municipal solid waste management. *J Clean Prod* 2020; 277: 123330.
- [136] European Commission (ed). *A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment: updated bioeconomy strategy*. Luxembourg: Publications Office, 2018. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.2777/478385.
- [137] Prasad M, Foster P. Comprehensive Evaluation and Development of Irish Compost and Digestate Standards for Heavy Metals, Stability and Phytotoxicity. *Environments* 2023; 10: 166.