



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Innovazione e Sostenibilità nei Processi Produttivi: Analisi della Decarbonizzazione con Riferimento alle Emissioni GHG

Facoltà di Economia

Dipartimento di Management

*Dottorato in Commodity Sciences
XXXVII ciclo*

Dottorando

Alessandro Bernardo

Tutor Accademico

Prof. Roberto Ruggieri

Tutor Aziendale

Dott. Carlo Nicolais

Dott.ssa Ilaria Catastini

a.a. 2025/2026



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Tesi di Dottorato in Commodity Sciences

Innovazione e Sostenibilità nei Processi
Produttivi: Analisi della
Decarbonizzazione con Riferimento alle
Emissioni GHG

Sommario

PARTE I: L'applicazione della metodologia LCA nella valutazione delle emissioni dirette (Scope 1)... 5

CAPITOLO 1: Approcci integrati alla gestione delle emissioni: classificazione, stima e strategie di approvvigionamento..... 6

1.1 Nuovi Approcci alla Gestione Sostenibile delle Risorse 6

1.2 Innovazione, Tecnologia e Industria 4.0 11

1.3 Evoluzione e Prospettive 13

1.4 Il Sistema della Gestione delle Emissioni per la Transizione Energetica 15

1.4.1 Emissioni GHG: Classificazione delle Emissioni Dirette Scope 1 17

1.4.2 Emissioni GHG: il Sistema dei Certificati Verdi e gli Obiettivi di Transizione Energetica
19

1.4.3 Emissioni Indirette: il Ruolo dei Fornitori e come Impattano sugli Obiettivi Sostenibili
delle Imprese 21

CAPITOLO 2: Strategie di Decarbonizzazione delle Emissioni Dirette nel Settore Agroalimentare Italiano..... 27

2.1 Strumenti di valutazione delle Tecnologie Innovative dell'Agrobusiness 27

2.2 Il Sistema delle Emissioni nel Settore Agroalimentare 30

2.3 Applicazione dell'analisi LCA a Differenti Tecnologie Produttive 32

2.3.1. Produzione Industriale Standardizzata 32

2.3.2 Produzione Integrata 35

2.3.3 Produzione Integrata 35

2.4 Metodologia Life Cycle Assessment (LCA) 36

2.4.1 Goal, Scope e Confini del Sistema 36

2.4.2 Inventario e Valutazione di Impatto 37

2.5 Risultati 40

2.5.1 Life Cycle Impact Assessment 40

2.6 Discussione ed Implicazioni 48

2.6.1 Discussioni Teoriche ed Implicazioni 48

2.6.2 Conclusioni 52

PARTE II: Stima e analisi delle emissioni indirette (Scope 3) nell'impiantistica industriale 54

CAPITOLO 3: Metodi e modelli di previsione nella fornitura di materie prime..... 55

3.1 La filiera del Gruppo Maire tra analisi e best practices: un caso studio 55

3.2 Il cemento come materia prima chiave nella realizzazione di impianti eco-sostenibili 56

3.2.1 La produzione di CM in Europa 60

3.2.2 La produzione di CM negli Stati Uniti 61

3.2.3 La produzione di CM in Asia 63

3.2.4 Il ciclo di vita del cemento 63

3.3 Metodologia e stima degli indicatori di innovazione sostenibile del cemento 66

3.4 Decarbonizzazione delle materie prime cementizie nei diversi Paesi 73

CAPITOLO 4: Un modello predittivo per la proiezione delle emissioni e l'innovazione in differenti contesti internazionali	76
4.1 Sistemi di gestione e approvvigionamento delle materie prime: Europa, Stati Uniti, Cina, India ed Emirati Arabi Uniti	76
<i>4.1.1 Modello predittivo, Indicatore S e percentuali di risparmio dello Scope 3</i>	<i>89</i>
4.2 Valutazione e previsione delle potenzialità eco-sostenibili delle Filiera	92
4.3 Analisi e stima dei costi della CO2 nei sistemi ETS per le emissioni globali	95
<i>4.3.1 Commodities e mercati internazionali</i>	<i>96</i>
<i>4.3.2 Costo Compensato delle Materie Prime: Meccanismo di Calcolo.....</i>	<i>98</i>
4.4 Proiezioni di Costo Conclusioni ed Implicazioni	102
Bibliografia.....	104

PARTE I: L'applicazione della metodologia LCA nella valutazione delle emissioni dirette (Scope 1)

Nella prima parte della tesi si vuole analizzare il ruolo della sostenibilità ed il suo impatto sulle strategie d'impresa. Si vuole evidenziare come aziende che operano nei mercati globali sono maggiormente esposte a regolamenti, direttive e standard che possono rappresentare un rischio per la visione futura dell'impresa stessa. Pertanto, si vuole analizzare il modo di operare e comunicare gli obiettivi e risultati di sostenibilità delle aziende multinazionali con un focus su quelle italiane. Tuttavia, un rinnovato approccio ai temi ambientali potrebbe rappresentare nuovi vantaggi, opportunità e migliorare il vantaggio competitivo. La stima e le politiche interne volte alla minimizzazione delle emissioni CO₂ rappresentano un obiettivo fondamentale per il pieno raggiungimento della neutralità di carbonio di un'azienda. Il protocollo GHG offre un importante modello di categorizzazione per la gestione delle emissioni in dirette e indirette. Se per le prime i modelli di analisi sono noti e la ristrutturazione dei processi produttivi può incidere fortemente, per le seconde manca un modello di stima ed indicatori di sintesi che possano orientare le scelte strategiche delle imprese nell'approvvigionamento delle materie prime. In questo scenario le filiere produttive locali giocano un ruolo cruciale. In questa sezione verrà approfondito il concetto di emissioni di gas climalteranti, con un focus specifico sul biossido di carbonio. L'attenzione sarà rivolta alle strategie di riduzione delle emissioni dirette. Attraverso l'approccio LCA, verrà presentato il caso studio delle produzioni agroalimentari italiane, evidenziando come tecnologia e innovazione possano rappresentare strumenti efficaci ed efficienti per il raggiungimento dell'obiettivo Scope 1, ovvero la decarbonizzazione delle emissioni dirette.

CAPITOLO 1: Approcci integrati alla gestione delle emissioni: classificazione, stima e strategie di approvvigionamento

Nel contesto globale contemporaneo, il concetto di sviluppo economico sostenibile ha acquisito un'importanza centrale nelle strategie di crescita dei Paesi e delle aziende. Di fronte alla crisi ambientale, alla crescente disuguaglianza sociale e alle sfide economiche globali, i paradigmi tradizionali di sviluppo non sono più sufficienti per affrontare le complesse problematiche attuali. In questo contesto, le aziende sono chiamate a rivedere profondamente il loro ruolo, non più solo come entità economiche orientate al profitto (*stakeholders theory*), ma come attori chiave nella transizione verso modelli di sviluppo che integrino le dimensioni ambientale, sociale ed economica.

Le aziende, grazie alla loro capacità di innovare, alla loro influenza sui mercati e alla loro rete di relazioni globali, possono essere promotrici di un cambiamento strutturale verso la sostenibilità. Tuttavia, ciò implica una trasformazione delle pratiche aziendali tradizionali, passando da una visione orientata al breve termine a una prospettiva di lungo periodo, in cui il benessere del pianeta e delle persone diventa parte integrante delle strategie di business. In tal senso, concetti come la responsabilità sociale d'impresa (CSR), l'economia circolare e la decarbonizzazione sono diventati elementi essenziali nelle discussioni sul futuro dello sviluppo economico.

In questa fase di transizione, le aziende che sapranno adeguarsi e adottare i nuovi paradigmi di sviluppo sostenibile potranno non solo contribuire al raggiungimento degli obiettivi globali, come quelli delineati dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite, ma anche consolidare la propria posizione competitiva sul mercato. Sostenibilità non è solo una necessità etica, ma anche una strategia vincente per garantire resilienza economica, innovazione e successo nel lungo termine.

La transizione verso un paradigma di sviluppo economico sostenibile non può essere pienamente compresa senza analizzare il concetto di creazione di valore condiviso e il ruolo della teoria degli stakeholder. Questi due approcci, sempre più rilevanti nel panorama economico e aziendale, rappresentano una chiave per le imprese che intendono coniugare la crescita economica con l'impatto positivo sul benessere sociale e ambientale.

1.1 Nuovi Approcci alla Gestione Sostenibile delle Risorse

La creazione di valore condiviso, proposta da Michael Porter e Mark Kramer nel celebre articolo intitolato "The Big Idea: Creating Shared Value. How to Reinvent Capitalism and Unleash a Wave of Innovation and Growth" del 2011, si distingue dalla tradizionale visione del profitto aziendale. Secondo questo concetto, le aziende possono generare valore economico creando al contempo valore per la società, affrontando bisogni sociali, ambientali o economici. Non si tratta di considerare la

sostenibilità come un costo aggiuntivo o un sacrificio, ma come un'opportunità di innovazione e crescita. Ad esempio, aziende che investono in soluzioni sostenibili per migliorare l'efficienza energetica, ridurre i rifiuti o migliorare la qualità della vita dei propri dipendenti non solo migliorano il proprio impatto ambientale e sociale, ma ottengono anche benefici economici diretti e indiretti, come l'aumento della reputazione, la fidelizzazione dei clienti e la riduzione dei costi operativi. Pertanto, CSV richiama in capo alla governance un approccio proattivo che si differenzia da quello difensivo tipico della massimizzazione del profitto. In sostanza pianificare strategie di lungo periodo che coinvolgono in toto l'azienda significa prevenire tutte quelle situazioni di emergenza che possono verificarsi se non considerate con la dovuta attenzione. L'orientamento moderno del management aziendale è volto alla previsione e all'anticipo delle tendenze e dei bisogni futuri prima che questi vengano regolamentati dai policy makers di turno. In mercati globalizzati con un livello di compliance ridotto, ad esempio quello americano, le imprese con una dimensione medio grande eguagliano le performance ambientali, sociali ed economiche delle loro pari in mercati con un maggiore livello di pressione legislativa, è il caso dell'Europa (Aresu., et al 2023). In un contesto in rapida evoluzione e innovazione tecnologica, si inserisce anche la teoria degli stakeholder, sviluppata da R.E. Freeman che, nel 1984, nel volume *Strategic Management. A stakeholder Approach*”, delinea, negli anni Ottanta del secolo scorso, un nuovo orizzonte utile per l'analisi dei contesti competitivi, particolarmente turbolenti, e per i quali nessuno dei paradigmi teorici allora vigenti sembrava essere applicabile. Questa teoria sostiene che le imprese non devono concentrarsi esclusivamente sugli interessi degli azionisti (shareholder), ma devono considerare l'intera rete di soggetti coinvolti o influenzati dalle loro attività: clienti, fornitori, dipendenti, comunità locali, enti governativi e l'ambiente. Per stakeholder si fa riferimento a qualsiasi portatore di interesse da e verso l'azienda. In sostanza vengono mappati tutti gli stakeholder e divisi in interni ed esterni, i primi sono individui o gruppi che fanno parte direttamente dell'organizzazione o hanno un interesse diretto nelle sue operazioni quotidiane (dipendenti, managers e fornitori), i secondi non fanno parte dell'organizzazione ma sono comunque influenzati o interessati dalle sue attività (clienti, fornitori e comunità locali). Ogni decisione aziendale dovrebbe quindi tenere conto delle esigenze e delle aspettative di questi gruppi, poiché il loro benessere è intrinsecamente legato al successo di lungo periodo dell'azienda stessa. L'integrazione della creazione di valore condiviso e della teoria degli stakeholder nella strategia aziendale contribuisce a ridefinire il ruolo delle imprese nello sviluppo economico sostenibile. Lontano dalla vecchia dicotomia tra profitto e responsabilità sociale, oggi le aziende possono essere motori di crescita economica, protezione ambientale e coesione sociale. In questo modo, le imprese si posizionano non solo come agenti di cambiamento economico, ma anche come partner essenziali per la costruzione di una società più equa e sostenibile. Le imprese che

adottano questi approcci possono non solo mitigare i rischi legati alla crescente pressione normativa e sociale in tema di sostenibilità, ma anche creare opportunità di business innovativo, diventando protagoniste di un futuro in cui il successo economico è indissolubilmente legato al progresso sociale e ambientale.

Nel pensiero neoclassico, il rapporto tra il successo economico di un'impresa e il suo impegno verso un progresso sociale è visto come un trade-off. Se “fare del bene” è considerato esclusivamente una spesa o addirittura un limite, un'impresa che si dedica a soddisfare un bisogno lontano dal proprio core business, con l'obiettivo di massimizzare il profitto, rischia di apparire poco credibile. Al contrario, il concetto di valore condiviso riconosce che i bisogni della società, non solo quelli economici convenzionali, definiscono il mercato. Il malfunzionamento e le debolezze dei contesti sociali in cui le imprese operano generano costi o portano, quantomeno, a un'inefficienza della catena produttiva. Competitività dell'impresa e benessere della comunità in cui essa opera sono, infatti, interconnessi e interdipendenti, e sanare queste debolezze non rappresenta necessariamente una spesa infruttuosa. Vi è invece un'espansione delle connessioni tra progresso economico dell'impresa e progresso sociale della comunità, con benefici reciproci. Il valore, in questo contesto, non si definisce solamente in termini di benefici, ma di benefici in relazione ai costi. La creazione di valore e quindi il profitto sono determinati dai ricavi generati dai clienti meno i costi relativi. Le imprese, tuttavia, raramente affrontano i problemi sociali in una prospettiva di valore, considerandoli piuttosto come aspetti periferici, il che oscura le connessioni tra obiettivi economici e sociali.

Porre al centro dell'attività d'impresa la relazione tra impresa e comunità apre molte opportunità per soddisfare nuovi bisogni, acquisire efficienza, creare differenziazione ed espandere i mercati. Il Valore Condiviso comprende tutte quelle strategie, azioni e politiche che aumentano la competitività di un business migliorando simultaneamente le condizioni economiche e sociali della comunità nella quale esso opera. Vista dalla prospettiva dei manager, il focus tradizionale è stato spesso limitato al settore o al mercato dell'azienda, trascurando l'influenza della comunità e della società di riferimento sulla produttività, sull'innovazione e, in ultima analisi, sui risultati economici dell'impresa. Si viene così a creare una connessione significativa tra vantaggio competitivo e risoluzione dei problemi sociali. Per la creazione di valore condiviso, sono stati identificati tre percorsi strategici principali: riconcepire prodotti e mercati, ridefinire la produttività nella catena del valore, facilitare lo sviluppo di cluster locali.

Il punto di partenza per creare valore condiviso è l'identificazione dei bisogni di una certa comunità e la definizione di una soluzione che possa includere tali bisogni in un prodotto o servizio. La ricerca di questo tipo di opportunità da parte delle imprese deve essere continua, perché continuamente emergono possibilità di differenziazione e riposizionamento in contesti già esistenti, oltre a possibilità

di esplorare mercati nuovi. Riconcepire prodotti e mercati è uno degli approcci principali per creare valore condiviso. Le esigenze e i bisogni sociali sono enormi: salute, migliori condizioni di alloggio, assistenza per gli anziani, maggiore sicurezza finanziaria, e minore impatto ambientale. Questi sono i principali bisogni attualmente insoddisfatti nell'economia globale e riguardano, anche se in forma e misura diversa, sia le economie avanzate che quelle in via di sviluppo. Nelle economie avanzate, la domanda di beni e servizi che rispondono a bisogni sociali sta rapidamente crescendo; per esempio, si osserva un cambiamento nelle abitudini alimentari e un nuovo atteggiamento verso lo sfruttamento delle risorse naturali. Nelle economie in via di sviluppo, l'impatto della ridefinizione del prodotto o servizio è ancora più evidente, generando opportunità di creare valore condiviso in settori e mercati molto diversi.

Ridefinire la produttività nella catena del valore" significa ripensare e riorganizzare le attività e le risorse di un'impresa in modo da ottenere benefici sia economici che sociali. Si tratta di un approccio strategico che riconosce come i problemi e le esigenze della comunità possano avere un impatto diretto sulla produttività e sull'efficienza delle imprese. Questo concetto di produttività ampliata va oltre l'idea tradizionale di ottimizzare i processi solo per ridurre i costi e aumentare i profitti: mira invece a integrare obiettivi sociali e ambientali che possono migliorare la competitività dell'azienda e, allo stesso tempo, generare un impatto positivo sulla comunità in cui l'impresa opera. In molti casi, i problemi sociali o ambientali possono rappresentare costi o inefficienze per le imprese. Ad esempio, la scarsa qualità delle infrastrutture locali, la difficoltà di accesso a fonti energetiche pulite, oppure problemi di salute e benessere dei lavoratori possono influire negativamente sui costi operativi, sulla produttività dei dipendenti e sulla stabilità della catena di fornitura. Ridefinire la produttività della catena del valore significa affrontare questi aspetti esterni, sviluppando soluzioni che siano vantaggiose sia per l'impresa sia per la società.

Un esempio di ridefinizione della produttività nella catena del valore è l'ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali. Molte imprese hanno iniziato a investire in tecnologie più efficienti per ridurre l'impatto ambientale delle proprie operazioni, come il consumo di acqua ed energia. Questi investimenti non solo migliorano l'efficienza dell'impresa e riducono i costi operativi, ma riducono anche l'impatto ambientale e migliorano la reputazione aziendale, rispondendo a una crescente domanda di sostenibilità da parte dei consumatori. Un altro aspetto riguarda la catena di fornitura. Migliorare le condizioni dei fornitori locali e investire nello sviluppo delle loro competenze può aumentare la qualità dei prodotti e ridurre i rischi associati a forniture instabili o inaffidabili. Ad esempio, alcune aziende scelgono di collaborare con fornitori in modo da migliorare le condizioni di lavoro, garantendo una formazione adeguata e il rispetto degli standard di sicurezza. Queste azioni non solo migliorano la qualità della produzione, ma possono anche ridurre i turnover e aumentare la

fedeltà dei fornitori. Ridefinire la produttività nella catena del valore può anche significare rivedere il processo di distribuzione e di logistica. Ottimizzare i trasporti e la gestione dei materiali riducendo le emissioni di CO₂, migliorando l'efficienza dei veicoli e riducendo gli sprechi può portare a un risparmio significativo e, allo stesso tempo, rispondere alle pressioni sociali per una maggiore sostenibilità ambientale.

Infine, un aspetto cruciale della ridefinizione della produttività riguarda la forza lavoro. Investire nella salute e nel benessere dei dipendenti può incrementare la produttività, ridurre l'assenteismo e migliorare il morale, creando un ambiente di lavoro più sano e attraente per i lavoratori. Ad esempio, aziende che offrono programmi di assistenza sanitaria, flessibilità lavorativa o supporto per l'equilibrio tra vita privata e lavoro spesso riscontrano miglioramenti significativi nella produttività e nella qualità del lavoro. Ridefinire la produttività nella catena del valore non è semplicemente un modo per migliorare l'efficienza economica dell'impresa, ma rappresenta una strategia integrata per creare valore condiviso, generando benefici per l'impresa e per la comunità in cui opera. Questo approccio dimostra che progresso sociale e produttività non sono in conflitto, ma anzi, possono rafforzarsi a vicenda in un circolo virtuoso.

Facilitare lo sviluppo di cluster locali si riferisce alla creazione di un ecosistema in cui imprese, fornitori, istituzioni pubbliche, organizzazioni non governative, e altre parti interessate collaborano e operano in sinergia in una determinata area geografica. Un cluster locale è, in sostanza, un insieme di attività economiche interconnesse che si sviluppano in una regione specifica, beneficiando di una serie di risorse comuni, competenze specializzate e infrastrutture. Esempi classici di cluster locali includono la Silicon Valley per l'industria tecnologica, il distretto del tessile in Italia, o i poli dell'automotive in Germania. Facilitare lo sviluppo di cluster locali consente di generare benefici che vanno ben oltre la singola impresa. I cluster possono migliorare la competitività delle aziende che ne fanno parte, aiutando a ridurre i costi, incrementare l'innovazione e stimolare la crescita economica della regione. Inoltre, i cluster locali possono attrarre investimenti, fornire accesso a una forza lavoro qualificata, e favorire la collaborazione tra imprese che altrimenti sarebbero concorrenti. Queste collaborazioni si traducono spesso in un miglioramento delle condizioni sociali ed economiche della comunità locale, poiché generano posti di lavoro, sviluppano competenze locali e, in alcuni casi, favoriscono lo sviluppo di infrastrutture (come strade, scuole e ospedali) che migliorano la qualità della vita.

Le imprese possono facilitare lo sviluppo di cluster locali adottando pratiche e strategie che rafforzano i legami con il territorio e favoriscono la cooperazione con altre organizzazioni locali. Ad esempio, un'azienda può scegliere di collaborare con fornitori locali per sostenere l'economia del territorio e migliorare la propria catena di fornitura. Allo stesso modo, può investire in formazione e sviluppo

delle competenze della forza lavoro locale, per assicurarsi che vi siano risorse umane qualificate e specializzate. In molti casi, le imprese possono anche lavorare insieme a enti governativi, associazioni industriali e istituti educativi per favorire lo sviluppo di cluster. Questo può includere iniziative come la creazione di programmi di formazione in partnership con scuole e università locali, il supporto a incubatori di startup e progetti di ricerca, o la partecipazione a iniziative di riqualificazione urbana. Facilitare i cluster locali significa quindi non solo investire direttamente nella crescita dell'azienda stessa, ma anche contribuire al miglioramento del contesto socioeconomico in cui opera.

Favorire lo sviluppo di cluster locali rappresenta una strategia di valore condiviso, poiché crea benefici sia per l'impresa che per la comunità. I cluster locali migliorano l'accesso delle imprese a risorse chiave (come fornitori, lavoratori qualificati e istituti di ricerca) che consentono di aumentare l'efficienza e l'innovazione. Per la comunità locale, un cluster ben sviluppato significa maggiori opportunità di lavoro, crescita economica, e miglioramenti in infrastrutture e servizi pubblici. Un esempio concreto di questo approccio potrebbe essere un'impresa nel settore agricolo che decide di investire in un cluster agricolo locale, collaborando con agricoltori, distributori e istituzioni locali per migliorare l'efficienza della produzione alimentare nella regione. Così facendo, non solo migliora la propria catena di fornitura, ma stimola anche lo sviluppo dell'intera comunità agricola locale, aumentando la produttività e la redditività per tutti gli attori coinvolti.

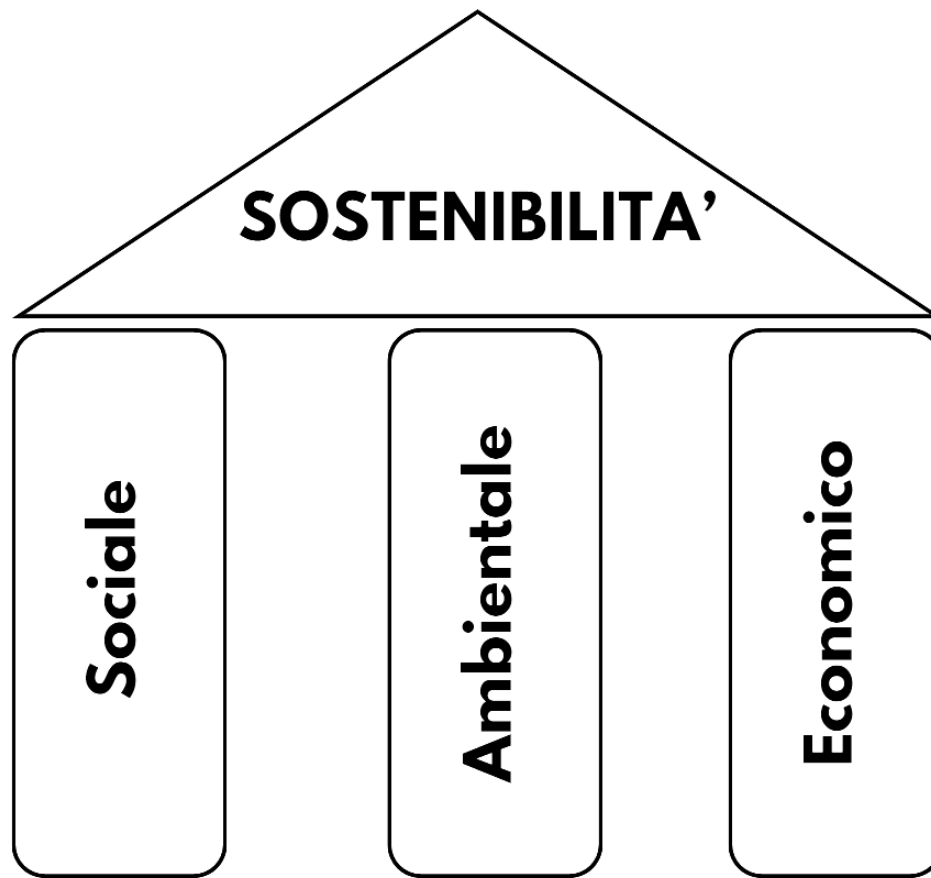
1.2 Innovazione, Tecnologia e Industria 4.0

Il mondo moderno è sempre più interessato all'emergere e all'adozione dell'Industria 4.0 (I4.0), un sistema di produzione avanzato basato sull'informatica (IT) e orientato verso la realizzazione di una società sostenibile (Khan et al., 2021). Nell'ambito produttivo, I4.0 ha introdotto nuove tecnologie che consentono di ottenere il massimo output con un utilizzo efficiente delle risorse (Kamble et al., 2018). Tecnologie come i sistemi cyber-fisici (CPS) e l'Internet delle cose (IoT) aprono nuove prospettive per lo sviluppo industriale, migliorando produttività ed efficienza nelle organizzazioni. Tjahjono et al. (2017) sottolineano come I4.0 integri big data (BD), IoT e intelligenza artificiale (AI) per ottimizzare le operazioni di produzione. Di conseguenza, I4.0 ha un grande potenziale per la creazione di valore industriale sostenibile, con impatti significativi in ambito sociale, economico e ambientale, grazie al miglioramento dell'efficienza delle risorse (Sharma et al., 2020).

Il nuovo concetto di sostenibilità richiede un cambiamento rispetto agli approcci tradizionali di risoluzione dei problemi, favorendo approcci sistemici per affrontare le sfide del cambiamento. Questo implica un'evoluzione dalle soluzioni basate su "fare le cose meglio" a quelle incentrate su "fare le cose migliori" (Sterling, 2004; McKibben, 2007). Il concetto di sviluppo sostenibile è ampio e include il progresso umano (Brown et al., 1987), l'uso delle risorse (Mieg, 2012) e le interazioni

aziendali (Strandhagen et al., 2017). Elkington (1998) definisce la sostenibilità su tre pilastri principali: sociale, economico e ambientale, i quali compongono la tripla linea di fondo (TBL).

Figura 1. Tripla linea di fondo (TBL), Elkington (1998). Elaborazione dell'autore.



La sostenibilità, secondo Elkington (1998), mira a soddisfare le esigenze delle generazioni presenti e future senza compromettere l'ambiente. Stock e Seliger (2016) affermano che I4.0 possiede un grande potenziale per contribuire alla creazione di valore industriale sostenibile all'interno della TBL. I modelli aziendali sostenibili, che includono la TBL, considerano l'ambiente e la società insieme a diverse parti interessate (Bocken et al., 2014). Questi modelli sono fondamentali per implementare processi aziendali innovativi e sostenibili, adottando strategie di economia circolare (CE) come la riduzione, il rallentamento e la chiusura del ciclo delle risorse (Geissdoerfer et al., 2017), diventando così fattori chiave per il vantaggio competitivo (Bocken et al., 2014) e lo sviluppo sostenibile.

Nonostante l'importanza riconosciuta di I4.0 come catalizzatore per lo sviluppo sostenibile (Beier et al., 2017), sono poche le analisi che hanno esplorato I4.0 da una prospettiva di sostenibilità (Sharma et al., 2021). Questo evidenzia che l'intersezione tra I4.0 e i paradigmi di sostenibilità è ancora in una fase di sviluppo (Jabbour et al., 2020; Kiron e Unruh, 2018; Fisher et al., 2018). Alcuni ricercatori hanno studiato le tecnologie I4.0 in relazione alla TBL e alle pratiche di economia circolare (Asiimwe e de Kock, 2019; Jabbour et al., 2020; Nobre e Tavares, 2017; Ribeiro et al., 2020; Alcayaga et al.,

2019; Rosa et al., 2020; Odważny et al., 2018), mentre altri si sono concentrati sul valore industriale sostenibile generato da I4.0, evidenziando come le interazioni tra società, aziende e ambiente possano essere migliorate attraverso gli SBM (Machado et al., 2020; Tirabeni et al., 2019). Tuttavia, l'analisi di questi studi mostra che essi tendono a coprire solo alcuni degli aspetti rilevanti (I4.0, TBL, CE, SBM) e spesso non offrono una visione integrata di questi temi interconnessi (Birkel e Müller, 2021).

1.3 Evoluzione e Prospettive

Il concetto di sostenibilità ha origine nella silvicoltura, dove indica il principio di non raccogliere mai più di quanto la foresta produca attraverso la nuova crescita (Wiersum, 1995). Il termine tedesco “Nachhaltigkeit” (sostenibilità) è stato utilizzato per la prima volta con questo significato nel 1713 (Wilderer, 2007). La preoccupazione per la conservazione delle risorse naturali per le generazioni future è senza dubbio antica: i nostri antenati del Paleolitico temevano probabilmente l'estinzione delle loro prede, e i primi agricoltori si preoccupavano di mantenere la fertilità del suolo. Le credenze tradizionali incoraggiavano una visione di responsabilità e di attenzione verso le generazioni future, come espresso nelle parole di un capo tribale nigeriano, spesso citato, che vedeva la comunità come composta da “molti morti, pochi vivi e innumerevoli altri non ancora nati” (Dinnen and Firth, 2008; Ike, 1984). Probabilmente, sono sempre esistite due visioni opposte del rapporto tra l'umanità e la natura: una che sottolinea l'adattamento e l'armonia, e un'altra che considera la natura come qualcosa da conquistare. Quest'ultima visione potrebbe aver prevalso nella civiltà occidentale, almeno negli ultimi secoli, ma il suo contrappunto non è mai stato assente. La sostenibilità è un argomento naturale per gli economisti, poiché la scarsità delle risorse è un tema centrale per questa scienza. Un esempio celebre è il lavoro di Thomas Malthus, che nel 1798 formulò una teoria sulla carestia di massa imminente a causa dell'incapacità della terra coltivabile di sfamare una popolazione in espansione (Malthus, 1986). Una teoria sulla gestione ottimale delle risorse non rinnovabili, ancora rilevante oggi, fu formulata dall'economista americano Harold Hotelling nel 1931 (Hotelling, 1931).

Un momento cruciale per attirare l'attenzione delle politiche pubbliche globali fu il rapporto del Club di Roma (Meadows et al., 2018), che prevedeva che molte risorse naturali cruciali per la nostra sopravvivenza si sarebbero esaurite nel giro di una o due generazioni. Tuttavia, il pessimismo non è appropriato per le politiche pubbliche, che mirano a migliorare la realtà. Per questo motivo, il rapporto della Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo delle Nazioni Unite, meglio noto come Rapporto Brundtland, è stato accolto positivamente per aver proposto una via d'uscita da questa crisi imminente (Borowy, 2013). Questo rapporto ha adottato il concetto di sostenibilità e gli ha conferito il riconoscimento globale di cui gode oggi. La domanda che Brundtland e i suoi colleghi si posero fu: come è possibile conciliare le aspirazioni delle nazioni per una vita migliore con le risorse naturali

limitate e i rischi di degrado ambientale? La loro risposta fu lo sviluppo sostenibile, definito dalla Commissione come:

“lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni” (World Commission on Environment, 1987).

In questo modo, le preoccupazioni ambientali diventano fondamentali, ma l'argomentazione di fondo è una questione di benessere, considerata in un contesto di equità intergenerazionale. Dovremmo prenderci cura dell'ambiente non tanto per il suo valore intrinseco, ma per preservare le risorse per i nostri figli con i concetti di equità *intra e inter* generazionale. Da allora, ci sono stati due importanti sviluppi nel concetto di sostenibilità: il primo è la sua interpretazione come un equilibrio tra tre dimensioni, che devono coesistere in armonia: sociale, economica e ambientale, come approfondito nel paragrafo 1.3 (Kuhlman and Farrington, 2010). Il secondo è la distinzione tra "sostenibilità forte" e "sostenibilità debole". Quest'ultimi rappresentano due approcci distinti alla gestione delle risorse naturali e alla preservazione dell'ambiente. La sostenibilità debole si basa sull'idea che il capitale naturale (le risorse ambientali) possa essere sostituito da capitale umano o tecnologico, assumendo che le innovazioni future permetteranno di compensare le risorse naturali perdute. In questo approccio, si considera accettabile degradare alcuni aspetti dell'ambiente, purché la crescita economica e il progresso tecnico possano eventualmente rimediare (Bijon et al., 2022; Ucal and Xydis, 2020; Velenturf and Purnell, 2021). La sostenibilità forte, al contrario, afferma che il capitale naturale è insostituibile: ci sono risorse e funzioni ecologiche che non possono essere replicate o sostituite artificialmente (Nasrollahi, Z., Hashemi et al., 2020; Ruggerio, 2021). Questo approccio promuove la conservazione rigorosa delle risorse naturali e l'adozione di limiti assoluti sull'uso delle risorse, ritenendo che alcune funzioni ecologiche siano indispensabili per il benessere umano e per la sopravvivenza del pianeta (Etxano and Villalba-Eguiluz, 2021; Taghvaei et al., 2022).

La sostenibilità, in tutte le sue forme, può contribuire a creare condizioni ideali per affrontare le sfide del XXI secolo, sia in ambito aziendale che ambientale (Greenwood e Holt, 2014; Pearce, 2008). Il Rapporto Brundtland (1987) definisce lo sviluppo sostenibile come "lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni" (Diesendorf, 2000). Questo concetto implica dei limiti, non assoluti, ma determinati dalle tecnologie disponibili, dall'organizzazione sociale e dalla capacità della biosfera di gestire gli impatti delle attività umane. Di conseguenza, lo sviluppo sostenibile non riguarda solo le problematiche ambientali ma affronta anche sfide sociali e complesse, che evolvono insieme alle società umane e agli ecosistemi (Robert et al., 2005). Sia il concetto di sostenibilità che quello di sviluppo sostenibile hanno guadagnato attenzione globale come soluzioni per problematiche ambientali, energetiche, climatiche e di sviluppo rurale (Olawumi e Chan, 2018; Axelsson et al., 2011). Norton (2005) utilizza

i termini "sostenibilità" e "sviluppo sostenibile" in modo intercambiabile, mentre Axelsson et al. (2011) distinguono i due concetti. Quest'ultimo approccio vede la sostenibilità come un termine concettuale e una visione politica per prevenire l'esaurimento delle risorse naturali, affrontando temi quali biodiversità, conservazione e integrità ecologica (Ramakrishnan, 2001). D'altra parte, Sartori et al. (2014) interpretano lo sviluppo sostenibile come un processo collettivo multidimensionale che coinvolge vari attori sociali. Questo studio considera entrambi i concetti come "processi di apprendimento e orientamento sociale" (Lee, 1994), con la sostenibilità che funge da guida per raggiungere gli obiettivi dello sviluppo sostenibile (Sartori et al., 2014).

La visione attuale più accreditata di sviluppo sostenibile è rappresentata dal modello delle triple bottom line (TBL) (Elkington, 1998), che include tre dimensioni: economica, sociale e ambientale. La sostenibilità economica garantisce la redditività e la solidità finanziaria; la sostenibilità sociale contribuisce alla crescita del capitale umano e sociale; mentre la sostenibilità ambientale si riferisce all'utilizzo delle risorse rinnovabili (Schulz e Flanigan, 2016; Hubbard, 2009; Norman et al., 2004). Inoltre, la ricerca si è concentrata sull'economia circolare come strumento di sviluppo sostenibile, in grado di rispondere agli interessi della società (Sauvé et al., 2016; Geng e Doberstein, 2008). L'economia circolare rappresenta un cambiamento di mentalità, che prevede un modello produttivo basato su "ridurre, riutilizzare, riciclare, recuperare, rifabbricare e riprogettare" piuttosto che su quello lineare tradizionale di "prendere, produrre, usare e smaltire" (Jabbour et al., 2020).

In risposta ai rapidi cambiamenti tecnologici e ai paradigmi di sostenibilità, i modelli di business sostenibili sono diventati una priorità per le aziende. Seguendo Machado et al. (2020), i modelli sostenibili sono strumenti che cercano di bilanciare le esigenze sociali, ambientali ed economiche, offrendo vantaggi come la creazione di posti di lavoro, il risparmio sui costi e la riduzione degli impatti ambientali (Boons e Lüdeke-Freund, 2013). Il raggiungimento dello sviluppo sostenibile richiede un cambiamento sistemico e innovazioni nei prodotti, stili di vita, processi e strutture organizzative (Smith et al., 2012), e pertanto un sistema integrato di sviluppo sostenibile deve includere il modello delle triple bottom line (TBL), economia circolare e business model sostenibili.

1.4 Il Sistema della Gestione delle Emissioni per la Transizione Energetica

I moderni modelli manageriali mostrano come le strategie volte alla creazione di valore condiviso in applicazioni che contribuiscono agli obiettivi di sviluppo sostenibile promossi dalle Nazioni Unite è un argomento di crescente rilevanza (Diniz et al., 2021). Il segretariato della Convenzione sui cambiamenti climatici (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change), vede un'opportunità di impiegare nuove tecnologie per controllare la concentrazione di gas serra (GHG) nell'atmosfera poiché queste innovazioni possono migliorare il tracciamento e la produzione di inventari delle emissioni di gas serra, fornendo maggiore trasparenza e prevenendo il doppio

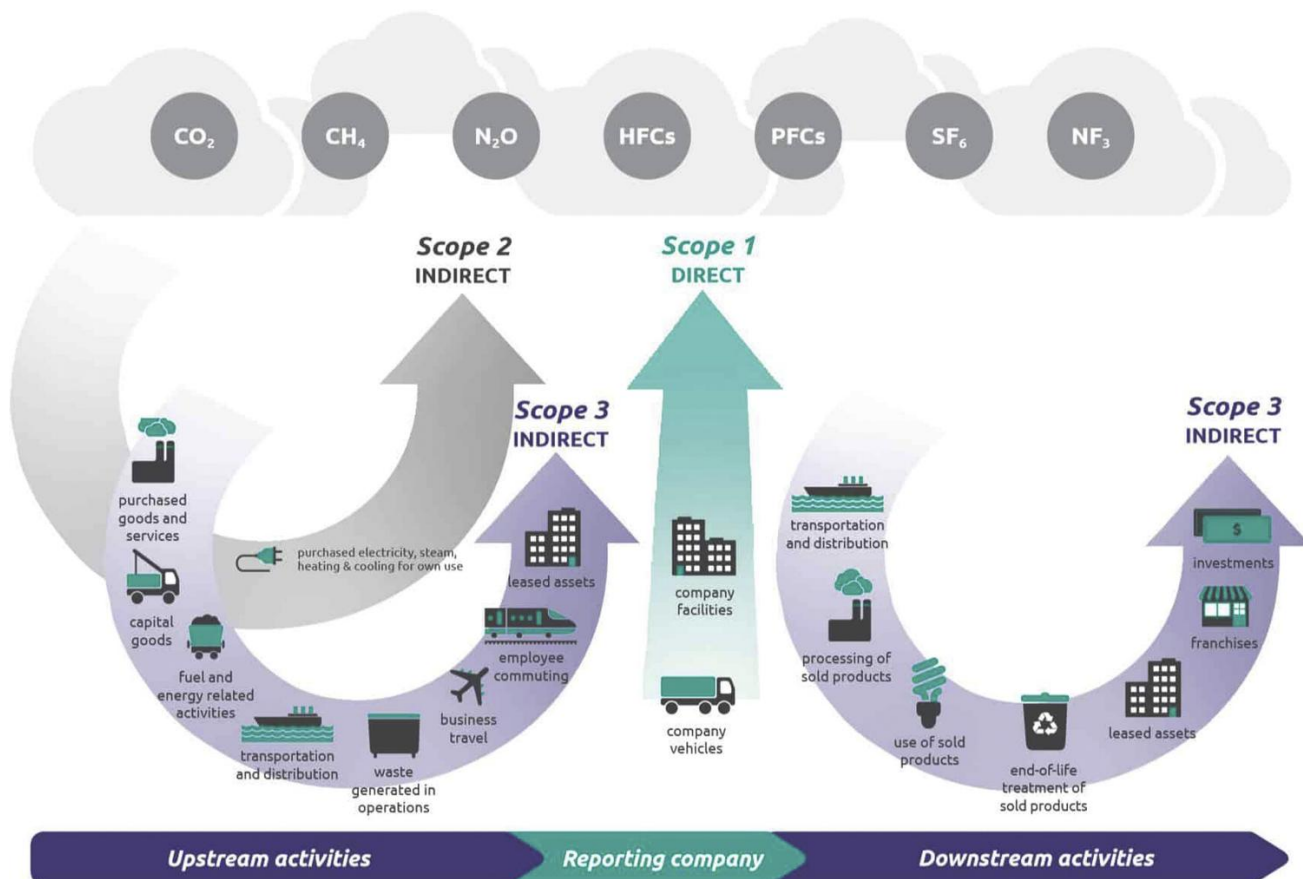
conteggio di queste emissioni. La guida più apprezzata per le valutazioni dei gas serra è il GHG Protocol (Downie e Stubbs, 2013) che utilizza una metodologia sviluppata da due organizzazioni globali, il World Resources Institute (WRI) e il World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).

Il Protocollo di Kyoto del 1997 e il suo emendamento a Doha del 2012 sono stati ratificati da 192 parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC, 2015), che richiedono ai paesi con obiettivi vincolanti ai sensi del Protocollo di Kyoto di riferire annualmente sulle proprie emissioni (Green, 2010). Il Greenhouse Gas Protocol (GHG) è uno strumento utilizzato dalle organizzazioni per creare inventari dei gas serra. Si tratta di una metodologia sviluppata sotto la guida del World Resources Institute (WRI) e del World Business Council on Sustainable Development (WBCSD) in collaborazione con alcune delle più grandi aziende al mondo ed è la guida più apprezzata per le valutazioni dei gas serra (Downie e Stubbs, 2013). Questa metodologia è diventata uno standard globale per le multinazionali, i governi e altre istituzioni per valutare la propria impronta di carbonio (Patchell, 2018). Il Protocollo GHG chiede essenzialmente alle aziende di valutare la propria responsabilità per le emissioni di gas serra distinguendo tra tre ambiti (Fig. 2), che rappresentano diverse fonti di emissioni di gas serra aziendali (Protocollo, 2013):

- Scope 1: tutto il carbonio diretto, compresi i combustibili bruciati e i trasporti di proprietà dell'entità segnalante. Questa tipologia di emissioni coinvolge l'impresa direttamente ed è legata alle strategie, all'innovazione tecnologica ed al modello organizzativo interno;
- Scope 2: emissioni indirette di carbonio derivanti dall'elettricità, dal calore o dal vapore acquistati e consumati dall'entità segnalante. Scope 2 è la prima tipologia di emissioni indirette nonostante questo sono legate alla tipologia ed al volume di produzione nonché alla gestione dello Scope 1;
- Scope 3: altre emissioni indirette di carbonio, come l'estrazione e la produzione di materiali e combustibili acquistati, attività legate al trasporto su veicoli non posseduti o controllati dall'entità segnalante, attività legate all'elettricità non comprese nell'Ambito 2 (Patchell, 2018)

In questo ambito rientrano anche fornitori o appaltatori di attività o progetti realizzati a nome dell'entità segnalante. Ad esempio, nella realizzazione di un impianto industriale dove l'entità segnalante si occupa della progettazione e coordinamento mentre i fornitori sono le aziende che forniscono le materie prime che poi saranno assemblate.

Figura 2. Gli Scope 1, 2 e 3 del protocollo GHG.



Fonte: GHG Protocol (2023)

Le dichiarazioni negli Scope 2 e 3 (note come emissioni "indirette") sono le più complesse da dichiarare poiché riguardano i GHG emessi lungo tutta la catena del valore delle aziende (Downie e Stubbs, 2013). Per la loro complessità, gli Scope 2 e 3 sono costantemente sottoposti a revisione per garantire coerenza, trasparenza e accuratezza. Di seguito viene approfondita la complessità dietro la gestione dei 3 ambiti del protocollo GHG.

1.4.1 Emissioni GHG: Classificazione delle Emissioni Dirette Scope 1

Le emissioni Scope 1 rappresentano tutte le emissioni dirette di gas serra derivanti da fonti possedute o controllate da un'organizzazione (Diniz et al., 2021). Questi includono, ad esempio, le emissioni derivanti dall'uso di combustibili fossili per il riscaldamento o il raffreddamento degli edifici aziendali, i processi produttivi, e i veicoli di proprietà dell'azienda. La gestione di queste emissioni risulta particolarmente complessa per diverse ragioni. Innanzitutto, la loro natura diretta richiede un monitoraggio preciso e continuo delle attività aziendali, che può essere costoso e tecnicamente impegnativo. Inoltre, molte aziende dipendono da infrastrutture e tecnologie difficili da sostituire nel breve termine, come impianti industriali ad alta intensità energetica o flotte di veicoli alimentati da combustibili tradizionali.

La difficoltà nella gestione delle emissioni Scope 1 si intreccia con la crescente pressione esercitata dal mercato internazionale, dai governi e dai consumatori verso pratiche sostenibili. Ridurre queste emissioni è di fondamentale importanza non solo per contribuire agli obiettivi climatici globali, ma anche per garantire la competitività aziendale. Le aziende che operano in mercati globali devono infatti affrontare normative sempre più stringenti in materia di emissioni e rispondere a una crescente domanda di trasparenza da parte degli stakeholder (Dhaliwal et al., 2012; Aresu et al., 2023). Una delle maggiori difficoltà che ha portato alla revisione delle strategie manageriali di medio-lungo periodo è proprio il gap economico tra nuova e vecchia tecnologia. Per ipotesi data un'azienda Alfa che opera sul mercato con una data tecnologia Beta, secondo la visione di breve periodo, volta alla massimizzazione del profitto, Alfa continuerà a produrre con Beta fino quando i ricavi saranno superiori ai costi sostenuti per l'acquisto della tecnologia Beta per una generica quantità di n unità prodotte. In ottica di lungo periodo Alfa avrebbe dovuto investire in una nuova tecnologia Gamma che gli permetterà di innovare i propri processi produttivi dal punto di vista della qualità e della sostenibilità dei prodotti/servizi offerti. Gamma essendo una tecnologia innovativa per ipotesi è più costosa di Beta e necessita anche di un capitale umano più qualificato (Penrose, 2009) pertanto i costi legati alla nuova tecnologia sono superiori alla vecchia (eq. 1).

$$(eq. 1) \quad \text{costo } \gamma > \text{costo } \beta$$

Se si tiene conto anche della CO₂ emessa dalle diverse produzioni questa rappresenta un costo per le aziende come regolamentato dal sistema Emission Trading System (ETS), pertanto:

$$(eq. 2) \quad \text{costo } \gamma + \text{costo CO}_2 \text{ di } \gamma > \text{costo } \beta + \text{costo CO}_2 \text{ di } \beta$$

Data la tecnologia Gamma più performante e più sostenibile i costi della CO₂ saranno più bassi per ogni anno di produzione, data anche l'innovatività e l'aumento della qualità della produzione si ottiene nel tempo:

$$(eq. 3) \text{ al tempo } t_0 \rightarrow \text{costo } \gamma + \text{costo CO}_2 \text{ di } \gamma > \text{costo } \beta + \text{costo CO}_2 \text{ di } \beta$$

$$\text{al tempo } t_1 \rightarrow \text{costo } \gamma + \text{costo CO}_2 \text{ di } \gamma = \text{costo } \beta + \text{costo CO}_2 \text{ di } \beta$$

$$\text{al tempo } t_2 \rightarrow \text{costo } \gamma + \text{costo CO}_2 \text{ di } \gamma < \text{costo } \beta + \text{costo CO}_2 \text{ di } \beta$$

Questo fenomeno viene identificato da Lazonick (2009) come un nuovo modello di business, che prende il nome di New Economy Business Model, che vede nella nuova tecnologia una visione di lungo periodo che permetterà all'impresa Alfa di rimanere competitiva nel tempo e affrontare le nuove sfide del mercato con approccio proattivo. Al tempo t_0 (eq. 3) il costo di Beta è inferiore a quello di Gamma poiché la vecchia tecnologia ormai obsoleta ha un valore di mercato inferiore alla nuova ed anche il potenziale di sostenibilità è diverso tale che al tempo t_1 (eq. 3) i costi di Beta eguagliano quelli di Gamma. Questo perché il costo della CO₂ abbinato alla manutenzione ed altri oneri accessori rendono Beta più costosa del tempo t_0 . La chiave di lettura che propone Lazonick

(2009) è l'opportunità da parte delle aziende di intercettare i futuri cambiamenti e le nuove tendenze in modo tale da aumentare la reattività e mantenere o aumentare la propria competitività nel tempo sia dal punto di vista economico sia dal punto di vista di valore condiviso (modello TBL).

Inoltre, i consumatori tendono a premiare le imprese che dimostrano un impegno concreto verso la sostenibilità, rendendo la riduzione delle emissioni Scope 1 un elemento chiave per mantenere una reputazione positiva e accedere a nuove opportunità di mercato (Zhang and Zhao, 2022). La transizione verso una gestione efficace delle emissioni Scope 1 richiede un approccio strategico che includa investimenti in tecnologie pulite, la riorganizzazione dei processi produttivi e l'adozione di misure per migliorare l'efficienza energetica. Sebbene impegnativo, questo percorso rappresenta non solo una sfida, ma anche un'opportunità per le aziende di guidare l'innovazione e costruire un vantaggio competitivo sostenibile.

1.4.2 Emissioni GHG: il Sistema dei Certificati Verdi e gli Obiettivi di Transizione Energetica

Le emissioni Scope 2 includono tutte le emissioni indirette generate dalla produzione di energia acquistata e consumata da un'organizzazione, come l'elettricità, il calore o il vapore. Queste emissioni, pur non provenendo direttamente dalle attività aziendali, sono strettamente legate al funzionamento delle imprese, in quanto derivano dalla produzione di energia da parte di fornitori esterni. La loro misurazione è cruciale, poiché rappresentano una quota significativa dell'impronta di carbonio di molte aziende, soprattutto di quelle che operano in settori non industriali ma ad alta intensità energetica, come i servizi e la tecnologia (Diniz et al., 2021). Gestire le emissioni Scope 2 presenta sfide specifiche. A differenza delle Scope 1, le organizzazioni non hanno un controllo diretto sulle fonti di emissione, dipendendo dalle modalità di produzione energetica dei propri fornitori. Questo significa che la riduzione di tali emissioni richiede un approccio collaborativo e spesso l'adozione di strategie innovative, come l'acquisto di energia da fonti rinnovabili o la stipula di contratti a lungo termine con fornitori che garantiscano energia a basse emissioni (Brander et al., 2018). Tuttavia, il costo dell'energia pulita e l'accesso limitato a infrastrutture rinnovabili in alcune regioni possono rappresentare ostacoli significativi (Wei et al., 2020). Ridurre le emissioni Scope 2 è essenziale per le aziende che vogliono dimostrarsi allineate agli obiettivi climatici globali e rispondere alle aspettative dei mercati internazionali. La transizione verso fonti energetiche più pulite non solo riduce l'impatto ambientale, ma può anche generare benefici economici nel lungo termine, come una maggiore efficienza operativa e una protezione dai rischi associati alle fluttuazioni dei prezzi dell'energia. L'acquisto di energia rinnovabile è sempre più valorizzato dagli investitori e dai consumatori, che tendono a preferire aziende impegnate in pratiche sostenibili. La teoria del valore

condiviso offre alle aziende una nuova visione di lungo periodo che permette di definire accordi e condividere un percorso di crescita tra imprese, società e policy makers.

Le imprese del settore secondario (trasformazione) sono una delle categorie maggiormente colpite dalla quota di emissioni Scope 2 in quanto i diretti suppliers sono i produttori delle materie prime. Nel settore secondario dell'industria agro-alimentare ci sono noti gruppi aziendali multinazionali, come Nestlé, Ferrero, e Starbucks, che hanno identificato un percorso di crescita condivisa con i propri fornitori. Una delle migliori strategie condivise all'interno del loro bilancio di sostenibilità fa riferimento ad accordi che mirano a fissare prezzo e quantità acquistata dai grandi gruppi periodicamente. Inoltre, quest'ultimi si impegnano ad istruire, formare e finanziare imprenditori locali al fine di dotarli della migliore tecnologia sul mercato (efficienza produttiva e ambientale) e di trasferire parte del capitale umano necessario a far funzionare al meglio quella tecnologia. I benefici derivanti da strategie di creazione di valore condiviso come questa sono: aumento della costanza degli approvvigionamenti, riduzione dell'oscillazione dei prezzi dovuta a cambiamenti climatici o altri fenomeni tipici della produzione, aumento delle skills e delle core competence del supplier, crescita condivisa e condivisione comune del successo aziendale. Per affrontare le emissioni Scope 2, molte aziende stanno ricorrendo all'acquisto di certificati di energia verde (come i RECs negli Stati Uniti o le Garanzie di Origine in Europa), per dimostrare il proprio impegno verso la sostenibilità e per soddisfare obiettivi ambientali e strategici. Questi certificati rappresentano una garanzia che una quantità equivalente di energia rinnovabile è stata prodotta e immessa nella rete, consentendo alle aziende di dichiarare l'uso di energia pulita anche se, fisicamente, ricevono energia da una rete con un mix di fonti tradizionali e rinnovabili. Uno dei principali motivi per cui le aziende scelgono questa strada è la necessità di dimostrare ufficialmente l'uso di energia rinnovabile, rispondendo alle crescenti aspettative di consumatori, investitori e stakeholder. I certificati consentono di migliorare la reputazione aziendale, rafforzando la percezione del marchio come attento alla sostenibilità e aumentando il suo valore competitivo sul mercato. Inoltre, l'acquisto di certificati permette alle aziende di conformarsi a normative ambientali e standard internazionali, spesso richiesti da governi o regolamenti locali, senza dover necessariamente investire direttamente in infrastrutture di produzione di energia rinnovabile (Song, et al., 2020; Yu et al., 2021; Zhang et al., 2023).

Un ulteriore vantaggio riguarda la riduzione delle emissioni Scope 2, che includono le emissioni indirette derivanti dalla produzione di energia acquistata e consumata. Attraverso i certificati, le aziende possono contabilizzare l'energia rinnovabile nel proprio inventario di gas serra, migliorando la loro performance climatica e soddisfacendo i criteri di valutazione dei report ESG (Environmental, Social, and Governance). Questo è particolarmente importante per le imprese globali che desiderano

mantenere una buona posizione nei mercati internazionali e nei confronti degli investitori. Dal punto di vista economico, i certificati rappresentano una soluzione flessibile e accessibile, soprattutto per le aziende che non possono permettersi di costruire impianti di energia rinnovabile onsite o che operano in aree con accesso limitato a risorse energetiche pulite. In molti casi, questi strumenti permettono alle imprese di avvicinarsi rapidamente agli obiettivi di approvvigionamento sostenibile, come quelli fissati da iniziative globali quali RE100, che promuovono l'uso di energia 100% rinnovabile. Infine, l'acquisto di certificati contribuisce a supportare il settore delle energie rinnovabili. I fondi derivanti dalla vendita di questi strumenti forniscono un incentivo economico ai produttori di energia pulita, stimolando ulteriori investimenti e favorendo la transizione verso un sistema energetico globale più sostenibile. In sintesi, i certificati di energia verde rappresentano una scelta strategica per le aziende che vogliono allinearsi agli obiettivi climatici globali, rispondere alle esigenze del mercato e contribuire attivamente alla riduzione delle emissioni di gas serra.

1.4.3 Emissioni Indirette: il Ruolo dei Fornitori e come Impattano sugli Obiettivi Sostenibili delle Imprese

A differenza dei bilanci nazionali delle emissioni di gas serra, che costituiscono giustamente la base per gli accordi internazionali in materia di protezione del clima, i confini del sistema utilizzati per la valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) o per l'impronta di carbonio del prodotto (Product Carbon Footprint, PCF) sono tradizionalmente definiti in maniera più dettagliata e completa. Questi confini coprono solitamente l'intero ciclo di vita di un prodotto, indipendentemente da dove e quando si verificano le emissioni associate. Tale approccio consente di analizzare le emissioni associate al prodotto lungo tutta la sua esistenza, evitando interpretazioni distorte derivanti da variazioni spaziali o temporali. Il metodo basato sul ciclo di vita rappresenta il nucleo fondamentale delle metodologie LCA, come definito dagli standard DIN EN ISO 14040 e DIN EN ISO 14044, e del calcolo della PCF, conforme alla norma DIN EN ISO 14067. Analogamente, l'impronta ambientale sviluppata dall'Unione Europea si basa anch'essa su questo approccio, integrando le emissioni indirette nell'analisi complessiva (European Union, 2013; Zampori and Pant, 2019). Diversa è la situazione per quanto riguarda l'impronta di carbonio delle organizzazioni (Organizational Carbon Footprint, OCF). In questo caso, l'analisi ha generalmente un riferimento temporale specifico, come ad esempio l'anno fiscale, e si concentra sulle emissioni derivanti dalle attività dell'organizzazione durante quel periodo. Questa distinzione metodologica sottolinea le diverse finalità e contesti di applicazione tra l'analisi del ciclo di vita dei prodotti e quella relativa alle organizzazioni.

L'iniziativa del protocollo GHG già nel 2001 richiedeva non solo la contabilità delle emissioni dirette presso la sede di un'azienda (ambito 1) o delle emissioni indirette attraverso gli acquisti di elettricità

(ambito 2), ma anche la contabilità di altre emissioni indirette (ambito 3), in particolare attraverso materie prime e merci della catena di approvvigionamento 9. L'iniziativa del protocollo GHG ha quindi stabilito le regole contabili per queste emissioni di Scope 3 nel 2011 10. Allo stesso modo, il Carbon Disclosure Project (CDP) internazionale tiene conto delle emissioni di Scope 3 quando vengono segnalate dalle società 11. Ciò dimostra che le emissioni di Scope 3 della catena di approvvigionamento rappresentano per lo più la quota maggiore delle emissioni totali causate dalle aziende tipiche del settore terziario e quaternario (Schmidt et al., 2022; Stenzel and Waichman, 2023). Solo nei settori economici dell'energia, dell'estrazione di materie prime, dell'agricoltura e dei trasporti predominano le emissioni dirette per via della caratterizzazione della produzione delle stesse (Schmidt et al., 2022; Shrimali, 2022). Altrimenti, la catena di approvvigionamento spesso contribuisce al 70% o più all'impronta di carbonio dell'azienda (Huang et al., 2009; Schmidt et al., 2022).

Il protocollo GHG suddivide le emissioni di Scope 3 in 15 categorie, alcune delle quali sono attribuibili alle attività a monte (come la produzione di beni e servizi acquistati lungo la catena di approvvigionamento), mentre altre si riferiscono a quelle a valle (ad esempio, le emissioni derivanti dall'uso dei prodotti venduti). Tuttavia, non tutte queste categorie risultano sempre pertinenti, poiché la loro applicabilità dipende dal contesto specifico dell'analisi. Un esempio emblematico riguarda la categoria 7, che comprende le emissioni legate al pendolarismo dei dipendenti: si pone il problema se queste debbano effettivamente essere attribuite all'azienda. Inoltre, le categorie 10-12 possono essere contabilizzate anche dai clienti successivi nella catena di approvvigionamento, rischiando di generare un doppio conteggio qualora più aziende lungo la filiera calcolino progressivamente l'impronta di carbonio dei propri prodotti o servizi. Di conseguenza, queste categorie non sono sempre adatte per un'aggregazione diretta delle emissioni all'interno del totale della catena di approvvigionamento e devono essere incluse con estrema cautela e attenzione metodologica. Le categorie di emissioni di Scope 3 secondo il protocollo GHG (2011):

1. Beni e servizi acquistati
2. Beni strumentali
3. Attività legate al carburante e all'energia
4. Trasporto e distribuzione a monte
5. Rifiuti generati nelle operazioni
6. Viaggio d'affari
7. Dipendente che si sposta
8. Attività affittate a monte
9. Trasporto e distribuzione a valle

10. Lavorazione dei prodotti venduti
11. Uso di prodotti venduti
12. Trattamento di fine vita dei prodotti venduti
13. Attività affittate a valle
14. Franchigie
15. Investimenti

Le categorie 11 e 12 presentano una sfida particolare, vale a dire l'uso e lo smaltimento dei prodotti fabbricati dall'azienda da contabilizzare. Mentre le altre categorie includono per lo più emissioni che si sono verificate "ex post", queste emissioni si trovano in un futuro prossimo o più lontano, a seconda del prodotto. Come vengono determinati e come vengono calcolati per l'anno fiscale? Dipendono dai modelli di utilizzo del cliente, che possono essere solo stimati approssimativamente. Ciò influisce negativamente sull'accuratezza e sulla tracciabilità delle informazioni. Dopotutto, queste emissioni "ex ante" possono dominare il ciclo di vita dei prodotti, come si può facilmente capire utilizzando l'esempio di prodotto di un veicolo a motore. Di seguito si propone un esempio di emissioni scope 3 dal punto di vista di un'azienda del settore terziario che si occupa della compra-vendita di automobili. Dato un fornitore automobilistico, esso pone le sue emissioni Scope 1 e Scope 2 per il 2020 a $0,938 \times 10^6$ ton/CO₂/eq., mentre le emissioni Scope 3 erano 448×10^6 ton/CO₂/eq., con la maggioranza causata dall'uso del prodotto (categoria 11), cioè le emissioni nel settore dei veicoli a motore 13.

Queste emissioni sono importanti per il monitoraggio continuo delle emissioni aziendali e svolgono un ruolo importante quando si tratta di valutare l'intero ciclo di vita di un prodotto o servizio, come con il PCF (Product Carbon Footprint) o l'LCA (Life Cycle Assessment). Qui, l'intero ciclo di vita dovrebbe essere considerato, in gran parte indipendentemente da quando si verificano queste emissioni. È certamente interessante osservare come un'azienda ha la leva più grande per contribuire alla protezione del clima. Ma le emissioni ex ante, che sono generalmente "a valle", sono difficili da quantificare, soprattutto perché le aziende, in quanto fornitori, dovrebbero in qualche modo determinare la loro quota di un prodotto finale e la sua fase di utilizzo.

Le emissioni ex-post di Scope 3 generate "a monte" lungo la catena di approvvigionamento sono molto più uniformi, indiscutibili e standardizzate (Schmidt et al., 2022). Sia lo standard ISO 14064-1 (Oblitas-Romero et al., 2023) che il protocollo GHG (Protocol, G. G. 2011) definiscono i principi per la contabilità e la rendicontazione delle emissioni di gas serra delle organizzazioni. Questi includono pertinenza, completezza, coerenza, accuratezza e trasparenza. La "pertinenza" è determinata dalle esigenze dell'utente, in particolare per il suo processo decisionale. Influenza la selezione delle categorie da considerare, i confini del sistema e i dati da utilizzare. La "Completezza" si riferisce alla rilevanza: "Tutte le emissioni di gas serra rilevanti ... devono essere incluse" (Zampori

and Pant, 2019). Ciò significa che nessuna attività della società che influenzi la rilevanza del bilancio dovrebbe essere esclusa senza giustificazione. La "coerenza" è particolarmente importante, soprattutto quando i dati sulle emissioni devono essere monitorati e valutati nel tempo. Metodi, ipotesi, confini di sistema o basi di dati eterogenee in continua evoluzione rendono più difficili tali confronti. La coerenza metodologica è importante anche per le valutazioni basate sul prodotto come il PCF: le stesse regole contabili dovrebbero essere applicate quando si confrontano due prodotti. Nel caso di un'impronta organizzativa, in cui devono essere considerati considerevolmente più prodotti e dati, questo è molto più difficile e richiede un concetto rigoroso (Schmidt et al., 2022). La norma ISO 14064-1 indica che le deviazioni e le incertezze sistematiche dovrebbero essere evitate il più possibile. Il protocollo GHG richiede che i dati siano sufficientemente accurati per consentire all'utente di prendere decisioni ragionevoli. La Science Based Targets Initiative (Science Based Targets Initiative, 2021) richiede una riduzione minima annuale assoluta delle emissioni di Scope 3 del 2,5 %. Un metodo di misurazione dovrebbe anche essere in grado di catturare questo sforzo di riduzione entro i limiti della precisione di misurazione, che è una grande sfida in termini di dati e metodi. La "trasparenza" include non solo la divulgazione dei risultati e delle ipotesi sottostanti, ma soprattutto la verificabilità da parte di revisori interni ed esterni, nonché la riproducibilità dei risultati (Protocol, G. G. 2011).

Fondamentalmente, nel calcolo delle emissioni di Scope 3 è richiedere la conoscenza dell'attività, ad esempio la quantità di un materiale o di un altro input (trasporto, ma anche servizi), da un lato, e il fattore di emissione associato o intensità di emissione, dall'altro, che può essere interpretato come l'impronta dell'input. Sono possibili sia una quantità di attività fisica, ad esempio per chilogrammo di materiale o per tonnellata chilometro di servizio di trasporto, sia un riferimento a quantità monetarie, ad esempio per euro. In pratica, il calcolo delle emissioni di Scope 3 può causare uno sforzo considerevole. La contabilità delle emissioni può servire a scopi diversi: si tratta della valutazione di un prodotto, ad esempio, per il confronto dei prodotti o per il miglioramento dello sviluppo del prodotto, o si tratta della valutazione e del monitoraggio nel tempo delle prestazioni ambientali dell'intera organizzazione. Nel caso di riferimento del prodotto, il ciclo di vita deve essere bilanciato in modo olistico, e quindi anche i singoli input devono essere quantificati. Questo è molto complesso e può essere fatto solo per i singoli prodotti, e anche allora solo per i prototipi, raramente per i lotti di prodotti e praticamente mai per ogni singolo prodotto. Quando si tratta di un confronto di base del prodotto o del potenziale di miglioramento nello sviluppo del prodotto, allora un equilibrio "in tempo reale" non è necessario per ogni singolo prodotto. La contabilità nel caso dell'organizzazione è relativamente semplice quando si tratta di emissioni di Scope 1 e Scope 2. Possono essere sistematicamente raccolti e riassunti per l'organizzazione per ogni anno fiscale, in modo che i valori

siano comparabili. Le emissioni Scope 3 dell'azienda sono anche riassunte per l'intera azienda, ma la loro determinazione dalla catena di approvvigionamento richiede dati di attività sugli input dei fornitori. I fattori di emissione per questi input, a loro volta, dovrebbero essere il più accurati possibile e quindi legati al prodotto. Se i fornitori hanno anche elaborato impronte relative all'organizzazione, possono semplicemente ridimensionare ("allocare") le loro emissioni riassuntive ai prodotti, ad esempio in termini di quantità o valore, e derivare i fattori di emissione corrispondenti. I prodotti ad alte emissioni sono mescolati con prodotti a basse emissioni. In altre parole, queste cifre forniscono quindi solo una valutazione del fornitore, non dei prodotti effettivamente acquistati.

Una soluzione, come proposta da molti esperti LCA, è la contabilità di tutti i prodotti di un'azienda con impronte di singoli prodotti, il più possibile appropriate alla rispettiva causa. Questo potrebbe quindi anche essere utilizzato per compilare l'impronta organizzativa come somma delle sue impronte di prodotto. Nell'area business-to-business (B2B), i fattori di emissione dei singoli prodotti potrebbero quindi essere trasmessi al cliente. Questa soluzione è solitamente esclusa per motivi pratici. Anche con nuove possibilità di digitalizzazione, ad esempio la trasmissione digitale dei dati rilevanti della catena di approvvigionamento, lo sforzo sarebbe ancora considerevole: un tale approccio dovrebbe essere ampiamente utilizzato in un sistema economico globale per mappare le catene di approvvigionamento internazionali.

Tali dati dalle impronte di carbonio organizzative, ad esempio quelli pubblicati anche dal CDP 11, sono in definitiva sempre misure di performance che si riferiscono alle organizzazioni, anche se si assumono dati di attività relativi al prodotto. Questo non è necessariamente peggiore del riferimento del prodotto nei bilanci dei prodotti. È una prospettiva diversa sul sistema di produzione reale. Ha vantaggi pratici perché richiede meno sforzo. Il problema di "miscelare" input a bassa intensità di emissioni con input ad alta intensità di emissioni porta a costi più elevati. Ha vantaggi pratici perché il suo sforzo è inferiore. Il problema di "miscelare" input a bassa intensità di emissioni con input ad alta intensità di emissione porta all'incertezza nei bilanci per i singoli prodotti o gruppi di prodotti, ma non per l'azienda nel suo complesso. Più dettagliatamente le unità organizzative e i loro gruppi di prodotti sono suddivise e i corrispondenti fattori di emissione sono determinati e utilizzati, meno incerte saranno le analisi dell'impronta. Ad esempio, un grande conglomerato potrebbe essere suddiviso in unità aziendali contabilizzate separatamente. Entrambi gli approcci, cioè l'impronta del prodotto e l'impronta organizzativa, rappresentano casi ideali in cui tutti i dati necessari sono disponibili nel ciclo di vita del prodotto o nella catena di approvvigionamento dell'azienda. Questo non riflette la pratica attuale. I dati empirici sull'intero ciclo di vita sono raramente raccolti sia per le impronte del prodotto che per quelle organizzative. Mentre dati di attività abbastanza accurati (consumo di energia e materiali, distinte base, formulazioni, ecc.) sono disponibili presso l'azienda

focale, solo dati generici da database disponibili in commercio come Gabi (Muñoz et al., 2022) o Ecoinvent (De Wachter, 2021) sono disponibili per molti materiali o processi al di fuori dell'azienda. L'accuratezza o fino a che punto i calcoli riflettono la realtà è solitamente sopravvalutata qui. Inoltre, la verificabilità, la coerenza metodologica e l'aggiornamento continuo sono significativamente limitati. La diversità e il gran numero di prodotti, intermedi e fornitori sono anche un problema pratico per le impronte di carbonio delle aziende se vogliono procedere su base di un singolo prodotto, indipendentemente dal fatto che si utilizzano dati empiricamente raccolti o generici. Le grandi aziende hanno decine di migliaia di fornitori e un multiplo di articoli d'ordine da considerare e assegnare ai rispettivi prodotti.

CAPITOLO 2: Strategie di Decarbonizzazione delle Emissioni Dirette nel Settore Agroalimentare Italiano

Il settore agroalimentare italiano è uno dei pilastri dell'economia nazionale, ma è anche un comparto con un impatto ambientale significativo, in particolare per quanto riguarda le emissioni dirette di gas climalteranti: Scope 1 del protocollo GHG. Queste emissioni derivano principalmente dall'uso di fertilizzanti, dal consumo di energia per il funzionamento delle attrezzature agricole e dalla gestione dei reflui zootecnici. Per affrontare questa sfida, è essenziale adottare strategie di decarbonizzazione efficaci, che permettano di ridurre l'impronta di carbonio senza compromettere la produttività e la competitività delle aziende agricole. Una delle strategie più promettenti è l'adozione di tecnologie innovative per l'efficienza energetica. L'impiego di macchinari agricoli a basso consumo, l'elettrificazione dei processi produttivi e l'uso di fonti di energia rinnovabile, come il solare e il biogas, rappresentano soluzioni chiave per ridurre le emissioni dirette. Inoltre, l'ottimizzazione delle pratiche agronomiche, come la riduzione delle lavorazioni del suolo e l'uso di tecniche di agricoltura di precisione, contribuisce a minimizzare il rilascio di CO₂ e altri gas serra.

Un altro aspetto fondamentale è l'adozione di pratiche di economia circolare all'interno della filiera agroalimentare. Il riutilizzo dei residui agricoli per la produzione di energia o fertilizzanti organici, la riduzione degli sprechi lungo tutta la catena di approvvigionamento e la valorizzazione dei sottoprodotti contribuiscono a ridurre le emissioni dirette e indirette. Inoltre, l'uso di colture di copertura e il miglioramento della gestione del suolo favoriscono il sequestro del carbonio, mitigando ulteriormente l'impatto ambientale del settore.

Infine, la transizione verso modelli produttivi più sostenibili richiede il supporto di politiche adeguate e incentivi economici. Le normative nazionali ed europee giocano un ruolo chiave nel promuovere la decarbonizzazione attraverso sussidi per l'adozione di tecnologie pulite e premi per le aziende che adottano pratiche agricole sostenibili. Al tempo stesso, è fondamentale il coinvolgimento diretto degli agricoltori e delle aziende del settore, affinché possano sviluppare strategie su misura per le loro specifiche realtà produttive. Solo attraverso un approccio integrato, che combini innovazione tecnologica, economia circolare e politiche di sostegno, sarà possibile ridurre in modo significativo le emissioni dirette e garantire un futuro più sostenibile per l'agroalimentare italiano.

2.1 Strumenti di valutazione delle Tecnologie Innovative dell'Agrobusiness

Negli ultimi anni, l'industria agroalimentare ha assunto un ruolo di particolare rilevanza nell'ambito delle politiche europee per la produzione e il consumo sostenibili (Notarnicola et al., 2017). L'obiettivo è sviluppare nuovi modelli di business (sia per il consumo che per la produzione) più

efficienti dal punto di vista ambientale, sociale ed economico. Quest'ultimo aspetto è fondamentale per le aziende del settore che desiderano innovare il proprio modello di business per rimanere competitive nel tempo (Lazonick, 2008; Massa et al., 2017). Allo stesso tempo, gli obblighi normativi imposti dalla Commissione Europea delineano i futuri orizzonti dell'agricoltura: una riduzione del 50% degli sprechi, la conservazione della biodiversità, la diminuzione dello sfruttamento del suolo e delle acque sotterranee, nonché l'indipendenza dalle fonti energetiche non rinnovabili (Montanarella & Panagos, 2021). La Politica Agricola Comune (PAC) si occupa della promozione di piani di intervento che garantiscano la compatibilità delle produzioni europee con le esigenze ambientali e sociali (Pe'er et al., 2022).

Le materie prime agroalimentari contribuiscono in modo significativo allo sfruttamento delle risorse naturali: uno studio EIPRO (Environmental Impact of Products) ha evidenziato che il settore alimentare è responsabile del 30% degli impatti ambientali legati al consumo totale e di oltre il 50% dell'eutrofizzazione marina (Zaborowska et al., 2021). Uno degli aspetti chiave nella valutazione dell'impatto ambientale delle materie prime è l'analisi dell'intero ciclo di vita (Pushkar, 2023). Lo strumento principale per questa analisi è la LCA (Life Cycle Assessment), che permette di stimare con precisione le prestazioni ambientali di un determinato alimento (Del Borghi et al., 2014). L'applicazione della LCA consente di identificare i punti critici su cui intervenire per ridurre le diverse categorie di impatto. Negli ultimi anni, l'analisi dell'impatto è stata applicata a numerosi prodotti e servizi, in particolare nel settore agroalimentare (Sica et al., 2022).

In questo ambito, sono emerse diverse questioni da approfondire, come la definizione dell'unità funzionale, i confini del sistema, l'origine dei database e la rapida evoluzione delle tecnologie e dei modelli per la dispersione di fertilizzanti e pesticidi. Alcune metodologie comuni e raccomandazioni per la valutazione delle categorie di impatto sono contenute nel manuale ILCD della Commissione Europea e nel protocollo ENVIFOOD (Borghesi et al., 2022; Colucci et al., 2021). Inoltre, la rendicontazione ESG (Environmental, Social, and Governance) e altre forme di comunicazione non finanziaria rappresentano strumenti cruciali per valutare le prestazioni ambientali delle imprese, sia da parte delle istituzioni che dei consumatori. Alcuni studi dimostrano che le pratiche di comunicazione esercitano un effetto positivo sulla willingness to buy (WTB) e sul word of mouth (WOM), e che questo effetto è amplificato dall'orientamento dei consumatori verso la sostenibilità ambientale e il consumo di status, nel tentativo di mostrare agli altri un comportamento di consumo "green" (Sestino et al., 2023). Altre forme di comunicazione includono i marchi e le etichette, che rappresentano strumenti efficaci per migliorare la trasparenza e la divulgazione di informazioni non finanziarie agli stakeholder (Jestratijevic et al., 2022).

Il marchio comprende la percezione complessiva, l'immagine, la reputazione e il legame emotivo che i consumatori sviluppano nei confronti di un'azienda o dei suoi prodotti. Esso include diversi elementi, come il nome dell'azienda, il logo, lo slogan, il design, la qualità del prodotto, il servizio clienti e i valori associati. Definisce, quindi, l'identità unica e il posizionamento dell'azienda nel mercato, determinando il livello della sua accountability (Bozkurt et al., 2022). Le etichette, invece, forniscono informazioni dettagliate come il nome del prodotto, gli ingredienti, i valori nutrizionali, la data di produzione, la scadenza, le istruzioni d'uso, eventuali avvertenze, certificazioni e altre informazioni rilevanti, comprese le dichiarazioni sull'impatto ambientale richieste dalle normative o utili per i consumatori. Le etichette, dunque, servono come strumento di comunicazione per informare e guidare i consumatori sulle caratteristiche del prodotto, sul suo utilizzo, sulle modalità di smaltimento e sulla conformità agli standard (Rietveld et al., 2020).

Negli ultimi anni, la corporate governance ha cercato di migliorare l'immagine e la responsabilità aziendale attraverso l'adozione di certificazioni, marchi, etichette e specifiche di produzione (come IGP, DOP, STG, il protocollo ENVIFOOD e la dichiarazione ambientale). Tuttavia, questo ha portato a difficoltà nel confronto tra concorrenti, soprattutto quando le aziende utilizzano certificazioni diverse per misurare la propria qualità, in particolare se queste certificazioni provengono da Paesi differenti. L'impegno richiesto alle imprese nell'era attuale va oltre la semplice conformità legale e implica una responsabilità nei confronti di tutti gli stakeholder (Sun et al., 2023; Lemoine et al., 2021). Per attrarre investimenti dai principali fondi, le aziende devono rispettare specifici criteri ambientali (spesso definiti come "requisiti green"), che includono l'indipendenza energetica, la neutralità carbonica, la valorizzazione dei rifiuti e il coinvolgimento sociale (Sigel, 2021; López Nevárez & Zavala Félix, 2019). Di conseguenza, l'accesso alle risorse finanziarie diventa cruciale per le aziende, poiché consente loro di acquisire tecnologie moderne che ottimizzano i volumi produttivi, riducendo al contempo gli impatti ambientali e sociali. L'agricoltura di precisione rappresenta un esempio emblematico di questo processo, in quanto incarna tali obiettivi. Si crea, così, un ciclo auto-rinforzante, in cui le aziende che non hanno accesso alle risorse necessarie per l'adozione di tali tecnologie si trovano progressivamente escluse dal mercato (Degieter et al., 2022).

L'obiettivo di questo studio è stimare gli impatti ambientali legati alla coltivazione di pomodori industriali, utilizzando tre diversi modelli di business: produzione standard (LAA1), produzione integrata (LAA2) e agricoltura di precisione (LAA3). L'analisi si baserà sull'applicazione del metodo LCA, come già avvenuto in studi condotti in Colombia (Bojacá et al., 2014), Norvegia (Naseer et al., 2022) e Svezia (Bosona & Gebresenbet, 2018). Questo lavoro mira a identificare e quantificare le pratiche finalizzate alla mitigazione degli impatti della produzione industriale del pomodoro su aria,

suolo e acqua. Inoltre, verrà analizzata la struttura dei modelli di business in relazione al campione di aziende che adottano differenti approcci produttivi.

2.2 Il Sistema delle Emissioni nel Settore Agroalimentare

Le tendenze globali stanno influenzando sempre di più l'agricoltura: la crescita demografica, l'urbanizzazione crescente, il cambiamento climatico e l'innovazione tecnologica. Le aziende agricole moderne devono affrontare queste sfide per sopravvivere in un mondo in rapida evoluzione. I sistemi alimentari contemporanei si trovano ad affrontare problemi crescenti legati alla variabilità climatica, alla crescita della popolazione e ai cambiamenti nelle preferenze dei consumatori. Le nuove attrezzature agricole si avvalgono di sensori e tecnologie informatiche, come robot, sensori di temperatura e umidità, immagini aeree e tecnologia GPS.

A partire dal secondo decennio degli anni 2000, una nuova rivoluzione agricola ha consentito alle aziende agricole di migliorare la loro redditività, efficienza, sicurezza e sostenibilità ambientale, grazie all'emergere di un nuovo modello di business (Tell et al., 2016). Con la diffusione della teoria degli stakeholder e del concetto di valore condiviso (CSV) all'interno delle strategie di governance aziendale, alle imprese del settore agricolo viene richiesto di ridurre il loro impatto ambientale e di rendere la produzione ecologicamente sostenibile (Knierim et al., 2015; Knierim et al., 2019; Seo et al., 2023). Per rispondere a queste richieste, sta emergendo un nuovo modello di business basato sull'agricoltura di precisione (Lencsés & Mészáros, 2020; Rose & Chilvers, 2018; Kovács & Husti, 2018). Il nuovo paradigma tecnologico, dovuto al compromesso tra risorse alimentari limitate e crescita demografica, impone alle aziende agricole di modificare i loro precedenti modelli di business. Gli investimenti, i sistemi informativi, il capitale umano e le nuove tecnologie sono alcuni degli elementi chiave che guidano l'innovazione nei modelli di business, con l'obiettivo di aumentare la resilienza e migliorare la competitività aziendale (Lazonick, 2010; Sutherland et al., 2023; Thomson, 2022).

Secondo alcuni studiosi (Massa & Tucci, 2014; Mitchell & Bruckner Coles, 2004; Lindgardt et al., 2012), l'innovazione del modello di business non si limita all'innovazione di prodotti, servizi o tecnologie, ma implica una trasformazione del modello di proposta di valore e del modello operativo. La proposta di valore comprende segmenti di target, offerta di prodotti/servizi e modello di ricavi, mentre il modello operativo include la catena del valore, il modello dei costi e l'organizzazione. Amit & Zott (2012) sottolineano che l'innovazione del modello di business avviene solitamente in tre modi: creazione di nuove attività, collegamento innovativo tra attività esistenti e modifica delle parti che svolgono un'attività. Nell'agricoltura di precisione, la letteratura ha evidenziato diversi elementi di complessità (caratteristiche aziendali, fattori socio-economici e psicologici) che possono limitare

un'adozione più ampia delle tecnologie agricole di precisione e del processo di trasferimento della conoscenza (Schnebelin, 2022).

Grazie ai dati dettagliati sulla resa e sulla qualità dei raccolti, gli agricoltori di precisione possono garantire un miglior monitoraggio e tracciabilità per i loro acquirenti. Sebbene la forma dei prodotti non cambi, la loro qualità e quantità risultano superiori. L'ottimizzazione dell'uso di input specifici per ogni zona riduce i rischi di produzione rispetto all'agricoltura convenzionale e consente una resa più stabile. Inoltre, l'applicazione mirata degli input ha favorito lo sviluppo di pratiche produttive meno dannose per l'ambiente, sempre più apprezzate dai consumatori e dagli investitori attenti alla sostenibilità. Tuttavia, mentre il costo degli input può diminuire, il costo dei macchinari tende ad aumentare con l'introduzione dell'agricoltura di precisione. Negli ultimi anni, lo sviluppo rapido della tecnologia ha permesso di creare sistemi interconnessi tra persone, dispositivi fisici e altri sistemi digitali, facilitati dall'uso di Internet. Questa interconnessione ha migliorato notevolmente i sistemi di comunicazione in diversi settori (Lampropoulos et al., 2019; Pallavi et al., 2022). Con l'avvento della quarta rivoluzione industriale (Industry 4.0), l'Internet of Things (IoT) è stato ampiamente adottato in molte operazioni industriali (Silverio-Fernández et al., 2018). Queste operazioni comprendono la comunicazione, l'accumulo e l'archiviazione dei dati, l'analisi dei big data, il recupero dei dati in tempo reale, il controllo dei dispositivi intelligenti, la gestione della catena di approvvigionamento e la contabilità finanziaria (Sestino et al., 2020).

L'obiettivo principale dell'IoT è colmare il divario tra il mondo fisico e quello digitale. Nell'Industry 4.0, l'IoT è comunemente denominato Industrial IoT (IIoT), il quale svolge un ruolo chiave nell'evoluzione dei sistemi di produzione tradizionali verso i sistemi cyber-fisici basati su Internet (Tao et al., 2019). Il CPS (Cyber-Physical Systems) facilita la comunicazione tra macchine (M2M) e tra esseri umani e macchine (H2M). Inoltre, l'implementazione dell'IIoT ha consentito lo sviluppo di sistemi di automanutenzione per la produzione e le operazioni. In passato, l'ottimizzazione e l'analisi di parametri come livelli di serbatoi, temperature, quantità di materiali e stato dei processi avvenivano prevalentemente in modo manuale (Killeen et al., 2019). Con l'integrazione dell'IIoT, ora gli operatori possono monitorare questi parametri in tempo reale, consentendo decisioni più informate (Boye & Arcand, 2013; Mazzucato & Shipman, 2014). L'utilizzo di macchinari avanzati basati sull'IT comporta costi elevati, rendendo cruciale un loro utilizzo efficiente. Ad esempio, i biosensori permettono agli agricoltori di intervenire tempestivamente quando il software rileva anomalie nei processi di controllo. Tuttavia, se i benefici economici non compensano i costi della nuova tecnologia, le aziende agricole potrebbero trovarsi in difficoltà finanziarie. Spesso, i vantaggi derivanti dall'innovazione si manifestano nel lungo periodo, portando molte aziende incapaci di sostenere i

costi iniziali (sia in termini di capitale monetario che di competenze) ad abbandonare il settore (Amit & Zott, 2012; Mazzucato & Shipman, 2014).

2.3 Applicazione dell'analisi LCA a Differenti Tecnologie Produttive

Secondo l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura (FAO), l'Italia è il secondo maggiore produttore di pomodori freschi destinati alla trasformazione industriale, preceduta solo dalla Cina, che detiene la leadership con una produzione annua di 59,9 milioni di tonnellate, pari a circa il 30% della produzione globale. La produzione italiana ammonta a circa 5,5 milioni di tonnellate all'anno, rappresentando circa il 7% della produzione mondiale. Il fatturato dell'industria del pomodoro in Italia è di circa 3,5 miliardi di euro, di cui 1,8 miliardi provengono dalle esportazioni (Cellura et al., 2012). La sfida di soddisfare la crescente domanda alimentare nel rispetto delle restrizioni sulle risorse, riducendo al contempo l'impatto ambientale dell'agricoltura, ha portato all'uso della valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) per analizzare i prodotti alimentari e i sistemi agricoli (Heller et al., 2013).

Storicamente, le analisi LCA relative alla coltivazione in serra di pomodori freschi, escludendo quelli destinati alla trasformazione industriale, sono state condotte in diversi paesi, tra cui Spagna (Bojacá et al., 2014; Naseer et al., 2022), Australia (Bosona & Gebresenbet, 2018), Canada (Lazonick, 2010) e California (Lazonick, 2008). In Italia, le analisi LCA sulla coltivazione del pomodoro sono state effettuate (Del Borghi et al., 2014), ma questi studi si sono concentrati principalmente sull'analisi delle categorie di impatto, identificando le aree critiche su cui intervenire per migliorare le prestazioni ambientali, come l'uso di materie prime energetiche non rinnovabili (combustibili fossili), risorse naturali (acqua e suolo), fertilizzanti e pesticidi. Per quanto riguarda la coltivazione del pomodoro destinato alla trasformazione industriale, gli studi hanno evidenziato che l'uso di fertilizzanti e il consumo di elettricità per l'irrigazione rappresentano due dei principali punti critici su cui intervenire per una produzione più sostenibile. Sulla base di queste evidenze, vengono confrontati tre diversi tipi di produzione, esaminando i principali punti critici individuati dalla letteratura. L'obiettivo è comprendere se e in che modo il modello di business e le tecnologie adottate possano ridurre l'impatto ambientale legato all'irrigazione e alla fertilizzazione.

2.3.1. Produzione Industriale Standardizzata

Per facilitare un confronto efficace tra i tre metodi di produzione, è stato selezionato un numero uguale di aziende agricole dal database del CRPV (Centro Ricerche Produzioni Vegetali), tutte situate nella regione Emilia-Romagna, in Italia.

Vi sono diverse ragioni per cui questa regione è stata scelta come campione per l'analisi del ciclo di vita (LCA). Importanza agricola: L'Emilia-Romagna è nota per il suo rilevante settore agricolo,

essendo una delle regioni più produttive d'Italia in termini di produzione agroalimentare (Notarnicola et al., 2017). L'agricoltura nella regione include una vasta gamma di attività, dalla coltivazione di colture alla zootecnia e alla trasformazione alimentare. Lo studio di questa regione consente quindi di analizzare un sistema agroalimentare ricco e diversificato. Specificità regionali: L'Emilia-Romagna presenta caratteristiche peculiari, come pratiche agricole tradizionali, varietà locali di colture e specifiche problematiche ambientali. Questi aspetti rendono interessante l'analisi della sostenibilità della produzione agroalimentare locale attraverso l'approccio LCA (Montanarella & Panagos, 2021).

Rilevanza delle politiche: La regione ha implementato specifiche politiche per la sostenibilità agricola e la protezione ambientale, tra cui il Sistema di Qualità Nazionale per la Produzione Integrata (SQNPI) e l'agricoltura di precisione (Pe'er et al., 2022). L'analisi di questa regione permette di valutare l'efficacia di tali politiche e di identificare possibili aree di miglioramento. I risultati dell'analisi LCA possono contribuire a decisioni basate su dati concreti per lo sviluppo di politiche regionali e nazionali.

Il primo metodo di produzione si basa sulle norme di condizionalità introdotte dalla Politica Agricola Comune (PAC), conformemente al regolamento (UE) n. 1306/2013. Tale regolamento stabilisce il principio secondo cui gli agricoltori, per accedere ai finanziamenti dell'Unione Europea, devono rispettare una serie di regole relative alla corretta gestione agronomica del suolo, alla protezione ambientale, alla salute pubblica, alla salute e al benessere degli animali (Agea Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura). Il mancato rispetto degli standard comporta una riduzione degli aiuti sia per i pagamenti diretti (Pagamento Unico) sia per lo Sviluppo Rurale. Tuttavia, il livello di attenzione ambientale previsto è minimo e si limita al rispetto degli obblighi di conformità (LAA1 Tabella 1).

Tabella 1. Le principali caratteristiche dell'industria del pomodoro da industria.

Caratteristiche delle produzioni			
	LAA1	LAA2	LAA3
Terreno (ha)	-	18,3	6,26
Resa produttiva 2014 (t/ha)	77	62	100
Precessione	Cereali	Cereali	Cereali
Caratteristiche del terreno			
Tessitura	Tessitura	Tessitura	Tessitura
S.O. (%)	4,5	4,5	1,2
pH	8,1	8,1	8,1
Piantine (n.ro/ha)	33.000	33.000	33.000
Consumo colture (kg/ha diesel)	202	188	195
Metodo di irrigazione	Irrigatore semovente	Irrigatore semovente	Irrigatore semovente
Consumo per irrigazione (kg/ha diesel)	211	158	89
Volume per irrigazione (m3/ha)	1200	900	320
Unità di fertilizzanti N.	180	105	97
Nitrato di ammonio (kg)	360	164	-
Nitrato di calcio (kg)	187	187	160
NPK 6-12-24 (kg)	400	400	-
Letame pellettato(kg)	-	-	479
NPK 8-9-18 (kg)	-	-	160
Fertirrigazione (various) (kg)	-	-	272
Quantità di pesticidi (kg)	88,5	24,7	73
N₂O Emissioni da fertilizzanti			
N ₂ O dirette (kg)	4,09	3,08	1,43
N ₂ O indirette (kg)	0,92	0,54	0,52

Fonte: Database CRPV Soc. Coop.

2.3.2 Produzione Integrata

La produzione integrata prevede l'adesione delle aziende al sistema di certificazione SQNPI (Sistema di Qualità Nazionale per la Produzione Integrata) in conformità con gli standard UNI EN ISO 22005:2008 (Notarnicola et al., 2017). Il SQNPI definisce linee guida nazionali che rappresentano uno strumento di riferimento volto a un'armonizzazione crescente delle 'Norme Tecniche' regionali, nel rispetto delle peculiarità climatiche, ambientali, colturali e fitosanitarie che caratterizzano le diverse aree agricole del territorio italiano. Queste linee guida stabiliscono i criteri di intervento, le soluzioni agronomiche e le strategie da adottare per la difesa delle colture e il controllo delle infestanti, con l'obiettivo di ridurre l'impatto sull'uomo e sull'ambiente, garantendo al contempo una produzione economicamente sostenibile.

L'adozione di disciplinari regionali di produzione integrata e l'implementazione di un rigoroso sistema di tracciabilità mirano a dimostrare che i prodotti certificati provengono da aziende agricole che applicano tali specifiche. La produzione agricola integrata massimizza l'uso delle risorse naturali, purché queste possano sostituire in modo adeguato i mezzi tecnici adottati nell'agricoltura convenzionale, riservando l'uso di quest'ultimi solo nei casi in cui siano necessari per ottimizzare il compromesso tra esigenze ambientali, sanitarie ed economiche. Per quanto riguarda le tecniche disponibili, a parità di condizioni, si privilegiano quelle a minore impatto, escludendo in ogni caso quelle ad alto impatto. Il livello di attenzione verso l'ambiente è medio: certificazioni e marchi di qualità LAA2.

2.3.3 Produzione Integrata

L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione agricola che prevede la raccolta, l'elaborazione e l'analisi dei dati, combinati con altre informazioni, per guidare le decisioni in base alla variabilità spaziale e temporale, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità della produzione agricola (Rose & Chilvers, 2018). Nota anche come agricoltura di precisione, essa utilizza tecnologie informatiche e digitali per gestire in modo razionale la variabilità temporale e quella all'interno dei singoli appezzamenti, modulando gli interventi colturali per massimizzarne l'efficacia.

In altre parole, si tratta di un insieme di tecnologie finalizzate alla raccolta di dati che, una volta analizzati, possono essere utilizzati per prendere decisioni in merito alle attività produttive sul campo, facendo la cosa giusta, al momento giusto e nel punto giusto. L'obiettivo è aumentare la produzione, sia in termini qualitativi che quantitativi, riducendo al minimo i costi degli input e l'impatto delle attività agricole sull'ambiente. Il livello di attenzione verso l'ambiente è alto: Tecniche Agronomiche Avanzate LAA3 tabella 1.

2.4 Metodologia Life Cycle Assessment (LCA)

Life Cycle Assessment (LCA) rappresenta uno strumento fondamentale per valutare in modo sistematico gli impatti ambientali associati a un prodotto, un servizio o un processo lungo l'intero ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento. La sua importanza è particolarmente evidente nel calcolo delle emissioni di Scope 3, ovvero quelle generate a monte e a valle delle attività aziendali (fornitori, trasporti, utilizzo e fine vita dei prodotti), che spesso costituiscono la quota più rilevante dell'impronta carbonica complessiva. Attraverso la LCA, le imprese possono quantificare in modo trasparente e comparabile tali emissioni, individuare i principali hotspot di impatto e definire strategie efficaci di mitigazione lungo la catena del valore, contribuendo così a una gestione più sostenibile e responsabile delle proprie attività.

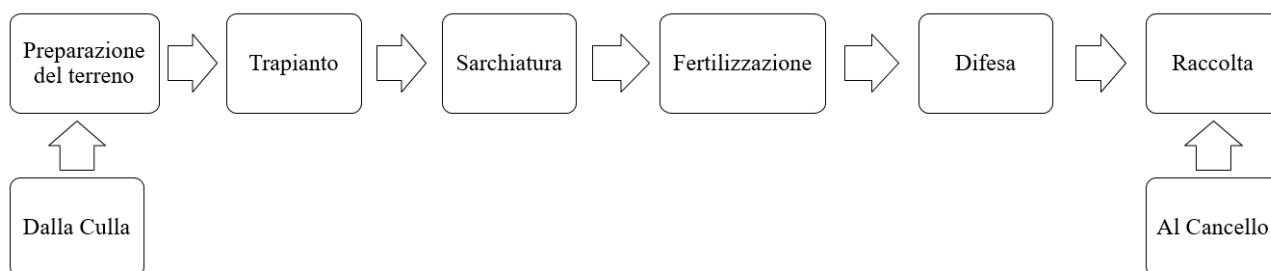
2.4.1 Goal, Scope e Confini del Sistema

L'obiettivo dello studio è calcolare gli impatti ambientali legati alla coltivazione dei pomodori da industria, considerando tre diversi livelli di consapevolezza ambientale (LAA), attraverso l'applicazione dell'analisi LCA (Life Cycle Assessment). L'analisi si concentra esclusivamente sulla fase agricola, monitorando un campione di tre aziende agricole classificate come segue:

- LAA1: Rispetto degli standard di condizionalità ambientale (Cross Compliance)
- LAA2: Produzione integrata
- LAA3: Tecniche agronomiche avanzate (Agricoltura di precisione)

L'unità funzionale di riferimento per lo studio è rappresentata da 1 kg di pomodoro. In base agli obiettivi dello studio, l'analisi considera tutti i flussi di materiali, energia e trasporto legati alla produzione di pomodori, limitatamente alla fase primaria svolta nelle aziende agricole monitorate (dall'inizio del ciclo produttivo fino all'uscita del prodotto dall'azienda agricola, ovvero "dal campo al cancello della fattoria").

Figura 3. Mappatura dei confini del Sistema dell'analisi LCA corrispondente alla produzione di pomodoro da industria.



Fonte: Elaborazione dell'autore

2.4.2 Inventario e Valutazione di Impatto

I dati sono stati raccolti dal database CRPV (progetto CRPV LIFE+). Per ridurre al minimo le variabili esogene che potrebbero influenzare le analisi successive, sono stati presi in considerazione due anni: il 2018 e il 2019. L'utilizzo di un biennio ha permesso di attenuare l'effetto di fattori esterni, come la variabilità stagionale, il ciclo produttivo completo, la riduzione della variabilità dei dati e la possibilità di valutare impatti di lungo periodo. Per la valutazione degli impatti ambientali (LCIA - Life Cycle Impact Assessment) è stato utilizzato il metodo ReCiPe, applicato attraverso il software OpenLCA (versione 1.11), uno strumento estremamente flessibile che consente di quantificare gli impatti derivanti dagli input e output del sistema (Finger, et al., 2019; Zaragüeta, et al., 2023). Il metodo ReCiPe analizza gli impatti su due livelli: midpoint (categorie di impatto intermedie) ed endpoint (categorie di danno). L'approccio endpoint considera tre aree principali: Salute Umana, Ecosistemi e Risorse.

Per il calcolo dell'indicatore GWP (Global Warming Potential), nella fase di LCIA sono stati utilizzati i fattori di caratterizzazione dell'IPCC 2007 (versione 1.02). In conformità alle linee guida indicate nel PCR 2011:20 (versione 1.01), riferite alla norma ISO 14025:2006 (Ingwersen and Stevenson, 2012), lo studio è stato incentrato sulla categoria di prodotto "Ortaggi". Le ipotesi su cui si basa l'analisi sono riportate nella tabella 2.

Tabella 2. Life Cycle Inventory (LCI) dei seguenti input/output e metodologie operative.

LCI (Life Cycle Inventory)	
Inclusioni	Esclusioni
La produzione dei mezzi tecnici utilizzati nella fase di coltivazione (fertilizzanti, diserbanti, pesticidi,) e il loro imballaggio (contenitori) e favi per piantine.	Lavoro umano.
La produzione di impianti di irrigazione in relazione alla sola tubazione irrigatrice semovente (ipotizzando una durata di 20 anni e una copertura di 30 ettari con irrigatore) o alle tubazioni.	La produzione di trattori e altre macchine agricole, edifici e strutture di stoccaggio utilizzate dall'azienda agricola.
I consumi energetici impiegati nel processo colturale, con particolare riguardo al consumo di gasolio agricolo utilizzato per le operazioni svolte in azienda durante la produzione in relazione a: lavorazione del terreno, trapianto, distribuzione di fertilizzanti, trattamenti diserbanti e fitosanitari, irrigazione, operazioni di raccolta.	Emissioni biogeniche di CO ₂ e sequestro di CO ₂ .
I rifiuti e il loro scenario di smaltimento (discarica per gli aggregati e incenerimento per le materie plastiche, ipotizzando per i rifiuti destinati al riciclaggio solo il trasporto allo smaltitore senza attribuire impatto al processo di riciclaggio).	Piantine di pomodoro.
Consumo di carburante ed emissioni relative al trasporto di mezzi tecnici nell'azienda agricola dall'ultimo fornitore in cui l'azienda viene abitualmente utilizzata (sono stati noleggiati veicoli da 3,5 t).	
Consumo di acqua legato alle operazioni agricole (irrigazione e trattamenti della vegetazione).	
Le emissioni dirette di N ₂ O sono state stimate con il modello statistico Stehfest e Bouwman (2006).	
Le emissioni indirette di N ₂ O sono state stimate utilizzando la metodologia IPCC 2006, che considera le emissioni indirette di N-N ₂ O pari all'1% delle perdite di N sotto forma di emissioni di NH ₃ +NO (eq. 11.11), dovute all'applicazione di fertilizzanti azotati (sia minerali che organici), e allo 0,75% delle perdite di N sotto forma di rilasci di azoto come percolazione + deflusso (eq. 11.10). Le emissioni di NH ₃ derivanti dall'applicazione di fertilizzanti sintetici sono state stimate sulla base dei fattori di emissione EMEP/EEA del 2013 (3.D Produzione vegetale e suoli agricoli). Per nessuna emissione	

dall'applicazione di fertilizzanti, vengono utilizzati i fattori di emissione EMEP/EEA 2013 Tier 1.	
Le emissioni di CO ₂ dovute all'applicazione di urea sono quantificate secondo la metodologia IPCC 2006.	

Fonte: Banca dati CRPV Soc. Coop

Lo studio del ciclo di vita parte dalla lavorazione preparatoria del terreno destinato alla semina. Il processo produttivo comprende: lavorazione del terreno con eventuale fertilizzazione pre-semina, trapianto (eventualmente accompagnato dalla posa di tubi per l'irrigazione a goccia), trattamenti per il controllo chimico delle infestanti, fertilizzazione azotata di copertura, diserbo, irrigazione e trattamenti fitosanitari contro malattie e insetti. La raccolta avviene tramite mietitrici semoventi che caricano direttamente i pomodori nei rimorchi per il trasporto.

La Tabella 1 riassume le principali caratteristiche delle aziende agricole monitorate e il livello dei principali input utilizzati. La categorizzazione dei risultati relativi al GWP, suddivisi per le principali fasi emissive nella produzione del pomodoro, è presentata nella Tabella 3. Il database di riferimento utilizzato è Ecoinvent, riconosciuto per la sua completezza, coerenza e trasparenza dei dati.

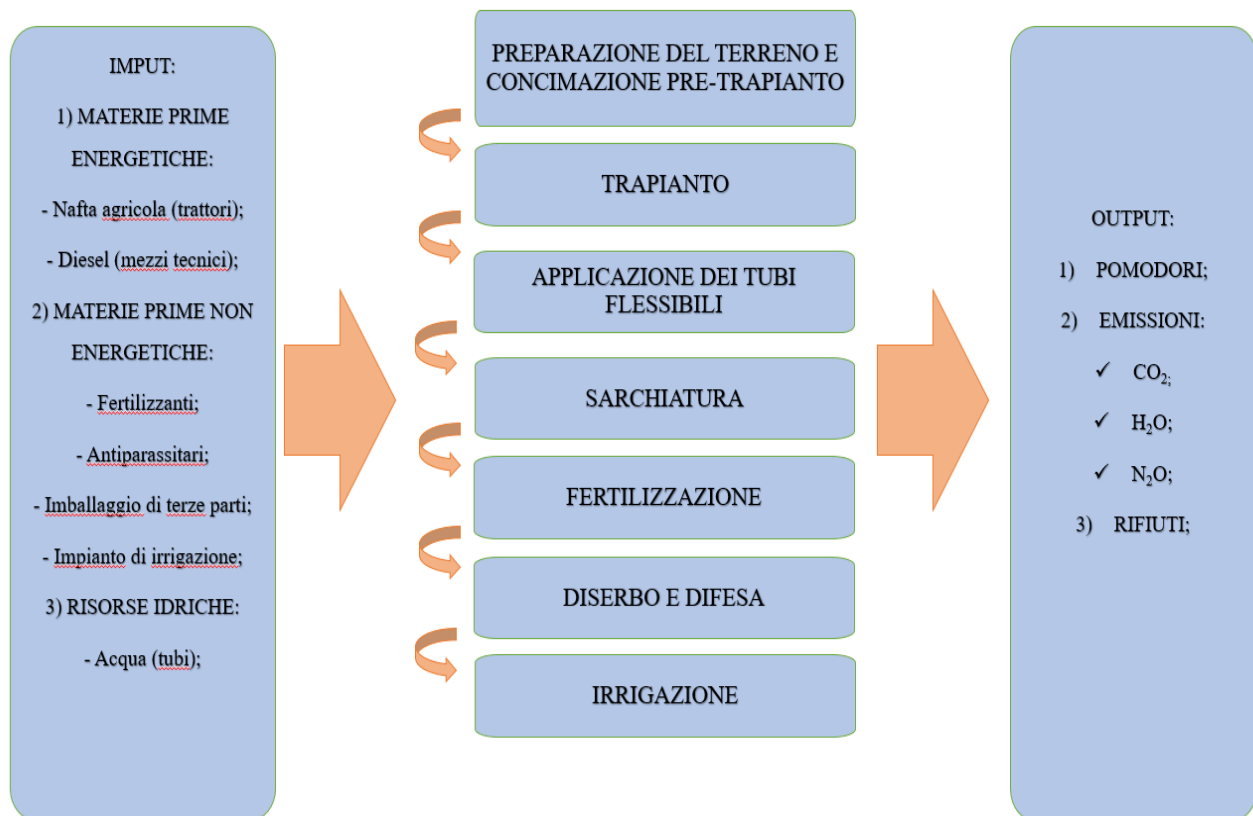
Tabella 3. Descrizione delle categorie d'impatto valutate nell'analisi LCA.

Classificazione	Descrizione
Operazioni Colturali	Consumo di energia per le operazioni colturali (lavorazione del terreno, trapianto, concimazione, diserbo, trattamenti fitosanitari, operazioni di raccolta)
Irrigazione	Consumo di energia (pompa, spandimento e raccolta dei tubi), sistemi di irrigazione (tubo o tubi semoventi) e consumo di acqua.
Seedlings	Produzione di piantine in crescita
Fertilizzanti	Produzione di fertilizzanti e relativi imballaggi
Pesticidi	Produzione di principi attivi e relativi imballaggi
Emissioni dei Fertilizzanti	Emissioni dirette e indirette N ₂ O, NO, NH ₃
Trasporto	Trasporto delle piantine e mezzi tecnici
Rifiuti	Smaltimento dei rifiuti (imballaggi, plateau di polistirolo, tubi flessibili, tubo irrigatore semovente)

Fonte: Elaborazione dell'autore

La Figura 4 mostra il diagramma di flusso che rappresenta i flussi di ingresso e di uscita studiati nell'analisi descritta sopra.

Figura 4. Diagramma di flusso della produzione di pomodori



Fonte: (Progetto CRPV LIFE+)

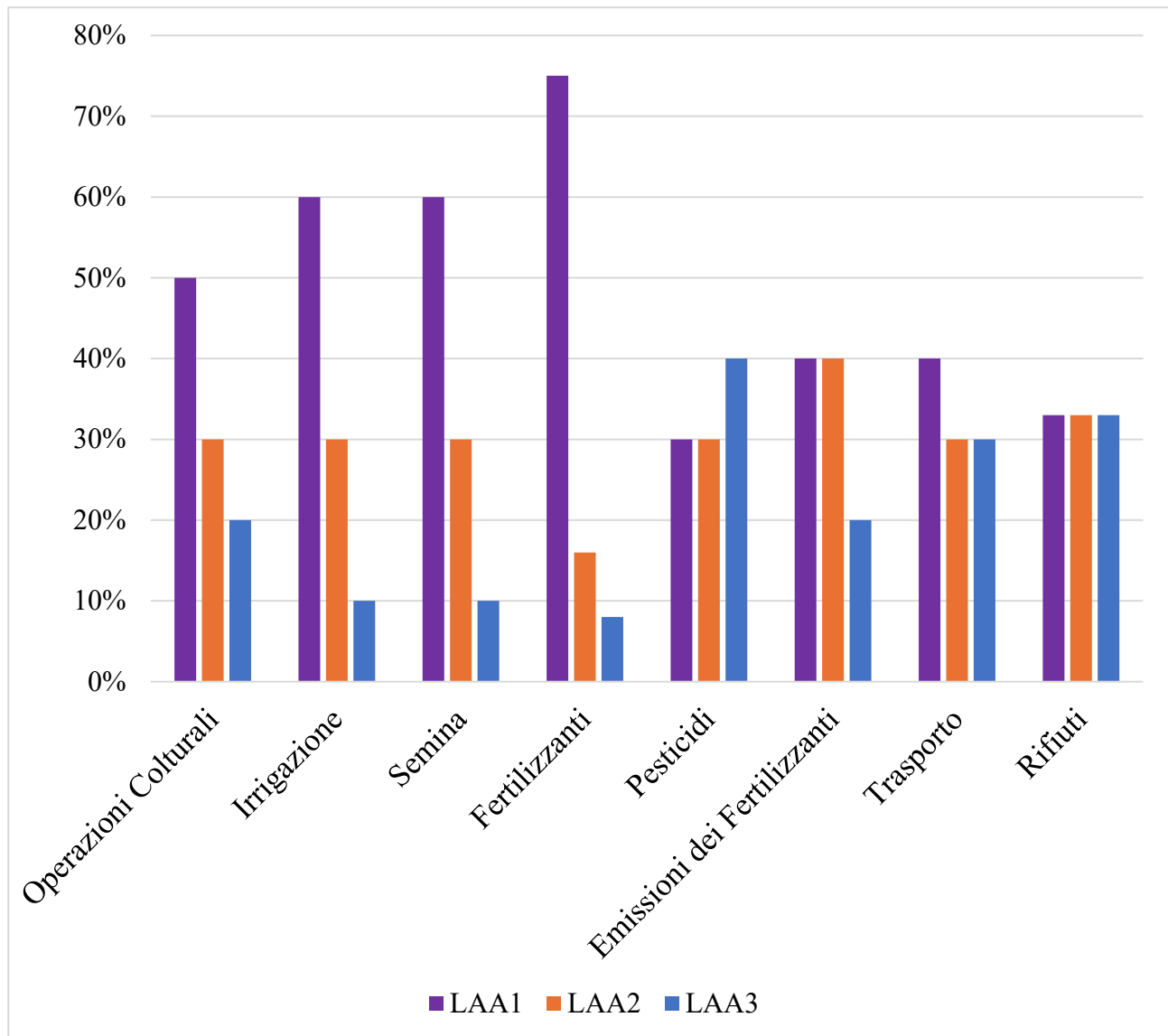
2.5 Risultati

2.5.1 Life Cycle Impact Assessment

In questa sezione viene presentata la stima degli impatti derivanti dai Modelli di Business adottati nella produzione di pomodoro fresco - LAA1, LAA2 e LAA3 -. I dati raccolti nella fase LCI vengono elaborati dal software OpenLCA per confrontare e valutare i punti di forza e di debolezza delle produzioni considerate. Il metodo ReCiPe è stato applicato a livello di endpoint e i risultati della Carbon Footprint sono stati rappresentati per una maggiore completezza delle analisi.

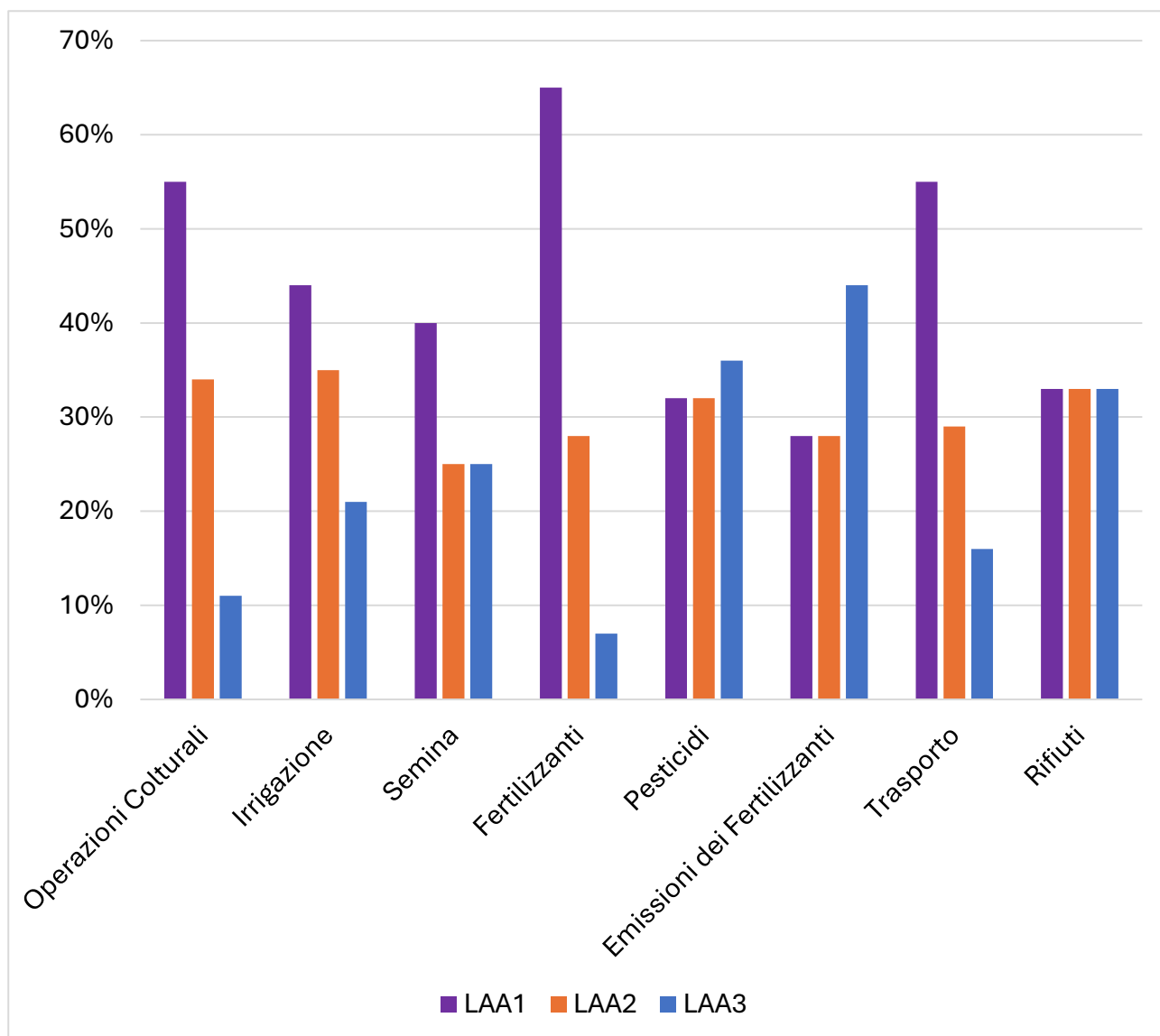
Attraverso l'analisi degli impatti a livello di endpoint, si è ottenuta una panoramica generale del danno ambientale causato dalle fasi di produzione delle tre tecniche considerate. Le Figure 5, 6 e 7 mostrano i risultati degli endpoint per le macroaree, rispettivamente, Salute umana, Ecosistemi e Risorse. Per effettuare il confronto, i dati sono stati standardizzati e i risultati sono stati rappresentati attraverso i seguenti istogrammi. I risultati sono presentati in base 100, dove il 100% rappresenta il totale degli impatti causati per ogni fase di produzione.

Figura 5. Risultati del metodo ReCiPe sull'endpoint. Categoria di impatto: Salute umana.



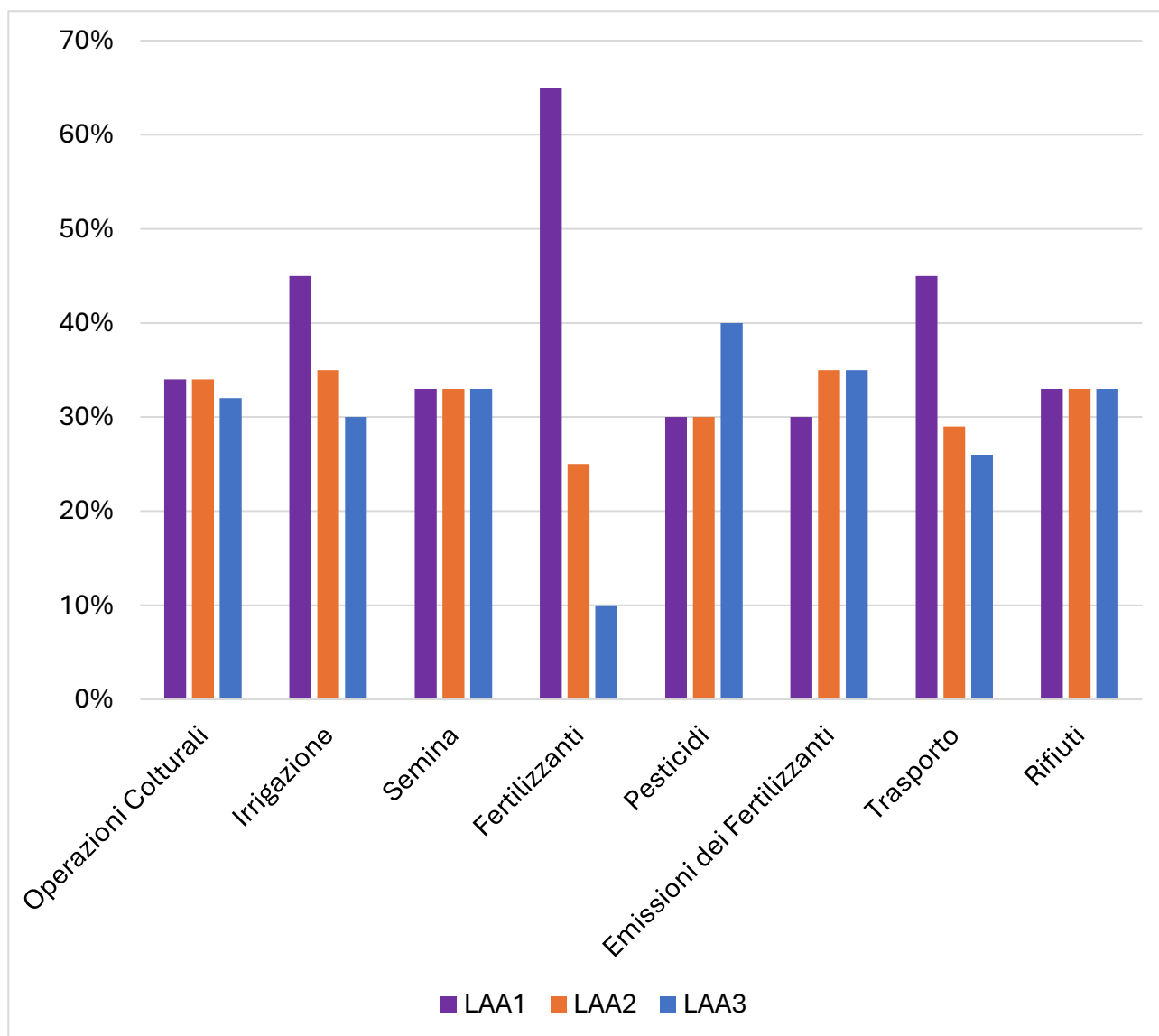
Fonte: OpenLCA 1.11

Figura 6. Risultati del metodo ReCiPe sull'endpoint. Categoria di impatto: Ecosistemi.



Fonte: OpenLCA 1.11

Figura 7. Risultati del metodo ReCiPe sull'endpoint. Categoria di impatto: Risorse.



Fonte: OpenLCA 1.11

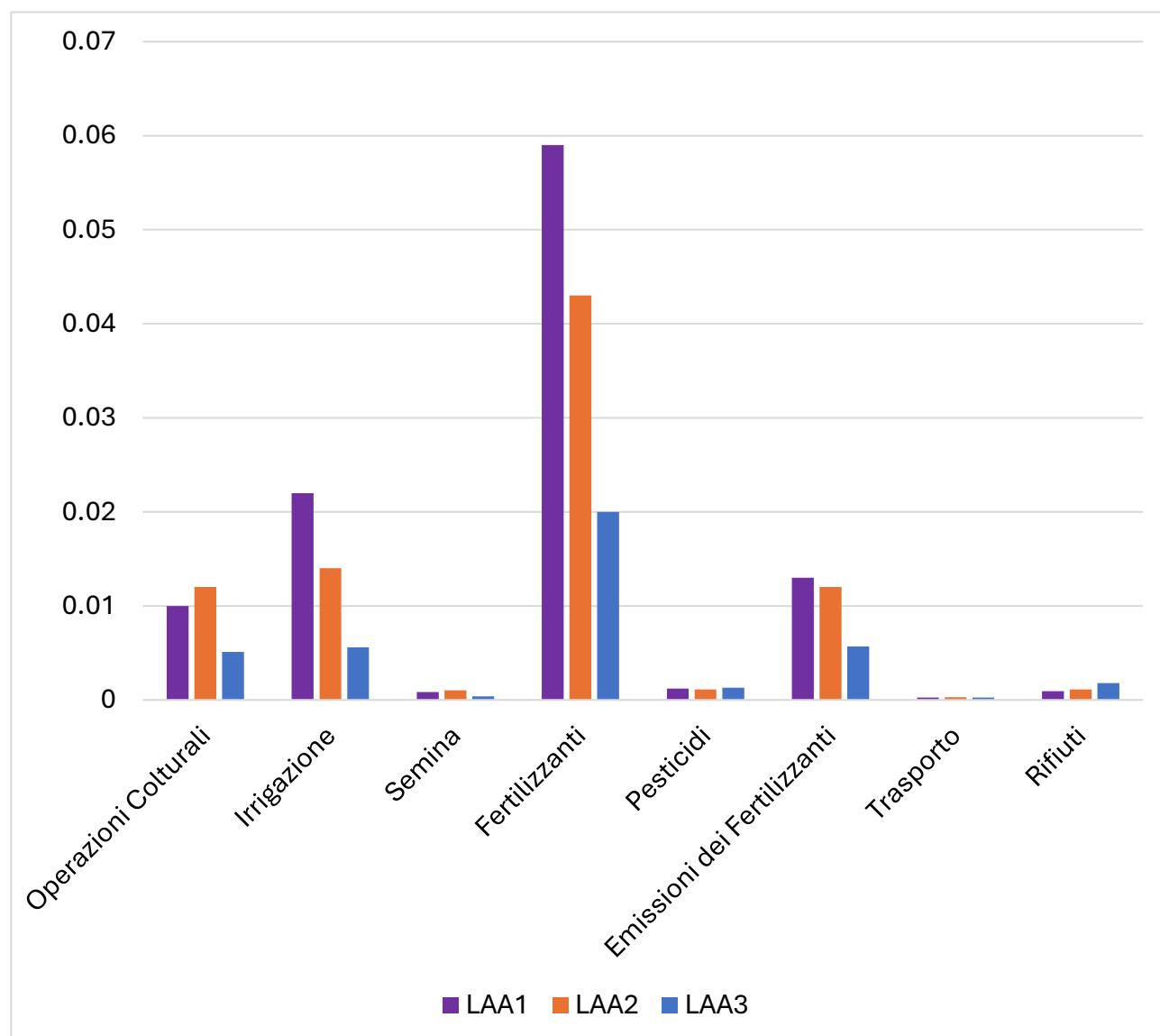
Nella Figura 5 sono riportati i risultati *endpoint* relativi alla categoria di impatto "Salute Umana". Dai dati emerge che il modello di agricoltura di precisione (LAA3) presenta le migliori performance in termini di impatto ambientale. Ad esempio, riesce a ridurre gli impatti della fase di irrigazione del 90% rispetto alla produzione standard, e quelli legati all'uso dei fertilizzanti del 92%. Il modello LAA2 mostra anch'esso miglioramenti rispetto alla produzione standard, con riduzioni del 20% nelle operazioni colturali, del 30% nell'irrigazione e nella semina, e del 56% nei fertilizzanti. Per quanto riguarda i pesticidi, si osserva un'inversione di tendenza: LAA3 registra un impatto superiore del 10% rispetto a LAA1 e LAA2.

Nella Figura 6 sono illustrati i risultati *endpoint* per la categoria di impatto "Ecosistemi". Anche qui, LAA3 mostra riduzioni significative: 44% nelle operazioni colturali, 23% nell'irrigazione, 15% nella semina, 58% nei fertilizzanti, e 39% nel trasporto delle attrezzature tecniche rispetto alla produzione standard. Tuttavia, come osservato nella categoria "Salute Umana", LAA3 presenta un impatto maggiore sugli ecosistemi rispetto a LAA1 e LAA2. La produzione integrata si mantiene su livelli simili alla produzione standard, ma mostra miglioramenti per le operazioni colturali (21% in meno) e per i fertilizzanti (37% in meno) rispetto a LAA1.

Infine, nella Figura 7, i risultati confermano il vantaggio del modello LAA3 nelle fasi di uso dei fertilizzanti, operazioni colturali e irrigazione. Tuttavia, si registra un'inversione di tendenza per quanto riguarda le emissioni da fertilizzanti, con risultati migliori per LAA1 e LAA2. In particolare, la fase di fertilizzazione rappresenta il punto di forza dell'agricoltura di precisione rispetto alla produzione integrata e a quella standard. In conclusione, si può affermare che il modello LAA3, nelle tre macro-aree analizzate Salute Umana (Figura 3), Ecosistemi (Figura 4) e Risorse (Figura 5) è quello che produce gli impatti ambientali meno significativi. La produzione integrata si avvicina ai livelli della produzione standard, con alcune eccezioni positive nelle operazioni colturali e nell'uso dei fertilizzanti.

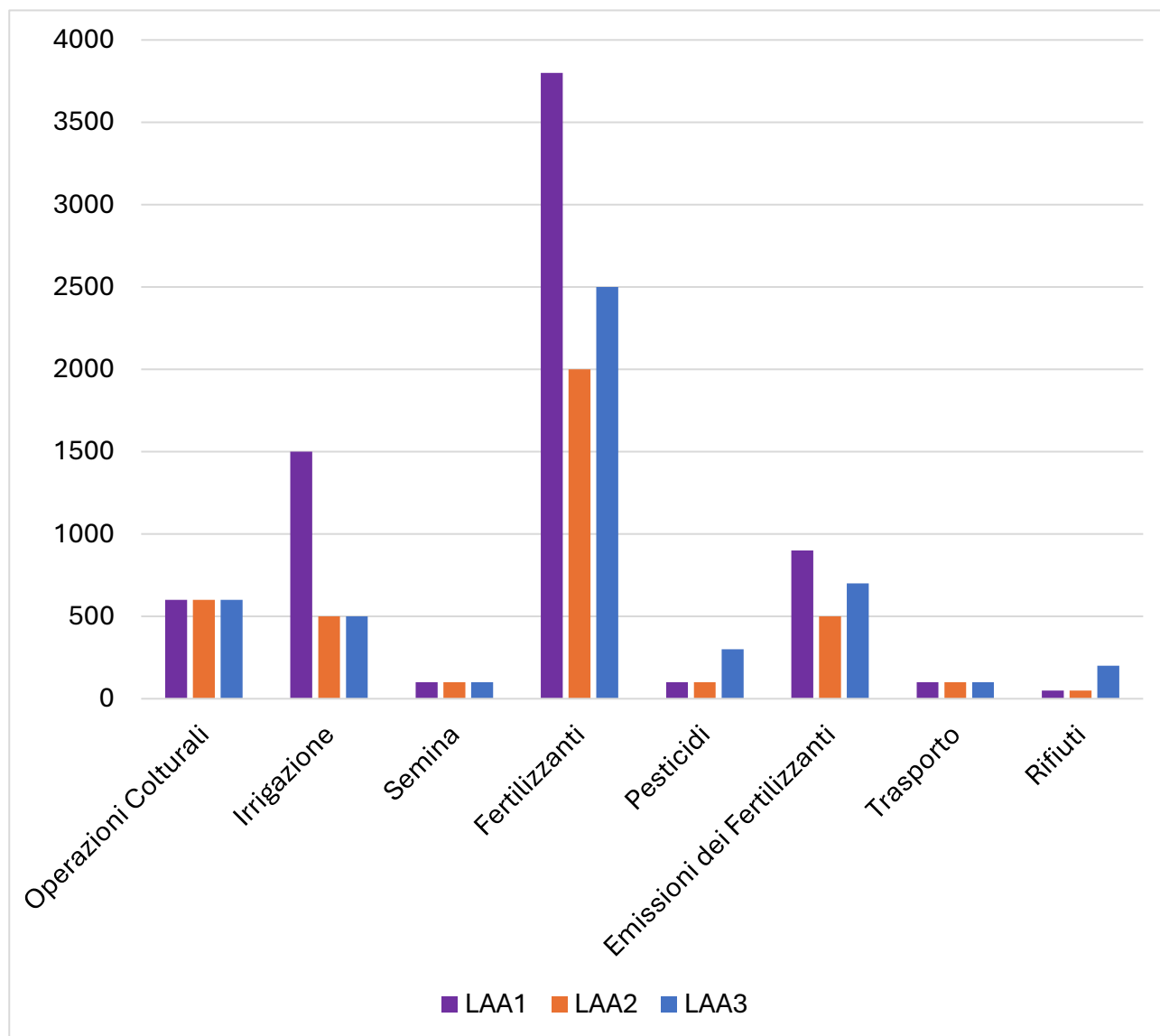
La Figura 6 e la Figura 7 mostrano i risultati della quantità di anidride carbonica emessa dalle produzioni LAA1, LAA2 e LAA3 per ciascuna unità funzionale (1 kg di pomodoro fresco da industria), relativamente alle singole fasi di produzione.

Figura 8. Confronto delle emissioni GWP dell'IPCC kg CO₂ eq/kg prodotte dalle tecniche di produzione LAA1, LAA2 e LAA3.



Fonte: OpenLCA 1.11

Figura 9. Confronto delle emissioni GWP dell'IPCC kg CO₂ eq /ha prodotte dalle tecniche di produzione LAA1, LAA2 e LAA3.



Fonte: OpenLCA 1.11

Il principale contributo al potenziale di riscaldamento globale è attribuito alla produzione di fertilizzanti, con valori che variano da 0,59 kg CO₂ eq/kg in LAA1 a 0,44 kg CO₂ eq/kg in LAA3. È importante sottolineare che la differenza tra i livelli LAA2 e LAA3, in termini di unità fertilizzanti azotate (UF), non è particolarmente elevata (rispettivamente 105 kg e 97 kg); tuttavia, è evidente la minore incidenza percentuale dell'apporto fertilizzante in LAA3. Ciò è dovuto principalmente all'impiego di letame pellettato in sostituzione, parziale o totale, dei fertilizzanti di sintesi.

Come illustrato nelle Figure 8 e 9, LAA3 mostra una differenza sostanziale non solo rispetto a LAA1, ma anche rispetto a LAA2, con emissioni inferiori del 52%. Questo risultato è attribuibile a un uso

più efficiente degli input. Si conferma quindi che la produzione di fertilizzanti rappresenta la voce più impattante sul potenziale climalterante, contribuendo per il 55% delle emissioni totali in LAA1 e per il 50% in LAA3.

Seguono, in ordine di importanza, le emissioni legate all'irrigazione, la cui incidenza è aumentata negli ultimi anni a causa delle estati sempre più siccitose in Italia, dell'uso di fertilizzanti azotati e delle operazioni colturali (Fernandes, et al., 2023; Tolettini, et al., 2023). La fase di irrigazione, che costituisce un elemento discriminante tra i diversi modelli LAA, mostra un'incidenza decrescente passando da LAA1 (20,4%), a LAA2 (16,1%), fino a LAA3 (13,9%). La voce "rifiuti" in LAA3, che comprende lo smaltimento delle manichette per irrigazione (considerate a durata annuale), risulta più elevata rispetto a LAA2 in termini assoluti, incidendo per il 4,4% sulle emissioni totali, rispetto a circa l'1% negli altri due modelli (tabella 4).

Tabella 4. IPCC GWP produzioni LAA1, LAA2 e LAA3.

% Kg CO₂ eq/Kg pomodoro	LAA1	LAA2	LAA3
Operazioni colturali	10,44%	12,35%	12,92%
Irrigazione	15,99%	15,66%	8,76%
Semenze	0,79%	0,94%	0,98%
Fertilizzanti	57,42%	55,15%	57,73%
Antiparassitari	1,92%	1,90%	1,99%
Emissioni da fertilizzanti	12,36%	12,75%	13,34%
Attrezzatura tecnica	0,18%	0,19%	0,21%
Trasporto			
Spreco	0,90%	1,05%	4,06%
Total	100%	100%	100%

Fonte: Banca dati CRPV Soc. Coop

Dal confronto quantitativo, il Livello Ambientale 2 (LAA2) ha permesso un risparmio di 0,023 kg CO₂ eq/kg rispetto a LAA1. Considerando una produzione media di 54 t/ha, ciò si traduce in un risparmio complessivo di 1242 kg CO₂ eq/ha. LAA3, invece, ha comportato una riduzione di 0,044 kg CO₂ eq/kg rispetto a LAA2 e, a fronte di una produzione di 136 t/ha, ha generato un risparmio totale di 5984 kg CO₂ eq/ha (tabella 5). Nella Figura 9, i confronti sono espressi per unità di superficie (ettaro). In questa rappresentazione, che disaccoppia i risultati dalla resa produttiva per ettaro e quindi dall'efficienza nell'uso degli input, si osserva un'inversione di trend tra LAA2 e LAA3: quest'ultimo, a causa di un maggiore impiego di fertilizzanti e pesticidi, raggiunge un valore di 5542 kg CO₂ eq/ha, contro i 4547 kg CO₂ eq/ha di LAA2. Tuttavia, il confronto diretto con LAA1 mostra ancora un vantaggio per LAA3, con una riduzione da 2595 kg CO₂ eq/ha a 1600 kg CO₂ eq/ha.

Tabella 5. IPCC GWP produzioni LAA1, LAA2 e LAA3.

kg CO2 eq/kg pomodoro	LAA1	LAA2	LAA3
Operazioni colturali	0,0095	0,010	0,0075
Irrigazione	0,015	0,013	0,00507
Semenze	0,00072	0,00077	0,001
Fertilizzanti	0,052	0,045	0,0334
Antiparassitari	0,0017	0,0016	0,0012
Emissioni da fertilizzanti	0,011	0,010	0,0077
Attrezzatura tecnica	0,00016	0,00016	0,00012
Trasporto			
Spreco	0,00082	0,00087	0,0024
Total	0,908	0,0823	0,0579

Fonte: Banca dati CRPV Soc. Coop

2.6 Discussione ed Implicazioni

2.6.1 Discussioni Teoriche ed Implicazioni

Da un punto di vista teorico, il nostro obiettivo è promuovere l'adozione della *teoria degli stakeholder* e del concetto di *valore condiviso* (*Creating Shared Value*, CSV) nei processi decisionali e strategici della governance aziendale, con un focus specifico sul settore agricolo. In questo contesto, sottolineiamo il ruolo centrale dell'ambiente, inteso come stakeholder cruciale, il cui riconoscimento impone alle imprese una revisione dei propri modelli di business. Questa revisione si rende necessaria per mitigare gli impatti ambientali negativi e promuovere la sostenibilità ecologica all'interno delle pratiche produttive.

Per rispondere a tali sfide, sta emergendo un nuovo paradigma: il *modello di business fondato sull'agricoltura di precisione*. Questo approccio si propone di integrare innovazioni tecnologiche e sostenibilità ambientale, ridefinendo le logiche tradizionali di creazione di valore nelle imprese agricole. Attraverso l'analisi di casi empirici rilevanti, intendiamo dimostrare che l'attuale compromesso tra la scarsità delle risorse alimentari e l'aumento della popolazione mondiale spinge le aziende agricole a rivedere i modelli organizzativi e produttivi esistenti. Fattori quali gli investimenti in tecnologia, l'adozione di sistemi informativi avanzati, la valorizzazione del capitale umano e l'introduzione di nuove tecnologie digitali, rappresentano i principali driver dell'innovazione nei modelli di business. Questa trasformazione non riguarda soltanto le modifiche alle proposte di valore, alle strategie o ai modelli operativi, ma coinvolge anche la creazione di nuove attività, la riconfigurazione dei collegamenti tra attività e la revisione delle componenti stesse delle attività aziendali, come evidenziato da Amit e Zott.

Nel contesto dell'agricoltura di precisione, la letteratura ha evidenziato numerose criticità, tra cui le caratteristiche strutturali delle aziende agricole, i fattori socio-economici e le barriere di tipo psicologico, che ostacolano una diffusione capillare delle tecnologie e un efficace trasferimento delle conoscenze. Ciononostante, riteniamo fondamentale un'analisi approfondita che permetta di comprendere come l'agricoltura di precisione integri le tre dimensioni principali dell'innovazione del modello di business: innovazione del contenuto, della struttura e della governance delle attività, come sintetizzato nella Tabella 6. Il mercato globalizzato contemporaneo impone nuove sfide e obiettivi in termini di sostenibilità. In tale contesto, si evidenzia un trade-off tra la quantità (es. il numero di unità prodotte) e la qualità, intesa secondo il nuovo approccio ESG (Environmental, Social, Governance). L'obiettivo è la creazione di un prodotto che risponda in modo soddisfacente alle esigenze delle generazioni attuali, senza compromettere quelle future. Per raggiungere questo traguardo, le imprese sono chiamate a innovare, valorizzando al contempo quegli elementi che in passato ne hanno garantito la resilienza al cambiamento.

Tabella 6. Principali fattori del business model nel caso della tecnologia dell'agricoltura standardizzata e di precisione.

COMPONENTI DEL BUSINESS MODEL	LAA1	LAA3
TARGET	B2C: persone che vogliono consumare prodotti agricoli freschi B2B: azienda dell'industria alimentare che cerca materie prime	B2C: consumatori di prodotti agricoli freschi che vogliono tracciare un alimento e che hanno un moderato impatto ambientale atteggiamento amichevole B2B: azienda dell'industria alimentare che cerca materie prime e per la quale il sistema completo di tracciabilità è molto importante
OFFERTA DI PRODOTTI	Prodotti agricoli, ad esempio colture, ortaggi, frutta.	Prodotti agricoli, ad esempio colture, ortaggi, frutta.
MODELLO DI RICAVI	Nell'agricoltura, la volatilità dei prezzi e delle rese è generale a causa dei fattori di rischio elevati.	Con la tecnologia dell'agricoltura di precisione, la volatilità dei rendimenti diventa meno generale a causa dell'uso più razionale degli input.

VALUE CHAIN	Tutta la gamma di beni e servizi necessari affinché un prodotto agricolo passi dall'azienda agricola al cliente finale o consumatore.	I membri della catena del valore sono gli stessi che nel caso della produzione agricola convenzionale. La differenza è che con la tecnologia dell'agricoltura di precisione vengono utilizzati meno prodotti chimici. L'uso razionale della chimica potrebbe essere uno strumento per aumentare la fiducia dei consumatori nei prodotti agricoli. La distribuzione non viene modificata.
MODELLO DI COSTO	Secondo la struttura dei costi della RICA, i costi connessi all'attività agricola del conduttore e alla produzione del periodo contabile. Comprende: fattori produttivi specifici per coltura, spese generali totali dell'agricoltura, ammortamento dei beni strumentali stimati al valore di sostituzione, totale	Il modello di costo è lo stesso dei metodi di coltivazione convenzionali. Dobbiamo ricordare che l'investimento nella tecnologia dell'agricoltura di precisione è superiore a quello delle attrezzature convenzionali.
ORGANIZZAZIONE	In generale, il personale delle aziende agricole non è ben qualificato o ben istruito	La tecnologia dell'agricoltura di precisione è molto sensibile le competenze digitali del personale e del management. L'impegno della gestione della tecnologia è un fattore molto importante nel caso della nuova tecnologia moderna

Fonte: Lencsés, et al., 2020

Un nuovo paradigma tecnologico si sta affermando: l'agricoltura di precisione. Nel presente studio, essa si dimostra particolarmente efficace nell'affrontare i cambiamenti climatici osservati negli ultimi anni (Colovic, et al., 2022; Zaragüeta, et al., 2023), registrando performance ambientali e produttive superiori nella coltivazione del pomodoro in Emilia-Romagna rispetto ad altri modelli di business esaminati. Tra i principali punti di forza, vi è la capacità di monitorare in tempo reale parametri ambientali come aria, suolo e umidità delle colture, permettendo così un adattamento mirato delle tecniche e delle quantità di input utilizzati. L'intelligenza artificiale, in sinergia con biosensori, consente la definizione di "varchi di controllo", soglie oltre le quali il sistema attiva misure automatiche di contenimento o segnala la necessità di intervento umano. A differenza di LAA1 e

LAA2, l'intervento dell'operatore in LAA3 è puntuale e calibrato in funzione dei dati raccolti. Questo approccio consente di ottimizzare la produzione anche in condizioni difficili – come stagioni imprevedibili o suoli a fertilità disomogenea riducendo l'impiego eccessivo di fertilizzanti e pesticidi, a beneficio dell'intera campagna produttiva.

Lo studio confronta tre modelli di business applicati alla produzione di pomodoro da industria: LAA1 (standard), LAA2 (produzione integrata certificata SQNPI), e LAA3 (agricoltura di precisione). Questi modelli si distinguono per il grado di specializzazione tecnologica. LAA3 si basa su un sistema automatizzato guidato da intelligenza artificiale che gestisce in autonomia anche la raccolta idroponica. Al contrario, LAA1 si fonda sull'esperienza diretta dell'agricoltore, mentre LAA2 applica pratiche agricole sostenibili secondo protocolli certificati.

I risultati evidenziati nelle Figure 5, 6 e 7 mostrano come LAA3 presenti un impatto ambientale significativamente inferiore rispetto a LAA1 e LAA2, ad eccezione dell'uso di pesticidi, dove registra un livello lievemente più alto. Ciò potrebbe sembrare un limite, ma l'analisi della Tabella 1 rivela che la resa per ettaro di LAA3 è nettamente superiore: 100 rispetto a 62 (LAA2) e 77 (LAA1). L'agricoltura di precisione garantisce dunque una produttività del 30% superiore rispetto alla produzione standard e del 61% rispetto alla produzione integrata. Sebbene l'utilizzo di fertilizzanti resti elevato anche in LAA3, le analisi di impatto ambientale (metodo ReCiPe, Figure 5–7) dimostrano come tale tecnica riesca a contenerne significativamente gli effetti negativi. Le emissioni legate ai fertilizzanti, misurate in kg CO₂ eq/kg/ha, rappresentano l'input con maggiore impatto sul riscaldamento globale, come evidenziato anche nelle Figure 8 e 9. Tuttavia, è proprio in questo ambito che LAA3 si discosta in modo più netto dai modelli tradizionali, registrando prestazioni ambientali migliori.

Un'ulteriore osservazione riguarda le “operazioni colturali”, che mantengono livelli simili di emissioni nei tre modelli, in quanto legate a fasi del processo come il trasporto delle attrezzature non ancora interessate da significative innovazioni. Inoltre, il basso costo della manodopera per la raccolta del pomodoro, sia in Italia che all'estero, costituisce un ostacolo all'adozione di modelli più automatizzati, poiché il rapporto qualità/prezzo rimane ancora favorevole alla raccolta manuale (Finger, et al., 2019; Vecchio, et al., 2020). In conclusione, i risultati dell'analisi LCA indicano che LAA3 rappresenta uno dei modelli di business più efficaci in Emilia-Romagna nel settore agroalimentare per quanto riguarda le performance ambientali, confermando la validità dell'approccio basato sull'agricoltura di precisione.

2.6.2 Conclusioni

Nonostante l'evidenza empirica dimostri come l'agricoltura di precisione possa migliorare significativamente gli esiti di sostenibilità per le imprese, la letteratura ha ampiamente indagato le limitazioni e le barriere che ostacolano l'adozione di modelli di business innovativi nel settore agricolo. Tra i principali ostacoli figurano fattori contestuali, sia esterni che interni, le caratteristiche aziendali e gli aspetti comportamentali. Particolarmente critiche sono le barriere legate ai processi strutturati di acquisizione e formalizzazione della conoscenza, come nel caso dell'approccio AKAP (Acquisition, Knowledge, Adoption and Practice), che possono determinare una ridotta capacità innovativa e una distribuzione diseguale dell'accesso alla conoscenza tra i potenziali beneficiari. Questo fenomeno, noto come elite capture, è confermato anche nella comunicazione dell'UE sul futuro dell'alimentazione e dell'agricoltura, dove si sottolinea la disomogeneità nell'accesso a tecnologie e conoscenze tra i diversi Stati membri. Tale scenario mette indirettamente in discussione il ruolo delle istituzioni nel facilitare i processi di trasferimento della conoscenza e di adozione dell'innovazione. I fattori istituzionali sono determinanti per il comportamento innovativo delle imprese agricole: l'ambiente istituzionale, infatti, può essere più o meno favorevole all'innovazione. Sauer e Vrolijk evidenziano come elementi quali l'accesso al credito, il supporto istituzionale, i valori culturali e la cooperazione con enti di ricerca e istituzioni produttrici di conoscenza influenzino significativamente l'adozione di innovazioni. Politiche locali inefficaci, carenza di supporto istituzionale, mancanza di coordinamento tra settore pubblico e privato, e l'isolamento geografico dai mercati o dai fornitori, rappresentano ulteriori barriere (Tell, et al., 2016; Barth, et al., 2017; Sauer, et al., 2019).

In questo contesto, il caso studio presentato si configura come un esempio virtuoso di riduzione delle emissioni Scope 1, ossia delle emissioni dirette generate dalle attività agricole all'interno dei confini organizzativi dell'impresa. L'introduzione di tecnologie come la carbonizzazione idrotermale (HTC) dimostra come sia possibile trasformare residui agricoli (es. legno, paglia, lolla di riso) in prodotti carboniosi a impatto negativo sul bilancio del carbonio, contribuendo attivamente alla decarbonizzazione del settore primario. Tale pratica non solo valorizza sottoprodotti agricoli, ma rappresenta anche un'alternativa concreta per la gestione sostenibile dei rifiuti e la produzione di energia rinnovabile, rafforzando il contributo dell'agricoltura alla lotta contro il cambiamento climatico. Ulteriori strategie innovative a supporto della sostenibilità includono l'aumento dell'accesso ai punti vendita alimentari locali, la promozione della produzione locale, l'implementazione di sistemi di recupero delle risorse a ciclo chiuso, e l'adozione di altri approcci emergenti. Tuttavia, l'approccio LCA (Life Cycle Assessment), ampiamente impiegato per la

valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi di produzione alimentare, presenta alcune limitazioni. In particolare, la difficoltà di aggiornamento costante delle banche dati a livello regionale e nazionale può alterare significativamente i risultati nelle diverse categorie di impatto, a causa della variabilità nella disponibilità di risorse naturali (Mirabella, et al., 2019). Inoltre, fattori quali la morfologia del territorio, il clima e la temperatura influenzano la produzione agricola, rendendo difficile una comparazione diretta tra modelli produttivi. Alcuni studi hanno dimostrato che le produzioni con minore impatto ambientale non coincidono necessariamente con quelle più efficienti dal punto di vista economico e sociale (Sica, et al., 2022; Colucci, et al., 2021). L'utilizzo di tecnologie avanzate comporta spesso costi "notionali", ovvero i costi legati alla conoscenza necessaria per il corretto funzionamento dei sistemi tecnologici (Yap, et al., 2020).

In tale contesto, si suggerisce l'integrazione dell'analisi LCA con strumenti come la Social-LCA (S-LCA) e il Life Cycle Costing (LCC), per una valutazione più completa e multidimensionale delle modalità produttive adottate (Arcese, et al., 2013; Heijungs, et al., 2013; Notarnicola, et al., 2012). LCA rappresenta infatti un quadro di riferimento fondamentale per valutare in modo sistemico gli impatti sulla salute umana e sull'ambiente associati alla produzione e al consumo alimentare. Tuttavia, gli attuali modelli e database LCA sono ancora limitati nella loro capacità di valutare con precisione i rischi e i benefici, sia a breve che a lungo termine, dei sistemi di produzione di alimenti, mangimi e biocarburanti. Affrontare in modo efficace le sfide ambientali, sanitarie e nutrizionali del nostro tempo richiede un'evoluzione metodologica degli strumenti di valutazione e, al contempo, la promozione di casi concreti – come quello presentato – in grado di dimostrare l'effettiva fattibilità e replicabilità di pratiche agricole sostenibili e a basse emissioni Scope 1. Tali esempi costituiscono un riferimento per le politiche pubbliche e per gli attori della filiera agroalimentare, indicando una direzione possibile e auspicabile verso la transizione ecologica del settore.

PARTE II: Stima e analisi delle emissioni indirette (Scope 3) nell'impiantistica industriale

In questa sezione verrà approfondito il concetto di emissioni indirette, con un focus sulle strategie per la loro riduzione. A tal fine, saranno analizzate le principali filiere produttive responsabili della produzione di materie prime, successivamente impiegate nei processi produttivi di altre imprese. Il Paese e la tecnologia di produzione rappresentano due fattori chiave su cui si baserà lo studio. Verrà inoltre esaminato il caso del Gruppo Maire, uno dei gruppi a maggiore capitalizzazione nel settore della realizzazione di impiantistica industriale ecosostenibile. L'obiettivo è quello di fornire uno strumento che permetta alle aziende di analizzare e valutare negli anni i trend e le aspettative di decarbonizzazione delle emissioni Scope 3 di Paesi e filiere produttive per differenti materie prime. A tal proposito saranno valutati scenari sulla base del nuovo sistema CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), un meccanismo introdotto dall'Unione Europea per evitare il fenomeno del carbon leakage, ossia la delocalizzazione della produzione in paesi con normative ambientali meno stringenti. Verrà illustrato il modello predittivo utilizzato per la decarbonizzazione delle emissioni indirette Scope 3. Tale modello sarà testato sui dati del Gruppo Maire, considerati un campione rappresentativo per un'analisi più ampia. In particolare, si partirà dal cemento, una materia prima con un'elevata incidenza di CO₂ nella realizzazione di impianti industriali. Il potenziale di sostenibilità, espresso dall'Indicatore S, sintetizzerà tecnologia, innovazione, politiche e sviluppo sia del contesto (Paese) sia della filiera produttiva locale. In altre parole, l'indicatore esprimerà la probabilità che, nel corso degli anni, grazie alle tecnologie e alle innovazioni offerte dal contesto (ad esempio, la disponibilità di energia elettrica rinnovabile in rete) e allo sforzo innovativo della filiera specifica, quest'ultima riesca a ridurre il proprio impatto ambientale. In questo capitolo il panorama delle filiere produttive viene ampliato: oltre al caso studio sul Gruppo Maire, saranno analizzate anche le filiere delle materie prime acciaio, EI&C (cavi e componentistica di ingegneria), energia e rame. Dopo aver testato il modello su queste cinque filiere, valuterò la convenienza economica di orientare le scelte strategiche verso determinati fornitori in specifiche aree geografiche, sulla base dell'indicatore di costo relativo. Quest'ultimo terrà conto del costo della CO₂ ed esprimerà la probabilità che, nel lungo periodo, il ricorso a una materia prima più sostenibile abbia un impatto positivo sulle performance economiche, compensando l'eventuale impatto negativo nel breve termine.

CAPITOLO 3: Metodi e modelli di previsione nella fornitura di materie prime

3.1 La filiera del Gruppo Maire tra analisi e best practices: un caso studio

Come descritto in precedenza le emissioni indirette Scope 3 rappresentano per le aziende odierne uno dei principali obiettivi ai fini del raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, efficienza ed economicità. Le emissioni Scope 3 sono principalmente legate alla filiera di fornitura delle materie prime e dei servizi correlati all'attività aziendale. Questo pone le aziende in una posizione di forte influenza per mitigare l'ammontare di tali emissioni poiché la scelta dei fornitori determina indirettamente un impatto sul business model di ciascun fornitore esercitando una spinta innovativa verso modelli di sostenibilità economica.

A tal proposito per studiare a fondo il problema e comprendere le dinamiche che intercorrono tra fornitori e aziende, diventa fondamentale l'esperienza presso un grande gruppo aziendale con un sistema di approvvigionamento complesso. Il gruppo Maire ha fornito un essenziale supporto nello studio e valutazione sul campo del fenomeno della decarbonizzazione delle emissioni indirette. Per tale motivo il gruppo Maire è stato selezionato come campione per lo sviluppo ed il test di un modello che permette alle aziende di gestire in modo efficace ed efficiente questa tipologia di emissioni.

Maire è un gruppo aziendale che opera a livello internazionale e si occupa dello sviluppo di impianti industriali eco-sostenibili e la produzione di materie prime sostenibili. È dunque, un attore industriale globale con un forte posizionamento nei settori dell'ingegneria e della tecnologia applicata alla trasformazione energetica. Con sede principale a Roma, Maire si è affermata come una delle principali realtà internazionali nell'ambito dell'impiantistica industriale, specializzandosi nella realizzazione di grandi progetti complessi, in particolare nel campo della chimica, della petrolchimica e della produzione di fertilizzanti. La strategia del gruppo si articola su due principali piattaforme operative: Integrated E&C Solutions (Engineering & Construction) e Sustainable Technology Solutions, entrambe orientate a guidare la transizione energetica e industriale attraverso un approccio integrato che combina competenze ingegneristiche, innovazione tecnologica e sostenibilità. Integrated E&C Solutions rappresenta il cuore storico del business di Maire, con attività focalizzate sulla progettazione, approvvigionamento e costruzione (EPC) di impianti industriali su larga scala. In questo ambito, il gruppo opera come contractor globale, con una presenza significativa in Medio Oriente, Asia, Europa e Africa. Sustainable Technology Solutions, invece, incarna l'evoluzione più recente del gruppo verso modelli produttivi a basso impatto ambientale. Questa divisione sviluppa tecnologie proprietarie e servizi ad alto valore aggiunto in settori chiave come la cattura della CO₂, la

chimica verde, il riciclo chimico e la produzione di idrogeno blu e verde, contribuendo attivamente alla decarbonizzazione dei processi industriali.

In considerazione delle caratteristiche sopra descritte, il campione selezionato si è rivelato particolarmente adeguato alla mappatura delle materie prime e all'analisi delle emissioni indirette lungo la filiera, soprattutto in relazione alla gestione e quantificazione delle emissioni Scope 3. Il processo di sviluppo e progettazione del modello analitico si è articolato in due fasi principali: la prima dedicata alla specificazione del modello, la seconda al testing dello stesso. La fase di specificazione ha compreso un insieme di attività preparatorie fondamentali, tra cui la raccolta e l'analisi dei dati primari e secondari, la stima degli indicatori ambientali ed economici rilevanti e la codifica dell'algoritmo di base. La seconda fase, centrata sulla validazione e simulazione del modello, si è focalizzata sull'applicazione pratica alle dinamiche di approvvigionamento del campione analizzato, con particolare attenzione alla stima dei costi della CO₂ secondo i criteri introdotti dal meccanismo europeo di adeguamento del carbonio alle frontiere CBAM.

Al fine di comprendere in modo approfondito i flussi di input e output che caratterizzano la gestione della supply chain del campione considerato, sono stati condotti incontri strutturati con i referenti aziendali. In tali occasioni è stato adottato un approccio guidato da moduli operativi e domande semi-strutturate, finalizzato a definire con precisione le principali materie prime impiegate nei processi produttivi, le caratteristiche delle filiere locali di approvvigionamento e la localizzazione geografica dei fornitori. A partire dai dati raccolti, si è proceduto alla mappatura dettagliata delle catene di fornitura, individuando cinque materie prime centrali nei processi produttivi del gruppo aziendale analizzato: acciaio, cemento, energia, rame ed EI&C (Electrical, Instrumentation & Control). Tali materiali rappresentano componenti ad alta intensità emissiva e rivestono un ruolo chiave nella valutazione degli impatti ambientali legati all'intera filiera produttiva, nonché nella stima delle potenziali implicazioni economiche derivanti dall'implementazione del CBAM. Tra le materie prime identificate, il cemento riveste un ruolo particolarmente strategico non solo per la sua diffusione nei processi produttivi del gruppo, ma anche per l'impatto ambientale che lo caratterizza lungo l'intero ciclo di vita. Il paragrafo seguente approfondisce il contributo del cemento nella progettazione di impianti eco-sostenibili, evidenziandone le criticità ambientali e le opportunità di innovazione legate alla decarbonizzazione del settore.

3.2 Il cemento come materia prima chiave nella realizzazione di impianti eco-sostenibili

Le emissioni di gas a effetto serra industriali (GHG) hanno rappresentato il ~30% del totale globale nel 2010 (Bajželj, Allwood, & Cullen, 2013; IPCC, 2014). Per limitare il riscaldamento globale a 1,5°C al di sopra dei livelli preindustriali, secondo l'accordo di Parigi (UNFCCC, 2015), le emissioni

industriali devono ridursi del 54-91% (rispetto ai livelli del 2010) entro il 2050 (IPCC, 2018). In questo contesto, il Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) emerge come uno strumento fondamentale per la misurazione la gestione e la rendicontazione delle emissioni. Questo standard internazionale consente alle aziende, alle organizzazioni e ai governi di contabilizzare e segnalare in modo accurato le proprie emissioni. GHG Protocol include tutti i principali gas serra riconosciuti per il loro contributo al climate change. I gas serra inclusi sono quelli elencati nel Protocollo di Kyoto e nel successivo Accordo di Parigi, che rappresentano la maggior parte delle emissioni responsabili dell'effetto serra: Diossido di carbonio (CO₂), Metano (CH₄), Protossido di azoto (N₂O), Idrofluorocarburi (HFC), Perfluorocarburi (PFC), Esafluoruro di zolfo (SF₆). GHG Protocol classifica le emissioni sopracitate sulla base di 3 livelli in relazione al principio di provenienza e caratterizzazione. Il primo livello denominato Scope 1 sono emissioni che derivano direttamente dalle attività dell'azienda, come la combustione di carburanti nelle strutture dell'azienda, le emissioni da processi industriali e le perdite di gas refrigeranti. Sono considerate dirette e controllabili direttamente dall'azienda stessa. Il secondo Scope 2 sono emissioni associate alla produzione di energia acquistata da fonti esterne, come l'elettricità, il vapore o il riscaldamento acquistati da fornitori esterni. Anche se le emissioni avvengono al di fuori del controllo diretto dell'azienda, sono strettamente legate alle sue operazioni pertanto hanno un certo grado di controllabilità diretta (Abdi et al., 2018; Albitar et al., 2023). Inoltre, Scope 3 è il tipo di emissioni più ampio e include tutte le altre emissioni indirette che derivano dalle attività dell'azienda, ma che si verificano al di fuori del suo controllo diretto. Queste possono includere le emissioni generate dalla catena di approvvigionamento dell'azienda, l'uso dei suoi prodotti da parte dei clienti, i viaggi dei dipendenti, lo smaltimento del prodotto stesso e dei rifiuti provenienti dalla supply chain. A tal proposito per le aziende risulta più complesso e difficilmente prevedibile la gestione di Scope 3 per le seguenti ragioni. La catena di approvvigionamento può essere estesa e complessa, con molteplici fornitori e sub-fornitori sparsi in diverse parti del mondo. Monitorare e gestire le emissioni in questa catena può essere complicato in particolare quando la fornitura di determinati componenti cosiddetti core è prodotta da un numero ridotto di imprese e l'impresa non può esercitare alcuna influenza su di esse. Altro caso è quello della reperibilità di commodities e pertanto il km0 è necessario per abbattere costi e inefficienze lungo l'intera supply chain. Determinare con precisione le emissioni di Scope 3 richiede la raccolta di dati dettagliati su una vasta gamma di attività, come il trasporto dei materiali, l'uso dei prodotti da parte dei consumatori e lo smaltimento dei rifiuti. Questi dati possono essere difficili da ottenere e possono variare notevolmente a seconda della geografia, delle pratiche commerciali e delle tecnologie impiegate. Le emissioni di Scope 3 derivanti dall'uso dei prodotti da parte dei consumatori sono particolarmente complesse da gestire, poiché l'azienda ha un controllo limitato su come i clienti

utilizzano e smaltiscono i suoi prodotti. Anche se un'azienda può progettare prodotti più efficienti dal punto di vista energetico o riciclabili, non può garantire che i consumatori li utilizzino in modo sostenibile (Alamerew & Brissaud, 2019; Diaz et al., 2021). Il coinvolgimento di stakeholder esterni può ridurre Scope 3, tra cui fornitori, clienti, partner commerciali e organizzazioni della società civile. Coordinare e coinvolgere queste parti interessate può essere impegnativo e richiedere tempo e risorse considerevoli. Anche se ci sono tecnologie e pratiche disponibili per ridurre Scope 3, queste possono non essere completamente mature o accessibili a tutte le aziende della supply chain. A tal proposito l'industria del cemento ha rappresentato ~23% delle emissioni industriali a livello globale, o ~8% delle emissioni globali totali, nel 2012 (Favier, Scrivener, & Habert, 2019; IEA, 2009; IEA, 2018; Miller, Horvath, & Monteiro, 2016; WWF, 2008). Come per le emissioni industriali totali, si prevede che le emissioni dell'industria del cemento aumenteranno in uno scenario di produzione continua, a causa della crescente domanda globale di prodotti di materiali cementizi (CM) (cioè cemento, malta, calcestruzzo) (IEA, 2018; WWF, 2008). Il cemento rappresenta una di quelle materie prime fondamentale per una vasta tipologia di settori industriali: edilizia, manifattura, industria del trasporto, ingegneria e delle costruzioni. Allo stesso modo il cemento è una componente che dato il GHG Protocol rientra nei suppliers che contribuiscono alle emissioni catalogate come Scope 3. Pertanto, la decarbonizzazione dell'industria del cemento, qui definita come riduzione delle sue emissioni a zero netto, rappresenta una sfida significativa. Questo perché è caratterizzata dall'elevata intensità energetica, delle emissioni dei processi di produzione, ed economica, ad esempio, a causa della natura globalizzata e relativamente a basso margine di profitto dei prodotti CM (Bataille et al., 2018). Un attento intervento politico è quindi essenziale per decarbonizzare l'industria globale del cemento e altre industrie che condividono sfide simili. Ciò è particolarmente rilevante nei paesi ad alto reddito, dove lo sviluppo e l'implementazione di tecnologie a basse emissioni devono essere stimolati evitando le perdite di carbonio (Forin, Radebach, Steckel, & Ward, 2018; Grubb, Hope, & Fouquet, 2002). I paesi a reddito più elevato, come quelli Europei, hanno storicamente concentrato la politica relativa alle emissioni sulla promozione dell'efficienza energetica (ad esempio, l'efficienza del forno di cemento) e dell'efficienza delle emissioni (ad esempio, cattura e stoccaggio/utilizzo del carbonio, CCS/U) nella fase di produzione del cemento (BEIS, 2017a; DECC, 2015a; SEE, 2019). Questo focus corrisponde a quello della ricerca sulla decarbonizzazione dell'industria del cemento, che si è storicamente concentrata sulle misure di efficienza energetica e delle emissioni implementate nel processo di produzione di clinker di cemento Portland (PC) (BEIS, 2017a; CEMBUREAU, 2013; IEA, 2018; Lehne & Preston, 2018; WWF, 2008). Tuttavia, i recenti processi di globalizzazione che hanno portato all'apertura dei mercati inducono ad uno sforzo congiunto anche i quei paesi definiti dall'OCSE "in via di sviluppo" e che secondo i recenti trattati internazionali, Accordo di Parigi e

Protocollo di Kyoto, possono beneficiare di status speciali al fine di permettere il pieno sviluppo delle loro economie. Secondo recenti studi Leal et al., 2021; Nguyen et al., 2021; Wang et al., 2022 le performance ambientali e il grado di innovazione tecnologica nei Paesi in Via di Sviluppo sono spesso superiori ai contesti occidentali determinando per alcune produzioni un vantaggio comparato nell'esternalizzare una parte o l'intera supply chain. GHG Protocol mette in evidenza come per la gestione dei livelli di emissione è fondamentale gestire e mappare l'intera supply chain e pertanto il grado di innovatività e il livello di resilienza di fornitori locali è core per la minimizzazione degli impatti. Allo stesso tempo è fondamentale il contesto istituzionale in cui l'impresa opera poiché questo potrebbe accelerare o meno i processi produttivi innovativi e quindi maggiormente sostenibili generando esternalità positive o negative. Ad esempio, la rete di fornitura elettrica e la sua origine, fonti energetiche rinnovabili o combustibili fossili, rappresenta per il paradigma tecnologico attuale una delle variabili a maggior incidenza sugli obiettivi Scope 3 (Ahmed et al., 2022; Breyer et al., 2022). Esaminiamo la supply chain del Gruppo Maire e da questo momento in poi faremo riferimento a progetto X come la sommatoria del totale degli impianti realizzati dall'azienda in un anno. Dopo aver mappato le filiere caratterizzanti dello Scope 3 di questa impresa multinazionale si vuole valutare quantitativamente come il cemento influenza le performance di CO2 a livello aggregato. Infine, dopo aver stabilito il peso del cemento sullo Scope 3 globale vengono confrontate diverse produzioni di cemento in diversi contesti: Europa, Stati Uniti e Asia. Questo perché analizzando le catene di approvvigionamento è emerso che quelli sono i Paesi a maggior contribuzione sul totale di fornitura di cemento.

A tal proposito vengono formulate le seguenti ipotesi di ricerca:

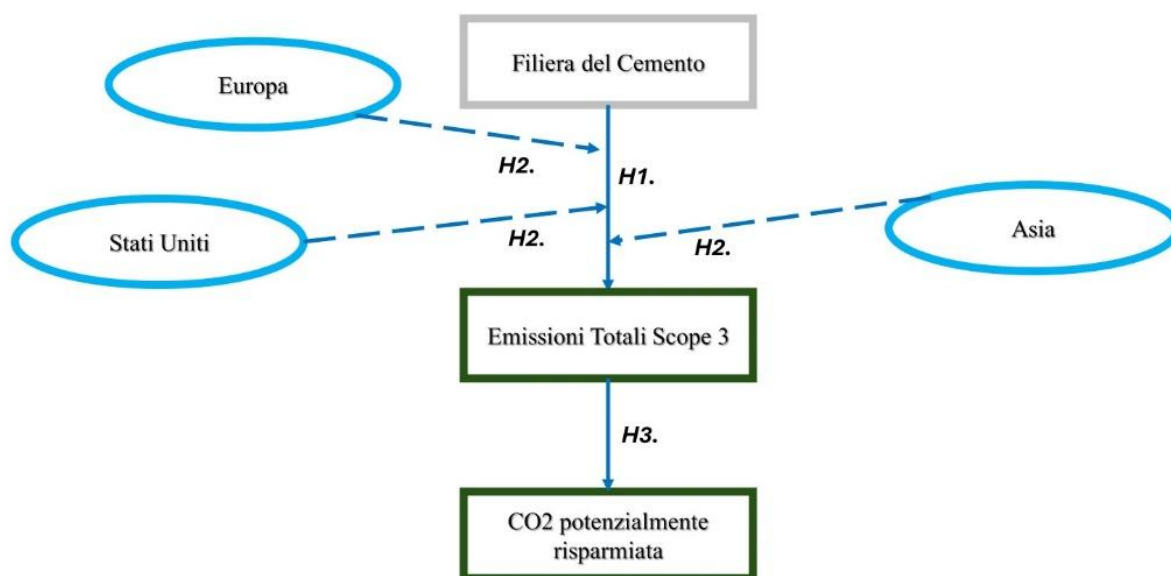
H1. Quanto impatta la produzione di cemento sulle emissioni Scope 3?

H2. Come variano le emissioni di Cemento sulle emissioni Scope 3 dati contesti istituzionali differenti?

H3. Sulla base della variabilità delle produzioni nei contesti Europa, Asia e Stati Uniti esiste uno scenario potenzialmente più sostenibile ed efficiente?

In Figura 10 viene rappresentato lo schema rappresentativo delle ipotesi da testare.

Figura 10. Framework teorico.



Fonte: Elaborazione degli Autori

3.2.1 La produzione di CM in Europa

Le emissioni di CO₂ cradle-to-gate derivanti dalla produzione di clinker per CM sono pari a circa 798 kg (media mondiale) e 712 kg (media europea) per t di clinker, e derivano principalmente dalle reazioni delle materie prime (ovvero, basate sul processo) e dai combustibili fossili con combustione (basata sull'energia) (Georgiades et al., 2023). Le emissioni derivanti dalla produzione di CM dipendono da diversi fattori, tra cui la quantità di clinker prodotta, l'ubicazione dell'impianto, il combustibile del forno, il mix di elettricità, nonché l'efficienza produttiva (Petek Gursel et al., 2014). In linea con l'Accordo di Parigi, l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) ha fissato un obiettivo di riduzione delle emissioni di CO₂ del 24% derivanti dalla produzione di cemento per contribuire a limitare l'aumento della temperatura media globale a 2° C all'anno (IEA, 2018). Il "Green Deal" della Commissione europea propone un obiettivo più ambizioso affinché l'Europa diventi carbon neutral entro il 2050, che richiede di limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C entro il 2100. Per raggiungere questi obiettivi climatici, l'industria del cemento deve ridurre le emissioni di CO₂ a un ritmo significativamente più rapido rispetto alla tendenza storica tra il 2005 e il 2018 (riduzione di circa 0,4% all'anno in kg di CO₂ per t di clinker). È importante quantificare il potenziale delle attuali misure di decarbonizzazione per ridurre le emissioni di CO₂ entro il 2050 e raggiungere gli obiettivi climatici. Molti studi LCA hanno studiato l'impatto del cambiamento climatico causato dalla sostituzione del clinker con SCM come scorie di altoforno, ceneri volanti di carbone, calcare, ceneri di buccia di riso e ceneri vulcaniche. Questi studi hanno dimostrato che i PC composti contenenti tali

SCM possono aver ridotto significativamente le impronte delle emissioni di CO₂/eq. (tra -15 e -88%) rispetto al PC ordinario (Miller et al., 2018; Rahla et al., 2019; Arrigoni et al., 2020). Il principale effetto di riduzione delle emissioni di CO₂-eq. è dovuto alla riduzione del contenuto di clinker del PC, che riduce le emissioni di CO₂ sia dalla calcinazione che dal consumo di carburante. Diversi studi dimostrano che l'uso di combustibili alternativi nei forni a cemento abbia il potenziale per ridurre le emissioni di CO₂ dalla produzione di cemento del 20-30% (Georgiopoulou e Lyberatos, 2018; Dziok et al., 2021), fanghi di depurazione (Dziok et al., 2021), plastica e carta non riciclate (Bourtsalas et al., 2018) e gas naturale (Thwe et al., 2021). L'incorporazione di combustibili di scarto nel mix (ad esempio, pneumatici di scarto, rifiuti agricoli, rifiuti solidi e rifiuti di petrolio) utilizza energia altrimenti persa e riduce le emissioni di CO₂/eq. associate all'estrazione, al trasporto e alla combustione di combustibili fossili. La cattura e lo stoccaggio del carbonio (CCS) è una tecnologia versatile applicabile in vari settori (ferro e acciaio, cemento, petrolchimici, ecc.) (Kuramochi et al., 2012). CCS mira a catturare le emissioni di CO₂ basate sul processo prima o dopo la combustione del combustibile. Il looping del calcio è un tipo di tecnologia CCS in cui la CO₂ nel gas di combustione viene rimossa utilizzando un assorbente di ossido di calcio per formare un flusso di CO₂ concentrato ad alta purezza. (Collelli et al., 2022). Gli studi LCA che studiano le tecnologie CCS come l'ossi-combustibile e la post-combustione (cioè lo scrubbing dell'ammina) mostrano una vasta gamma di potenziali di riduzione delle emissioni di CO₂/eq. (15-78%) che sono influenzati da diversi parametri (Miller et al., 2018). Questi parametri includono l'efficienza di cattura, il tipo di tecnologia e la fonte di carburante (Chen e Yang, 2021; Wunderlich et al., 2021).

3.2.2 La produzione di CM negli Stati Uniti

Oggi, la produzione di cemento rappresenta circa l'8% (2,3 GtCO₂/anno) di tutte le emissioni globali di anidride carbonica. Di queste emissioni, quasi 67 MtCO₂/anno proviene dagli Stati Uniti (Pisciotta et al., 2023). Il settore del cemento statunitense si trova ad affrontare una sfida unica nelle operazioni di decarbonizzazione perché la CO₂ emessa ha origine dall'uso di combustibili fossili nella fase di calcinazione ad alta temperatura (40% di emissioni) e dalla chimica del calcare (CaCO₃) che si scompone in calce (CaO) e CO₂ (60% di emissioni). Gli Stati Uniti si sono impegnati a sviluppare un sistema di energia elettrica privo di emissioni di carbonio al 100% entro il 2035 e un'economia a zero emissioni nette entro il 2050 (Arent et al., 2022). Gli sviluppi tecnologici nell'ampia gamma di soluzioni energetiche a basse emissioni di carbonio stanno avanzando rapidamente, con innovazioni continue nella generazione di elettricità rinnovabile, processi industriali e tecnologie e servizi per il risparmio energetico, tra cui illuminazione a LED, riscaldamento a induzione, veicoli elettrici, soluzioni di stoccaggio dell'energia e mobilità come servizio, oltre a dispositivi intelligenti, controlli

ed edifici più efficienti e intelligenti. La combinazione di elettricità rinnovabile con percorsi biotici e abiotici per produrre sostanze chimiche, combustibili e materiali promette di fornire nuove soluzioni come dimostrato negli studi (Bataille et al., 2016; Davis et al., 2018; Jenkins, 2018). Le tecnologie a basse emissioni di carbonio attualmente disponibili, come l'energia solare ed eolica, sono pronte per un'implementazione economica su una scala senza precedenti. Questa trasformazione è in linea con le valutazioni tecniche ed economiche precedenti, che prevedono una rapida transizione del sistema energetico degli Stati Uniti combinata con una maggiore elettrificazione degli usi finali in tutto il mondo. Numerosi studi delineano una visione per la transizione da un sistema energetico centralizzato, basato sull'energia fossile e progettato per un flusso unidirezionale di energia con limitate comunicazioni con i clienti, a un sistema altamente decentralizzato. Questo sistema includerà la generazione distribuita di energia rinnovabile, risorse di stoccaggio e distribuzione, e operazioni dinamiche di domanda e offerta. Per decarbonizzare l'economia energetica statunitense, le soluzioni a basse emissioni di carbonio devono servire tutti i settori, compresi i trasporti, le costruzioni, l'industria e l'agricoltura. La continua dipendenza dalle risorse di combustibili fossili, che includono 250 miliardi di tonnellate corte di carbone recuperabile, 44 miliardi di barili di petrolio accertato e 495 trilioni di piedi cubi (TCF) di gas naturale, richiede una rapida adozione di tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio su larga scala, con risultati contrastanti. Le risorse energetiche rinnovabili negli Stati Uniti hanno il potenziale per generare 212.000 GW di energia da sistemi solari, eolici, geotermici, idroelettrici e marini, un aumento di molti ordini di grandezza rispetto ai 1.120 GW di capacità di generazione attualmente in uso. Questo sarebbe più che sufficiente per soddisfare le esigenze future senza dipendere dai combustibili fossili. L'uso continuo dell'energia idroelettrica sarà importante, a condizione che ci siano sufficienti livelli d'acqua disponibili, data la crescente siccità in diverse aree del paese. L'elettrificazione è fondamentale per la strategia di decarbonizzazione, con un costo previsto di trilioni di dollari all'anno nei prossimi anni. Il futuro sistema di generazione di energia sarà probabilmente dominato da un portafoglio di tecnologie di generazione rinnovabile e nucleare. Poiché i settori industriale e dei trasporti saranno difficili da elettrificare completamente, il sistema energetico probabilmente includerà un'infrastruttura per l'idrogeno, insieme a capacità di cattura, stoccaggio e utilizzo del carbonio. Inoltre, strategie di sintesi biotiche e abiotiche permetteranno la produzione di sostanze chimiche, carburanti elettronici e materiali sfruttando l'energia delle fonti rinnovabili. Il futuro sistema energetico deve anche essere resiliente e sicuro, sia tecnologicamente che fisicamente. Data la sua intrinseca complessità, basata su grandi quantità di raccolta e valutazione di dati in tempo reale, questo sistema non potrà essere gestito interamente da esseri umani. Sarà controllato autonomamente, utilizzando tecnologie come l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico, algoritmi basati su agenti e teoria del controllo.

3.2.3 La produzione di CM in Asia

Spinta dal rapido sviluppo economico e dall'urbanizzazione, la produzione di cemento in Asia ha registrato una tendenza crescente negli ultimi tre decenni e ha contribuito a oltre la metà della produzione totale mondiale di cemento dal 2009. Dal 1990 al 2020, dopo una crescita continua per oltre 20 anni, la produzione di cemento ha raggiunto per la prima volta il picco nel 2014 (2,49 miliardi di tonnellate) (NBS China Database), con un picco simultaneo di produzione di clinker (1,42 miliardi di tonnellate) (J. Liu et al., 2021). Da allora, i livelli di produzione di cemento e clinker hanno registrato tendenze divergenti, che sono state causate dall'aumento del rapporto clinker/cemento a causa del divieto del cemento Portland grade 32.5 (PC 32.5) (Wu et al., 2022). L'industria del cemento è un importante settore fondamentale che sostiene lo sviluppo economico di tutta l'Asia ed è anche una tipica fonte di emissione di CO₂ e inquinanti atmosferici. Dal 1990 al 2020, le emissioni di CO₂ provenienti dall'industria del cemento hanno generalmente registrato una tendenza al rialzo, e soprattutto dal 2018 al 2020, la crescita si è verificata significativamente più veloce di quella durante il periodo precedente guidato dalla crescita della produzione di clinker, che pone una sfida per la mitigazione futura. Al contrario, le emissioni di inquinanti atmosferici, tra cui SO₂, NO_x e PM_{2.5}, sono state controllate in modo più efficace e fundamentalmente disaccoppiate dalla produzione di cemento (Wang et al., 2023). Il miglioramento dell'efficienza energetica è importante sia a breve che a lungo termine. Per quanto riguarda le fonti energetiche alternative, i combustibili di scarto e la biomassa sono attualmente tecnologicamente fattibili. L'uso di materiali alternativi può ridurre le emissioni di carbonio diminuendo l'uso di clinker e calcare. Il Carbon Capture Use and Storage (CCUS) è una tecnologia imperativa e di supporto per la decarbonizzazione profonda a lungo termine. Lo sviluppo di nuovo cemento è una misura potenziale per raggiungere la riduzione del carbonio, ma richiede ancora ulteriori ricerche. A breve termine, la riduzione delle emissioni dipenderà dal miglioramento dell'efficienza energetica, dalle fonti energetiche alternative (CSS) e dai materiali alternativi, che rappresentano rispettivamente il 36 %, il 21 % e il 43 % della riduzione del carbonio nel 2030 (Wang et al., 2023). Altri processi e misure potrebbero ridurre ulteriormente le emissioni di carbonio dal punto di vista del ciclo di vita del cemento. Migliorare la qualità e la durata degli edifici e delle infrastrutture è utile per ridurre le emissioni di CO₂ alla fonte.

3.2.4 Il ciclo di vita del cemento

Il cemento è il principale precursore della malta e del calcestruzzo, essendo quest'ultimo il materiale sintetico più utilizzato sulla Terra (IEA, 2018). Reagisce con un attivatore (ad esempio, acqua) per formare la matrice relativamente forte e durevole, nota come “legante”, che incolla insieme le

particelle aggregate (sabbia, ghiaia) in questi materiali. La produzione annuale globale di cemento è quasi triplicata dal 1994 al 2014 (USGS, 1996, 2015), e si prevede che aumenterà ancora del 12-23% entro il 2050. Si prevede che questo aumento della produzione provenga principalmente dai PVS (Paesi in Via di Sviluppo). Tuttavia, il calcestruzzo rimarrà un materiale da costruzione chiave nei PS (Paesi Sviluppati) grazie al suo costo di produzione relativamente basso e all'abbondanza di materie prime. Il cemento facilita inoltre la decarbonizzazione di altre industrie e settori di utilizzo finale attraverso l'uso del calcestruzzo nelle costruzioni, ad esempio nelle turbine eoliche, nelle dighe e negli edifici a basso consumo energetico operativo. Si prevede che la produzione europea di cemento aumenterà approssimativamente del 10% entro il 2050 (Material Economics, 2019).

Il calcestruzzo a base di Cemento Portland (PC) ha una bassa intensità di emissioni incorporate in massa (kg/CO₂/eq. di calcestruzzo) rispetto ad altri materiali da costruzione come l'acciaio (Kua & Maghimai, 2017; Purnell, 2012). Tuttavia, tali prodotti CM sono utilizzati su scala così massiccia da rappresentare circa l'8% delle emissioni di origine antropica totali e circa il 23% delle emissioni industriali a livello globale (Favier et al., 2019; Miller et al., 2016). La produzione di clinker PC rappresenta la maggior parte delle emissioni contenute nel calcestruzzo PC. È uno dei processi industriali più difficili da decarbonizzare, poiché le “emissioni di processo” fondamentali rappresentano circa il 50% delle emissioni di produzione dei PC (Davis et al., 2018; Teh, Wiedmann, Castel e de Burgh, 2017).

Il ciclo dei materiali cementizi (CM) è costituito dai seguenti processi principali: estrazione di materie prime; produzione di cemento e aggregati; produzione di calcestruzzo e malta; uso; e fine vita. Calcare, argilla e scisto sono le tre principali materie prime utilizzate nella produzione di clinker per PC. Acqua e roccia frantumata, sabbia e ghiaia, utilizzati come aggregati, sono le principali materie prime utilizzate nella produzione di calcestruzzo PC. Circa il 6% delle emissioni del ciclo dei CM derivano dall'estrazione. La produzione di PC prevede la frantumazione e la macinazione, la piro-lavorazione, la macinazione e la miscelazione. Durante la frantumazione e la macinazione, le materie prime vengono macinate e miscelate in proporzioni variabili, tipicamente >80% in massa di calcare e <20% in massa di scisto e/o argilla. La miscela macinata viene riscaldata, o “piroprocessata”, in una serie di scambiatori di calore (“preriscaldatori”) e un forno rotante. Tra i 600 e gli 800°C, il carbonato di calcio nel calcare si decompone in ossido di calcio (calcinazione), emettendo CO₂ (emissioni di processo). A circa 1.450°C si forma il clinker PC. Il PC viene prodotto macinando e miscelando il clinker di PC con altri materiali reattivi, che ne modificano le proprietà cementizie. Definiamo questi materiali reattivi come materiali cementizi non Portland (NPCM). In questa fase vengono quasi sempre utilizzati due NPCM: il calcare e una fonte di solfato di calcio, ad esempio il gesso. Il luogo

in cui verranno miscelati gli ingredienti dipende in modo significativo dai costi (costi di trasporto). Per un tipico PC miscelato con un rapporto clinker/cemento di 0,75, la produzione rappresenta circa il 57% delle emissioni del ciclo di CM (Teh et al., 2017), che provengono da tre fonti principali: emissioni di processo, emissioni del ciclo, emissioni di carburante e altre emissioni (Salas et al., 2016; Shanks et al., 2019).

Il Batching si riferisce alla miscelazione di CM (ad esempio, clinker di PC, NPCM), aggregati e un attivatore (ad esempio, acqua nei prodotti di PC). Gli NPCM comuni includono scorie di altoforno, ceneri volanti di carbone, calcare e gesso. La malta utilizza aggregati fini (ad esempio sabbia), mentre il calcestruzzo utilizza aggregati fini e grossolani (ad esempio roccia, ghiaia). Gli attivatori liquidi sono tipicamente una soluzione acquosa aggiunta in fase di dosaggio e la loro aggiunta, simile all'acqua, produce un prodotto di dosaggio “umido”. Una volta che i CM vengono miscelati con un attivatore, la miscela reagisce per formare un “legante”, che alla fine si solidifica, legando insieme gli aggregati. La polimerizzazione si riferisce al processo mediante il quale questa reazione viene controllata (utilizzando temperatura e umidità), per fornire un buon sviluppo delle proprietà del materiale. Esistono cinque tipi principali di PC (misti) specificati in Europa nella norma ISO EN 197-1 (BSI, 2011): CEM I–V. I loro costituenti sono quantificati in percentuale in massa escluse le aggiunte di solfato di calcio (tipicamente gesso). CEM I (PC ordinario, OPC) contiene la percentuale più alta (95-100% in massa) di clinker PC. Il restante 0–5% in massa (“componenti aggiuntivi minori” nella norma ISO EN 197-1) è tipicamente calcare. I CEM II–V sono comunemente indicati come PC miscelati o cementi “compositi”: hanno contenuti di clinker PC che vanno dal 5 al 94% in massa (BSI, 2011). In media, il clinker PC costituisce circa il 75% in massa del cemento europeo (WBCSD, 2016). In questa sede utilizziamo il termine PC per riferirci sia al “PC ordinario” che, per semplicità, al “PC miscelato”, cioè alle miscele di PC clinker e NPCM, che comprende quindi sostanzialmente tutti i cementi oggi utilizzati (in termini di quantità usato). Le emissioni del settore manifatturiero comprendono circa il 23% delle emissioni del ciclo CM (Teh et al., 2017). Contributi notevoli a questo totale provengono dall’uso di elettricità (5% delle emissioni del ciclo CM) e dal trasporto stradale (2% delle emissioni del ciclo CM).

Il PC è utilizzato prevalentemente negli edifici (83% in massa compresi impianti e strutture industriali) e nelle infrastrutture (13% in massa) (Shanks et al., 2019). Negli edifici, il PC viene utilizzato nei telai strutturali (22% in massa della domanda di PC), comprese colonne, pavimenti, pareti e travi; nelle fondazioni (5% in massa della domanda di PC); e nell’industria (7,5% in massa della domanda di PC) (Shanks et al., 2019). Nelle infrastrutture, gli usi dei PC includono tunnel,

condutture, marciapiedi e trasporti (7,5% in massa della domanda di PC), ad esempio ferrovie e ponti. Le riparazioni e la manutenzione di tali prodotti rappresentano il 14% in massa della domanda di PC (Shanks et al., 2019). Il calcestruzzo può essere rinforzato (contenente barre di acciaio per migliorare la resistenza alla trazione) e non rinforzato, a seconda dell'uso finale. Gli edifici, le infrastrutture e gli impianti spesso giungono al termine del loro ciclo di vita prima che la malta e il calcestruzzo utilizzati in essi si degradino. Dopo il loro utilizzo, vengono demoliti o decostruiti in frammenti di malta e cemento di varia dimensione, che vengono poi raccolti presso impianti di cernita. Questi materiali sono classificati come aggregati secondari grossolani e fini, che possono essere: lavorati e riciclati nel ciclo dei CM o in altri cicli di materiali (ad esempio, asfalto); downcycled (ad esempio, utilizzo “sciolto” di aggregato secondario con qualità inferiori rispetto all'aggregato vergine come sottofondo stradale); o smaltiti in discarica.

3.3 Metodologia e stima degli indicatori di innovazione sostenibile del cemento

Sulla base dello schema presentato in Figura 10 sono stati selezionati 9 indicatori per ciascun contesto, Europa, Stati Uniti e Asia, per definire il livello di sviluppo sostenibile ed il potenziale tecnologico che questi contesti possono e potranno offrire rispetto la produzione di CM in locale.

Global Innovation Index (GII)

Il Global Innovation Index (GII) è un rapporto annuale che classifica i paesi e le economie del mondo in base alla loro capacità di innovare e al loro successo nell'innovazione. È prodotto congiuntamente dall'Organizzazione Mondiale della Proprietà Intellettuale (WIPO), dall'INSEAD e dalla Cornell University. È espresso in base 100 e valuta l'innovazione nelle economie mondiali utilizzando vari indicatori, tra cui la ricerca e lo sviluppo (R&D), la produzione scientifica, la creazione di brevetti, l'istruzione superiore, l'infrastruttura, il mercato e la sofisticazione aziendale. Viene preso in considerazione anche il contesto normativo e imprenditoriale, inclusi aspetti legali e politici, per offrire un quadro completo delle condizioni di innovazione di un paese. Il GIi esprime una valutazione globale dell'innovazione di un paese rispetto a altri paesi, aiutando i governi, le imprese e gli investitori a comprendere meglio le forze e le debolezze delle diverse economie e a sviluppare strategie per migliorare le loro capacità innovative (Bate et al., 2023; Dutta et al 2023; Oturakci 2023).

Energy Transition Index (ETI)

L'Energy Transition Index (ETI) è un indice che misura la capacità di un paese di rendere sostenibile il proprio sistema energetico. Questo indice valuta le prestazioni energetiche di un paese in termini di sviluppo economico, sostenibilità ambientale e sicurezza energetica. L'Energy Transition Index (ETI) è calcolato dal World Economic Forum (WEF), un'organizzazione internazionale che si occupa di questioni economiche, sociali e ambientali a livello globale. Il WEF pubblica regolarmente rapporti

che includono l'ETI, fornendo una panoramica delle prestazioni dei paesi in termini di transizione energetica. L'ETI è composto da una serie di indicatori che prendono in considerazione vari aspetti chiave del sistema energetico, come: l'accesso all'energia, l'efficienza energetica, la diversificazione delle fonti energetiche, la riduzione delle emissioni di gas serra e l'innovazione tecnologica. L'ETI viene utilizzato in letteratura al fine di valutare i progressi dei paesi nel passaggio a sistemi energetici più sostenibili (Waleed et al., 2023), confrontare le prestazioni di diversi paesi in materia di transizione energetica (Razzaq et al., 2023), individuare le aree in cui i paesi possono migliorare le proprie politiche energetiche (Sinha et al., 2023).

Sustainable Development Goals Index (SDGI)

L'indice degli obiettivi di sviluppo sostenibile ossia Sustainable Development Goals Index (SDGI), è uno strumento che misura e valuta i progressi dei paesi verso il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs) delle Nazioni Unite. Questi obiettivi sono stati stabiliti nel 2015 come parte dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile e includono 17 obiettivi chiave che coprono vari aspetti dello sviluppo, tra cui la povertà, la salute, l'istruzione, l'uguaglianza di genere, il cambiamento climatico e le fonti energetiche. L'SDG Index tiene traccia delle performance dei paesi rispetto ai 17 obiettivi, assegnando punteggi basati su vari indicatori che misurano il progresso verso ogni obiettivo. Questi punteggi vengono quindi aggregati per fornire un punteggio complessivo che rappresenta il grado di progresso di un paese verso il raggiungimento degli SDGs. Diversi studi come Diaz-Sarachaga et al., (2018), Schmidt-Traub, et al., (2017), Halisçelik & Soytaş, (2019), hanno evidenziato l'importanza di questo indicatore come espressione del livello di sviluppo sostenibile di un paese.

Indicatori OCSE

L'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico in italiano (OCSE) ogni anno pubblica un report all'interno del quale per ciascun paese o contesto viene riportato uno score che rappresenta il livello di sviluppo e avanzamento del paese. Nello specifico dalla banca dati OCSE (Gavurova et al., 2021) sono stati identificati i seguenti indicatori sullo sviluppo della filiera del cemento nei contesti oggetto d'analisi. Il Green Research and Development Indicator (GR&D) è una metrica utilizzata per misurare e valutare l'investimento e l'impatto delle attività di ricerca e sviluppo (R&D) nel contesto della sostenibilità ambientale. Questo indicatore si concentra sull'impegno delle aziende o organizzazioni nel portare avanti progetti di ricerca e innovazione che mirano a ridurre l'impatto ambientale, promuovere l'efficienza energetica e ridurre le emissioni di carbonio. Il Global Carbon Budget CM (GCB) il quale fornisce informazioni circa la gestione sostenibile del ciclo di vita

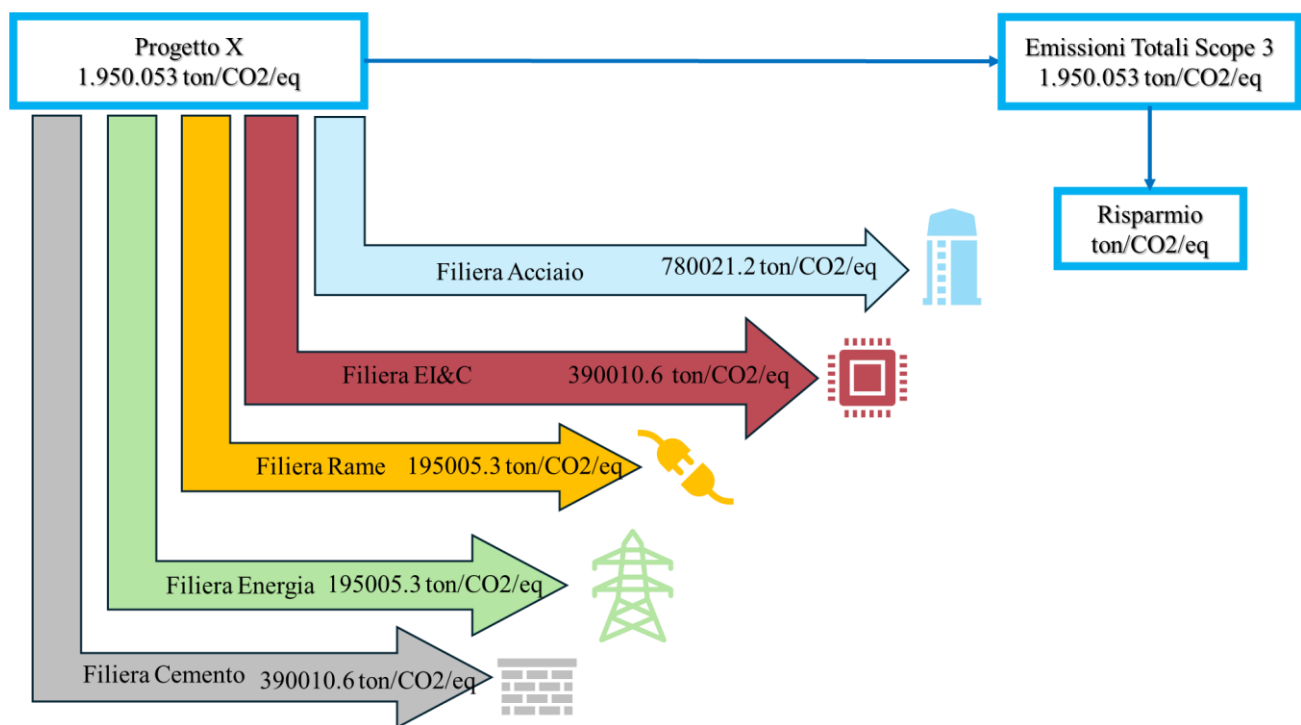
del carbonio nella produzione di CM. GCB esprime in rapporto al tetto massimo di emissioni gli eccessi di CO₂ prodotti dalle singole produzioni. L'indice di energia rinnovabile presente in rete sulla totalità prodotta (RWE) come proxy per la disponibilità di energia sostenibile, al fine di comprendere che se produco CM in quel paese, potrò utilizzare energia proveniente da fonti rinnovabili e, di conseguenza, ridurre le emissioni scope 3. L'indice di capacità di cattura operativa e pianificata del carbonio (STOR) nella filiera del cemento si riferisce alla capacità di cattura del carbonio già in uso presso impianti di produzione di cemento. Questo può includere tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio (BCCS) che catturano la CO₂ emessa durante la combustione del combustibile e il processo di produzione del clinker. La CO₂ catturata può essere stoccata in modo sicuro sottoterra o riutilizzata in altri processi industriali (Hong et al., 2022; Liu & Rui 2022). Infine, l'indice di utilizzo di combustibili solidi secondari e biomasse (BCSS) rappresenta una valida alternativa per sostituire i combustibili fossili convenzionali, come il carbone e il petcoke (Favieretal et al., 2018; Rahman et al., 2015).

Indicatori IEA per Elettificazione e Veicoli

Uno degli ultimi rapport dell'International Energy Agency IEA (2024) presenta il volume di veicoli elettrici venduti (auto, furgoni, camion, escavatrici, ecc.) e quindi rappresenta per le produzioni locali una probabilità maggiore di vedere in uso macchinari a basso impatto ambientale. IEA fornisce un punteggio per paese e settori produttivi che per l'analisi oggetto di studio sarà fondamentale correlare con l'indicatore RWE in quanto, se i veicoli elettrici vengono alimentati con energia proveniente da combustibili fossili, il risultato sarà un aumento delle emissioni scope 3, vanificando i benefici ambientali associati all'uso di veicoli elettrici (Requia et al., 2018; Wu & Zhang, 2017).

Al fine di identificare la composizione degli attori che contribuiscono attivamente alla fornitura delle materie prime che sono alla base della costruzione di progetto X in figura 11 viene proposto il seguente diagramma di flusso.

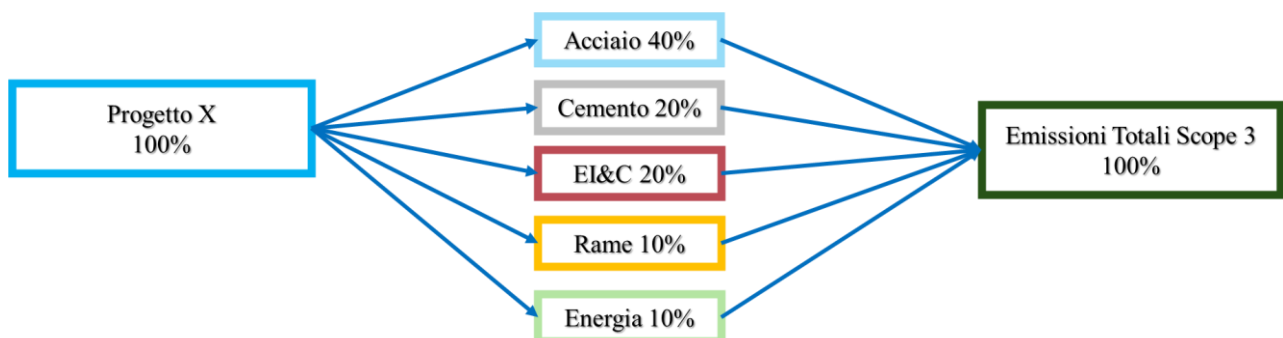
Figura 11. Mappatura fornitori.



Fonte: Colloquio con Gruppo Maire.

In figura 11 vengono mostrate le diverse filiere coinvolte nei processi di costruzione, il peso attribuito in percentuale è proporzionale al contributo che quella specifica filiera apporta al processo di costruzione in termini di composizione di materie prime. L'impianto generico X è costituito in ordine di grandezza dal 40% di acciaio, 20% di cemento, 20% di rame, 10% di componenti ICT e 10% di materiale energetico. Sulla base dei pesi delle materie prime vengono calcolati i pesi di quest'ultime in relazione alle emissioni Scope 3 (figura 12). Date le ipotesi di ricerca si assume che la produzione delle filiere illustrate in figura 11 viene fatta per intero nel contesto oggetto studio (Europa, Stati Uniti e Asia). Per questo motivo non viene considerata nella ripartizione delle emissioni scope 3 la logistica ossia tutte quelle attività connesse al trasporto delle materie prime e componentistica tra paesi dissimili.

Figura 12. Pesi delle commodities sulle emissioni totali Scope 3.



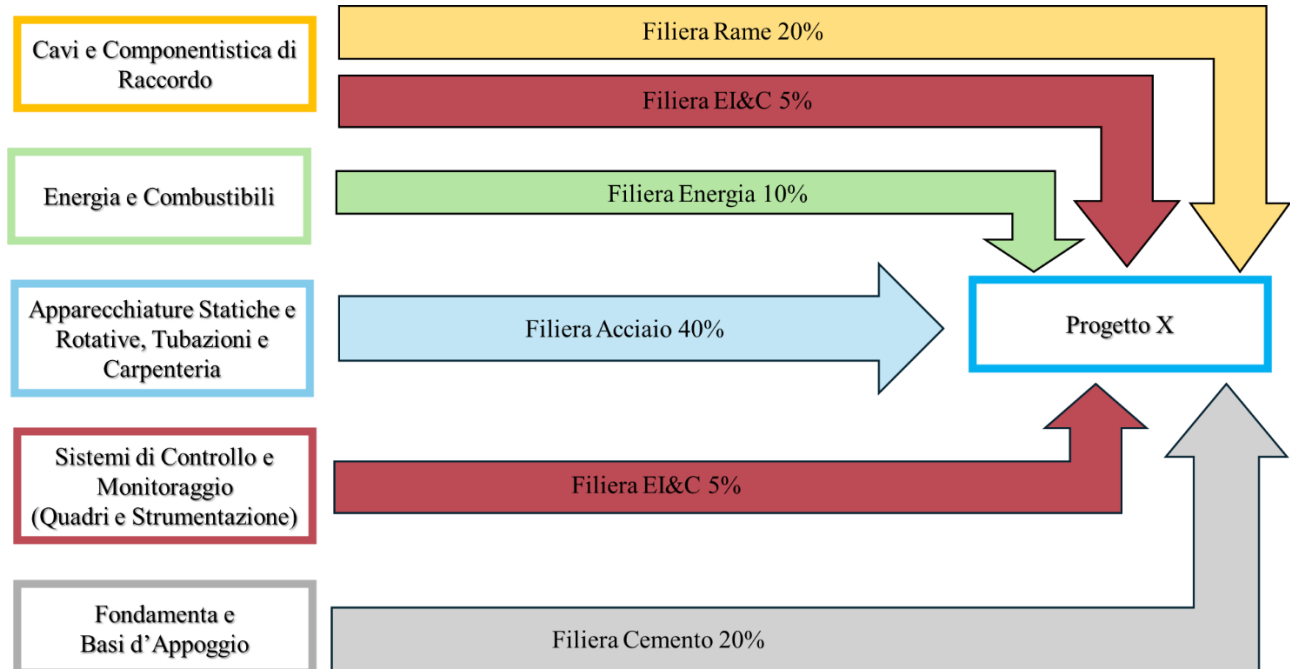
Fonte: Colloquio con Gruppo Maire.

Pertanto, è verificata l'ipotesi *H1*. la filiera del cemento è direttamente correlata alla costituzione di Progetto X e rappresenta il 20% delle emissioni scope 3 totali. Per semplificare l'analisi degli impatti delle materie prime si ipotizza che Progetto X rappresenti la totalità degli impianti dell'impresa X e che le emissioni Scope 3 totali siano imputabili per la totalità alla costruzione dell'progetto X. I dati relativi alle emissioni scope 3 totali sono stati individuati all'interno del bilancio di sostenibilità dell'impresa X e si riferiscono al 2023. Pertanto, lasciando invariate le emissioni Scope 1 e Scope 2 dell'progetto X l'equazione a cui faremo riferimento qui seguito è:

$$(eq\ 1.) Emissioni\ Totali\ Scope\ 3\ impresa\ X = Emissioni\ Scope\ 3\ Impianto\ X$$

Viene quindi presentato lo scenario t-0 ossia l'analisi degli impatti delle emissioni scope 3 calcolati sulla base delle ipotesi dell'equazione 1. Nello scenario t-0 viene ipotizzato che non vi sia nessun cambiamento dalle condizioni delle filiere ma esclusivamente lo scopo è quello di rappresentare lo stato dell'arte dell'impatto della filiera del cemento rispetto quello delle filiere delle altre materie prime che compongono progetto X. In figura 4 viene mostrato il diagramma di flusso t-0.

Figura 13. Mappatura suppliers t-0.

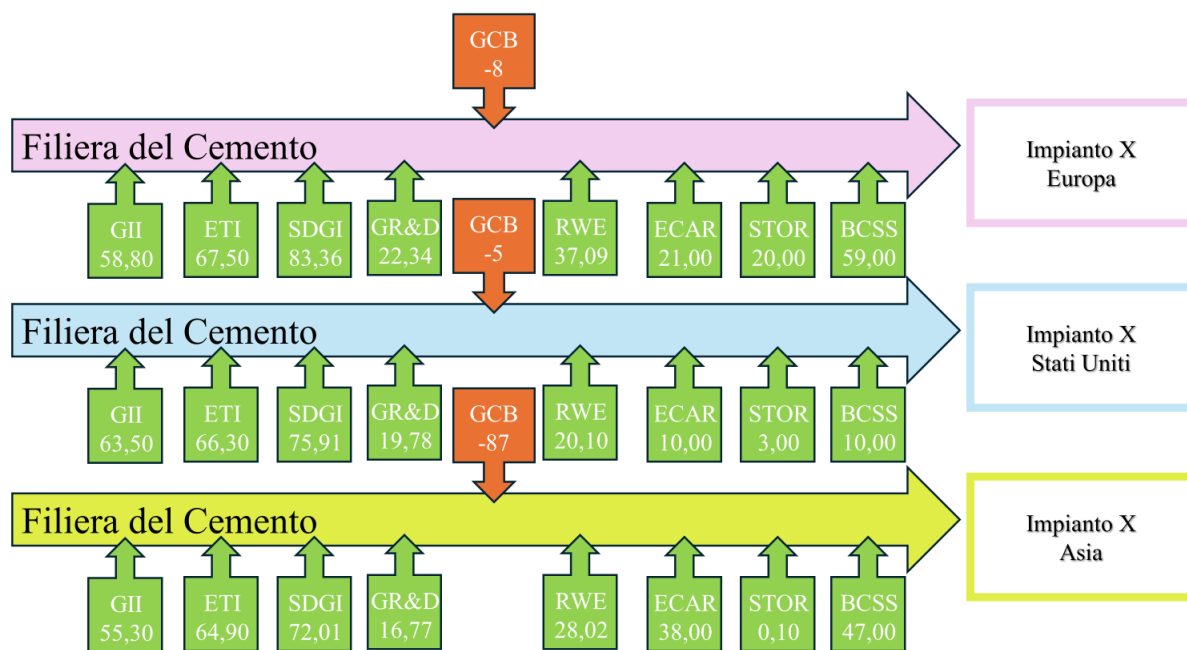


Fonte: *Elaborazione degli autori.*

In Figura 13 possiamo osservare come il cemento per progetto X rappresenta circa 195.005,3 ton/CO2/eq. all'anno ossia il 20% delle emissioni scope 3 del Protocollo GHG. Sulla base di un'attenta analisi della letteratura attuale abbiamo elaborato Figura 5 la quale riassume per ciascuno dei 3 contesti di riferimento, Europa, Stati Uniti e Asia, le performance delle filiere del cemento in

termini di sostenibilità ambientale e potenziale innovativo come descritto nel paragrafo 3. Si tratta quindi di identificare un vettore proiezione dei fenomeni descritti in precedenza (paragrafo 3), per ciascuno dei 3 contesti, al fine di moltiplicarlo per le emissioni scope 3 di Azienda X per la costruzione di Progetto X.

Figura 14. Performance della filiera del cemento in Europa, Stati Uniti e Asia.



Fonte: *Elaborazione degli autori.*

In figura 14 possiamo vedere rappresentati i 9 indicatori di performance ambientale per i quali sono stati identificati 2 tipi: globali e specifici. Gli indicatori di carattere globale esprimono il grado di avanzamento e innovazione sostenibile che ciascuno dei 3 contesti possiede mentre gli indicatori specifici sono correlati direttamente alla filiera del cemento di Europa, Stati Uniti e Asia. In figura 14 l'indicatore GCB a differenza degli altri (evidenziati in verde) è preceduto dal segno negativo poiché rappresentando lo sfioramento del budget di CO₂ per la produzione di CM viene considerato all'interno del vettore proiezione come elemento di inefficienza in quel contesto.

Dopo aver selezionato i 9 indicatori attraverso l'analisi PCA viene ottenuto per Europa, Stati Uniti e Asia un vettore proiezione rappresentante tutto il possibile potenziale innovativo tale da fornire una stima di differenti scenari nei quali la costruzione di progetto X risulta essere più sostenibile dal punto di vista delle emissioni indirette scope 3. I vettori ottenuti, come mostrati in tabella 7, sono per Europa 40.12, Stati Uniti 29.29 e Asia 26.12. Sulla base dei vettori appena identificati e dei pesi assegnati in precedenza (figura 11) vengono ottenuti i risultati mostrati in tabella 1.

Tabella 7. Risultati del potenziale innovativo nei paesi Europa, Stati Uniti e Asia.

EUROPA				
Vettore Proiezione: 40.12				
Scenario	Dati	ton/CO2/eq	Pesi	%
t-EU	Progetto X	1793576	1	100%
t-EU	Emissioni Totali Scope 3	1793576	1	100%
t-EU	Filiera Acciaio	780021	0.4	40%
t-EU	Filiera EI&C	390011	0.2	20%
t-EU	Filiera Rame	195005	0.1	10%
t-EU	Filiera Energia	195005	0.1	10%
t-EU	Filiera Cemento	233534.1	0.130	13%
t-EU	Saved CO2	156477	0.087	8.7%
STATI UNITI				
Vettore Proiezione: 29.29				
Scenario	Dati	ton/CO2/eq	Pesi	%
t-USA	Progetto X	1835828	1	100%
t-USA	Emissioni Totali Scope 3	1835828	1	100%
t-USA	Filiera Acciaio	780021	0.4	40%
t-USA	Filiera EI&C	390011	0.2	20%
t-USA	Filiera Rame	195005	0.1	10%
t-USA	Filiera Energia	195005	0.1	10%
t-USA	Filiera Cemento	275785	0.150	15%
t-USA	Saved CO2	114225	0.062	6.2%
ASIA				
Vettore Proiezione: 26.12				
Scenario	Dati	ton/CO2/eq	Pesi	%
t-ASIA	Progetto X	1848174	1	100%
t-ASIA	Emissioni Totali Scope 3	1848174	1	100%
t-ASIA	Filiera Acciaio	780021	0.4	40%
t-ASIA	Filiera EI&C	390011	0.2	20%
t-ASIA	Filiera Rame	195005	0.1	10%
t-ASIA	Filiera Energia	195005	0.1	10%
t-ASIA	Filiera Cemento	288131	0.156	16%
t-ASIA	Saved CO2	101879	0.055	5.5%

I risultati di tabella 1 sono calcolati mantenendo ferma l'ipotesi per la quale le emissioni scope 3 delle altre filiere che contribuiscono alla costruzione di progetto X non subiscono modificazioni, pertanto, i pesi (%) rimangono le medesime sia in t-0 (figura 14) sia in t-EU, t-USA e t-ASIA (tabella 7). Per questo motivo in tabella 1 per ciascun contesto a variare a seguito dell'applicazione del vettore proiezioni sono esclusivamente le emissioni scope 3 imputabili alla filiera del cemento. In tabella 7 la voce "Saved CO2" indica la quantità di CO2 che Impresa X potrebbe risparmiare se costruisse Progetto X in quel contesto specifico. Viene quindi validata ipotesi H2. per la quale i contesti di riferimento dimostrano un differente approccio all'innovazione tale che i vettori che esprimono le performance di sostenibilità sono dissimili. Il contesto che permetterebbe un risparmio di emissioni scope 3 maggiore è l'Europa -8,7% (156.477 ton/CO2/eq) seguito dagli Stati Uniti -6,2% (114.225 ton/CO2/eq) ed infine l'Asia -5,5% (101879 ton/CO2/eq). Anche ipotesi H3. risulta verificata.

3.4 Decarbonizzazione delle materie prime cementizie nei diversi Paesi

Le industrie del cemento dei 3 macro-contesti analizzati hanno compiuto progressi significativi nella riduzione dell'intensità delle emissioni scope 3 attraverso una migliore efficienza energetica, un migliorato livello di avanzamento tecnologico, un aumento dell'uso di combustibili solidi alternativi ed una migliore gestione dei processi produttivi grazie allo stoccaggio della CO2. Tuttavia, il raggiungimento della decarbonizzazione dello scope 3 richiede sviluppi tecnologici significativi e cambiamenti dirompenti dell'attuale ciclo dei CM, compresi cambiamenti tecnici e non tecnici. Risulta quindi fondamentale per le aziende selezionare il contesto nel quale la produzione di materie prime e processi produttivi avvengono in quanto le emissioni non direttamente controllabili sono correlate proporzionalmente al livello di avanzamento di quel posto. Dopo aver esaminato la letteratura relativa al cemento e alla decarbonizzazione per combinare varie misure proposte di energia, emissioni ed efficienza dei materiali in un'unica visualizzazione (Figura 14) si presentano degli indicatori di sintesi per Europa, Stati Uniti e Asia. Per migliorare il processo di comparazione delle produzioni e quindi evidenziare quale di queste aree possa offrire il miglior potenziale innovativo gli indicatori in Figura 5 vengono sintetizzati attraverso un vettore proiezione. Ci si aspetta che ciò faciliti l'individuazione delle lacune nella politica di decarbonizzazione industriale e del cemento e quindi lo sviluppo di migliori misure politiche di incentivo da parte dell'azienda centra da e verso i propri fornitori. Lo sviluppo e l'adozione di standard basati sulle prestazioni delle filiere sulla base del Paese di provenienza, che consentono la libera scelta del materiale purché siano soddisfatti gli indicatori di prestazione richiesti per il componente o il prodotto in cui è incorporato, è un'altra misura politica che può influenzare in modo significativo varie attività lungo il ciclo dei CM e ridurre le sue emissioni complessive. Tabella 1 contribuisce alle stime quantitative delle

emissioni potenzialmente risparmiate se la filiera del cemento in quel Paese adottasse al massimo tutte le tecnologie offerte. Dei 3 contesti analizzati l'Europa risulta essere particolarmente affine con le tecnologie dell'innovazione e della transizione energetica, pertanto, rappresenta il contesto con il massimo valore di decarbonizzazione dello scope 3 in linea con gli studi (Bauer et al., 2021; Haas & Sander, 2020; Kakoulaki et al., 2021; Wolf et al., 2021). L'Europa si distingue grazie all'uso efficiente ed efficace dei CSS alternativi e del recupero e stoccaggio della CO₂ prodotta durante il ciclo di vita dei CM (STOR 20 e BCSS 59). Inoltre, presenta una quantità elevata di energia rinnovabile erogata in rete tale da rendere efficace l'effetto dell'utilizzo di auto elettriche (RWE 37,9 e ECAR 21). Al contrario Stati Uniti e Asia presentano performance simili in termini di innovazione tecnologica e transizione energetica espressi con indicatori globali come GII, ETI e SDGI mentre per quelli specifici vi sono notevoli differenze. L'Asia in particolare riduce la sua competitività significativamente per l'elevato livello di sforamento del tetto di emissioni massime assegnate alla produzione di CM. Seppur tale sforamento è stato concesso per via del principio della responsabilità comune ma differenziata (Conferenza delle Nazioni Unite Rio 1992) rimane fermo che gli sforzi in termini di transizione energetica del sistema e il ricorso alle tecnologie di ultima generazione non sono sufficienti per colmare la grande quantità di emissioni in eccesso per l'intero sistema produttivo di CM in Asia. Questo fenomeno è legato, come mostrato da Le Guenedal et al., 2020, alla grande quantità di PMI presenti nei Paesi Asiatici ed al livello di specializzazione che questi offrono a livello aggregato: c'è potenziale tecnologico ma non tutti riescono a sfruttarlo in maniera omogenea. In Europa, al contrario anche per via dell'elevato livello di compliance, le attività economiche tutte risultano presentare quantomeno livelli minimi di efficacia e efficienza energetica contribuendo in maniera positiva alle performance globali di tutto il sistema produttivo. Gli Stati Uniti si posizionano a metà tra i risultati Europei e quelli Asiatici. A differenza di quest'ultimi l'utilizzo di CSS e alternativi rappresenta per gli USA un limite fondamentale. L'indice BCSS degli Stati Uniti è pari a 10 mentre in Europa 59 e in Asia 47. Questo dato determina una riduzione delle performance totali degli USA in quanto l'utilizzo di CSS come fonte energetica alternativa per la produzione dei CM è fondamentale per l'abbattimento di circa il 60% delle emissioni di CO₂ sulla produzione totale. Pamenter & Myers (2021) dimostrano come in UK l'utilizzo di CSS e altri combustibili alternativi permetterebbe di abbattere più del 40% delle emissioni totali dei processi di produzione dei CM. Il contesto americano, inoltre presenta bassi livelli di energia rinnovabile presente in rete (RWE 20,10) e di utilizzo di mezzi e auto elettriche (ECAR 10) se confrontato con l'Asia (RWE 28,02 e ECAR 38) e con l'Europa. Questo è importante in quanto gli indicatori RWE e ECAR sono correlati positivamente e producono un effetto positivo solo se agiscono congiuntamente: l'utilizzo di mezzi e macchinari elettrici che utilizzano energia prodotta da combustibili fossili impattano al pari livello di

quelli con motore termico (Burchart-Korol et al., 2020; Filote et al., 2020; Shu et al., 2021). Sarebbe interessante approfondire il confronto sui singoli Paesi e non i contesti aggregati, a tal proposito ci si aspetta un elevato livello di eterogeneità almeno per i Paesi Europei ma anche per quelli Asiatici come Cina, India e Giappone. Per questo motivo i contesti Asia e Europa analizzati nel presente studio vengono considerati come aggregato e le performance totali sono influenzate dai singoli Paesi. Si potrebbe rilevare un effetto trainante per l'Europa dovuto agli elevati risultati del Nord EU rispetto quelli del Sud e allo stesso modo per Cina, India, Giappone e Corea. Il modello presentato in questo studio può essere quindi replicato ed utilizzato anche per realtà più limitate come uno Stato o una Regione. L'innovatività della ricerca risiede nella possibilità di analizzare tutte quelle variabili che per le emissioni scope 1 e 2 sono in capo alle dirette azioni di un'azienda mentre per le scope 3 rimangono latenti rispetto all'ambiente e quindi di difficile controllo e stima.

CAPITOLO 4: Un modello predittivo per la proiezione delle emissioni e l'innovazione in differenti contesti internazionali

Sulla base dei risultati emersi nel Capitolo 3, incentrati sulla decarbonizzazione delle filiere di approvvigionamento nel settore cementizio, il presente capitolo estende la medesima metodologia analitica ad altre quattro filiere strategiche: acciaio, rame, energia ed EI&C (Electrical, Instrumentation & Control). L'obiettivo principale è la costruzione di un indicatore sintetico capace di esprimere il potenziale innovativo e sostenibile di ciascuna filiera su due livelli di analisi: Paese e catena di fornitura. Rispetto al modello applicato nel capitolo precedente, l'analisi geografica viene ampliata e approfondita attraverso lo studio dei singoli Paesi di origine delle materie prime. In collaborazione con il Gruppo Maire, sono stati identificati cinque contesti nazionali di interesse strategico: Emirati Arabi Uniti, Arabia Saudita, Italia, India e Cina. Tale selezione deriva da una serie di incontri e confronti con i referenti aziendali, che hanno evidenziato come questi territori rappresentino aree prioritarie per l'espansione industriale del gruppo e, al contempo, hotspot emergenti per l'innovazione sostenibile nei settori analizzati. L'analisi delle filiere e dei relativi contesti geografici risulta fortemente connessa alla crescente esigenza delle imprese di monitorare e gestire in modo proattivo le emissioni indirette di carbonio (Scope 3), le quali a partire dal 2023 saranno soggette a regolamentazione e tassazione attraverso il sistema CBAM in Europa e iniziative analoghe negli Stati Uniti. In tale prospettiva, lo sviluppo di un modello capace di produrre un indicatore di sostenibilità facilmente interpretabile rappresenta un supporto strategico per l'implementazione di politiche aziendali orientate al coordinamento efficace della supply chain e all'integrazione di criteri ESG nei processi decisionali.

4.1 Sistemi di gestione e approvvigionamento delle materie prime: Europa, Stati Uniti, Cina, India ed Emirati Arabi Uniti

Nella fase di specificazione del modello è stata condotta un'analisi approfondita dell'innovazione sostenibile nei cinque Paesi selezionati, con l'obiettivo di comprenderne l'orientamento strategico e la traiettoria evolutiva. Per misurare il potenziale innovativo, come già fatto per il settore cementizio, sono state individuate 16 banche dati internazionali dalle quali sono stati estratti indicatori e metriche rappresentative del livello di sostenibilità sia delle filiere produttive locali sia del contesto nazionale. L'intento è duplice: da un lato, costruire un indicatore sintetico in grado di stimare la capacità futura di riduzione delle emissioni da parte dei fornitori, a livello di materia prima; dall'altro, definire un secondo indicatore che riassume le politiche, le strategie e i risultati conseguiti a livello macroeconomico in materia di sostenibilità ambientale. L'integrazione di questi due livelli analitici consente la costruzione di un indicatore composito, denominato Indicatore S, che assume valori

compresi tra 0 e 100. Tale indicatore esprime, in un dato orizzonte temporale, la probabilità che una specifica filiera, in uno specifico Paese, riesca a ridurre o, al contrario, incrementare le proprie emissioni di CO₂. Di conseguenza, l'Indicatore S rappresenta uno strumento strategico per stimare il potenziale contributo alla riduzione delle emissioni Scope 3 dell'azienda capofila, facilitando scelte più consapevoli nella gestione della supply chain globale.

L'Indicatore S è calcolato sulla base di 2 ipotesi di base: la prima è che il 50% dello score totale è dato da 7 indicatori globali che rappresentano l'efficienza o capacità di un Paese nel ridurre le emissioni di CO₂. Ad esempio, un Paese con un indicatore di sostenibilità più alto (vicino a 100) è più efficiente nel ridurre le emissioni, mentre uno con un indicatore basso (vicino allo 0) lo è meno. La seconda è che il rimanente 50% dello score totale è dato da 9 indicatori specifici che identificano l'efficienza ed il grado di innovazione sostenibile di ciascuna filiera produttiva nel rispettivo Paese. L'Indicatore S si basa sulle seguenti relazioni. La relazione proporzionale tra sostenibilità e riduzione CO₂: si assume che ci sia una relazione lineare tra l'indicatore di sostenibilità S e il potenziale risparmio di CO₂ (Aresu et al., 2023; Chen et al., 2021; Dhaliwal et al., 2012; Wang et al., 2019; Zhou et al., 2023). Se un Paese ha una sostenibilità più alta, è in grado di risparmiare una maggiore quantità di CO₂, proporzionalmente al suo livello di sostenibilità così come espresso dall'indicatore (Fujii et al., 2013; Razmjoo et al., 2021). La misura del potenziale risparmio si ottiene moltiplicando l'Indicatore S (nelle sue diverse configurazioni Totale, Specific e Global) per le emissioni totali di CO₂, si ottiene la stima di quanta CO₂ potrebbe essere risparmiata, basando l'analisi sull'efficienza di quel Paese e di quella filiera in termini di sostenibilità.

Assunzioni Implicite

Una delle assunzioni di base del modello è che data una filiera questa produrrà in quel contesto Paese. Pertanto, le filiere vengono analizzate come “produzione locale”. Si assume che ogni unità dell'Indicatore S corrisponde a un equivalente risparmio di emissioni di CO₂. Ad esempio, un Paese con un punteggio di sostenibilità di 80 ridurrebbe le sue emissioni di CO₂ dell'80%, dato che le politiche e le tecnologie in atto supportano una riduzione maggiore rispetto a un Paese con un punteggio più basso. Il risultato non è una misura esatta, ma piuttosto una stima del risparmio potenziale basata su un indicatore composito che riflette diversi fattori di sostenibilità. La relazione tra sostenibilità e riduzione di CO₂ non è sempre lineare. Fattori come le politiche nazionali, l'industria dominante e l'accesso alle tecnologie potrebbero influenzare il risparmio effettivo. I nuovi assetti geopolitici ed equilibri internazionali impongono nuovi paradigmi ai quali molto spesso le aziende sono esposte (Murray, 2018; Gong and Xu 2022; Urom and Ndubuisi 2023; Karkowska and Urjasz 2024).

Dati

La raccolta dei dati si basa sui seguenti indicatori pubblicati sulle piattaforme online di istituzioni e organizzazioni internazionali di grande rilievo ed in studi scientifici mostrati in tabella 8.

Tabella 8. Descrizione degli indicatori utilizzati per lo sviluppo di Indicatore S.

Tipologia	Denominazione dell'Indicatore	Fonte dei Dati	Descrizione
Globale	Global Innovation Index (GII)	Organizzazione Mondiale per la Proprietà Intellettuale (WIPO)	Global Innovation Index misura la capacità di un Paese di innovare e il livello di efficienza del suo sistema di innovazione. Combina indicatori relativi a input (infrastrutture, istruzione, investimenti in R&D) e output (brevetti, articoli scientifici, applicazioni tecnologiche). È utile per valutare il contesto innovativo a supporto della transizione sostenibile.
Globale	Index of Energy Transition (ETI)	World Economic Forum	Energy Transition Index elaborato dal World Economic Forum valuta la capacità dei sistemi energetici nazionali di fornire energia in modo sicuro, accessibile e sostenibile. Analizza fattori come l'intensità di carbonio, l'efficienza energetica, e il livello di integrazione delle rinnovabili.
Globale	Sustainable Society Index (SSI)	Witulski and Dias, (2020)	Sustainable Society Index fornisce una valutazione del benessere sostenibile nei Paesi, includendo indicatori ambientali, sociali ed economici. Tra i temi trattati: qualità ambientale, equità sociale, salute e partecipazione economica.

Globale	Index of Sustainable Development Goals (SDGI)	Sachs, J.D., Lafortune, G., Fuller, G. (2024). The SDGs and the UN Summit of the Future. Sustainable Development Report 2024. Paris: SDSN, Dublin: Dublin University Press.	SDG Index misura i progressi dei Paesi verso il raggiungimento dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) delle Nazioni Unite. È costruito sulla base di indicatori ufficiali legati a povertà, istruzione, ambiente, energia e disuguaglianze.
Globale	Environmental Performance Index (EPI)		Environmental Performance Index, sviluppato da Yale e Columbia University, classifica i Paesi in base alla performance ambientale. Include indicatori relativi alla salute ambientale (es. qualità dell'aria, acqua potabile) e alla vitalità degli ecosistemi (es. biodiversità, gestione delle risorse).
Globale	Commitment to Development Index (CDI)	Vargas-Santander, K. G., Álvarez-Diez, S., Baixauli-Soler, S., & Belda-Ruiz, M. (2023). Developing a country's sustainability indicator: An analysis of the effect on trade openness. Environmental and Sustainability Indicators, 19, 100280.	Commitment to Development Index, pubblicato dal Center for Global Development, valuta quanto i Paesi ricchi supportano lo sviluppo sostenibile globale, attraverso politiche commerciali, ambientali, tecnologiche e di aiuto allo sviluppo.
Globale	Ecological Footprint (EF)	Vargas-Santander, K. G., Álvarez-Diez, S., Baixauli-Soler, S., &	Ecological Footprint misura la domanda di risorse naturali da parte di una popolazione rispetto alla capacità della Terra di rigenerarle. Include il

		Belda-Ruiz, M. (2023). Developing a country's sustainability indicator: An analysis of the effect on trade openness. Environmental and Sustainability Indicators, 19, 100280.	consumo di suolo, foreste, acqua e risorse energetiche. È spesso confrontato con la biocapacità per valutare la sostenibilità ambientale di un Paese.
Specifico	Inform Risk Index (INFORM)	Banca dati International Monetary Fund (IMF)	L'Inform INFORM Risk Index è una valutazione del rischio globale e open source per crisi e disastri. Il Climate-driven INFORM Risk è un adattamento dell'Indice di rischio INFORM, adeguato dal personale del FMI per distillare e centralizzare i rischi legati al clima. Ha tre dimensioni: pericolo ed esposizione legati al clima, vulnerabilità e mancanza di capacità di far fronte. Le mappe seguenti, disponibili in due diverse schede, presentano l'indicatore di rischio INFORM basato sul clima e il componente di pericolo ed esposizione basati sul clima.
Specifico	Renewable energy integration on the grid (RWE)	Hossain, M. R., Dash, D. P., Das, N., Ullah, E., & Hossain, M. E. (2024). Green energy transition in OECD	L'indicatore Renewable Energy Integration on the Grid (RWE) misura il grado di penetrazione e di integrazione delle fonti di energia rinnovabile nei sistemi elettrici nazionali. Non si limita a valutare la quota di energia rinnovabile prodotta, ma analizza anche la capacità delle infrastrutture e delle

		region through the lens of economic complexity and environmental technology: A method of moments quantile regression perspective. Applied Energy, 365, 123235.	normative di accogliere e gestire efficacemente fonti energetiche non programmabili, come eolico e solare. Tra gli aspetti considerati: flessibilità del sistema elettrico, tecnologie di accumulo, smart grid, interconnessioni, politiche di supporto e stabilità della rete. Questo indicatore è cruciale per comprendere quanto un Paese sia pronto a sostenere la transizione energetica senza compromettere l'affidabilità dell'approvvigionamento.
Specifico	Greenhouse Gas Emissions Accounts (GGEA)	Banca dati International Monetary Fund (IMF)	Questo indicatore mostra le emissioni di gas serra (GHG) sia annuali che trimestrali destagionalizzate derivanti dall'attività economica di ciascuna regione. I dati di origine annuali provengono dai conti annuali delle emissioni atmosferiche del Sistema dei conti ambientali-economici (SEEA) pubblicati a livello nazionale, dalle presentazioni dell'inventario nazionale della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), dalle emissioni di gas serra per paese come stimato dal database delle emissioni per la ricerca atmosferica globale (EDGAR) e da Climate Watch. I dati di origine subannuale provengono dall'Agenzia internazionale

			dell'energia (AIE) e da altre agenzie (dati economici).
Specifico	Quadro di indicatori del Lowell Center for Sustainable Production (LCSP)	Long, Y., Pan, J., Farooq, S., & Boer, H. (2016). A sustainability assessment system for Chinese iron and steel firms. Journal of Cleaner Production, 125, 133-144.	Questo framework utilizza un approccio a cinque livelli per ottenere un sistema sostenibile a livello di struttura. I cinque livelli sono indicatori di conformità/conformità (livello 1), indicatori di utilizzo e prestazioni dei materiali (livello 2), indicatori di effetto (livello 3), indicatori di catena di fornitura e ciclo di vita del prodotto (livello 4) e indicatori di sistemi sostenibili (livello 5).
Specifico	Indice di sostenibilità dei prodotti Ford (PSI)	Fonte: Long, Y., Pan, J., Farooq, S., & Boer, H. (2016). A sustainability assessment system for Chinese iron and steel firms. Journal of Cleaner Production, 125, 133-144.	Il Ford PSI prende in considerazione otto indicatori di sostenibilità che sono specificamente rilevanti per la produzione e i servizi automobilistici, vale a dire: capacità di mobilità, costo del ciclo di vita, impatto sul riscaldamento globale del ciclo di vita, qualità dell'aria del ciclo di vita, materiali sostenibili, sostanze soggette a restrizioni, sicurezza e rumore esterno durante la guida.
Specifico	Iniziativa di rendicontazione globale GRI (GRI)	GRI Standards Italian Translations	L'obiettivo del GRI è quello di fornire un framework di rendicontazione della sostenibilità standardizzato e generalmente accettato. Il framework del GRI è generalmente riconosciuto come lo strumento di rendicontazione della

			sostenibilità più ampiamente utilizzato. La linea guida contiene oltre 70 indicatori di performance, che vengono utilizzati per misurare e rendicontare le performance economiche, ambientali e sociali.
Specifico	Indici di sostenibilità Dow Jones (DJSI)	Long, Y., Pan, J., Farooq, S., & Boer, H. (2016). A sustainability assessment system for Chinese iron and steel firms. Journal of Cleaner Production, 125, 133-144; Institution of Chemical Engineers (ICChemE); Dow Jones Sustainability World Index, Bloomberg;	DJSI traccia la performance del 20% delle aziende top nel Dow Jones Global Total Stock Market Index di 600 aziende leader nel settore in termini di sostenibilità aziendale. L'indice valuta la performance aziendale su 12 criteri, che coprono principalmente la dimensione economica, ma includono anche alcuni aspetti ambientali e sociali.

Specifico	Metriche di sostenibilità dell'Institution of Chemical Engineers (ICChemE)	Long, Y., Pan, J., Farooq, S., & Boer, H. (2016). A sustainability assessment system for Chinese iron and steel firms. Journal of Cleaner Production, 125, 133-144; Institution of Chemical Engineers (ICChemE);	Questo quadro è meno complesso e orientato all'impatto e include parametri di sostenibilità che coprono le dimensioni ambientale, economica e sociale per valutare le prestazioni di sostenibilità dell'industria di processo.
Specifico	Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) - Norma di valutazione delle prestazioni ambientali (EPE) (ISO, 14031)	UNI EN ISO 14031:2021 - UNI Ente Italiano di Normazione	La norma ISO 14031 contiene due categorie generali di indicatori, vale a dire: (1) indicatori di prestazione ambientale, compresi gli indicatori di prestazione operativa e di gestione, e (2) indicatori di condizione ambientale.

Modello di calcolo

L'Indicatore S viene calcolato sulla base di 3 metodi di calcolo che esprimono a loro volta un diverso livello di sintesi:

- Livello Globale;
- Livello Specifico;
- Livello Totale;

Per ciascun livello sono state raccolte variabili, in questo caso indicatori, misurate con differenti metodologie, ad esempio, su base 100, base 1, base 80. Per tale motivo si è preferito prima di effettuare ulteriori analisi normalizzare tutte le variabili raccolte utilizzando la base 100 (Singh and Singh, 2020; Chong, et al., 2020; Huang, et al., 2023).

I tre livelli sopracitati sono ottenuti combinando una o più variabili. Il livello Globale è dato dalla condensazione, Analisi in Componenti Principali (PCA), di 7 indicatori Globali che per natura variano per Paese ma non per filiera. Questo rappresenta il 50% dello score finale “livello totale” e per tale motivo ad ognuno dei 7 indicatori è attribuito un peso di 7,14% (50/7). Analogamente il livello Specifico è dato dalla sintesi (PCA) dei 9 indicatori Specifici con peso 5,6% (50/9). In questo caso gli indicatori sono individuati in relazione alla filiera geograficamente localizzata in quel Paese, variabilità filiera-Paese. Una volta ottenuti gli score finali della PCA Specifico, Globale e Totale questi indici vengono moltiplicati per le emissioni Scope 3 attuali, precedentemente suddivise grazie all’ausilio di pesi. Viene quindi formulato uno scenario t-0 il quale rappresenta la situazione di partenza del Gruppo Maire al 2023. Le informazioni relative alle emissioni t-0 sono dedotte dal bilancio di sostenibilità 2023 del medesimo Gruppo Aziendale. Si ottiene quindi una stima del risparmio potenziale di CO2 Scope 3 che il Gruppo potrebbe beneficiare se, date le ipotesi di partenza, i progetti fossero localizzati in quel specifico Paese. Grazie alla regressione lineare si fornisce, inoltre, una stima al 2050 di come l’andamento della curva di risparmio delle emissioni Scope 3 potrebbe variare al variare della produzione in differenti contesti.

Analogamente a quanto ottenuto per le emissioni Scope 3, si propone una stima in termini di costo della CO2 e delle diverse materie prime che vengono assemblate per la realizzazione dei progetti del Gruppo Maire. Questo per confrontare la convenienza di approvvigionamento del prezzo grezzo delle materie prime con il prezzo corrisposto a fronte della valutazione della CO2 emessa per la produzione delle stesse. In sostanza vengono sommati costo delle materie prime con CO2 emessa in quel Paese per la realizzazione. Una volta determinata la situazione di partenza, come nel paragrafo precedente, si stimano i risparmi al 2050 grazie all’Indicatore S e di conseguenza il costo ridotto della CO2. L’obiettivo è quello di dimostrare come in alcune situazioni potrebbe essere conveniente acquistare una materia prima da un determinato fornitore solo al netto del costo delle emissioni. Al contrario mostrare come prezzi del materiale magari marginalmente più elevati ma con un livello di CO2 più basso (oppure potenzialmente più basso) in realtà se analizzati tenendo conto del costo delle emissioni Scope 3 si rivelano effettivamente con un vantaggio comparato superiore. Nelle mie analisi basate sul caso studio del Bilancio di Sostenibilità del Gruppo Maire si evince come Paesi con tasso

d'innovazione e sviluppo assai elevato come l'Italia confermano l'ipotesi che il costo delle materie associato a quello della CO2 è più basso laddove c'è una forte coesione del tessuto economico imprenditoriale che riesce a riflettere perfettamente il know-how, la tecnologia e l'innovazione del contesto Paese in cui opera. Questa precisazione è dovuta in quanto altri Paesi come l'India e la Cina, che pur avendo dei tassi d'innovazione e sviluppo molto elevati, presentano un tessuto economico poco coeso con una frammentizzazione che non permette il pieno utilizzo di tutta la tecnologia messa a disposizione dal macro-contesto. E' il caso di imprese che per via del principio della responsabilità comune ma differenziata del Fondo Monetario Internazionale e della Banca Mondiale operano ancora con tecnologie poco efficienti, sia dal punto di vista tecnologico sia ambientale, che ritengono ancora conveniente (massimizzazione del profitto) l'utilizzo della vecchia tecnologia in quanto la nuova avrebbe un costo superiore non allineato ai ricavi attuali (visione di breve periodo).

Ai fini dimostrativi viene presentata tabelle 9, 10, 11 che mostrano i risultati dell'Indicatore S a tre livelli di attenzione per la filiera dell'acciaio.

Tabella 9. Indicatore S livello Globale filiera acciaio.

FILIERA ACCIAIO	INDICATORE S - GLOBALE - 50% totale (50/7= 7,14)						
	GII	ETI	SDGI	EPI	CDI	EF	SSI
Pesi	7,14%	7,14%	7,14%	7,14%	7,14%	7,14%	7,14%
Emirati Arabi Uniti	43.20	54.60	70.52	52.00	35.00	0.60	83.50
Arabia Saudita	34.50	55.30	64.91	42.60	25.00	0.70	63.90
Italia	46.60	60.60	79.29	60.50	59.00	0.90	80.40
India	38.10	54.30	63.99	27.60	15.00	0.40	70.10
Cina	55.30	64.90	70.85	35.50	19.00	0.80	78.40

Tabella 10. Indicatore S livello Specifico filiera acciaio.

FILIERA ACCIAIO	INDICATORE S - SPECIFICO - 50% totale (50/9= 5,6)								
	INFORM	RWE	GGEA	LCSP	PSI	EPE	GRI	IchemE	DJSI
Pesi	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%
Emirati Arabi Uniti	-20.00	7.30	-11.00	36.50	33.00	35.00	38.00	38.00	42.00
Arabia Saudita	-26.00	0.70	-9.50	32.50	25.00	25.00	28.00	30.00	33.00
Italia	-25.00	34.70	-12.60	67.50	65.00	65.00	70.00	70.00	70.00
India	-57.00	19.70	-67.30	43.50	35.00	33.00	38.00	40.00	40.00
Cina	-53.00	0.90	-36.30	46.50	45.00	42.00	48.00	52.00	52.00

Tabella 11. Indicatore S livello Totale filiera acciaio analisi PCA.

FILIERA ACCIAIO	Livello Globale	Livello Specifico	Livello Totale
Emirati Arabi Uniti	24.23	11.13	35.37
Arabia Saudita	20.49	7.77	28.25
Italia	27.65	22.66	50.31
India	19.24	6.99	26.24
Cina	23.19	11.04	34.22

Analogamente i risultati ottenuti nelle tabelle precedenti sono replicati per tutte le filiere del modello, per ciascuna la tabella 9 rimane invariata poiché le performance del Paese sono globali e abbracciano tutte le produzioni locali. Tabella 10 e 11 varieranno per ogni abbinamento filiera-Paese e saranno proprio quei dati a determinare una netta differenza nei risultati finali. In tabella 10 gli indicatori INFORM e GGEA sono evidenziati in marrone in quanto vengono considerati con segno negativo perché rappresentano rispettivamente il rischio ambientale e l'ammontare di CO2 aggregato. In tabella 11 sono evidenziati i risultati della PCA ossia la condensazione delle informazioni delle tabelle 9 e 10 sulla base dei pesi attribuiti in precedenza.

In figura 14 e 15 gli indicatori globali e specifici per tutti gli abbinamenti filiere-Paese, esposti come istogrammi per una migliore rappresentazione dei dati.

Figura 14. Risultati Indicatore S livello globale.

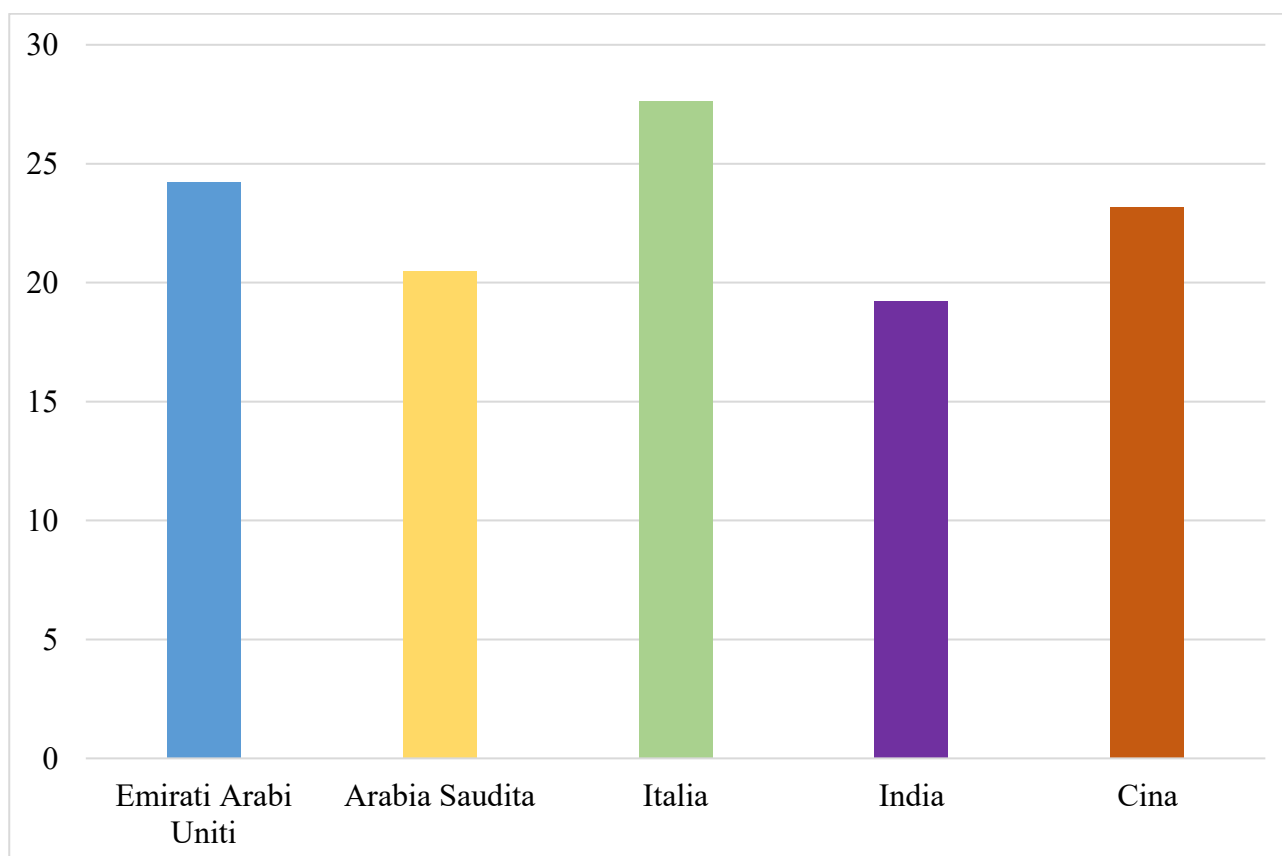
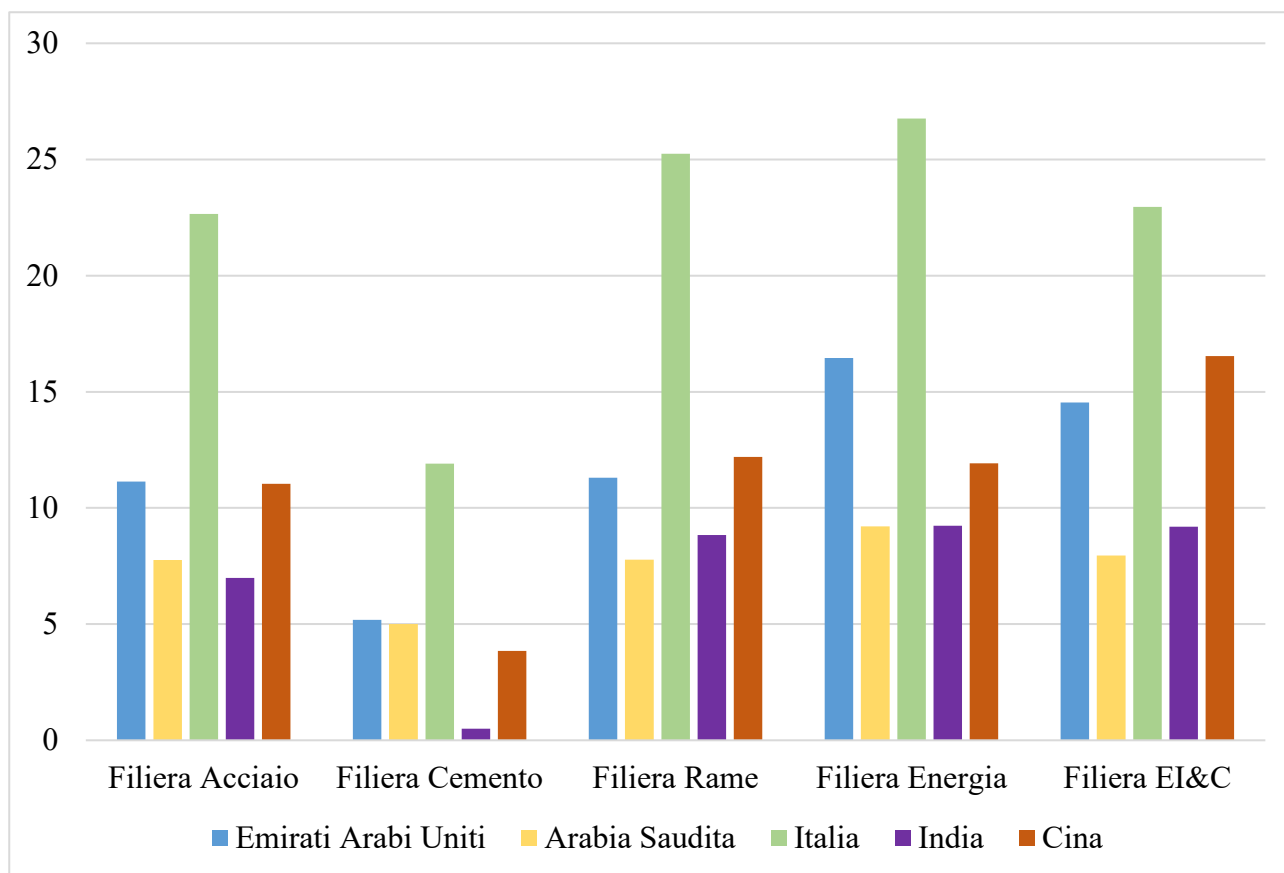
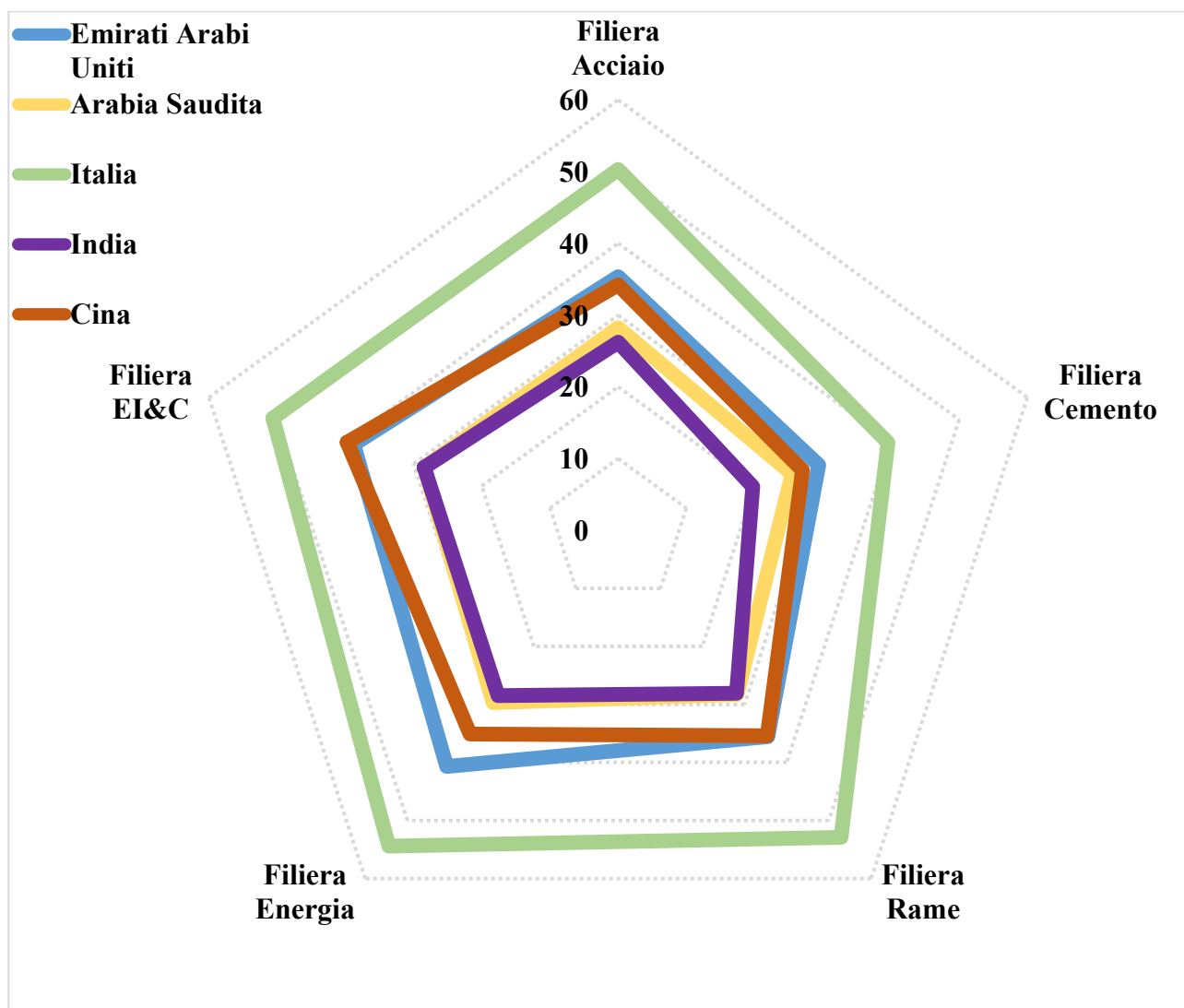


Figura 15. Risultati Indicatore S livello specifico tutte le filiere.



Per gli abbinamenti Paese-filiera analizzati, emerge una tendenza coerente sia a livello di contesto macroeconomico sia a livello settoriale: l'Italia si posiziona in testa per performance complessive, seguita dagli Emirati Arabi Uniti e dall'Arabia Saudita. Al contrario, India e Cina mostrano livelli di performance più contenuti, sia in termini di sostenibilità del contesto nazionale sia per quanto riguarda l'innovazione nei singoli settori produttivi considerati.

Figura 16. Diagramma di Kiviat Indicatore S livello di Sintesi, tutte le filiere.



In figura 16 il diagramma di Kiviat mostra i benchmark totale per ciascuna materia prima selezionata. I rating espressi in percentuale rappresentano da 0 a 100 la probabilità di successo (+) delle filiere produttive locali nella riduzione delle emissioni Scope 3. Osserviamo che le produzioni a maggiore innovazione sostenibile per ciascun contesto sono EI&C, Energia e Acciaio mentre per Cemento e Rame i punteggi di sintesi sono contenuti. Anche in questo caso i trend rimangono gli stessi di figura 14 e 15 con l'Italia in testa.

4.1.1 Modello predittivo, Indicatore S e percentuali di risparmio dello Scope 3

A differenza del modello presentato nel capitolo 3 in questa fase si è preferito utilizzare dei valori differenti dello Scope 3 del Gruppo Maire scorporando dal totale quella parte di emissioni imputate ad altre attività come i viaggi d'affari, lo spostamento quotidiano dei dipendenti o gli uffici (tabella 12).

Tabella 12. Volume aggregato di emissioni Scope 3 del Gruppo Maire nell'anno 2023.

Categorie Emissioni Scope 3	ton./CO2/eq.
Beni e servizi acquistati	1,894,102
Viaggi d'affari	29,559
Spostamento dei dipendenti	6,163
Rifiuti prodotti nei processi	4,313
Trasporto e distribuzione	15,916
Emissioni Totali	1,950,053

Fonte: Bilancio sostenibilità Gruppo Maire 2023

A seguito di una verifica congiunta tra l'ufficio Procurement e l'area Construction Subcontracting del Gruppo Maire, è stata effettuata un'analisi dello spending effettivo per l'anno 2023. Le percentuali riportate nella tabella 13 riflettono i dati aggiornati risultanti da tale analisi.

Tabella 13. Conversione dello spending in emissioni reali.

	Speso	Fattore di Emissioni	Speso * Fattore di Emissione	Emissioni Reali
	%	(ton/CO2/eq/€)	(ton/CO2/eq/€)	%
	(A)	(B)	(C)	(D)
Acciaio	40%	0.435	0.174	38%
Cemento	20%	0.495	0.099	22%
Ei&C	13%	0.719	0.093	20%
Rame	7%	0.643	0.045	10%
Energia	20%	0.237	0.047	10%
Totale	100%	0.459	-	100%

Per la conversione dello spending in emissioni di CO₂, è stato utilizzato il database DEFRA, attualmente adottato, dal Gruppo Maire, per il calcolo delle emissioni Scope 3. Sulla base di tale

database è stato definito un fattore medio di filiera, riportato nella tabella seguente. Contributo emissivo delle filiere anno 2023. Tabella 13 serve a calcolare il reale contributo emissivo di ciascuna voce. Si usano tre passaggi:

- $\text{Speso} \times \text{Fattore di emissione (colonna C)}$: il fattore di emissione (ad esempio 0.435 per l'acciaio) rappresenta quanta CO₂ viene emessa per ogni unità di spesa o peso.
- **Somma complessiva**: la somma di questi valori dà un totale (in questo caso 0.459), che rappresenta l'impatto emissivo totale relativo al 100% della spesa.
- **Rinormalizzazione a 100% (colonna D)**: ogni valore viene diviso per il totale (0.459) e moltiplicato per 100 per ottenere la percentuale reale di emissioni di CO₂.

Questi calcoli permettono di tradurre le voci di spesa o l'impiego di materiali in termini di emissioni effettive, consentendo di individuare con maggiore precisione le aree su cui intervenire per ridurre l'impatto ambientale, ovvero i materiali e i processi maggiormente emissivi. I risultati confermano che non è sufficiente basarsi esclusivamente sui costi sostenuti: l'impatto ambientale non è sempre proporzionale alla spesa. Ad esempio, l'energia rappresenta circa il 20% dei costi totali, ma incide solo per il 10% sulle emissioni complessive. Al contrario, la voce EI&C (Electrical, Instrumentation & Control), pur rappresentando solo il 13% della spesa, contribuisce per il 20% alle emissioni, a causa dell'elevato fattore di emissione associato.

A questo punto si può calcolare il reale volume aggregato di emissioni indirette di gas serra generate dalle attività del Gruppo Maire nell'anno 2023 pesate per le 5 filiere oggetto d'analisi. Per il testing del modello è ragionevole utilizzare, date le ipotesi precedenti, i valori di emissioni Scope 3 della voce "Beni e Servizi Acquisitati". Pertanto, si ipotizza che in termini di emissioni indirette Scope 3:

$$\text{Beni e Servizi Acquisitati} = \text{Progetto X}$$

Questa ipotesi di base evita di utilizzare dati interni al Gruppo ma è funzionale ai fini del test dello strumento quale si vuole implementare. In tabella 14 viene presentata la nuova ripartizione delle emissioni Scope 3.

Tabella 14. Ripartizione delle emissioni Scope 3 anno 2023 del Gruppo Maire.

Dati	ton/CO2/eq	Pesi	%
	(A)	(B)	(C)
Emissioni Totali Scope 3	1,950,053	-	-
Beni e servizi acquistati	1,894,102	1.00	100%
Filiera Acciaio	719,758.76	0.38	38%
Filiera Cemento	378,820.40	0.22	22%
Filiera EI&C	189,410.20	0.20	20%
Filiera Rame	189,410.20	0.10	10%
Filiera Energia	416,702.44	0.10	10%

Fonte: Elaborazione dell'autore su dati del Gruppo Maire.

4.2 Valutazione e previsione delle potenzialità eco-sostenibili delle Filiere

Una volta quantificate le emissioni reali riconducibili al Gruppo Maire, è possibile applicare le metriche dell'Indicatore S per stimare, nell'orizzonte temporale 2023–2050, il potenziale risparmio di emissioni Scope 3 derivante da una riorganizzazione strategica delle filiere di fornitura, privilegiando Paesi diversi rispetto a quelli attualmente coinvolti nella catena di approvvigionamento. L'intervallo temporale fino al 2050 è coerente con gli obiettivi di lungo periodo definiti a livello internazionale, e consente di valutare gli sforzi e le traiettorie di transizione adottate sia a livello nazionale sia settoriale, in relazione alle strategie climatiche e agli impegni di decarbonizzazione in atto. La Tabella 15 riporta i risultati, espressi sia in termini percentuali sia in tonnellate di CO₂ equivalente, relativi alla probabilità di riduzione delle emissioni Scope 3 nel periodo 2023–2050, ottenibile attraverso una riorganizzazione dell'importazione di materie prime a favore dei Paesi oggetto dell'analisi.

Tabella 15. Decarbonizzazione Scope 3 Gruppo Maire 2023-2050

Filiera Acciaio	GLOBAL SCORE		SPECIFIC SCORE		TOTAL SCORE	
	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %
Emirati Arabi Uniti	188999.14	9.7%	86816.36	4.5%	275893.50	14.1%
Arabia Saudita	159826.34	8.2%	60607.65	3.1%	220355.99	11.3%
Italia	215675.862	11.1%	176752.804	9.1%	392428.666	20.1%
India	150076.079	7.7%	54523.4819	2.8%	204677.563	10.5%
Cina	180886.916	9.3%	86114.3405	4.4%	266923.255	13.7%
Filiera Cemento	GLOBAL SCORE		SPECIFIC SCORE		TOTAL SCORE	
	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %
Emirati Arabi Uniti	94499.57	4.8%	20202.55	1.0%	169537.61	8.7%
Arabia Saudita	79913.17	4.1%	19539.53	1.0%	99452.70	5.1%
Italia	107837.93	5.5%	46450.26	2.4%	154288.19	7.9%
India	75038.04	3.8%	1950.05	0.1%	76988.09	3.9%
Cina	90443.46	4.6%	15015.41	0.8%	105458.87	5.4%
Filiera Rame	GLOBAL SCORE		SPECIFIC SCORE		TOTAL SCORE	
	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %
Emirati Arabi Uniti	47249.7842	2.4%	22035.5989	1.1%	69285.3831	3.6%
Arabia Saudita	39956.586	2.0%	15151.9118	0.8%	55108.4978	2.8%
Italia	53918.9655	2.8%	49219.3377	2.5%	103157.804	5.3%
India	37519.0197	1.9%	17238.4685	0.9%	54757.4882	2.8%
Cina	45221.7291	2.3%	23790.6466	1.2%	69012.3757	3.5%
Filiera Energia	GLOBAL SCORE		SPECIFIC SCORE		TOTAL SCORE	
	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %
Emirati Arabi Uniti	47249.7842	2.4%	32078.3719	1.6%	79347.6566	4.1%
Arabia Saudita	39956.586	2.0%	17940.4876	0.9%	57897.0736	3.0%
Italia	53918.9655	2.8%	52183.4183	2.7%	106102.384	5.4%
India	37519.0197	1.9%	17998.9892	0.9%	55537.5094	2.8%
Cina	45221.7291	2.3%	23244.6318	1.2%	68466.3608	3.5%
Filiera EI&C	GLOBAL SCORE		SPECIFIC SCORE		TOTAL SCORE	
	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %	Saved CO2 ton/CO2/eq.	Saved CO2 %

Emirati Arabi Uniti	94499.57	4.8%	56707.54	2.9%	151207.11	7.8%
Arabia Saudita	79913.17	4.1%	31005.84	1.6%	110919.015	5.7%
Italia	107837.931	5.5%	89546.43	4.6%	197384.365	10.1%
India	75038.0394	3.8%	35841.97	1.8%	110880.014	5.7%
Cina	90443.4581	4.6%	64507.75	3.3%	154951.211	7.9%

Fonte: elaborazione degli autori su dati Gruppo Maire

I risultati evidenziano come, per tutte le filiere analizzate, i Paesi con il maggiore contributo all'innovazione sostenibile siano l'Italia, gli Emirati Arabi Uniti e l'Arabia Saudita. Al contrario, India e Cina si collocano in una posizione più marginale, ancora fortemente ancorate a modelli produttivi tradizionali e labour intensive (Ganai, et al., 2024; Liang and Lu, 2024; Marjit and Gupta, 2024). Questi ultimi risultano di particolare interesse in quanto, come si vedrà nell'analisi di costo, rappresentano i mercati low cost con enormi vantaggi in termini di concorrenza di prezzo.

Tabella 15. Punteggio Totale Indicatore S.

	Emirati Arabi Uniti %/ Scope 3	Arabia Saudita %/ Scope 3	Italia %/ Scope 3	India %/ Scope 3	Cina %/ Scope 3
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Filiera Acciaio	14.10%	11.30%	20.10%	10.50%	13.70%
Filiera Cemento	8.70%	5.10%	7.90%	3.90%	5.40%
Filiera Rame	3.60%	2.80%	5.30%	2.80%	3.50%
Filiera Energia	4.10%	3.00%	5.40%	2.80%	3.50%
Filiera EI&C	7.80%	5.70%	10.10%	5.70%	7.90%
CO2 Risparmiata al 2050	35%	28%	49%	26%	34%
Stima Scope 3 al 2050	65%	72%	51%	74%	66%

*Fonte: elaborazione
dell'autore*

L'analisi dei potenziali risparmi di emissioni Scope 3 ottenibili entro il 2050, derivanti da una riorganizzazione delle filiere di approvvigionamento del Gruppo Maire, mostra differenze significative tra i cinque Paesi oggetto di studio. L'Italia emerge come il contesto più favorevole in termini di sostenibilità lungo l'intera catena del valore, con una riduzione stimata delle emissioni Scope 3 pari al 49%, seguita dagli Emirati Arabi Uniti (35%) e dalla Cina (34%). Arabia Saudita e India mostrano performance più contenute, con riduzioni rispettive del 28% e del 26%. A livello settoriale, la filiera dell'acciaio è quella che offre il maggior potenziale di riduzione, con valori

particolarmente elevati per l'Italia (20,1%) e gli Emirati Arabi Uniti (14,1%). Anche la filiera EI&C (Electrical, Instrumentation & Control), caratterizzata da elevati fattori di emissione, risulta strategica: l'Italia raggiunge un risparmio del 10,1%, mentre Emirati Arabi e Cina si attestano rispettivamente al 7,8% e 7,9%. Le filiere del cemento, dell'energia e del rame presentano risparmi più modesti, ma comunque significativi nel bilancio complessivo delle emissioni Scope 3. Questi risultati confermano l'efficacia dell'Indicatore S nel supportare decisioni strategiche relative alla selezione dei Paesi da cui approvvigionarsi. L'adozione di fornitori localizzati in contesti più virtuosi dal punto di vista dell'innovazione sostenibile consente di ridurre in modo consistente l'impronta carbonica indiretta, contribuendo agli obiettivi di decarbonizzazione fissati per il 2050. A tale beneficio ambientale si associa, inoltre, un importante impatto economico derivante dalla progressiva internalizzazione del costo della CO₂ prevista dal meccanismo europeo di adeguamento del carbonio alle frontiere (CBAM). Infatti, la capacità di prevedere e minimizzare le emissioni Scope 3 si traduce anche in una significativa riduzione dei costi potenziali legati alla tassazione delle importazioni ad alta intensità emissiva, rafforzando ulteriormente il vantaggio competitivo delle imprese che operano secondo logiche di sostenibilità integrata.

4.3 Analisi e stima dei costi della CO₂ nei sistemi ETS per le emissioni globali

Nel contesto attuale, la gestione delle emissioni di gas serra è diventata una componente cruciale per le strategie aziendali, soprattutto per quelle imprese che operano a livello globale e che sono soggette a regolamentazioni sempre più stringenti in materia di sostenibilità. In particolare, lo Scope 3, che include le emissioni indirette derivanti dalla catena di fornitura e dall'uso dei prodotti, rappresenta una delle voci più complesse e difficili da monitorare e ridurre. Tuttavia, con l'introduzione di politiche come il meccanismo europeo di adeguamento del carbonio alle frontiere (CBAM), la stima accurata dei costi associati a queste emissioni diventa fondamentale per la competitività delle imprese.

La stima dei costi della CO₂ dello Scope 3 è, infatti, una delle principali sfide per le aziende moderne. Includere il costo della carbon footprint nella valutazione economica delle materie prime consente alle imprese di anticipare e ottimizzare le loro strategie di approvvigionamento, riducendo i rischi legati alle fluttuazioni dei costi di emissione. Il modello di stima proposto, basato su Indicatore S, non solo analizza il risparmio potenziale in termini di emissioni, ma proietta anche l'evoluzione delle stesse nel tempo, permettendo alle aziende di calcolare con maggiore precisione l'impatto economico complessivo delle loro scelte strategiche. In particolare, la proiezione della riduzione delle emissioni Scope 3 consente di comprendere come l'introduzione di fornitori con un'impronta carbonica inferiore possa ridurre, nel lungo termine, i costi associati al CBAM, il quale impone una tassazione crescente

sulle importazioni di beni con alta intensità emissiva. Pertanto, i costi delle materie prime, seppur legati alle fluttuazioni del mercato, possono essere ulteriormente influenzati dalla crescente incidenza delle emissioni carboniche e dalle normative internazionali che mirano a promuovere la sostenibilità. Di conseguenza, è fondamentale per le aziende valutare come la gestione delle emissioni di Scope 3 non solo contribuisca a obiettivi di sostenibilità, ma anche a una gestione economica ottimizzata, anticipando i cambiamenti normativi e i relativi impatti sui costi di produzione.

4.3.1 Commodities e mercati internazionali

Per verificare le ipotesi formulate all’inizio del presente capitolo, si propone una stima del costo ipotetico delle materie prime per i Paesi oggetto d’analisi, opportunamente rettificato includendo il costo associato alle emissioni di CO₂, in conformità con i criteri previsti dal meccanismo CBAM. Come primo passo, sono stati identificati i prezzi di riferimento delle principali commodities alla base delle filiere produttive esaminate. I dati relativi al costo delle materie prime e alle emissioni di CO₂ per unità funzionale sono stati scaricati dalla piattaforma Trading Economics, che fornisce serie storiche dei prezzi aggiornate annualmente, tenendo conto sia del tasso d’inflazione che dell’andamento dei mercati finanziari. Le tabelle 16 e 17 riportano rispettivamente i prezzi e le emissioni associate a cinque materie prime strategiche, acciaio, cemento, rame, energia ed EI&C, aggiornati all’anno 2023.

Tabella 16. Prezzo delle materie prime al 2023 per unità funzionale espresse in valuta euro (€).

	Acciaio	Cemento	Energia	Rame	EI&C
Paese	(1 ton)	(1 ton)	(1 MWh)	(1 ton)	(1 ton)
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Emirati Arabi Uniti	583.39 €	94.00 €	54.82 €	8,221.40€	1,100.00€
Arabia Saudita	622.86 €	92.00 €	53.91 €	8,265.30€	1,050.00€
Italia	600.00 €	100.00 €	81.87 €	8,238.77€	1,200.00€
India	560.00 €	89.00 €	79.02 €	8,222.72€	950.00 €
Cina	480.00 €	97.00 €	82.14 €	8,214.20€	900.00 €

Fonte: Piattaforma Trading Economics

Tabella 17. Emissioni delle materie prime al 2023 per 1 unità funzionale espresse in ton/CO₂/eq.

	Acciaio	Cemento	Energia	Rame	EI&C
Paese	(1 ton)	(1 ton)	(1 MWh)	(1 ton)	(1 ton)

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Emirati Arabi Uniti	1.83	0.70	0.78	0.80	0.46
Arabia Saudita	1.83	0.80	0.84	0.72	0.49
Italia	1.70	0.72	0.26	0.98	0.39
India	2.60	0.98	0.82	0.90	0.53
Cina	2.20	0.90	0.67	0.80	0.51

Fonte: Piattaforma Trading Economics

I dati relativi ai prezzi della CO₂ sono stati ricavati dalla piattaforma ufficiale dell'Agenzia delle Dogane e dei Monopoli, che mette a disposizione strumenti semplificati per l'interpretazione e l'applicazione della normativa europea in materia di carbon pricing. In Tabella 18 è presentato un quadro completo del costo per tonnellata equivalente di CO₂ (ton/CO₂/eq) che le aziende importatrici sono tenute a versare nell'ambito del meccanismo CBAM. Tale costo si somma al prezzo base delle materie prime, andando così a costituire una componente sempre più rilevante del costo complessivo di approvvigionamento. I valori sono riportati su base annua, in quanto il CBAM prevede un progressivo aumento della carbon tax, in linea con l'intensità emissiva dei Paesi di origine delle merci e con gli obiettivi europei di decarbonizzazione.

Tabella 18. Prezzo di 1 ton/CO₂/eq. sistema CBAM orizzonte 2024-2025 espresso in valuta euro (€).

Anni	Emirati Arabi Uniti	Arabia Saudita	Italia	India	Cina
2023	100.00 €	100.00 €	85.87 €	110.00 €	110.00 €
2024	100.78 €	100.78 €	86.54 €	110.86 €	110.86 €
2025	101.56 €	101.56 €	87.21 €	111.71 €	111.71 €
2026	102.33 €	102.33 €	87.87 €	112.57 €	112.57 €
2027	103.11 €	103.11 €	88.54 €	113.42 €	113.42 €
2028	103.89 €	103.89 €	89.21 €	114.28 €	114.28 €
2029	104.67 €	104.67 €	89.88 €	115.13 €	115.13 €
2030	105.44 €	105.44 €	90.55 €	115.99 €	115.99 €
2031	106.22 €	106.22 €	91.21 €	116.84 €	116.84 €
2032	107.00 €	107.00 €	91.88 €	117.70 €	117.70 €
2033	107.78 €	107.78 €	92.55 €	118.56 €	118.56 €
2034	108.56 €	108.56 €	93.22 €	119.41 €	119.41 €
2035	109.33 €	109.33 €	93.88 €	120.27 €	120.27 €
2036	110.11 €	110.11 €	94.55 €	121.12 €	121.12 €
2037	110.89 €	110.89 €	95.22 €	121.98 €	121.98 €
2038	111.67 €	111.67 €	95.89 €	122.83 €	122.83 €
2039	112.44 €	112.44 €	96.56 €	123.69 €	123.69 €

2040	113.22 €	113.22 €	97.22 €	124.54 €	124.54 €
2041	114.00 €	114.00 €	97.89 €	125.40 €	125.40 €
2042	114.78 €	114.78 €	98.56 €	126.26 €	126.26 €
2043	115.56 €	115.56 €	99.23 €	127.11 €	127.11 €
2044	116.33 €	116.33 €	99.90 €	127.97 €	127.97 €
2045	117.11 €	117.11 €	100.56 €	128.82 €	128.82 €
2046	117.89 €	117.89 €	101.23 €	129.68 €	129.68 €
2047	118.67 €	118.67 €	101.90 €	130.53 €	130.53 €
2048	119.44 €	119.44 €	102.57 €	131.39 €	131.39 €
2049	120.22 €	120.22 €	103.23 €	132.24 €	132.24 €
2050	121.00 €	121.00 €	103.90 €	133.10 €	133.10 €

Fonte: Agenzia delle Dogane e dei Monopoli

4.3.2 Costo Compensato delle Materie Prime: Meccanismo di Calcolo

Il costo compensato delle materie prime rappresenta una variabile strategica centrale per le imprese nella pianificazione degli obiettivi di sostenibilità ambientale ed efficienza economica. Come approfondito nel Capitolo 1, la sostenibilità e la redditività devono essere integrate in modo sinergico affinché l'impresa possa crescere e innovarsi in modo realmente sostenibile. L'acquisto di materie prime al solo prezzo di mercato, infatti, non riflette i costi ambientali nascosti associati alle emissioni climalteranti e al livello intrinseco di sostenibilità delle diverse filiere. A tal fine, si propone in eq. 1. l'algoritmo sviluppato per stimare il costo compensato al 2050 delle principali materie prime considerate nello studio: acciaio, cemento, rame, energia ed EI&C includendo sia il prezzo di mercato che il costo della CO₂ secondo i criteri previsti dal sistema CBAM.

$$(eq. 1.) \quad \text{Costo Compensato} = \sum_{t=2023}^{2050} \Delta C_{m,t} + [(E_t - (S_t * E_t)) * \Delta P_{CO_2,t}]$$

Di cui:

t= anni dal 2023 al 2050

$\Delta C_{m,t}$ = variazione del costo della materia prima dell'anno t (per unità funzionale), influenzata da inflazione e dinamiche di mercato;

E_t = CO₂ emessa per unità funzionale nell'anno t;

S_t = indicatore S nell'anno t;

$\Delta P_{CO_2,t}$ = variazione del prezzo del credito di carbonio nell'anno t, secondo il meccanismo CBAM;

Nelle figure successive sono presentate le stime di costo compensato dal 2023 al 2050.

Figura 17. Costo compensato dell'acciaio (€), orizzonte dal 2023-2050.

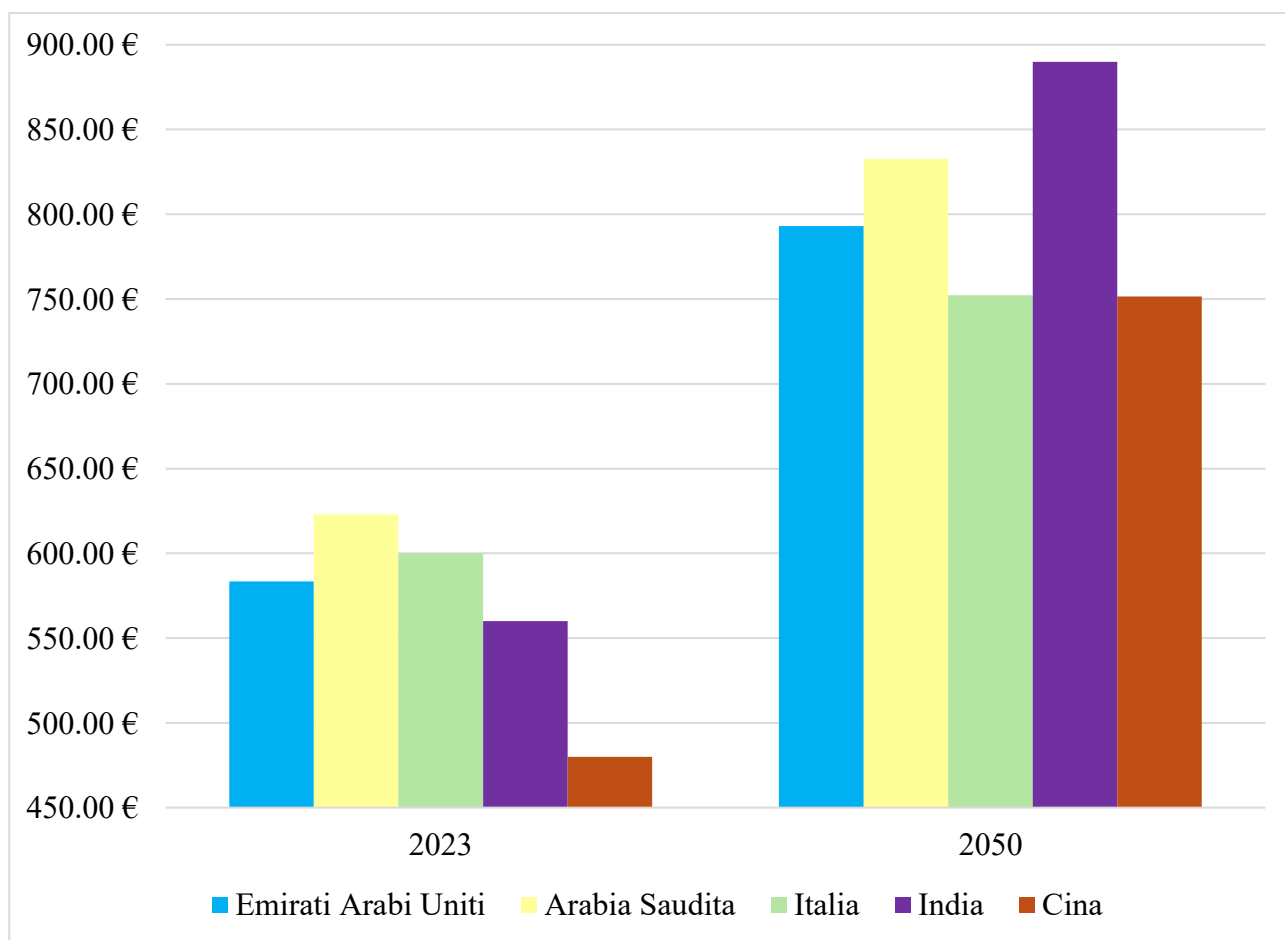


Figura 18. Costo compensato del cemento (€), orizzonte dal 2023-2050.

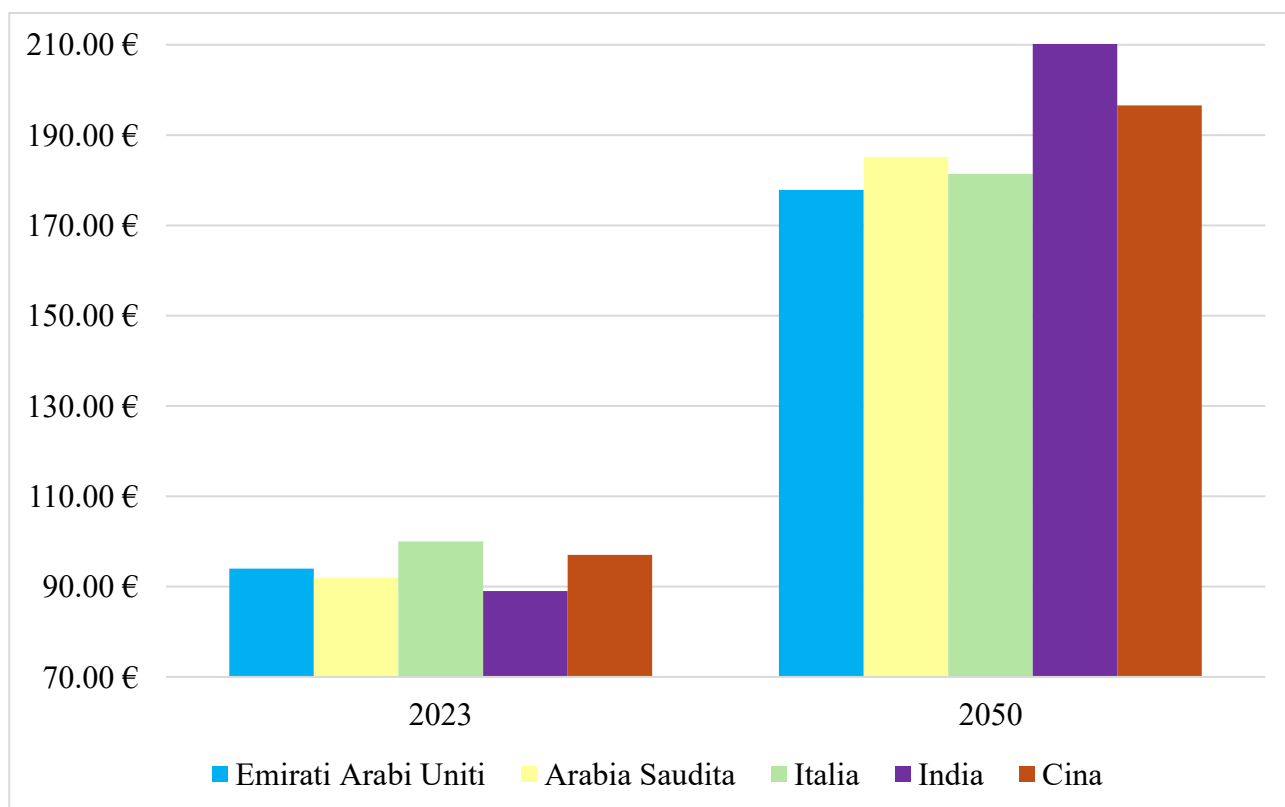


Figura 19. Costo compensato del rame (€), orizzonte dal 2023-2050.

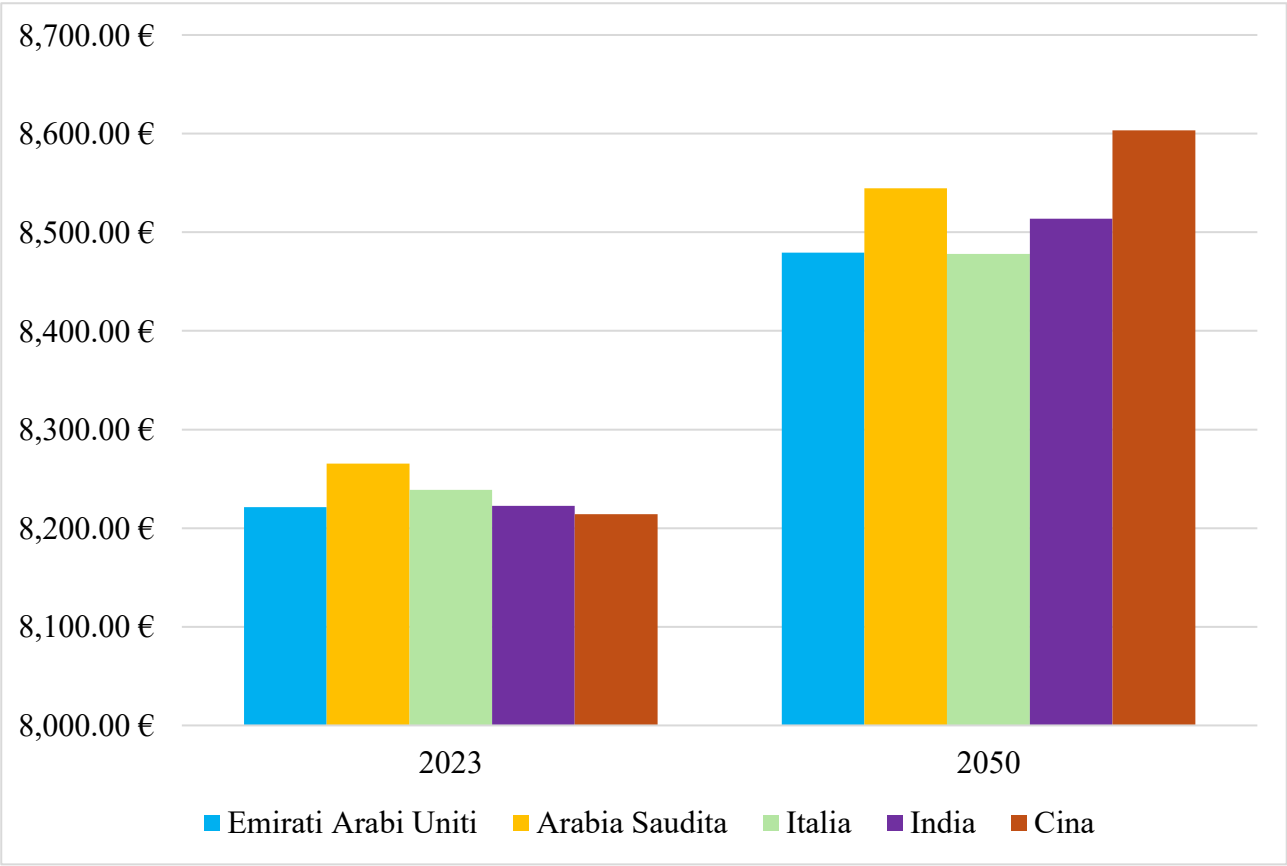


Figura 20. Costo compensato dell'energia (€), orizzonte dal 2023-2050.

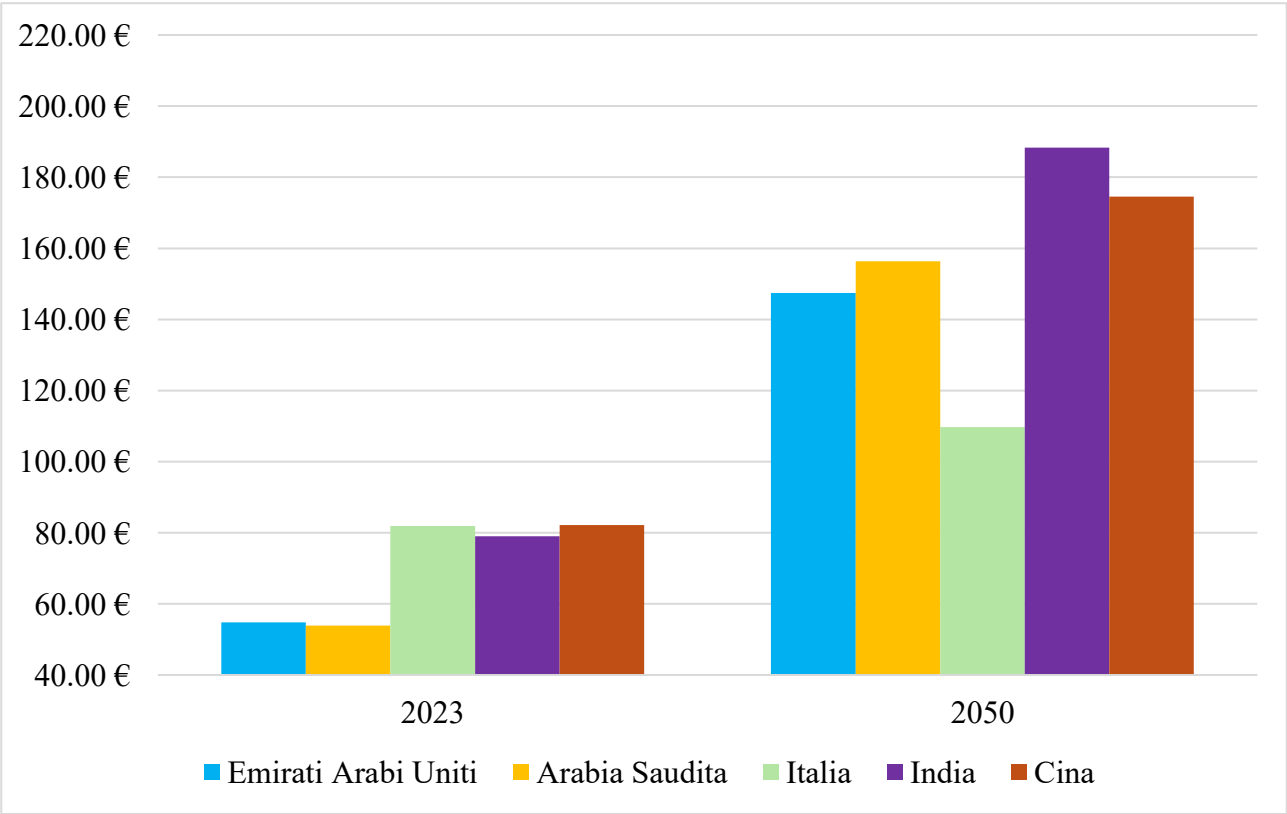
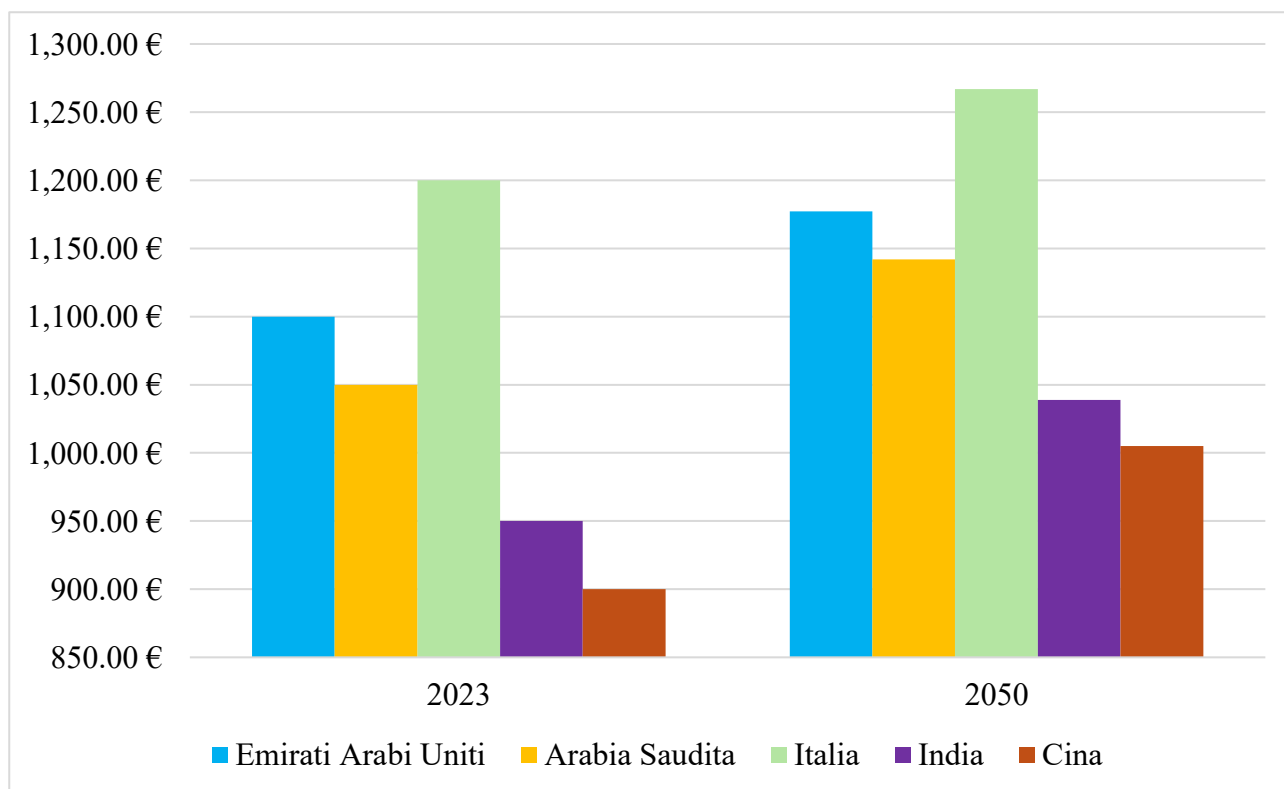


Figura 20. Costo compensato dell'EI&C (€), orizzonte dal 2023-2050.



Per le materie prime acciaio, cemento ed energia, il costo compensato risulta più competitivo in Paesi come Italia, Emirati Arabi Uniti e Arabia Saudita. Questo risultato è riconducibile a due fattori principali: da un lato, l'aumento previsto del costo della CO₂ entro il 2050 per Paesi meno virtuosi sul piano ambientale, come India e Cina; dall'altro, la maggiore capacità di questi Paesi (Italia, EAU e Arabia Saudita) di ridurre le emissioni Scope 3, come stimato dall'Indicatore S. Sebbene India e Cina presentino, nel breve termine (2023), una maggiore convenienza economica nell'approvvigionamento di materie prime, nel lungo periodo, con l'introduzione del meccanismo CBAM e una ridotta efficacia nella mitigazione delle emissioni Scope 3, perdono competitività rispetto a contesti più avanzati in termini di transizione sostenibile. Questo tipo di analisi è strategico per le imprese emergenti, che sono sempre più interessate a valutare in ottica prospettica nuovi canali di approvvigionamento. La sostenibilità, infatti, oltre a essere un valore sociale, assume un peso economico crescente e tangibile nelle decisioni industriali e di mercato.

Le materie prime rame ed EI&C, analizzate rispettivamente in Figura 19 e Figura 20, mostrano che al 2050 non si prevedono variazioni significative nei costi complessivi derivanti dall'integrazione del prezzo della CO₂. In altre parole, anche applicando l'algoritmo di stima del costo compensato (Eq. 1), l'impatto del carbon pricing rimane marginale rispetto al costo unitario molto elevato di queste due categorie merceologiche. Ciò accade perché il prezzo base di rame ed EI&C è già strutturalmente

alto rispetto al costo aggiuntivo associato alle emissioni di CO₂ per unità funzionale. Pertanto, l'aggiunta del costo della CO₂, anche proiettata al 2050 secondo lo scenario CBAM, non altera in modo sostanziale la convenienza economica che alcuni Paesi come Cina e India continuano a offrire in termini di prezzo. Questa dinamica suggerisce che, per alcune categorie di materiali ad alto valore intrinseco, il peso economico delle emissioni può non essere sufficiente, da solo, a modificare le scelte di approvvigionamento a favore di contesti più sostenibili, a meno di politiche aggiuntive o incentivi mirati.

4.4 Proiezioni di Costo Conclusioni ed Implicazioni

Il presente lavoro ha sviluppato un modello predittivo multidimensionale in grado di integrare indicatori di sostenibilità e innovazione per stimare il potenziale risparmio di emissioni Scope 3 e i relativi costi associati alla carbon tax (CBAM) in contesti internazionali eterogenei. L'adozione dell'Indicatore S, costruito a partire da 16 banche dati globali e settoriali, ha permesso di fornire una valutazione strutturata della capacità di cinque Paesi strategici (Italia, Emirati Arabi Uniti, Arabia Saudita, India e Cina) di contribuire alla transizione sostenibile del Gruppo Maire. Tale strumento si è rivelato particolarmente efficace nel rappresentare scenari comparati di decarbonizzazione, rafforzando la dimensione predittiva della sostenibilità applicata alle decisioni di supply chain management.

L'Italia si conferma il Paese con il maggiore potenziale di riduzione delle emissioni Scope 3 (fino al 49% entro il 2050), grazie alla coesione del tessuto industriale, all'adozione diffusa di tecnologie avanzate e alla solidità delle politiche ambientali. Seguono Emirati Arabi Uniti (35%) e Cina (34%), mentre India e Arabia Saudita registrano una minore efficacia, rispettivamente con una riduzione stimata del 26% e 28%. A livello settoriale, le filiere dell'acciaio e dell'EI&C emergono come aree prioritarie per l'intervento, in quanto responsabili di oltre il 50% delle emissioni Scope 3 del Gruppo. Tuttavia, i margini di miglioramento più ampi si registrano proprio in questi comparti, indicando una chiara opportunità per interventi di ottimizzazione ambientale.

L'introduzione del concetto di "costo compensato" delle materie prime, che integra il prezzo di mercato con il costo della CO₂, ha offerto un'ulteriore chiave di lettura. I risultati mostrano che, in molti casi, Paesi apparentemente meno competitivi dal punto di vista dei costi grezzi, come l'Italia, risultano invece vantaggiosi quando si include il costo della carbon tax. Al contrario, contesti come India e Cina, pur offrendo materie prime a basso prezzo, evidenziano un rischio di non sostenibilità economica nel lungo termine, in virtù dell'aumento progressivo dei costi CBAM.

Sulla base dell'analisi svolta, è possibile delineare alcune implicazioni operative e raccomandazioni di policy a supporto delle strategie industriali del Gruppo Maire:

Ridefinizione strategica della geografia dei fornitori: l'adozione dell'Indicatore S consente al Gruppo di orientare le proprie decisioni di approvvigionamento verso Paesi a maggiore efficienza sostenibile, riducendo in modo strutturale le emissioni Scope 3 e ottimizzando la gestione del rischio legato alla carbon tax. Una progressiva rilocalizzazione delle forniture, in particolare per acciaio, cemento ed energia, dovrebbe essere perseguita privilegiando Paesi come Italia, EAU e Arabia Saudita.

Integrazione del carbon pricing nei processi decisionali: il costo compensato, calcolato fino al 2050 secondo lo scenario CBAM, deve entrare a pieno titolo nelle logiche di budgeting e procurement. Ciò richiede la revisione dei modelli di valutazione delle offerte commerciali, superando la logica del solo costo grezzo e adottando una prospettiva *carbon-adjusted*.

Pianificazione ESG e sostenibilità integrata: L'adozione del modello proposto fornisce un supporto concreto alla pianificazione ESG, consentendo di misurare l'impatto ambientale potenziale in fase ex-ante. Questo rafforza la coerenza tra obiettivi ambientali e strategia industriale, facilitando la rendicontazione sostenibile (secondo GRI, CSRD, ecc.) e il dialogo con stakeholder e investitori.

Innovazione e investimento in tecnologie clean-tech: nei contesti meno performanti, come India e Cina, il Gruppo Maire potrebbe valutare l'opportunità di avviare partnership locali per accelerare il trasferimento tecnologico e l'adozione di soluzioni a basso impatto emissivo. Questo approccio ibrido tra internalizzazione della produzione e cooperazione – consente di mantenere competitività senza sacrificare gli obiettivi ambientali.

Bibliografia

- Porter, Michael & Kramer, Mark. (2011). The Big Idea: Creating Shared Value. How to Reinvent Capitalism—and Unleash a Wave of Innovation and Growth. *Harvard Business Review*, 89, 62-77.
- Aresu, S., Hooghiemstra, R., & Melis, A. (2023). Integration of CSR criteria into executive compensation contracts: a cross-country analysis. *Journal of Management*, 49(8), 2766-2804.
- Freeman, R. E. (1999). Divergent stakeholder theory. *Academy of management review*, 24(2), 233-236.
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126655.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process safety and environmental protection*, 117, 408-425.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does industry 4.0 mean to supply chain?. *Procedia manufacturing*, 13, 1175-1182.
- Sharma, R., Jabbour, C. J. C., & Lopes de Sousa Jabbour, A. B. (2021). Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. *Journal of Enterprise Information Management*, 34(1), 230-266.
- Sterling, S. (2004). Higher education, sustainability, and the role of systemic learning. In *Higher education and the challenge of sustainability: Problematics, promise, and practice* (pp. 49-70). Dordrecht: Springer Netherlands.
- McKibben, B. (2007). *Deep economy: The wealth of communities and the durable future*. Macmillan.
- Brown, B. J., Hanson, M. E., Liverman, D. M., & Merideth, R. W. (1987). Global sustainability: Toward definition. *Environmental management*, 11, 713-719.
- Mieg, H. A. (2012). Sustainability and innovation in urban development: concept and case. *Sustainable Development*, 20(4), 251-263.
- Strandhagen, J. O., Vallandingham, L. R., Fragapane, G., Strandhagen, J. W., Stangeland, A. B. H., & Sharma, N. (2017). Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. *Advances in Manufacturing*, 5, 359-369.
- Elkington, J., & Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *procedia CIRP*, 40, 536-541.
- Bocken, N. M., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of cleaner production*, 65, 42-56.

- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T., & Xue, B. (2017). Sustainability aspects of a digitalized industry—A comparative study from China and Germany. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 4, 227-234.
- Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., & Piato, É. L. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of the total environment*, 725, 138177.
- Kiron, D., & Unruh, G. (2018). The convergence of digitalization and sustainability. *MIT Sloan Management Review*, 17.
- Fisher, O., Watson, N., Porcu, L., Bacon, D., Rigley, M., & Gomes, R. L. (2018). Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route. *Journal of manufacturing systems*, 47, 53-68.
- Asiimwe, M. M., & De Kock, I. H. (2019). An analysis of the extent to which industry 4.0 has been considered in sustainability or socio-technical transitions. *South African Journal of Industrial Engineering*, 30(3), 41-51.
- Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., & Piato, É. L. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of the total environment*, 725, 138177.
- Nobre, G. C., & Tavares, E. (2017). Scientific literature analysis on big data and internet of things applications on circular economy: a bibliometric study. *Scientometrics*, 111, 463-492.
- Ribeiro, I., Matos, F., Jacinto, C., Salman, H., Cardeal, G., Carvalho, H., ... & Peças, P. (2020). Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing. *Sustainability*, 12(3), 929.
- Alcayaga, A., Wiener, M., & Hansen, E. G. (2019). Towards a framework of smart-circular systems: An integrative literature review. *Journal of cleaner production*, 221, 622-634.
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662-1687.
- Odważny, F., Wojtkowiak, D., Cyplik, P., & Adamczak, M. (2018). Smart factory within sustainable development and green growth concepts. *LogForum*, 14(4).
- Kuo, T. C., & Smith, S. (2018). A systematic review of technologies involving eco-innovation for enterprises moving towards sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 192, 207-220.
- Strandhagen, J. O., Vallandingham, L. R., Fragapane, G., Strandhagen, J. W., Stangeland, A. B. H., & Sharma, N. (2017). Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. *Advances in Manufacturing*, 5, 359-369.
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484.

- Tirabeni, L., De Bernardi, P., Forliano, C., & Franco, M. (2019). How can organisations and business models lead to a more sustainable society? A framework from a systematic review of the industry 4.0. *Sustainability*, 11(22), 6363.
- Birkel, H., & Müller, J. M. (2021). Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability—A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125612.
- Wiersum, K. F. (1995). 200 years of sustainability in forestry: lessons from history. *Environmental management*, 19, 321-329.
- Wilderer, P. A. (2007). Sustainable water resource management: the science behind the scene. *Sustainability Science*, 2(1), 1-4.
- Ike, D. N. (1984). The system of land rights in Nigerian agriculture. *American Journal of Economics and Sociology*, 43(4), 469-480.
- Dinnen, S., & Firth, S. (2008). *Politics and State-building in the Solomon Islands* (p. 294). ANU Press.
- Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources. *Journal of political Economy*, 39(2), 137-175.
- Malthus, T. R. (1986). An essay on the principle of population (1798). *The Works of Thomas Robert Malthus*, London, Pickering & Chatto Publishers, 1, 1-139.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (2018). The limits to growth. In *Green planet blues* (pp. 25-29). Routledge.
- Borowy, I. (2013). *Defining sustainable development for our common future: A history of the World Commission on Environment and Development (Brundtland Commission)*. Routledge.
- World Commission on Environment. (1987). *Our common future*. Peterson's.
- Kuhlman, T., & Farrington, J. (2010). What is sustainability?. *Sustainability*, 2(11), 3436-3448.
- Nasrollahi, Z., Hashemi, M. S., Bameri, S., & Mohamad Taghvaei, V. (2020). Environmental pollution, economic growth, population, industrialization, and technology in weak and strong sustainability: using STIRPAT model. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 1105-1122.
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of the Total Environment*, 786, 147481.
- Taghvaei, V. M., Nodehi, M., Saber, R. M., & Mohebi, M. (2022). Sustainable development goals and transportation modes: Analyzing sustainability pillars of environment, health, and economy. *World Development Sustainability*, 1, 100018.
- Etxano, I., & Villalba-Eguiluz, U. (2021). Twenty-five years of social multi-criteria evaluation (SMCE) in the search for sustainability: Analysis of case studies. *Ecological Economics*, 188, 107131.

- Bijon, N., Wassenaar, T., Junqua, G., & Dechesne, M. (2022). Towards a sustainable bioeconomy through industrial symbiosis: Current situation and perspectives. *Sustainability*, 14(3), 1605.
- Velenturf, A. P., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable production and consumption*, 27, 1437-1457.
- Ucal, M., & Xydis, G. (2020). Multidirectional relationship between energy resources, climate changes and sustainable development: Technoeconomic analysis. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102210.
- Greenwood, D. T., & Holt, R. P. (2014). Local Economic Development in the 21st Century: Quality of Life and Sustainability. Routledge.
- Pearce, O. (2008). Holistic assessment of sustainability and its application at Halcrow. *Journal of Corporate Citizenship*, (30), 37-65.
- Brundtland, G. H., & Khalid, M. (1987). *Our common future*. Oxford University Press, Oxford, GB.
- Diesendorf, M. (2001). Models of sustainability and sustainable development. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 1(2), 109-123.
- Robert, K. W., Parris, T. M., & Leiserowitz, A. A. (2005). What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice. *Environment: science and policy for sustainable development*, 47(3), 8-21.
- Olawumi, T. O., & Chan, D. W. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. *Journal of cleaner production*, 183, 231-250.
- Axelsson, R., Angelstam, P., Elbakidze, M., Stryamets, N., & Johansson, K. E. (2011). Sustainable development and sustainability: Landscape approach as a practical interpretation of principles and implementation concepts. *Journal of Landscape Ecology*, 4(3), 5-30.
- Norton, B. G. (2005). *Sustainability: A philosophy of adaptive ecosystem management*. University of Chicago Press.
- Axelsson, R., Angelstam, P., Elbakidze, M., Stryamets, N., & Johansson, K. E. (2011). Sustainable development and sustainability: Landscape approach as a practical interpretation of principles and implementation concepts. *Journal of Landscape Ecology*, 4(3), 5-30.
- Ekins, P., Simon, S., Deutsch, L., Folke, C., & De Groot, R. (2003). A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability. *Ecological economics*, 44(2-3), 165-185.
- Ramakrishnan, P. S. (2001). *Ecology and sustainable development*. National Book Trust.
- Sartori, S., Latrónico, F., & Campos, L. (2014). Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature. *Ambiente & sociedade*, 17, 01-22.
- Axelsson, R., Angelstam, P., Elbakidze, M., Stryamets, N., & Johansson, K. E. (2011). Sustainable development and sustainability: Landscape approach as a practical interpretation of principles and implementation concepts. *Journal of Landscape Ecology*, 4(3), 5-30.

- Lee, K. N. (1993). *Compass and gyroscope: integrating science and politics for the environment* (No. ISLAND-0380/XAB). Island Press, Washington, DC (United States).
- Sartori, S., Latrónico, F., & Campos, L. (2014). Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature. *Ambiente & sociedade*, 17, 01-22.
- Elkington, J., & Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
- Schulz, S. A., & Flanigan, R. L. (2016). Developing competitive advantage using the triple bottom line: A conceptual framework. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 31(4), 449-458.
- Hubbard, G. (2009). Measuring organizational performance: beyond the triple bottom line. *Business strategy and the environment*, 18(3), 177-191.
- Norman, W., & MacDonald, C. (2004). Getting to the bottom of “triple bottom line”. *Business ethics quarterly*, 14(2), 243-262.
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental development*, 17, 48-56.
- Geng, Y., & Doberstein, B. (2008). Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development'. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(3), 231-239.
- McDowall, W., Geng, Y., Huang, B., Barteková, E., Bleischwitz, R., Türkeli, S., ... & Doménech, T. (2017). Circular economy policies in China and Europe. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 651-661.
- Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., & Piato, É. L. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of the total environment*, 725, 138177.
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484.
- Boons, F., & Lüdeke-Freund, F. (2013). Business models for sustainable innovation: state-of-the-art and steps towards a research agenda. *Journal of Cleaner production*, 45, 9-19.
- Wals, A. E., & Schwarzin, L. (2012). Fostering organizational sustainability through dialogic interaction. *The Learning Organization*, 19(1), 11-27.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6, 239-242.
- Bonilla, S. H., Silva, H. R., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 10(10), 3740.
- Kagermann, H., Lukas, W. D., & Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI nachrichten*, 13(1), 2-3.

- Diniz, E. H., Yamaguchi, J. A., dos Santos, T. R., de Carvalho, A. P., Alego, A. S., & Carvalho, M. (2021). Greening inventories: Blockchain to improve the GHG Protocol Program in scope 2. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125900
- Downie, J., & Stubbs, W. (2013). Evaluation of Australian companies' scope 3 greenhouse gas emissions assessments. *Journal of Cleaner Production*, 56, 156-163.
- Protocol, G. G. (2013). Technical guidance for calculating scope 3 emissions. *Supplement to the Corporate Value Chain (Scope 3), Accounting & Reporting Standard, in partnership with the Carbon Trust*.
- Agreement, P. (2020). United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).(2015). *Climate Change Secretariat: Bonn, Germany*.
- Green, J. F. (2010). Private standards in the climate regime: the greenhouse gas protocol. *Business and Politics*, 12(3), 1-37.
- Downie, J., & Stubbs, W. (2013). Evaluation of Australian companies' scope 3 greenhouse gas emissions assessments. *Journal of Cleaner Production*, 56, 156-163.
- Patchell, J. (2018). Can the implications of the GHG Protocol's scope 3 standard be realized?. *Journal of Cleaner Production*, 185, 941-958.
- Downie, J., & Stubbs, W. (2013). Evaluation of Australian companies' scope 3 greenhouse gas emissions assessments. *Journal of Cleaner Production*, 56, 156-163.
- Fong, W. K., Sotos, M., Michael Doust, M., Schultz, S., Marques, A., & Deng-Beck, C. (2015). Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories (GPC). *World Resources Institute: New York, NY, USA*.
- Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2014). Integrating triple bottom line input–output analysis into life cycle sustainability assessment framework: the case for US buildings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 1488-1505.
- Brander, M., Gillenwater, M., & Ascui, F. (2018). Creative accounting: A critical perspective on the market-based method for reporting purchased electricity (scope 2) emissions. *Energy Policy*, 112, 29-33.
- Zhang, Z., & Zhao, R. (2022). Carbon emission and credit default swaps. *Finance Research Letters*, 50, 103286.
- Lazonick, W. (2009). The new economy business model and the crisis of US capitalism. *Capitalism and society*, 4(2).
- Penrose, E. T. (2009). *The Theory of the Growth of the Firm*. Oxford university press.
- Brander, M., Gillenwater, M., & Ascui, F. (2018). Creative accounting: A critical perspective on the market-based method for reporting purchased electricity (scope 2) emissions. *Energy Policy*, 112, 29-33.
- Wei, W., Zhang, P., Yao, M., Xue, M., Miao, J., Liu, B., & Wang, F. (2020). Multi-scope electricity-related carbon emissions accounting: A case study of Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119789.

- Yu, X., Dong, Z., Zhou, D., Sang, X., Chang, C. T., & Huang, X. (2021). Integration of tradable green certificates trading and carbon emissions trading: how will Chinese power industry do?. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123485.
- Zhang, L., Liu, D., Cai, G., Lyu, L., Koh, L. H., & Wang, T. (2023). An optimal dispatch model for virtual power plant that incorporates carbon trading and green certificate trading. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108558.
- Song, X., Han, J., Shan, Y., Zhao, C., Liu, J., & Kou, Y. (2020). Efficiency of tradable green certificate markets in China. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121518.
- Schmidt, M., Nill, M., & Scholz, J. (2022). Determining the scope 3 emissions of companies. *Chemical Engineering & Technology*, 45(7), 1218-1230.
- Stenzel, A., & Waichman, I. (2023). Supply-chain data sharing for scope 3 emissions. *npj Climate Action*, 2(1), 7.
- Shrimali, G. (2022). Scope 3 emissions: measurement and management. *The Journal of Impact and ESG Investing*, 3(1), 31-54.
- Huang, Y. A., Weber, C. L., & Matthews, H. S. (2009). Categorization of scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting.
- European Union, *Official Journal of the European Union* 56, L124, 4.5.2013.
- Zampori, L., & Pant, R. (2019). Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. *Publications Office of the European Union: Luxembourg*, 201910, 424613.
- Oblitas-Romero, A. M., Pérez-Díaz, A. N., & Zúñiga, C. L. O. (2023). Application of the Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) and the ISO 14064-1: 2006 standard for the estimation of the carbon footprint at the National University of Jaen in 2021. *Dyna*, 90(226), 90-97.
- Protocol, G. G. (2011). Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard. *World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, Washington, DC*.
- Science Based Targets Initiative. (2021). *SBTi criteria and recommendations*. TWG-INF-002, Version 4.2.
- Muñoz, S., Hosseini, M. R., & Crawford, R. H. (2022). Circular economy software tools at the material and product level: A scoping review. *ASA* 2022, 167.
- De Wachter, H. (2021). *Towards an Integration of life cycle assessment and material flow analysis databases: an efficient estimation and rebalancing of iron flows inecoinvent*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Notarnicola, B.; Sala, S.; Anton, A.; McLaren, S.J.; Saouter, E.; Sonesson, U. The Role of Life Cycle Assessment in Supporting Sustainable Agri-Food Systems: A Review of the Challenges. *J Clean Prod* 2017, 140, 399–409, doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.071.
- Calero, M.; Clemente, G.; Fartdinov, D.; Bañón, S.; Muñoz, I.; Sanjuán, N. Upscaling via a Prospective LCA: A Case Study on Tomato Homogenate Using a Near-to-Market Pasteurisation Technology. *Sustainability* 2022, 14, 1716. <https://doi.org/10.3390/su14031716>.

- Lazonick, W. The New Economy Business Model and Sustainable Prosperity. SSRN Electron. J. 2008, 1-35. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1134982>.
- Massa, L.; Tucci, C.L.; Afuah, A. A Critical Assessment of Business Model Research. Acad. Manag. Ann. 2017, 11, 73–104. <https://doi.org/10.5465/annals.2014.0072>.
- Montanarella, L.; Panagos, P. The Relevance of Sustainable Soil Management within the European Green Deal. Land Use Policy 2021, 100, 104950. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950>.
- Pe'er, G.; Finn, J.A.; Díaz, M.; Birkenstock, M.; Lakner, S.; Röder, N.; Kazakova, Y.; Šumrada, T.; Bezák, P.; Concepción, E.D.; et al. How Can the European Common Agricultural Policy Help Halt Biodiversity Loss? Recommendations by over 300 Experts. Conserv. Lett. 2022, 15, e12901. <https://doi.org/10.1111/conl.12901>.
- Zaborowska, M.; Bernat, K.; Pszczółkowski, B.; Wojnowska-Baryła, I.; Kulikowska, D. Anaerobic Degradability of Commercially Available Bio-Based and Oxo-Degradable Packaging Materials in the Context of Their End of Life in the Waste Management Strategy. Sustainability 2021, 13, 6818. <https://doi.org/10.3390/su13126818>.
- Abdi, A., Taghipour, S., & Khamooshi, H. (2018). A model to control environmental performance of project execution process based on greenhouse gas emissions using earned value management. International Journal of Project Management, 36(3), 397-413.
- Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W. C., Tee, B. T., & You, S. (2022). Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. Energy and Buildings, 256, 111755.
- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2019). Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. Journal of Remanufacturing, 9(3), 169-185.
- Albitar, K., Borgi, H., Khan, M., & Zahra, A. (2023). Business environmental innovation and CO2 emissions: The moderating role of environmental governance. Business strategy and the environment, 32(4), 1996-2007.
- Aresu, S., Hooghiemstra, R., & Melis, A. (2023). Integration of CSR criteria into executive compensation contracts: A cross-country analysis. *Journal of Management*, 49(8), 2766-2804.
- Arrigoni, A., Panesar, D. K., Duhamel, M., Opher, T., Saxe, S., Posen, I. D., & MacLean, H. L. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions of concrete containing supplementary cementitious materials: cut-off vs. substitution. Journal of Cleaner Production, 263, 121465.
- Bataille, C., Waisman, H., Colombier, M., Segafredo, L., Williams, J., & Jotzo, F. (2016). The need for national deep decarbonization pathways for effective climate policy. Climate Policy, 16(sup1), S7-S26.
- Bate, A. F., Wachira, E. W., & Danka, S. (2023). The determinants of innovation performance: an income-based cross-country comparative analysis using the Global Innovation Index (GII). Journal of Innovation and Entrepreneurship, 12(1), 20.
- Bauer, P., Stevens, B., & Hazeleger, W. (2021). A digital twin of Earth for the green transition. Nature Climate Change, 11(2), 80-83.

- Bojacá, C.R.; Wyckhuys, K.A.G.; Schrevens, E. Life Cycle Assessment of Colombian Greenhouse Tomato Production Based on Farmer-Level Survey Data. *J. Clean. Prod.* 2014, 69, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.078>.
- Borghesi, G.; Stefanini, R.; Vignali, G. Life Cycle Assessment of Packaged Organic Dairy Product: A Comparison of Different Methods for the Environmental Assessment of Alternative Scenarios. *J. Food Eng.* 2022, 318, 110902. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110902>.
- Bosona, T.; Gebresenbet, G. Life Cycle Analysis of Organic Tomato Production and Supply in Sweden. *J. Clean. Prod.* 2018, 196, 635–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.087>.
- Bourtsalas, A. T., Zhang, J., Castaldi, M. J., Themelis, N. J., & Karaiskakis, A. N. (2018). Use of non-recycled plastics and paper as alternative fuel in cement production. *Journal of cleaner production*, 181, 8-16.
- Bozkurt, S.; Gligor, D.; Gligor, N. Investigating the Impact of Psychological Customer Engagement on Customer Engagement Behaviors: The Moderating Role of Customer Commitment. *J. Mark. Anal.* 2022, 10, 408–424. <https://doi.org/10.1057/s41270-021-00146-3>.
- Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., ... & Sovacool, B. K. (2022). On the history and future of 100% renewable energy systems research. *IEEE Access*, 10, 78176-78218.
- Burchart-Korol, D., Jursova, S., Folega, P., & Pustejovska, P. (2020). Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120476.
- Chen, C., & Yang, S. (2021). The energy demand and environmental impacts of oxy-fuel combustion vs. post-combustion capture in China. *Energy Strategy Reviews*, 38, 100701.
- Chen, Z., Zhang, X., & Chen, F. (2021). Do carbon emission trading schemes stimulate green innovation in enterprises? Evidence from China. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120744.
- Chong, J., Liu, P., Zhou, G., & Xia, J. (2020). Using MicrobiomeAnalyst for comprehensive statistical, functional, and meta-analysis of microbiome data. *Nature protocols*, 15(3), 799-821.
- Colelli, G., Chacartegui, R., Ortiz, C., Carro, A., Arena, A. P., & Verda, V. (2022). Life cycle and environmental assessment of calcium looping (CaL) in solar thermochemical energy storage. *Energy Conversion and Management*, 257, 115428.
- Colucci, V.; Manfrida, G.; Mendecka, B.; Talluri, L.; Zuffi, C. LCA and Exergo-Environmental Evaluation of a Combined Heat and Power Double-Flash Geothermal Power Plant. *Sustainability* 2021, 13, 1935. <https://doi.org/10.3390/su13041935>.
- Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., ... & Caldeira, K. (2018). Net-zero emissions energy systems. *Science*, 360(6396), eaas9793.
- Degieter, M.; Gellynck, X.; Goyal, S.; Ott, D.; De Steur, H. Life Cycle Cost Analysis of Agri-Food Products: A Systematic Review. *Sci. Total Environ.* 2022, 850, 158012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158012>.

- Del Borghi, A.; Gallo, M.; Strazza, C.; Del Borghi, M. An Evaluation of Environmental Sustainability in the Food Industry through Life Cycle Assessment: The Case Study of Tomato Products Supply Chain. *J. Clean. Prod.* 2014, 78, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.083>.
- Dhaliwal, D. S., Radhakrishnan, S., Tsang, A., & Yang, Y. G. (2012). Nonfinancial disclosure and analyst forecast accuracy: International evidence on corporate social responsibility disclosure. *The accounting review*, 87(3), 723-759.
- Diaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., & Castro-Fresno, D. (2018). Is the Sustainable Development Goals (SDG) index an adequate framework to measure the progress of the 2030 Agenda?. *Sustainable Development*, 26(6), 663-671, link download time series: <https://dashboards.sdginde.org/map>.
- Diaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., & Castro-Fresno, D. (2018). Is the Sustainable Development Goals (SDG) index an adequate framework to measure the progress of the 2030 Agenda?. *Sustainable Development*, 26(6), 663-671.
- Diaz, A., Schöggel, J. P., Reyes, T., & Baumgartner, R. J. (2021). Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 1031-1045.
- Dutta, S., Lanvin, B., Rivera León, L., & Wunsch-Vincent, S. (Eds.). (2023). *Global Innovation Index 2023: Innovation in the face of uncertainty*. WIPO, link download time series: <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-2000-2023-en-main-report-global-innovation-index-2023-16th-edition.pdf>.
- Dziok, T., Bury, M., Bytnar, K., & Burmistrz, P. (2021). Possibility of using alternative fuels in Polish power plants in the context of mercury emissions. *Waste Management*, 126, 578-584.
- Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., & Habert, G. (2018). A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. ETH Zurich.
- Filote, C., Felseghi, R. A., Raboaca, M. S., & Aşchilean, I. (2020). Environmental impact assessment of green energy systems for power supply of electric vehicle charging station. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10471-10494.
- Fujii, H., Iwata, K., Kaneko, S., & Managi, S. (2013). Corporate environmental and economic performance of Japanese manufacturing firms: Empirical study for sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 22(3), 187-201.
- Ganai, S. G., Mir, A. H., Bhat, S. A., & Khan, J. A. (2024). Impacting instruments for export competitiveness: Evidence from India and China in the global manufacturing market. *Global Journal of Emerging Market Economies*, 16(1), 130-142.
- Gavurova, B., Megyesiova, S., & Hudak, M. (2021). Green growth in the OECD countries: A multivariate analytical approach. *Energies*, 14(20), 6719, link download time series: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=GREEN_GROWTH.
- Georgiades, M., Shah, I. H., Steubing, B., Cheeseman, C., & Myers, R. J. (2023). Prospective life cycle assessment of European cement production. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 106998.

- Georgiopoulou, M., & Lyberatos, G. (2018). Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. *Journal of environmental management*, 216, 224-234.
- Global Carbon Budget (2023) – with major processing by Our World in Data. “Annual CO₂ emissions from cement – GCB” [dataset]. Global Carbon Project, “Global Carbon Budget” [original data]. Retrieved April 27, 2024 from <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-cement>.
- Gong, X., & Xu, J. (2022). Geopolitical risk and dynamic connectedness between commodity markets. *Energy Economics*, 110, 106028.
- Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, 38-48.
- Haas, T., & Sander, H. (2020). Decarbonizing transport in the European Union: Emission performance standards and the perspectives for a European Green Deal. *Sustainability*, 12(20), 8381.
- Halisçelik, E., & Soytaş, M. A. (2019). Sustainable development from millennium 2015 to Sustainable Development Goals 2030. *Sustainable Development*, 27(4), 545-572.
- Hong, W. Y. (2022). A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future. *Carbon Capture Science & Technology*, 3, 100044.
- Huang, L., Qin, J., Zhou, Y., Zhu, F., Liu, L., & Shao, L. (2023). Normalization techniques in training dnns: Methodology, analysis and application. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 45(8), 10173-10196.
- IEA (2024), Electric car registrations and sales share in China, United States and Europe, 2018-2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-registrations-and-sales-share-in-china-united-states-and-europe-2018-2023>, Licence: CC BY 4.0
- IEA, C. (2018). Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 10.
- Jenkins, J. D., Luke, M., & Thernstrom, S. (2018). Getting to zero carbon emissions in the electric power sector. *Joule*, 2(12), 2498-2510.
- Jestratić, I.; Uanhoro, J.O.; Creighton, R. To Disclose or Not to Disclose? Fashion Brands’ Strategies for Transparency in Sustainability Reporting. *J. Fash. Mark. Manag. Int. J.* 2022, 26, 36–50. <https://doi.org/10.1108/JFMM-09-2020-0182>.
- Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., & Jäger-Waldau, A. (2021). Green hydrogen in Europe—A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 228, 113649.
- Karkowska, R., & Urjasz, S. (2024). Importance of Geopolitical Risk in Volatility Structure: New Evidence from Biofuels, Crude Oil, and Grains Commodity Markets. *Journal of Commodity Markets*, 100440.
- Kuramochi, T., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2012). Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. *Progress in energy and combustion science*, 38(1), 87-112.

- Le Guenedal, T., Girault, J., Jouanneau, M., Lepetit, F., & Sekine, T. (2020). Trajectory monitoring in portfolio management and issuer intentionality scoring. Available at SSRN 3630302.
- Leal, P. H., Marques, A. C., & Shahbaz, M. (2021). The role of globalisation, de jure and de facto, on environmental performance: evidence from developing and developed countries. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 7412-7431.
- Lemoine, G.J.; Eva, N.; Meuser, J.D.; Falotico, P. Organizational Performance with a Broader Focus: The Case for a Stakeholder Approach to Leadership. *Bus. Horiz.* 2021, 64, 401–413. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2020.10.007>.
- Liang, Y., & Lu, W. (2024). Do export tax rebates promote firm upgrading? Evidences from labor-intensive firms in China. *Journal of Asian Economics*, 90, 101690.
- Liu, J., Tong, D., Zheng, Y., Cheng, J., Qin, X., Shi, Q., ... & Zhang, Q. (2020). Carbon and air pollutant emissions from China's cement industry 1990–2015: trends, evolution of technologies and drivers. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2020, 1-39.
- Liu, Y., & Rui, Z. (2022). A storage-driven CO₂ EOR for a net-zero emission target. *Engineering*, 18, 79-87.
- López Nevárez, V.; Zavala Félix, B.D. La Responsabilidad Social En Las Dimensiones de La Ciudadanía Corporativa. Un Estudio de Caso En La Manufactura Agrícola. *CIRIEC-España Rev. Econ. Pública Soc. Coop.* 2019, 97, 179–211. <https://doi.org/10.7203/CIRIEC-E.97.12566>.
- Marjit, S., & Gupta, K. (2024). Indian Economy: A Story of Faltering Investment. In *The Indian Economy@ 75* (pp. 123-138). Routledge India.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and concrete research*, 114, 115-124.
- Murray, D. (2018). Geopolitical risk and commodities: an investigation. *Glob. Commod. Appl. Res. Dig.*, 3, 95-106.
- Naseer, M.; Persson, T.; Hjelkrem, A.-G.R.; Ruoff, P.; Verheul, M.J. Life Cycle Assessment of Tomato Production for Different Production Strategies in Norway. *J. Clean. Prod.* 2022, 372, 133659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133659>.
- National Bureau of Statistics of China. (2013). China statistical abstract.
- Nguyen, T. H., Elmagrhi, M. H., Ntim, C. G., & Wu, Y. (2021). Environmental performance, sustainability, governance and financial performance: Evidence from heavily polluting industries in China. *Business Strategy and the Environment*, 30(5), 2313-2331.
- Oturakci, M. (2023). Comprehensive analysis of the global innovation index: statistical and strategic approach. *Technology Analysis & Strategic Management*, 35(6), 676-688.
- Pamenter, S., & Myers, R. J. (2021). Decarbonizing the cementitious materials cycle: A whole-systems review of measures to decarbonize the cement supply chain in the UK and European contexts. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 359-376.
- Pisciotta, M., Pilorgé, H., Davids, J., & Psarras, P. (2023). Opportunities for cement decarbonization. *Cleaner Engineering and Technology*, 15, 100667.

- Pushkar, S. Life-Cycle Assessment of LEED-CI v4 Projects in Shanghai, China: A Case Study. *Sustainability* 2023, 15, 5722. <https://doi.org/10.3390/su15075722>.
- Rahla, K. M., Mateus, R., & Bragança, L. (2019). Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC). *Journal of Cleaner Production*, 220, 445-459.
- Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. (2015). Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel*, 145, 84-99.
- Razmjoo, A., Kaigutha, L. G., Rad, M. V., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. J. R. E. (2021). A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area. *Renewable Energy*, 164, 46-57.
- Razzaq, A., Sharif, A., Ozturk, I., & Afshan, S. (2023). Dynamic and threshold effects of energy transition and environmental governance on green growth in COP26 framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113296.
- Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A., & Ferguson, M. (2018). How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. *Atmospheric Environment*, 185, 64-77.
- Rietveld, R.; Van Dolen, W.; Mazloom, M.; Worrying, M. What You Feel, Is What You like Influence of Message Appeals on Customer Engagement on Instagram. *J. Interact. Mark.* 2020, 49, 20–53. <https://doi.org/10.1016/j.intmar.2019.06.003>.
- Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Teksoz, K., Durand-Delacre, D., & Sachs, J. D. (2017). National baselines for the Sustainable Development Goals assessed in the SDG Index and Dashboards. *Nature geoscience*, 10(8), 547-555.
- Sestino, A.; Rossi, M.V.; Giraldi, L.; Faggioni, F. Innovative Food and Sustainable Consumption Behaviour: The Role of Communication Focus and Consumer-Related Characteristics in Lab-Grown Meat (LGM) Consumption. *Br. Food J.* 2023, ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2022-0751>.
- Shu, X., Guo, Y., Yang, W., Wei, K., & Zhu, G. (2021). Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Reports*, 7, 2302-2315.
- Sica, D.; Esposito, B.; Malandrino, O.; Supino, S. The Role of Digital Technologies for the LCA Empowerment towards Circular Economy Goals: A Scenario Analysis for the Agri-Food System. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2022, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02104-2>.
- Sigel, A. CSR statements: Incentives and enforcement in the wake of the business roundtable's statement on corporate purpose. *Boston Univ. Law Rev.* 2021, 101, 803–833.
- Singh, D., & Singh, B. (2020). Investigating the impact of data normalization on classification performance. *Applied Soft Computing*, 97, 105524.
- Sinha, A., Bekiros, S., Hussain, N., Nguyen, D. K., & Khan, S. A. (2023). How social imbalance and governance quality shape policy directives for energy transition in the OECD countries?. *Energy Economics*, 120, 106642.

- Sun, Y.; Bao, Q.; Taghizadeh-Hesary, F. Green Finance, Renewable Energy Development, and Climate Change: Evidence from Regions of China. *Hum. Soc. Sci. Commun.* 2023, 10, 107. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01595-0>.
- Thwe, E., Khatiwada, D., & Gasparatos, A. (2021). Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100007.
- Urom, C., & Ndubuisi, G. (2023). Do geopolitical risks and global market factors influence the dynamic dependence among regional sustainable investments and major commodities?. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 91, 94-111.
- Waleed, K., & Mirza, F. M. (2023). Examining fuel choice patterns through household energy transition index: an alternative to traditional energy ladder and stacking models. *Environment, development and sustainability*, 25(7), 6449-6501, link download time series: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2023.pdf.
- Waleed, K., & Mirza, F. M. (2023). Examining fuel choice patterns through household energy transition index: an alternative to traditional energy ladder and stacking models. *Environment, development and sustainability*, 25(7), 6449-6501.
- Wang, F., Yang, S., Reisner, A., & Liu, N. (2019). Does green credit policy work in China? The correlation between green credit and corporate environmental information disclosure quality. *Sustainability*, 11(3), 733.
- Wang, Q. J., Wang, H. J., & Chang, C. P. (2022). Environmental performance, green finance and green innovation: what's the long-run relationships among variables?. *Energy Economics*, 110, 106004.
- Wang, Q., Su, B., Sun, J., Zhou, P., & Zhou, D. (2015). Measurement and decomposition of energy-saving and emissions reduction performance in Chinese cities. *Applied Energy*, 151, 85-92.
- Wang, Y., Yi, H., Tang, X., Wang, Y., An, H., & Liu, J. (2023). Historical trend and decarbonization pathway of China's cement industry: A literature review. *Science of The Total Environment*, 164580.
- Wiedmann, T., Chen, G., Owen, A., Lenzen, M., Doust, M., Barrett, J., & Steele, K. (2021). Three-scope carbon emission inventories of global cities. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3), 735-750.
- Witulski, N., & Dias, J. G. (2020). The sustainable society index: Its reliability and validity. *Ecological Indicators*, 114, 106190.
- Wolf, S., Teitge, J., Mielke, J., Schütze, F., & Jaeger, C. (2021). The European Green Deal—more than climate neutrality. *Intereconomics*, 56, 99-107.
- Wu, T., Ng, S. T., & Chen, J. (2022). Deciphering the CO₂ emissions and emission intensity of cement sector in China through decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131627.
- Wu, Y., & Zhang, L. (2017). Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 129-145.

- Wunderlich, J., Armstrong, K., Buchner, G. A., Styring, P., & Schomäcker, R. (2021). Integration of techno-economic and life cycle assessment: Defining and applying integration types for chemical technology development. *Journal of cleaner production*, 287, 125021.
- Zhou, Y., Xu, G., Li, H., Chen, Y., Xu, X., & Li, M. (2023). Effect of greenhouse gas emissions on the life cycle of biomass energy production and conversion under different straw recycling modes. *Environmental Research*, 238, 117184.

Sitografia

Agenzia delle Dogane e dei Monopoli (ADV), 2025, tool online al link: <https://www.adm.gov.it/portale/cbam-carbon-border-adjustment-mechanism>;

Gruppo Maire, Bilancio di Sostenibilità 2023, al link: https://www.groupmaire.com/media/filer_public/38/1a/381a68a5-f432-44c5-8c78-3596e62b5cb5/bilancio_di_sostenibilita_2023_contenente_la_dnf_2023.pdf;

Trading Economics, 2025, tool online al link: <https://tradingeconomics.com>;