



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE MATEMATICHE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA LIFE CYCLE ASSESSMENT AD UN
PRODOTTO PER IL NUOTO E POSSIBILI SCENARI PER IL MIGLIORAMENTO
DELLA SOSTENIBILITÀ**

**APPLICATION OF THE LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY TO A
SWIMMING PRODUCT AND POSSIBLE SCENARIOS FOR THE
SUSTAINABILITY IMPROVEMENT**

Relatore:

Chiar.mo PROF. MICHELE GERMANI

Tesi di Laurea di:

FABIO MARIANI PRIMIANI

Correlatori:

ING. MARTA ROSSI

ING. ROBERTO MENGHI

A. A. 2020/2021

“Se tutti gli abitanti della Terra consumassero le risorse come fanno gli italiani, avremmo bisogno di 2,6 pianeti Terra”

Mathis Wackernagel

INDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUZIONE | 3 |
| Capitolo 1 – LA SOSTENIBILITA’ AMBIENTALE | 4 |
| 1.1 Definizione di sostenibilità ambientale di prodotto | 5 |
| 1.2 Le fasi del ciclo di vita di prodotto | 10 |
| Capitolo 2. La METODOLOGIA E GLI STRUMENTI LIFE CYCLE ASSESSMENT | 12 |
| 2.1 La normativa | 13 |
| 2.2 Le fasi dell’analisi LCA | 15 |
| 2.2.1 Obiettivi e campo di applicazione | 16 |
| 2.2.2 Analisi di Inventario | 18 |
| 2.2.3 Valutazione degli impatti | 19 |
| 2.2.4 Interpretazione dei risultati e miglioramento | 21 |
| 2.2.5 Calcolo dell’incertezza | 22 |
| 2.3 Il software SimaPro | 22 |
| Capitolo 3 – CASO STUDIO | 25 |
| 3.1. Obiettivo | 25 |
| 3.2 Unità funzionale | 26 |
| 3.3 Confini del sistema | 27 |
| 3.4 Categorie di impatto ambientale, modelli e indicatori | 28 |
| 3.5 Raccolta dati | 31 |
| 3.6 Modellazione | 32 |
| 3.6.1 Analisi con dataset generici | 33 |
| 3.6.2 Analisi con dataset Indiani | 38 |
| 3.7 Valutazione e interpretazione dei risultati | 42 |
| Capitolo 4 – SCENARI DI MIGLIORAMENTO | 45 |
| 4.1 Produzione in Italia | 45 |
| 4.2 Utilizzo materiale Bio-based per la ciabatta | 46 |
| 4.3 Utilizzo di materiale riciclato da scarti di produzione | 47 |
| CONCLUSIONI | 50 |
| BIBLIOGRAFIA | 51 |

INTRODUZIONE

L'attività umana per la produzione di beni, ha come conseguenza l'uso di materie prime, acqua, energia e l'immissione in atmosfera di sostanze più o meno inquinanti e tossiche. Il miglioramento dello stile di vita degli ultimi 50 anni, è dovuto anche all'aumento della produzione industriale che ha comportato un sempre più grosso consumo di risorse naturali, in misura molto maggiore rispetto a quella che la natura riesce a rigenerare. L'emissione crescente di sostanze inquinanti nell'acqua e nel suolo, ha provocato e provoca sempre di più, l'acidificazione e l'eutrofizzazione delle acque con la conseguente riduzione delle specie ittiche; l'erosione del suolo, la perdita di territorio utilizzabile per l'agricoltura e della biodiversità. L'emissione di sostanze nocive nell'aria come la CO₂ ha comportato e comporta, l'aumento dell'effetto serra e quindi della temperatura della terra, causa del cambiamento climatico che provoca un sempre maggior numero di fenomeni devastanti per il territorio e le persone che vi abitano. I governi, la politica, i giovani, le varie organizzazioni ambientaliste, cercano sempre di più, di sensibilizzare i cittadini alla problematica, per indurli a richiedere ed acquistare beni ecocompatibili prodotti con un basso impatto ambientale. Le aziende quindi cercano di riconvertirsi ad una produzione più green e, per comunicare la trasformazione dei loro prodotti e del loro sistema produttivo, si servono anche di certificazioni ed etichettature ambientali, rilasciate da enti terzi certificatori. Uno strumento per valutare la sostenibilità di un bene o servizio, in maniera oggettiva e scientifica, è rappresentato dalla metodologia LCA che è in grado di valutare l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla fase di reperimento delle materie prime al fine vita.

In questo lavoro di tesi, ho valutato il ciclo di vita, dalla produzione al fine vita, di un paio di ciabatte Hydrosoft Arena. Per farlo ho utilizzato il software SimaPro. Ho ipotizzato due scenari di produzione, uno in cui le ciabatte vengono prodotte in un Paese qualsiasi che abbia un impatto pesato rispetto alla produzione mondiale e un altro scenario per cui le ciabatte vengono prodotte in India. In entrambi questi scenari è previsto il trasporto in Italia dove avviene poi il seguente uso e fine vita. Per quanto riguarda l'uso ho ipotizzato due scenari: il lavaggio una volta al mese per due anni o il mancato lavaggio. Relativamente al fine vita ho ipotizzato sia lo scenario per cui il packaging viene riciclato mentre il resto finisce in discarica, sia quello in cui tutto viene conferito in discarica. Ho poi valutato quale sarebbe l'impatto se le ciabatte fossero prodotte in Italia, e se, per produrle, fosse usato, per il cinquanta per cento, materiale riciclato dagli scarti di produzione. Infine ho analizzato l'impatto di una ciabatta prodotta completamente con un materiale biodegradabile al 100% come il PLA.

Capitolo 1 – LA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE

Nel 1987 la Commissione Mondiale delle Nazioni Unite per l'ambiente e lo sviluppo pubblicò il documento “Our Common Future” cosiddetto rapporto Brundtland [1]. Il rapporto comprendeva il concetto di sviluppo sostenibile visto come “*uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni*”. Un ampliamento del concetto si ebbe nel 1992 con il piano d'azione Agenda 21 [2], il documento strategico con più di 2500 raccomandazioni d'azione, che indicava tre elementi chiave per aiutare i Paesi a raggiungere uno sviluppo sostenibile ovvero: le informazioni, che devono essere fornite a tutti gli utenti; l'integrazione tra aziende dello stesso settore al fine di cooperare per migliorare le problematiche ambientali e sociali presenti in tutti i processi di sviluppo e, la partecipazione del pubblico al processo decisionale necessario.

La Dichiarazione del Millennio delle Nazioni Unite, firmata nel settembre del 2000, identifica tre dimensioni di sviluppo: economico, sociale e protezione dell'ambiente.

Lo sviluppo sociale per essere sostenibile deve essere in grado di garantire le condizioni di benessere umano distribuendole equamente per classi e generi.

La sostenibilità economica prevede che venga garantito il livello minimo di reddito ritenuto necessario per raggiungere un adeguato standard di vita in ogni Paese.

Lo sviluppo che riguarda l'ambiente, per essere sostenibile, richiede che la società, nel progettare le attività umane al fine di soddisfare i bisogni dei suoi cittadini, miri a preservare le risorse vitali del Pianeta.

Questo comporta la necessità di un uso sostenibile delle energie rinnovabili e dell'acqua; un approvvigionamento delle risorse e dei materiali necessari alla produzione che sia possibile reintegrare naturalmente; la riduzione di emissioni nocive nell'aria, alcune delle quali responsabili dell'aumento della temperatura e dei cambiamenti climatici.

Viene introdotto il concetto di “capitale naturale critico” che rappresenta il livello minimo di una risorsa necessario a garantire la riproducibilità dell'ecosistema, ovvero, le forme di capitale naturale essenziali alla vita biologica che non possono venire sostituite da nessun altro tipo di capitale e, il concetto di “capacità di carico” che indica il grado di inquinamento e di rifiuti che il Pianeta è in grado di sopportare [3].

Holden ed altri autori [4] hanno previsto, nel 2014, una rivisitazione del rapporto Brundtland in cui prevedono un modello basato su quattro dimensioni primarie necessarie a valutare la sostenibilità di un Paese e cioè: la salvaguardia della sostenibilità ecologica a lungo termine; la soddisfazione dei bisogni umani di base; la promozione dell'equità intra generazionale e di quella intergenerazionale. Secondo questi autori la crescita economica non rientra tra le dimensioni primarie ma facilita il soddisfacimento di tali dimensioni, per ognuna delle quali sono stati previsti degli indicatori cioè, dei valori di soglia che dovranno essere soddisfatti entro il 2030. Questi quattro valori sono compresi in quello che viene definito il Sustainable Development Space.

Per indicare la salvaguardia della sostenibilità ecologica nel lungo termine, è stato scelto il concetto di “impronta ecologica” che indica la pressione ambientale, cioè valuta il consumo umano di risorse naturali relativamente alla capacità della terra di rigenerarle. Per misurarla è stata deciso di utilizzare l'ettaro globale pro-capite e gli autori hanno stabilito che il valore di soglia sia 2,3 gha. Per quanto riguarda l'Italia, l'Overshoot Day¹, ovvero il giorno del sovrasfruttamento delle risorse, si è verificato, quest'anno il 24 maggio. Ciò significa che l'italiano medio ha un'impronta ecologica di 4,15 mentre la media globale già molto alta, è di 1,78.

La politica dell'Unione Europea è sempre di più rivolta ad un'opera di sensibilizzazione alla produzione e allo sviluppo ecocompatibile. Si cerca quindi di incentivare le aziende a convertire la produzione in maniera sempre più sostenibile, anche con incentivi fiscali. Si promuove l'informazione ai cittadini, incentivando le aziende ad acquisire certificazioni o etichettature di carattere ambientale. Inoltre si investe nella ricerca e nello sviluppo della tecnologia di alto livello, come avviene con il progetto Horizon 2021-2027 in cui sono stati stanziati quasi cento miliardi per affrontare le problematiche ambientali².

1.1 Definizione di sostenibilità ambientale di prodotto

La produzione sostenibile può essere definita come “la creazione di prodotti attraverso processi produttivi che minimizzano l'impatto ambientale, conservano l'energia e le risorse naturali, sono sicuri per i dipendenti, le comunità ed i clienti, e sono economicamente sani” [5].

Per promuovere la sostenibilità in produzione, occorre una visione che si estenda oltre il prodotto e i processi produttivi e comprenda anche il sistema, la cui portata va dalla linea produttiva, all'impianto, all'azienda e, infine, alla “supply chain”.

In tal senso, troviamo nelle tre dimensioni della sostenibilità (ambientale, economica e sociale) uno dei fattori chiave.

Riferendoci al prodotto, questo deve essere pensato considerando l'impatto sull'intero ciclo di vita (comprendente le fasi di pre-produzione, produzione, utilizzo e post utilizzo) o addirittura, su cicli di vita multipli, al fine di assicurare un flusso di materiali continuo, in accordo con i principi dell'economia circolare e del Green Manufacturing.

In aggiunta alla metodologia delle 3R del Green Manufacturing che ricordiamo sono: ridurre, riutilizzare e riciclare, quando parliamo di produzione sostenibile, l'approccio

¹ <https://www.footprintnetwork.org/>

² https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/funding/documents/ec_rtd_horizon-europe-overview.pdf

dovrebbe essere del tipo basato sulla filosofia delle 6R, ovvero basato su sei fondamentali azioni, così come proposto da [6], Figura 1.

Ridurre: riduzione delle risorse in pre-produzione; riduzione dell'utilizzo di energia, materiali ed altre risorse in produzione; la riduzione delle emissioni e dei rifiuti nella fase di utilizzo.

Riutilizzare: riutilizzo dell'intero prodotto o di sue parti, dopo il primo ciclo di vita, per successivi cicli, in modo tale da limitare l'impiego di materiali vergini per nuovi prodotti e/o componenti

Riciclare: per avere la possibilità di convertire in nuovi materiali o prodotti

Recuperare: dopo la fase di utilizzo, tramite disassemblaggio, smistamento e pulizia, per l'impiego in successivi cicli di vita

Riprogettare: nel senso di studiare come impiegare risorse, materiali e componenti da vecchi prodotti per la generazione successiva.

Rilavorare: riprocessare prodotti già usati per riportarli al loro stato originale, o come nuovi, attraverso il riutilizzo di più parti possibili senza perdite di funzionalità.

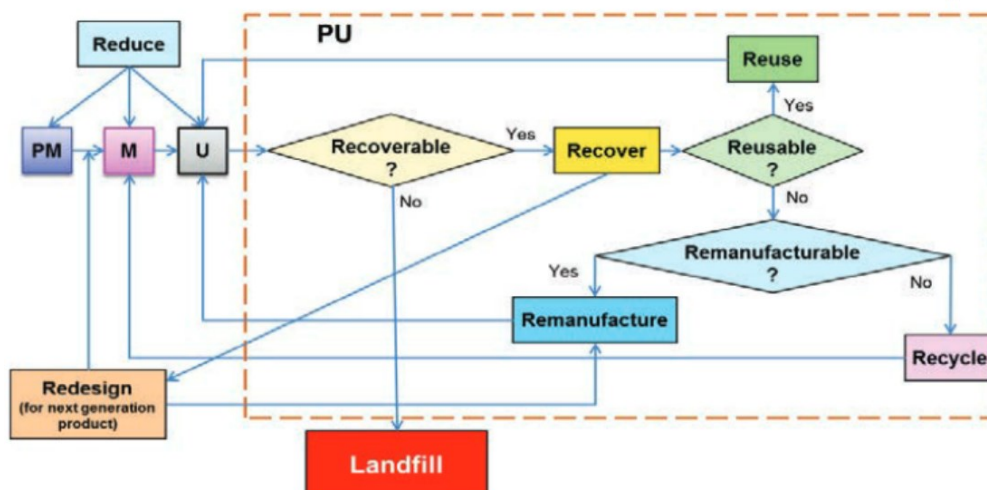


Figura 1. Applicazione della metodologia 6R [6].

Pertanto, oltre alle tre dimensioni della sostenibilità, gli altri due cardini della produzione sostenibile sono la metodologia 6R e l'analisi del ciclo vita del prodotto.

Occorre ora definire come misurare le performance di sostenibilità del sistema. In Figura 2, viene riportata la “sustainability performance measurement house” [5], dove alla base troviamo il concetto di produzione sostenibile con i tre pilastri principali, nel mezzo troviamo il sistema di misurazione e valutazione delle performance di

sostenibilità. Al centro abbiamo l'insieme degli stakeholders, ovvero delle persone che hanno un interesse legittimo nei confronti dell'impresa e delle sue attività.

Ovviamente, le attività dell'azienda potranno avere un impatto positivo o negativo sugli stakeholders stessi. Le metriche di prodotto e di processo, dovranno considerare tutti gli aspetti legati alla produzione sostenibile e contribuiranno alla definizione delle metriche di sistema, rappresentate dal tetto di questa casa.

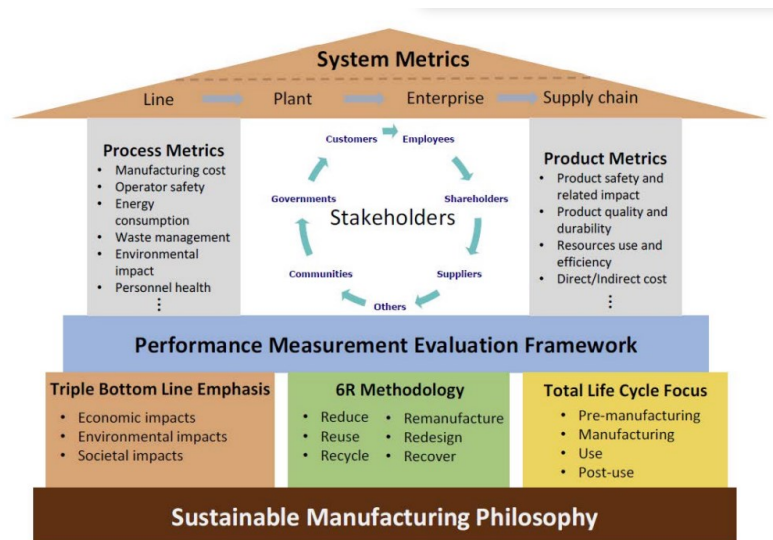


Figura 2. Sustainability performance measurement house [5].

Sono state proposte delle metriche individuando sei elementi per una produzione sostenibile: costo, consumo di energia, gestione degli sprechi, impatto ambientale, salute del personale e sicurezza degli operatori. Le metriche si suddividono in due grandi categorie, le metriche di prodotto e quelle di processo [7].

Per quanto riguarda la prima categoria (metriche di prodotto), vengono classificate in base alle quattro fasi del ciclo di vita del prodotto, ovvero:

1. Pre-produzione (pre-manufacturing, PM)
2. Produzione (manufacturing, M)
3. Utilizzo (use, U)
4. Post-utilizzo (post-use, PU)

Di seguito alcuni esempi, tratti da [7], dove è possibile trovare un elenco esteso.

| Tipologia di metrica | Esempio | Unità di misura | PM | M | U | PU |
|-----------------------------|--|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Residui | Emissioni (anidride carbonica, ossidi di azoto,..) | Massa/unità | X | X | X | X |
| Energia usata ed efficienza | Energia per la rifabbricazione | kWh/unità | | X | X | X |
| | Energia per la manutenzione e riparazione | kWh/unità | | | X | |
| Uso di acqua ed efficienza | Tasso di uso dell'acqua riciclata | l/unità | X | X | | X |
| | | | | | | |

Alcune metriche di prodotto e processo sono interconnesse in quanto il prodotto è frutto di un processo di produzione. Infatti, sempre in [7], si sostiene che dal punto di vista del prodotto i processi produttivi non sono altro che una piccola parte del loro ciclo di vita.

La sostenibilità ambientale dei processi viene valutata sulla base di tre metriche ambientali [8]:

- Consumo d'acqua
- L'utilizzo delle materie prime
- Consumo di energia

Viene distinto tra acqua richiesta, utilizzata o netta, cioè persa ovvero non riutilizzata da un altro processo nella linea o riciclata.

Per l'utilizzo delle materie prime, si prende in considerazione il materiale scartato in modo da ridurlo al minimo.

Infine, per il consumo di energia, si considera sia quello richiesto nel processo di produzione sia quello necessario per il trasporto e lo stoccaggio.

Da tutto ciò possiamo dedurre che un prodotto sostenibile dal punto di vista ambientale dovrebbe essere il più possibile prodotto con materiale riciclato o almeno proveniente da fonti rinnovabili, dovrebbe avere una o più parti organiche, meglio se biodegradabile almeno in alcune componenti, dovrebbe avere una tossicità nulla ed essere prodotto con il più basso consumo di energia possibile, meglio se proveniente da fonti rinnovabili, infine dovrebbe essere riciclabile il più possibile.

L'unione Europea, proprio per perseguire questi obiettivi, alla fine degli anni novanta, ha introdotto la IPP Integrated Product Policy, per cercare di responsabilizzare i

produttori sul ciclo totale del prodotto, (produzione, utilizzo, distruzione o recupero a fine vita).

I principi su cui si basa questa politica sono basati sulla considerazione del ciclo di vita del prodotto; sulla collaborazione con il mercato per incentivare domande e offerta di prodotti ecologici; sul coinvolgimento delle parti interessate (produttori e consumatori); sul miglioramento continuo e, sulla molteplicità degli strumenti d'azione.

Questa policy viene di volta in volta adattata ai singoli settori tramite delle direttive specifiche per il recupero a fine vita del prodotto.

Nel 2020, Bruxelles ha pubblicato il piano d'azione per l'economia circolare CEAP³ che prevede una serie di iniziative tra cui ricordo la Sustainable Product Initiative, che stabilisce che entro la fine di quest'anno sia estesa la direttiva sulla progettazione ecocompatibile dei beni, e che determina i requisiti minimi di sostenibilità, nonché l'obbligo di informazioni sui prodotti immessi sul mercato dell'Unione Europea. Infatti, nel corso degli anni, i cittadini stanno diventando sempre più attenti e sensibili all'acquisto di prodotti ecologici, e quindi, anche le aziende sono sempre più interessate a presentare i loro prodotti come eco friendly e green. Perciò, l'Unione Europea, ha predisposto tre tipologie di etichette ambientali che i produttori possono ottenere da enti terzi certificatori.

Il tipo 1 (ISO 14024) che prende in considerazione l'intero ciclo di vita del prodotto, basata su criteri scientifici e di trasparenza quale ad esempio l'Ecolabel europea. Si tratta di etichettature "business to consumer" che si rivolgono al consumatore e che attestano che il prodotto ha un ridotto impatto ambientale nel suo intero ciclo di vita, e riguardano quindi, non solo il produttore ma anche l'eventuale importatore e il rivenditore. Per poterla ricevere i produttori devono aver ridotto gli impatti ambientali, le emissioni nocive, l'utilizzo di materie prime, di energia, la produzione di rifiuti, aumentato la durata della vita del bene e fornito informazioni chiare e trasparenti. Mentre questa certificazione si riferisce al singolo prodotto, la certificazione EMAS riguarda l'intera azienda.

Il tipo 2 (ISO 14021) sono autodichiarazioni di carattere ambientale, rivolte o all'utilizzatore finale o a una figura all'interno della filiera produttiva.

Il tipo 3 (ISO 14025) sono Dichiarazioni Ambientali di Prodotto EPD e si basano su Analisi del Ciclo di Vita e su regole definite PCR che permettono, tramite criteri discussi e condivisi, di fare confronti tra prodotti diversi appartenenti alla stessa categoria merceologica. I destinatari possono essere o i consumatori o una figura all'interno della filiera produttiva. Tali informazioni relative a prodotti o servizi, sono

³ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1/language-en>

ottenute attraverso l'applicazione della LCA, come espressamente previsto dalla normativa ISO 14040 relativa a Life Cycle Assessment, Principles and framework. E' necessario che le aziende nel redarre tali documenti seguano delle regole divise per categorie merceologiche, dette Product Category rules, ciò al fine di garantire la rigosità delle informazioni e permettere il confronto delle prestazioni ambientali di beni o servizi della medesima categoria.

Fine dell'Unione Europea è quello di promuovere la comunicazione da parte delle aziende di relazioni rigorose e certificate da terzi in ambito di sostenibilità ambientale, secondo quanto stabilito dal Sistema comunitario di Ecogestione e Audit Emas. In queste dichiarazioni le aziende indicano le loro prestazioni ambientali allo stato attuale e i loro obiettivi, nonché le modalità con cui perseguirli.

Uno strumento importante per ottenere alcune di queste etichette ambientali è rappresentato dalla metodologia LCA che permette la quantificazione degli impatti ambientali di beni o servizi.

1.2 Le fasi del ciclo di vita di prodotto

Il ciclo di vita di un prodotto è dato dalla successione di tutti quei processi che concorrono alla sua creazione, al suo utilizzo e al suo smaltimento, figura 3.



Figura 3. Esempio di ciclo vita del prodotto.

L'impatto ambientale di un prodotto è legato ai flussi in entrata (risorse utilizzate quali ad esempio energia, acqua ecc.) e in uscita (emissioni in aria, acqua e suolo) di ogni singola fase dell'intero ciclo di vita.

Da un punto di vista ingegneristico, esse sono in sintesi: la progettazione, la scelta delle materie prime, la lavorazione dei materiali e produzione, il packaging, il trasporto, la fase d'uso e la fine vita del prodotto.

Progettazione. Fase fondamentale in cui vengono definite le caratteristiche di un prodotto che, se di alta qualità, avrà un impatto ambientale minore dato che dura di più. Lo stesso risultato si ha se il bene può essere facilmente riparato e le sue componenti sostituite. Questa fase viene molte volte erroneamente trascurata, ma, è proprio durante l'ideazione che si può ridurre lo spreco, ad esempio, con l'ottimizzazione dell'utilizzo di risorse, la scelta opportuna del tipo e della qualità delle materie prime, l'ottimizzazione della previsione dell'imballaggio o prevedendo un livello di disassemblabilità del prodotto.

Scelta materie prime. L'estrazione o la raccolta delle materie prime ha un forte impatto ambientale. E' necessario tenere conto della scarsità e dell'esauribilità delle suddette materie. Un po' ovunque lo sfruttamento delle risorse naturali supera di molto la loro capacità di rigenerarsi. È il caso di materie prime quali risorse minerarie, ma anche di altre risorse naturali quali l'acqua, la stabilità climatica, la biodiversità e l'aria. Lo sfruttamento eccessivo delle risorse sta conducendo i sistemi ambientali del pianeta al limite dell'instabilità. Il concetto di «limiti del pianeta» (planetary boundaries) è stato pubblicato nel 2009 da una comunità di ricercatori tra cui Johann Rockström e Will Steffen [9]. Già recepito negli obiettivi della politica climatica internazionale, tale strumento tiene conto di nove limiti biofisici decisivi per il «sistema Terra», il cui superamento potrebbe avere conseguenze gravi. Tra questi figurano ad esempio i cambiamenti climatici, la perdita di biodiversità o i cicli biogeochimici (azoto e fosforo)

Lavorazione e produzione:

I processi di produzione hanno elevati consumi di energia e possono essere potenzialmente nocivi per l'ambiente.

Imballo: spesso utilizzato come opera di marketing anche senza che vi sia una reale necessità per il prodotto (es frutta e verdura).

Trasporto: in un'analisi di LCA viene analizzato non solo il trasporto della distribuzione del prodotto finito, ma anche il trasporto delle materie prime e dei semilavorati alla fabbrica. Il trasporto viene calcolato a seconda del mezzo utilizzato e del suo uso di combustibile

Utilizzo: l'impatto della fase d'uso differisce notevolmente da prodotto a prodotto. Tale impatto è dato principalmente dalla durata del prodotto e da tutto ciò che è necessario o utile per garantirne l'uso o un buon funzionamento, come la pulizia o la manutenzione ordinaria

Fine vita: l'impatto della fase di fine vita è fortemente collegato con la fase d'ideazione, infatti dipende da come si è pensato il prodotto.

Capitolo 2 - LA METODOLOGIA E GLI STRUMENTI LIFE CYCLE ASSESSMENT

La valutazione del ciclo vita, "Life Cycle Assessment" (LCA), è una metodologia che permette di valutare i possibili impatti dei prodotti industriali, già in fase di concezione e progettazione, considerando tutte le fasi della loro vita, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento finale. In sostanza, viene valutato l'insieme delle interazioni che un prodotto (o anche un servizio) ha con l'ambiente, esaminando il suo intero ciclo vita dalle fasi di pre-produzione (quindi anche estrazione e produzione dei materiali), produzione, trasporto, distribuzione, uso (quindi anche riuso e manutenzione), riciclaggio e dismissione finale, figura 4.

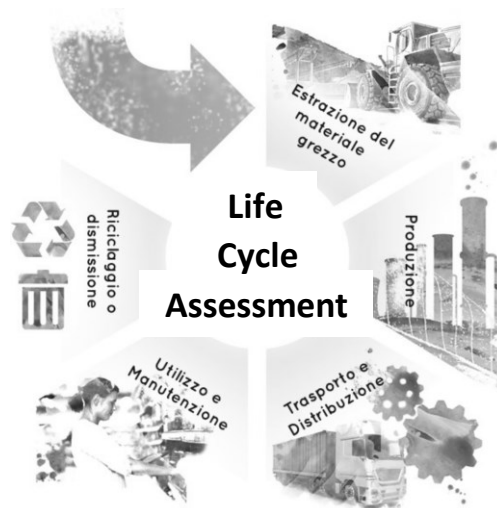


Figura.4. LCA nel ciclo vita del prodotto.

A seguito dello stimolo prodotto dalle politiche europee su ambiente, energia, risorse e rifiuti, il LCA risulta essere uno strumento sempre più necessario per la definizione di politiche pubbliche e per la competitività delle imprese. A livello europeo il LCA rappresenta un elemento di qualificazione in tutti i campi dove è richiesta una valutazione della sostenibilità. Infatti, permette di valutare i vantaggi ecologici di un prodotto, attraverso la quantificazione degli impatti ambientali connessi ai processi produttivi e alle altre attività dell'azienda. Dal lato consumatore, il LCA può permettere di valutare le caratteristiche ecologiche di un prodotto, che acquista credibilità in quanto viene affiancato da dati numerici sugli impatti.

Lo scopo è quello di determinare un quadro completo delle interazioni con l'ambiente, del bene o del servizio, finalizzato a comprendere le conseguenze sul territorio direttamente o indirettamente causate, e quindi a dare le informazioni necessarie per definire i comportamenti e gli effetti ambientali di una attività ed a identificare le opportunità di miglioramento al fine di raggiungere soluzioni più sostenibili.

Infatti, un maggior impegno delle imprese verso pratiche più sostenibili nel condurre le proprie attività, potrebbe consentire loro di identificare opportunità di riduzione dei costi e maggiore efficienza nell'impiego delle risorse. In tal senso, l'adozione di una prospettiva del ciclo di vita, dove i principali attori non limitano la propria responsabilità ai soli stadi della filiera da essi direttamente controllati, rappresenta il presupposto per una solida valutazione della sostenibilità. L'approccio LCA viene utilizzato per consapevolizzare i processi decisionali aziendali sulle potenziali conseguenze, in termini di costo e impatto ambientale (Eco-design). Infine, anche i programmi di marketing trovano giovamento dall'applicazione della LCA, in termini di Eco-marketing e definizione di marchi di qualità ecologica.

Il LCA può essere applicato anche a contesti più ampi come il Life Cycle Thinking, che valuta in che modo, sia i prodotti di consumo che le attività umane, hanno un impatto sull'ambiente lungo l'intero ciclo di vita, in una visione a 360 gradi di un intero prodotto o sistema di attività. L'obiettivo del Life Cycle Thinking è quindi rendere, le persone e le aziende, più consapevoli di come le loro azioni abbiano un impatto sul Pianeta in senso olistico.

La metodologia LCA può essere applicata in un contesto «from Cradle to Grave» (dalla culla alla tomba) se il ciclo vita si considera terminato con la riduzione a rifiuto del prodotto considerato. Oppure, anche in un contesto «from Cradle to Cradle» (dalla culla alla culla), se il ciclo vita si considera non terminato con la riduzione a rifiuto del prodotto considerato, ma con la re-immissione in successivi cicli vita dei rifiuti rigenerati.

2.1 La normativa

Il quadro normativo che regola l'applicazione della tecnica LCA è riassunto nella figura 5.

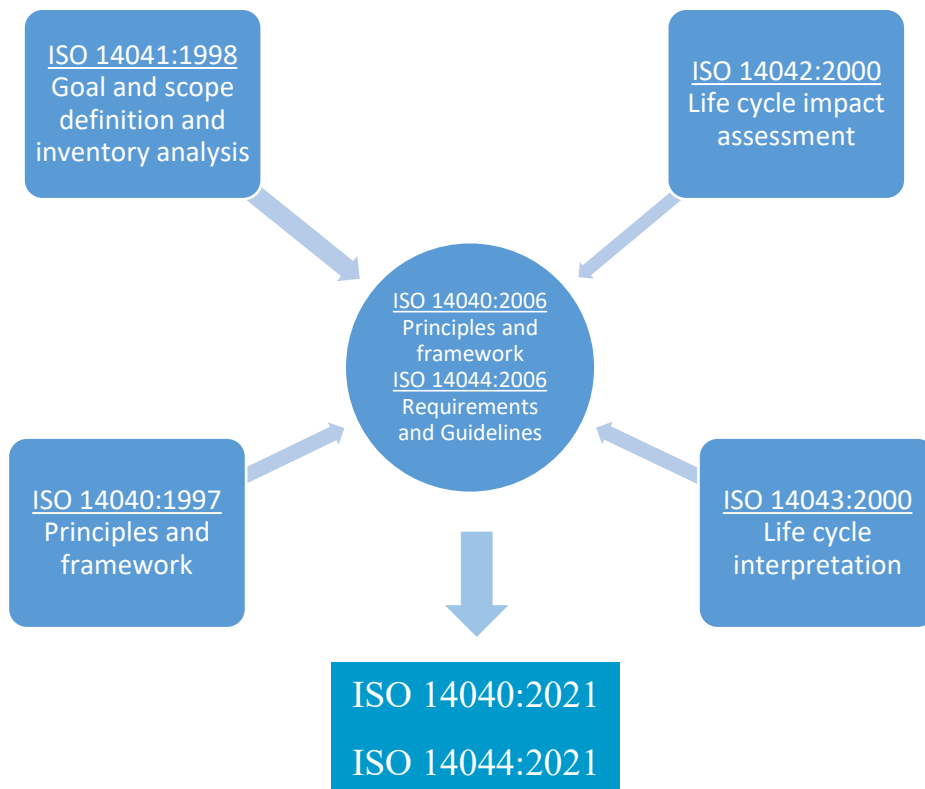


Figura 5. Sintesi del quadro normativo per l'applicazione della metodologia LCA.

La figura mostra come le norme emanate negli anni 2000 e precedenti siano poi state riunite e aggiornate nella ISO 14040 del 2006 e nella ISO 14044 sempre del 2006.

Gli emendamenti proposti nel corso degli anni, sono stati recepiti nelle nuove versioni entrate in vigore il 18 Febbraio 2021.

La UNI EN ISO 14040:2021 (Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework) descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA). La norma non descrive in dettaglio la tecnica di valutazione del ciclo di vita e non specifica metodologie per le singole fasi dell'LCA.

La UNI EN ISO 14044:2021 (Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines) specifica i requisiti e fornisce linee guida per la valutazione del ciclo di vita (LCA) del singolo prodotto o servizio, comprendendo:

- a) la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione di LCA;
- b) la fase di inventario del ciclo di vita (LCI);

- c) la fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA);
- d) la fase di interpretazione del ciclo di vita;
- e) la rendicontazione e la revisione critica di LCA;
- f) le limitazioni di LCA;
- g) le correlazioni tra le fasi di LCA;
- h) le condizioni per l'utilizzo delle scelte dei valori e degli elementi facoltativi.

La norma tratta gli studi di valutazione del ciclo di vita (LCA) e di inventario del ciclo di vita (LCI).

2.2 Le fasi dell'analisi LCA

Lo studio della LCA si divide in 4 fasi iterative: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi di inventario (LCI, *Life Cycle Inventory*), valutazione degli impatti (LCIA, *Life Cycle Impact Analysis*) e interpretazione dei risultati ed eventuale miglioramento, come riassunto in figura 6.

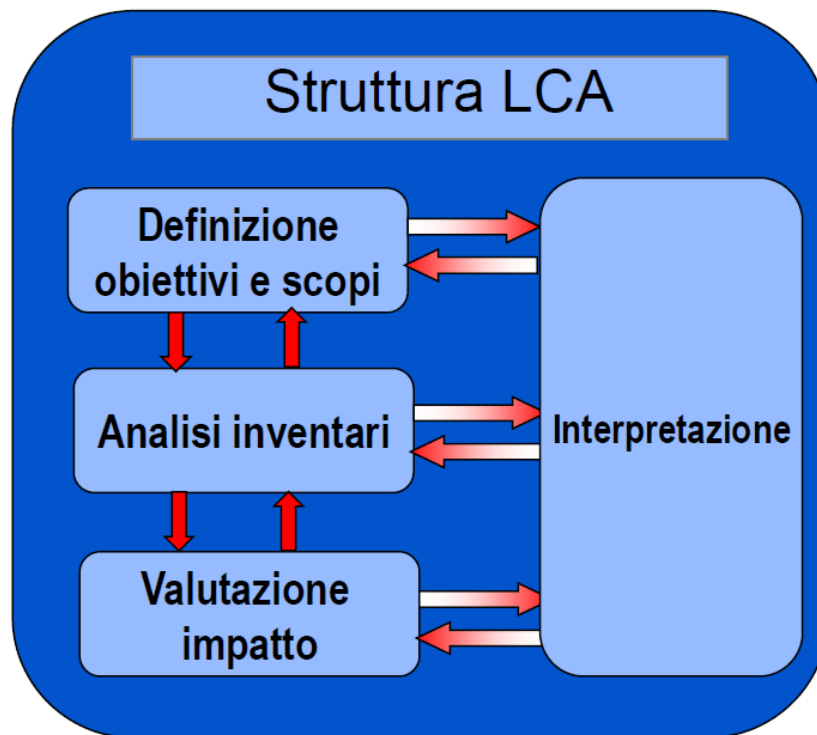


Figura 6. Fasi per l'applicazione della LCA.

Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (Goal and Scope Definition): è una fase preliminare per definire le finalità dello studio, i confini del sistema oggetto di studio (tipo prodotto, processo), l'unità funzionale, l'affidabilità dei dati, le assunzioni da seguire durante il prosieguo delle fasi e i limiti dello studio stesso.

Analisi di inventario (Life Cycle Inventory Analysis, LCI): è la fase di raccolta dati e di calcolo con la finalità di quantificare i flussi di massa ed energia in entrata e in uscita dal Sistema produttivo.

Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Analysis, LCIA): si quantificano gli impatti ambientali provocati da un determinato processo o attività. La valutazione è collegata ai dati di inventario, in quanto avviene il passaggio dal dato oggettivo al giudizio di pericolosità ambientale.

Interpretazione dei risultati e miglioramento (Life Cycle Interpretation): si tratta della fase conclusiva, in cui vengono analizzati i risultati derivanti dalle fasi precedenti per identificare le fasi del processo o i componenti del sistema dove poter apportare dei cambiamenti con il fine di ridurre l'impatto ambientale complessivo.

2.2.1 Obiettivi e campo di applicazione

Il primo passo consiste quindi nella definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. La norma ISO 14040 riporta le prescrizioni circa questa fase: *“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”*

Essendo il LCA una tecnica iterativa, è possibile, o può rendersi necessario, modificare il campo di applicazione in funzione di nuove informazioni raccolte. I punti seguenti sono fondamentali per comporre il campo di applicazione:

- **unità funzionale:** Il primo passo è la definizione dell'unità funzionale, cioè il prodotto, il servizio o la funzione su cui impostare l'analisi e il confronto con le possibili alternative (es. kg di prodotto)

L'unità funzionale indica l'oggetto riferimento del nostro studio a cui tutti i dati in ingresso ed in uscita saranno normalizzati.

È così definita dalla ISO 14040:

- Misura della prestazione del flusso in uscita, funzionale del sistema prodotto.
- Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita.

È un riferimento necessario per consentire la comparabilità dei risultati di LCA. Utile quando si valutano sistemi differenti, ci si deve assicurare che il confronto venga fatto su base comune.

- **confini del sistema:** circoscrivono le unità di processo che devono essere incluse nel modello che rappresenta il sistema. Questi devono essere in accordo con la configurazione necessaria alla valutazione del ciclo di vita, il sistema deve cioè essere modellizzato in modo che i flussi in ingresso e in uscita dai confini del sistema siano flussi elementari, ovvero materia od energia prelevati da, o scaricati, nell'ambiente, senza nessuna trasformazione da parte dell'uomo;

- **unità di processo:** trasforma le materie prime o i materiali intermedi in ingresso, in un prodotto semilavorato in uscita, attraverso il consumo di materiali ausiliari ed energia, contribuendo al rilascio di eventuali inquinanti nell'ambiente, figura 7. A volte vengono escluse determinate unità di processo ritenute non significative. Questa esclusione però viene fatta prima che venga quantificato quanto possa incidere quella determinata unità di processo sul bilancio globale dello studio.

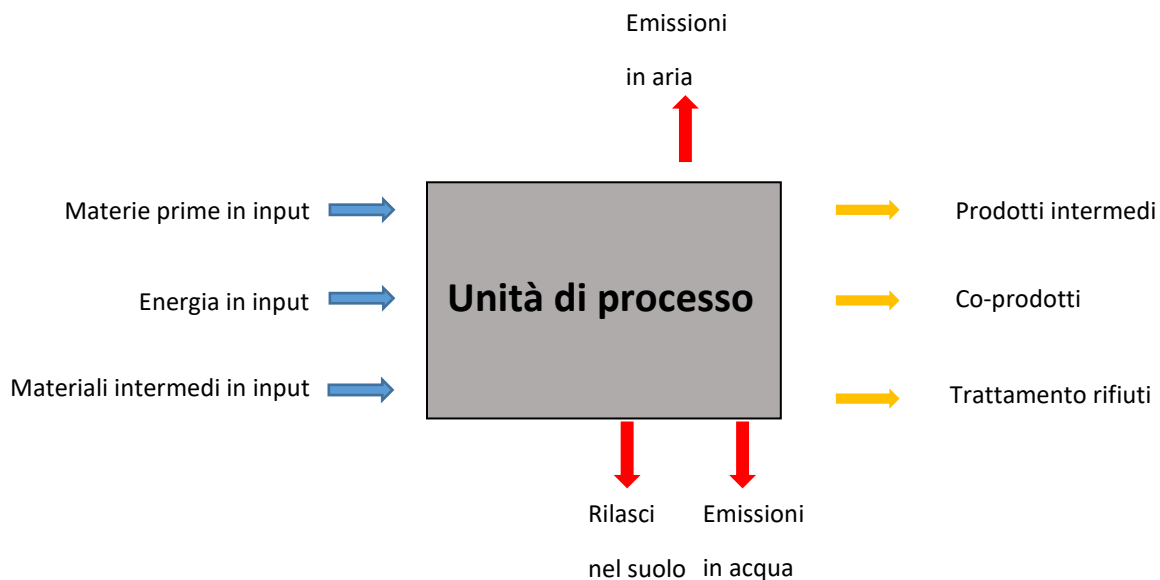


Figura 7. Rappresentazione grafica di una unità di processo.

- **requisiti di qualità dei dati:** è necessario prendere in considerazione i parametri che comprendono: fattori temporali, geografici, le fonti dei dati e la loro rappresentatività, l'incertezza dell'informazione, la precisione, completezza e la rappresentatività dei

dati. Si tratta di un aspetto importante in quanto da essi dipende l'attendibilità dell'intero studio.

Naturalmente in questa fase alcune assunzioni possono essere soggettive e/o specifiche del caso analizzato. L'importante è che tutto venga accuratamente documentato, come richiesto dalla norma.

2.2.2 Analisi di Inventario

E' la fase durante la quale vengono raccolti i dati e creato il modello rappresentativo della realtà, ovvero la sequenza di operazioni unitarie che compongono il sistema in esame. I dati caratterizzano le singole operazioni della catena produttiva e, da questi, è possibile calcolare tutti gli scambi che avvengono tra queste operazioni appartenenti alla catena produttiva.

Questa fase è importante in quanto consentirà poi di simulare i tentativi di miglioramento, per diminuire l'impatto ambientale e per controllare che non si verifichino effetti inattesi. La prima operazione è l'organizzazione in un diagramma di flusso, delle fasi concretamente rilevanti per il LCA che formano il Sistema.

Per ogni operazione unitaria vanno individuati gli ingressi, in termini di massa ed energia; le uscite, ovvero i rilasci in acqua, aria, suolo e i rifiuti. Il trasporto può essere incluso o meno a seconda dei confini del sistema decisi o a seconda delle assunzioni fatte. Attraverso il bilancio di massa è possibile verificare che sia rispettato il principio di conservazione, infatti, deve esserci una corrispondenza tra gli ingressi e le uscite del Sistema in quanto, molti processi, possono avere come risultato più di un prodotto, e riciclano prodotti intermedi o di scarto come fossero materie prime. In questo caso, occorre applicare un metodo di ripartizione dei flussi che si applica quando da una operazione unitaria escono più coprodotti. Si ripartiscono consumi ed emissioni tra tutti i coprodotti, associando a ciascuno di essi una quota di risorse consumate ed emissioni. E' necessario un rigoroso bilancio di massa ed energia seguendo le prescrizioni normative:

- a) se è possibile si cerca di rivedere i confini del sistema ed includere le fasi relative ai coprodotti;
- b) quando non è possibile, si cerca di discriminare i flussi dei vari coprodotti su base fisica (es. massa, volume, energia);
- c) quando le caratteristiche fisiche non lo permettono, la distinzione va effettuata sul valore economico di ciascun coprodotto. Questa procedura è generalmente considerata come non correttamente scientifica.

La qualità e affidabilità dei dati raccolti è importante per l'intera metodologia. Abbiamo sostanzialmente due tipologie di dati: quelli secondari (*background data*) e

quelli primari (*foreground data*). I primi, sono dati generici che possono derivare da database, da letteratura o sono dati solitamente usati per materiali generici, energia e trasporti. Naturalmente sono da privilegiare i dati primari, ossia dati raccolti direttamente sul campo e quindi specifici per il caso di studio. L'uso di questi dati infatti, caratterizza lo specifico Sistema studiato. La raccolta dei dati primari viene fatta mediante l'utilizzo di questionari, con richieste specifiche, che vengono compilati dai lavoratori degli impianti o dalle aziende. Per l'utilizzo dei dati secondari, occorre applicare un certo livello di controllo, per esempio, confrontandoli con altre pubblicazioni, inoltre si devono citare la fonte e la data di pubblicazione e, in ogni caso, è necessario rispettare l'ideale di trasparenza prescritto dalla norma.

2.2.3 Valutazione degli impatti

Con le informazioni raccolte durante la precedente fase di inventario, si procede alla valutazione degli impatti, con lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali dovute a rilasci nell'ambiente (emissioni o reflui) e al consumo di risorse, provocati dall'attività produttiva. La valutazione dell'inquinamento, viene fatta prendendo in considerazione diverse scale spaziali. E' necessario tener conto di alcuni fattori: l'emissione delle sostanze nocive (che tipo di emissione, se in aria, in acqua, o nel suolo e la tipologia di sostanza), la diffusione, l'eventuale trasformazione che le sostanze subiscono nell'ambiente e la concentrazione nel luogo di azione. A seconda degli obiettivi dello studio, viene deciso il tipo di metodo di calcolo da utilizzare per trasformare i dati di inventario in valori di impatto. Nello studio LCA di questa tesi è stato utilizzato il metodo EF 3.0 Method (adapted) V1.00 che prende in considerazione varie categorie di impatti ambientali descritti nel capitolo 3.

La valutazione degli impatti si suddivide in 6 fasi:

1. definizione delle categorie di impatto;
2. definizione dei risultati di LCI (classificazione);
3. calcolo degli indicatori di categoria (caratterizzazione);
4. confronto con un valore di riferimento (normalizzazione);
5. raggruppamento;
6. pesatura.

Secondo la norma ISO solo le prime 3 sono obbligatorie, mentre normalizzazione, raggruppamento e pesatura sono facoltative.

Definizione categorie di impatto

Le categorie di impatto che vengono normalmente più utilizzate, sono state identificate sulla base delle seguenti tematiche:

Ecologia: gli effetti sulla popolazione e sull'ecosistema.

Salute: gli effetti sulla salute e sulla sicurezza dell'uomo.

Risorse: esaurimento di risorse, energia e materiali.

Riflessi sociali: impatto tra le attività umane e la degradazione dell'habitat.

Classificazione

Dopo che sono state identificate le categorie di impatto che si vogliono considerare, si possono utilizzare i dati acquisiti nella fase di inventario, ad esempio quelli relativi alle emissioni dirette ed indirette in aria, acqua, suolo, ed assegnarli alle differenti categorie di impatto, divisi secondo le tipologie di problemi che potenzialmente contribuiscono a creare. Va sottolineato che alcune sostanze possono incidere su più categorie, come per esempio il metano (CH₄) che contribuisce sia al riscaldamento globale (GWP) che all'assottigliamento della fascia di ozono (OD). Questa operazione permette un collegamento quantitativo tra un determinato processo, che ha particolari emissioni, e, una o più specifiche categorie. Questa fase consente di formulare solo giudizi di valore relativo tra i diversi processi considerati, evidenziando quelli che hanno un impatto ambientale maggiore.

Gli indicatori di impatto previsti dal metodo di calcolo da me utilizzato, sono:

- Climate change, (cambiamento climatico) il quale viene sia considerato nel suo insieme, sia diviso a seconda che sia dovuto all'uso di fossili, da biogeni, da uso del territorio o cambiamento dell'uso del territorio.
- Ozone depletion (riduzione dell'ozono),
- Ionising radiation (radiazioni ionizzanti),
- Photochemical Ozone formation (formazione di ozono fotochimico),
- Particulate matter (polveri sottili),
- Human toxicity (tossicità per l'uomo), questa categoria viene considerata divisa a seconda che gli effetti siano di tipo cancerogeno o no, e all'interno di questi due insiemi, a seconda dell'elemento che ne è la causa (organico, inorganico, metalli).
- Acidification (acidificazione),
- Eutrophication (eutrofizzazione), divisa in base al luogo di impatto, ovvero: acque dolci, acque di mare o territori.
- Ecotoxicity freshwater (tossicità per le acque dolci), viene considerata sia nel suo insieme, sia divisa a seconda che sia dovuta da emissioni organiche, inorganiche o metalli.
- Land use (uso del territorio),
- Water use (uso delle acque),
- Resource use fossils (uso di risorse fossili)
- Resource use minerals and metals (uso di risorse minerarie e metalli).

Caratterizzazione

Ogni sostanza presente nell'inventario può provocare uno o più problemi ambientali e, per stabilire in quale misura, dopo essere stata classificata, viene moltiplicata per un "fattore equivalente" che valuta l'intensità dell'effetto della sostanza stessa rispetto al problema considerato. L'obiettivo di questa fase è quindi quello di mettere in correlazione l'effetto potenziale della sostanza con l'impatto che essa provoca.

Quindi, per esempio, possiamo definire come effetto di una sostanza, il riscaldamento globale mentre l'impatto della sostanza è quello di contribuire all'effetto (riscaldamento globale), proporzionalmente al fattore di equivalenza. Se il fattore equivalente è basso, la sostanza ha un basso impatto.

Esempio di caratterizzazione: il calcolo del potenziale di riscaldamento globale è espresso in kg equivalenti di CO₂, il fattore caratterizzazione della CO₂ è 1, mentre per il metano è 11; questo significa che il rilascio di 1 kg di metano equivale al rilascio di 11 kg di CO₂.

Normalizzazione

La normalizzazione rappresenta la fase durante la quale i risultati, cioè gli indicatori, vengono divisi per un valore di riferimento (es. emissioni totali in una data area, per abitante). In questo modo si riesce a stabilire, per ogni indicatore di impatto ambientale, l'entità relativa.

Raggruppamento

Questa fase riordina le categorie di impatto a seconda dell'obiettivo e del campo di applicazione, su base nominale ed in relazione, per esempio, alle emissioni, al consumo di risorse oppure su scala gerarchica, ad esempio di priorità.

Pesatura

La pesatura viene data dalla moltiplicazione del risultato degli indicatori per un particolare fattore numerico. Il risultato stabilisce la gravità che un determinato fenomeno ha in confronto ad un altro. Tuttavia, in questo caso, valutazioni differenti possono, per lo stesso Sistema, portare a risultati anche molto diversi tra loro.

Le fasi di normalizzazione, raggruppamento e pesatura non sono universalmente accettate in quanto potrebbero essere alterate da approcci arbitrari per arrivare ad avere risultati più favorevoli per i committenti dello studio LCA.

2.2.4 Interpretazione dei risultati e miglioramento

Il risultato di tutti i dati elaborati nelle fasi precedenti, viene racchiuso in un riepilogo e vengono stilate delle conclusioni e raccomandazioni, in relazione all'obiettivo e al campo di applicazione per il quale l'analisi del ciclo di vita è stata effettuata. Tali conclusioni e raccomandazioni possono essere utilizzate per progettare nuovi standard di produzione sostenibile, per migliorare i processi in atto e per lo sviluppo di strategie

di politica ambientale. Quindi, in quest'ultima fase, ci si adopera per arrivare a raggiungere la massima eco-efficienza, correggendo il sistema prodotto o riprogettandolo da capo.

La rappresentazione dei risultati deve essere trasparente, chiara e disponibile, sia per coloro che dovranno prendere decisioni in base allo studio sia per coloro ai quali lo studio è destinato.

2.2.5 Calcolo dell'incertezza

Per effettuare dei controlli sul modello realizzato a seguito dello studio effettuato con la metodologia LCA che si sta cercando di interpretare, si utilizza il calcolo dell'incertezza.

Le tre tipologie di incertezza che si possono valutare sono: l'incertezza sui dati, sulla rappresentatività del modello e quella dovuta alle omissioni del modello.

Il primo tipo, viene stimato mediante l'analisi di Monte Carlo [10]; il secondo tramite l'analisi di sensitività che valuta i cambiamenti nei risultati cambiando specifiche assunzioni e, il terzo, conducendo le due analisi appena riportate.

2.3 Il software SimaPro

Per procedere ad una analisi LCA è possibile utilizzare diversi tipi di software quali EcoPro, GaBi, PIA ed altri, compreso il SimaPro. Questi software permettono di creare il modello del ciclo di vita del prodotto e di valutarne i potenziali impatti ambientali.

Per questo lavoro sono stati utilizzati il software SimaPro 9.1.1.1 EF 3.0 Method V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set.

Il SimaPro⁴ è stato elaborato dalla società olandese PRE (Product Ecology Consultant-NL) su richiesta del ministero dell'Ambiente olandese. Questo software ci permette di ottenere dati relativi alla sostenibilità ambientale di beni o servizi e di valutarne le prestazioni ambientali, secondo le direttive delle norme ISO 14040-14044.

Il Software può essere usato per differenti applicazioni:

- svolgere studi di Life Cycle Assessment (LCA);
- svolgere calcoli per l'ottenimento della Dichiarazione ambientale di prodotto (EPD);

⁴ <https://simapro.com/>

- calcolare il carbon footprint e il water footprint a livello di prodotto e aziendale;
- sviluppare attività di comunicazione ambientale basate su dati dimostrabili;
- supportare attività di eco-design e di sviluppo del prodotto;
- avviare politiche di green procurement;

Attualmente questo software è usato in più di 80 paesi al mondo, soprattutto da grandi industrie e società di consulenza per condurre valutazioni su prestazioni energetiche ed ambientali di vari prodotti, processi e servizi.

Questo software risulta essere uno dei più utilizzati al mondo perchè a causa della sua flessibilità, risulta facile inserire nuovi processi, materiali e metodi di analisi degli impatti ambientali, modificare o completare quelli già esistenti e adattarli al caso studio, con la possibilità di ampliare i confini quando lo si ritenga necessario o nel caso in cui si abbiano ulteriori informazioni.

L'interfaccia è intuitiva e in accordo con la norma UNI EN ISO 14040; inoltre ci sono:

- la disponibilità di un certo numero di banche dati basate su statistiche economiche ed ambientali per l'inserimento di dati in input ed in output;
- la possibilità di modellare vari parametri, cioè di eseguire analisi di sensibilità, analisi di incertezza, definire relazioni non lineari tra i parametri stessi, valutare scenari alternativi per i prodotti analizzati e ottenere così diversi scenari di studio;
- la possibilità di scelta tra più metodi di valutazione degli impatti;
- la possibilità di calcolo diretta per la valutazione degli impatti per ogni singola fase del modello;
- l'analisi interattiva dei risultati, con possibilità di arrivare immediatamente alle origini del risultato ottenuto;
- la possibilità di presentare risultati personalizzati, filtrabili, scegliendo come raggrupparli ed esporli;
- la possibilità di importare ed esportare dati, grafici e tabelle, grazie alla compatibilità con altri software

Il SimaPro implementa lo sviluppo di tutte le fasi previste per il LCA.

Nella fase Goal and scope definition, il SimaPro prevede due sezioni. La prima di inserimento testo, per definire gli aspetti degli obiettivi e lo scenario che può poi essere direttamente copiato ed inserito nel report finale. La seconda sezione si riferisce alla scelta della libreria standard di dati da considerare, a seconda ad esempio che si operi in ambito europeo, in quello statunitense o asiatico.

Per quanto riguarda la fase di Inventario, il SimaPro dispone di un database molto fornito, specialmente per quanto riguarda i dati di background. Il SimaPro mette a disposizione l'Ecoinvent V3 database, che copre oltre 10000 processi. Esso è il risultato dello sforzo congiunto che diverse Istituzioni Svizzere hanno compiuto per aggiornare e integrare i data base per il LCA ⁵.

Relativamente alla fase di valutazione dell'impatto, il SimaPro prevede un elevato numero di metodi standard. Ogni metodo contiene tra le 10 e le 20 categorie di impatto. E' possibile scegliere semplicemente un metodo completo preimpostato, ad esempio in questo studio ho utilizzato: EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set, oppure si possono selezionare le singole categorie di impatto. E' anche possibile togliere o aggiungere categorie ad un metodo pre-impostato. Per ogni metodo di valutazione dell'impatto è possibile definire e memorizzare una serie di diverse normalizzazioni (e ponderazioni) dei valori. Ad esempio, sono previsti set di normalizzazione olandesi, europei e mondiali per molti metodi. Si possono anche modificare o aggiungere set di normalizzazione. Ciò consente di verificare quanto possa influire la selezione della normalizzazione. Alcuni metodi di valutazione dell'impatto, come quelli basati sulla valutazione monetaria (ad esempio, EPS) non necessitano di normalizzazione. Per aiutare a definire i valori di normalizzazione, sono previsti record di processo che contengono le emissioni inquinanti annuali di cittadini europei e mondiali.

L'ultima fase del LCA è l'interpretazione. La ISO 14044 prevede un numero di verifiche che servono a stabilire se le conclusioni sono adeguatamente supportate dai dati e dalle procedure usate. A questo scopo il SimaPro consente di effettuare un'analisi dell'effetto dell'incertezza sui dati. La variabilità dei dati può essere descritta da distribuzioni di probabilità alle quali è associata una deviazione standard.

E' possibile applicare tecniche statistiche, come per esempio, l'analisi Monte Carlo, per gestire le incertezze e determinare l'effetto sulla valutazione del LCA.

⁵<https://ecoinvent.org/>

Capitolo 3 – CASO STUDIO

Il lavoro di analisi LCA svolto, si riferisce ad un paio di ciabatte Hydrossoft (taglia n. 42) del marchio ARENA. L'azienda, la cui sede centrale si trova a Tolentino (MC), è stata fondata nel 1973 da Horst Dassler, un imprenditore tedesco, per la realizzazione di una linea di costumi dedicata ai nuotatori migliori al mondo.

Nel corso degli anni, l'Azienda ha approfondito la sua competenza tecnica del nuoto e del corpo umano. Sul proprio sito ufficiale Arena⁶ dichiara di avere una continua attenzione alle necessità degli atleti e dei consumatori, inoltre, conferma l'intenzione di continuare ad espandersi e a sviluppare una cultura volta alla crescita sostenibile, all'orientamento verso il cliente e all'innovazione costante. Arena sottolinea di aver preso un impegno nei confronti del consumatore, dell'ambiente e delle comunità al fine di permettere anche alle generazioni future di poter praticare al meglio il nuoto e gli sport acquatici e, di lavorare per far fronte, in ogni momento, all'impatto che le sue attività hanno sul nostro Pianeta, per contribuire a costruire un futuro migliore per i suoi lavoratori, i suoi partners, i suoi clienti e l'ambiente. L'azienda ha 43 stabilimenti in 15 Paesi e 33139 lavoratori. Dichiara di collaborare solo con fornitori che rispettino i diritti di tutti i lavoratori e che dimostrino di eliminare o ridurre al minimo l'impatto ambientale. In particolare, valuta attentamente lo sviluppo del prodotto; la pianificazione della produzione; il processo produttivo; il controllo qualità; l'impatto su salute, sicurezza e ambiente; la sicurezza e certificazione dei prodotti; la responsabilità sociale. Col marchio ARENA possiamo trovare sul mercato costumi da gara, da piscina, da mare, e accessori (zaini, borsoni, accappatoi, cuffie, occhialini, ciabatte). Troviamo inoltre abbigliamento sportivo tecnico e per il tempo libero.

In particolare, poichè nel sito l'azienda dichiara di avere un solo stabilimento produttivo in India, ho ipotizzato che le ciabatte Hydrossoft, che l'azienda ha indicato di produrre in India, siano realizzate nello stabilimento di Finproject India Private Limited, SP-1013 Ricco Industrial Area, PHASE – III SITAPURA RAJASTHAN 302022, INDIA, a circa 270 km a Sud-Ovest di Nuova Delhi.

In questo stabilimento, dove si producono accessori, sono impiegati 426 lavoratori di cui 384 lavorano sulla linea produttiva. Il 45% dei lavoratori sono donne.

3.1. Obiettivo

Questo studio viene fatto per valutare l'impatto ambientale di un paio di ciabatte hydrossoft di marca Arena e della sua confezione e, per considerare eventuali possibili

⁶ <https://about.arenasport.com/it/anni-70/>

modifiche che l'Azienda potrebbe porre in essere, al fine di migliorare la sostenibilità ambientale nella fase di produzione, d'uso e di fine ciclo vita del bene considerato, Fig. 8. A tal fine è stato calcolato l'impatto derivante dalla produzione in India delle ciabatte, confrontandolo con il caso di una produzione in un paese medio del mondo. Inoltre, è stata valutata la variazione dell'impatto, nel caso in cui la produzione fosse svolta in Italia. Infine, è stato calcolato l'impatto che le ciabatte potrebbero avere se prodotte con lo stesso materiale in parte però proveniente da riciclo di scarti di produzione oppure al 100% da materiale diverso biodegradabile.



Figura 8. Ciabatte Hydrosoft Arena.

3.2 Unità funzionale

Le due ciabatte considerate hanno taglia 42, ed un peso totale di 214 g. Il materiale è 100% Etilene Vinil Acetato (EVA). Le due ciabatte sono unite tramite un gancio in Polipropilene (PP) del peso di gr. 40 e sono inserite in un sacchetto in polietilene a bassa densità (low density polyethylene) del peso di gr.7.

L'Etilene Vinil Acetato (EVA) è una materia plastica copolimerica di etilene e acetato di vinile utilizzata per realizzare prodotti particolarmente flessibili ed elastici. E' un materiale anallergico, antibatterico, antimicotico, resistente al cloro, impermeabile e termoisolante.

La ciabatta è composta in un unico stampo, per cui non ci sono parti assemblate, ha dei fori all'interno per la fuoriuscita dell'acqua e una calzata antiscivolo con plantare ergonomico. La suola è strutturata in modo da garantire una presa sicura su superfici asciutte e bagnate. La ciabatta è aderente per evitare scivolate a bordo vasca

Le ciabatte sono progettate per essere utilizzate soprattutto nell'ambiente delle piscine, nelle cui acque si trova cloro e che, spesso, sono posizionate indoor, in locali con un alto tasso di umidità. E' possibile tuttavia che vengano utilizzate anche in altre tipologie di ambiente.

3.3 Confini del sistema

I confini del sistema sono riassunti nella figura 9.

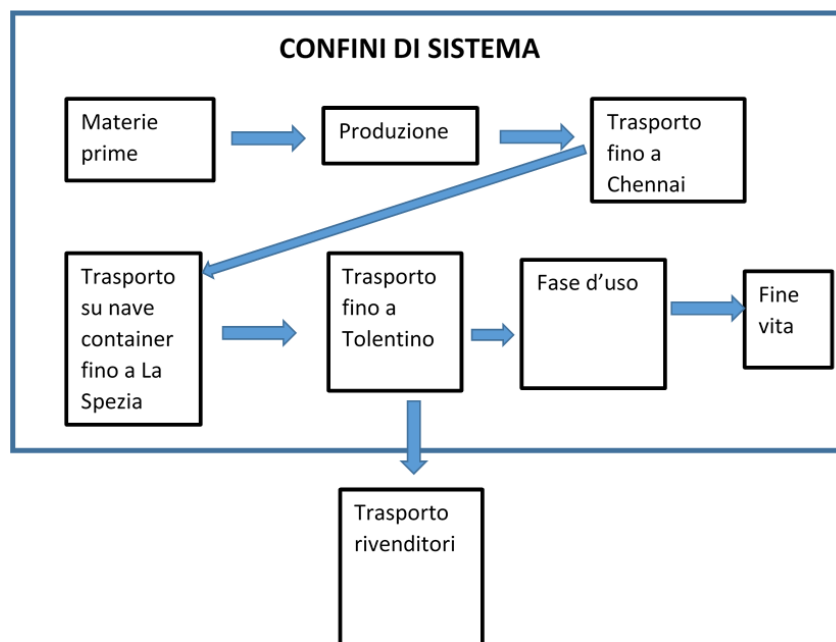


Figura 9. Confini del sistema.

E' stato ipotizzato che il trasporto delle ciabatte venga fatto, per la tratta che va dalla azienda produttrice al porto di spedizione, via gomma e per la tratta dal porto di Chennai, al porto di La Spezia, su una nave container. Dopo di che, si è ipotizzato che le ciabatte vengano caricate su camion e portate alla sede centrale di Tolentino, in provincia di Macerata.

Nella fase d'uso, si è assunto, che le ciabatte siano utilizzate per un periodo di due anni. In quell'arco di tempo, ho ipotizzato due scenari: che venissero lavate, con acqua e sapone, una volta al mese o che non venissero mai lavate.

Per quanto concerne il fine vita sono state previste due differenti opzioni: conferimento delle ciabatte e del packaging in discarica o riciclo della confezione e conferimento in discarica del rimanente.

Non è stato considerato il trasporto necessario a portare il prodotto fino alla discarica o al centro di riciclaggio.

3.4 Categorie di impatto ambientale, modelli e indicatori

Le categorie di impatto considerate nelle analisi effettuate sono riportate nella tabella seguente con le relative unità di misura.

| Categoria d'impatto | Unità |
|---|------------------------|
| Climate change | kg CO ₂ eq |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq |
| Particulate matter | disease inc. |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh |
| Human toxicity, cancer | CTUh |
| Acidification | mol H ⁺ eq |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq |
| Eutrophication, marine | kg N eq |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe |
| Land use | Pt |
| Water use | m ³ depriv. |
| Resource use, fossils | MJ |
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq |
| Climate change - Fossil | kg CO ₂ eq |
| Climate change - Biogenic | kg CO ₂ eq |
| Climate change - Land use and LU change | kg CO ₂ eq |
| Human toxicity, non-cancer - organics | CTUh |
| Human toxicity, non-cancer - inorganics | CTUh |
| Human toxicity, non-cancer - metals | CTUh |
| Human toxicity, cancer - organics | CTUh |
| Human toxicity, cancer - inorganics | CTUh |
| Human toxicity, cancer - metals | CTUh |
| Ecotoxicity, freshwater - organics | CTUe |
| Ecotoxicity, freshwater - inorganics | CTUe |
| Ecotoxicity, freshwater - metals | CTUe |

Climate change: (Cambiamento climatico), indica una serie di gravi alterazioni ambientali causate dall'attività dell'uomo. Una delle cause è l'Effetto Serra (GWP-Global Warming Potential), cioè la capacità di alcuni gas di trattenere la radiazione infrarossa proveniente dalla Terra, causa dell'innalzamento della temperatura media terrestre. Il cambiamento climatico viene considerato nel suo insieme o diviso, a seconda che sia causato da uso di materie fossili (fossil), sostanze biogeniche (biogenic), uso del territorio (land use), o dal cambiamento nell'uso normale del territorio che ne comporti lo sfruttamento fino anche ad arrivare ad una modifica del paesaggio.

Ozone Depletion: (Riduzione della fascia di ozono), questo fenomeno avviene nella stratosfera tra i 15 e i 50 km sopra la superficie terrestre. L'ozono protegge la terra dalla radiazione ultravioletta del sole. La riduzione comporta aumento dei raggi UV-B che provocano danni alla pelle e agli occhi e, una parziale inibizione della fotosintesi che causa danni alla produzione delle derrate alimentari.

Ionising radiation: (Radiazioni ionizzanti), sono particelle e onde elettromagnetiche ad alto contenuto energetico, che possono penetrare in misura diversa all'interno della materia. Le radiazioni alfa, possono essere pericolose per l'organismo se si ingeriscono o si inalano sostanze in grado di produrle. Le radiazioni beta e gamma possono attraversare i tessuti e necessitano quindi di essere bloccate da schermi più o meno spessi.

Photochemical Ozone Formation: (Formazione di Smog fotochimico), si tratta di un tipo di inquinamento dovuto alla presenza di luce ultravioletta (UV), ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili (VOC), i quali subiscono una serie di modifiche e formano ozono (O_3), perossiacetil nitrato (PAN) e aldeidi che, insieme, formano lo smog fotochimico. Gli effetti dannosi che ne derivano possono essere: danni alla salute con stati di malessere, irritazione della mucosa respiratoria e degli occhi, tossicità per le piante ed effetti sulla visibilità atmosferica.

Particulate matter: (Polveri sottili), dovute anche a combustione di sostanze fossili nei trasporti e nelle industrie. Il particolato atmosferico è un pulviscolo molto fine talmente leggero da rimanere facilmente sospeso in aria e quindi respirato. L'esposizione prolungata nel tempo, anche a bassi livelli di PM 10 può comportare disturbi respiratori come tosse, asma, riduzione della funzionalità respiratoria, bronchite cronica ed effetti sul sistema cardiovascolare.

Human toxicity: (Tossicità per l'uomo), può essere causata da componenti organici, inorganici o metalli e può provocare sia effetti cancerogeni che non cancerogeni. Trattandosi di un fenomeno molto complesso, è difficile riuscire ad identificare i singoli contributi che ogni sostanza può causare sull'effetto complessivo. Questa

categoria d'impatto viene considerata sia nel suo insieme, divisa solo in cancerogena e non, sia separatamente a seconda della tipologia di sostanza che ne è causa.

Acidification: (Acidificazione), consiste nella ricaduta al suolo tramite pioggia, neve, rugiada o nebbie, di particelle acide presenti in atmosfera anche a causa dell'attività umana. Circa un quarto della CO₂ presente nell'atmosfera finisce negli Oceani. Ciò comporta la decrescita del valore di Ph nelle acque e questo può influire sul lisocline (profondità dell'acqua di mare in cui aumenta in modo significativo il tasso di dissoluzione della calcite), riguardo allo scioglimento dei gusci calcarei delle conchiglie dei molluschi e del plancton calcareo.

Eutrophication: (eutrofizzazione), è causata dall'eccessiva presenza di fosforo, azoto o zolfo, nei terreni e nelle acque. Ciò comporta la crescita eccessiva di alcuni tipi di piante acquatiche e di alghe che assorbono ossigeno sottraendolo ai pesci e provocandone la morte. E' causata dal dilavamento dei fertilizzanti usati nella coltivazione delle terre, dall'inquinamento derivante dall'attività umana o dai rifiuti industriali e civili che finiscono nelle acque. Viene distinta in relazione al fatto che riguardi le acque dolci (freshwater) le acque di mare (marine) o il territorio (terrestrial).

Ecotoxicity freshwater: (ecotossicità per le acque dolci), Viene distinta a seconda che la causa sia dovuta a sostanze organiche, inorganiche o a metalli. Può colpire l'ambiente, con la perdita di diversità delle specie ittiche ma anche la salute umana.

Land use (uso del territorio): indica lo sfruttamento di territorio ed è considerato una risorsa limitata non rinnovabile.

Water use (uso dell'acqua): l'uso dell'acqua, considerata una risorsa flusso, come l'aria, il sole e le risorse biotiche, cioè rinnovabile e illimitata. Purtroppo però, ci si sta rendendo conto che, sia a causa dell'eccessivo sfruttamento, sia a causa dei cambiamenti climatici, la disponibilità di acqua è sempre minore.

Resources use, fossils, minerals, metals: (uso delle risorse fossili, minerarie e metalli), indicano delle categorie di risorse non rinnovabili (risorse stock) che il Pianeta ha a disposizione in quantità limitata. Il consumo di un determinato sistema produttivo viene messo in relazione con la disponibilità globale di quelle risorse per verificare se vi sia una diminuzione o scarsità delle stesse.

Secondo lo standard ISO 14044 la classificazione degli impatti e la loro caratterizzazione consentono di assegnare i risultati della fase LCI a determinate categorie di impatto con conseguente quantificazione degli impatti sull'ambiente mediante modelli scientifici e fattori di equivalenza. Le categorie di impatto generalmente sono riconducibili a quattro grandi aree: utilizzo di risorse naturali, effetti sulla salute dell'uomo, effetti sull'ecosistema e riflessi sociali.

Nelle categorie in “input”, ad esempio, rientrano:

- Land use
- Water use
- Resource use, fossils
- Resource use, minerals and metals

Invece, nelle categorie “output” possono rientrare, ad esempio:

- Climate change
- Human toxicity, non-cancer o cancer
- Ecotoxicity, freshwater

In particolare, all’interno di SimaPro, queste tre categorie vengono analizzate nel dettaglio mediante il metodo da me utilizzato: software SimaPro 9.1.1.1 EF 3.0 Method V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set, che considera diverse tipologie e cause. Ad esempio le cause possono essere uso di metalli, sostanze organiche e inorganiche per Human toxicity e Ecotoxicity freshwater, mentre riguardo al Climate change, la distinzione viene fatta a seconda che il riferimento sia relativo a uso di materiale fossile, biogenico, uso della terra o cambiamento di uso del territorio.

Questo software mette a disposizione anche il dato aggregato per ogni categoria, utile per sintetizzare e snellire la rappresentazione del risultato finale.

3.5 Raccolta dati

I dati utilizzati per lo studio sono stati in parte forniti dall’Azienda, e in parte tratti dal database presente in SimaPro. In particolare, Arena ha fornito i seguenti dati:

- tipo di materiale impiegato per produrre le ciabatte: EVA etilene vinil acetato;
- peso di un paio di queste ultime: gr.214;
- materiale e peso dei vari componenti del packaging: Carton box (147g Paper), Plastic hook (40g PP), Polybag (LDPE 7g);
- stato di produzione delle ciabatte: India.

Questi dati sono stati integrati tramite il SimaPro relativamente all’uso dell’energia, dell’acqua, del carburante, ed altri.

3.6 Modellazione

L'analisi LCA ha preso in esame il prodotto finito assemblato (carton box, ciabatte, polybag e plastic hook), aggiungendo due possibili scenari d'uso del prodotto e due possibili scenari di fine vita. Pertanto, l'analisi è composta da: produzione, fase d'uso e scenari di smaltimento.

I materiali, il loro trasporto all'azienda, la produzione delle ciabatte e il trasporto alla sede italiana, sono stati tutti inclusi dal software nella fase di produzione, sulla base di dati presenti nel database del SimaPro

Per quanto riguarda il trasporto, abbiamo ipotizzato che avvenisse: per le tratte via terra, su gomma, mentre per la tratta via mare, dal porto di Chennai al porto di La Spezia, con una nave container.

E' importante sottolineare che la fase di trasporto è stata inclusa all'interno della produzione del prodotto, per ottenere una maggiore flessibilità di utilizzo del software.

Anche i dati relativi alla sede dell'azienda di produzione, al porto di partenza e di arrivo, sono stati ipotizzati, senza una precisa indicazione da parte dell'azienda. La sede di destinazione finale, si è assunto potesse essere la sede principale dell'azienda.

Relativamente all'uso ho ipotizzato due scenari: il lavaggio una volta al mese per due anni o il mancato lavaggio. Per quantificare il consumo di acqua e sapone necessari per il lavaggio, mi sono basato su prova empirica da me effettuata che ha dato come risultato una quantità di 1,5 l di acqua e 5 g di sapone.

Gli scenari di smaltimento sono due: 100% in discarica o riciclaggio del packaging e il rimanente in discarica.

La prima analisi è stata effettuata con i dataset generici riferiti al mercato globale.

Sono stati individuati quindi 4 casi di analisi.

Caso1_analisi_LCA_scenari01_lavaggio: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento1 (tutto va in discarica), e il lavaggio della ciabatta.

Caso2_analisi_LCA_scenari02_lavaggio: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento 2 (riciclo del packaging) ed il lavaggio della ciabatta.

Caso3_analisi_LCA_scenari01: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento 1 (tutto va in discarica) senza il lavaggio.

Caso4_analisi_LCA_scenari02: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento 2 (riciclo del packaging) senza il lavaggio.

Successivamente sono state effettuate delle modifiche ai dataset per personalizzarli per il mercato indiano. Queste modifiche sono state effettuate sui processi produttivi di thermoforing with calendering, injection molding e il coreboard. Le modifiche si sono concentrate sull'utilizzo, nei processi, di elettricità prodotta in India.

Questo ha portato allo sviluppo di altri 4 casi:

Caso1_analisi_LCA_scenariol_lavaggio_India: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento1 (tutto va in discarica), e il lavaggio della ciabatta.

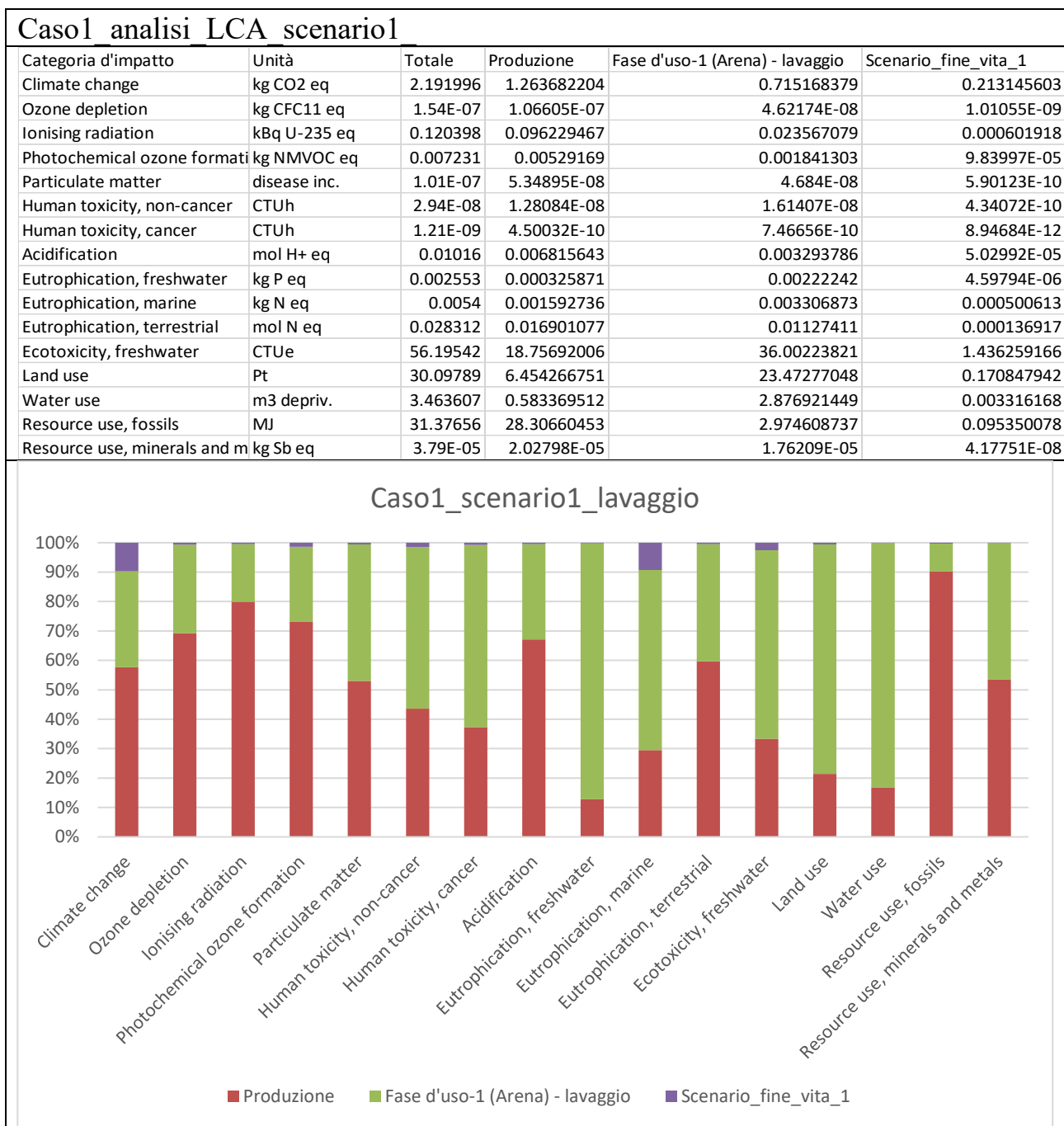
Caso2_analisi_LCA_scenario2_lavaggio_India: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento 2 (riciclo del packaging) ed il lavaggio della ciabatta.

Caso3_analisi_LCA_scenariol_India: è l'analisi effettuata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento 1(tutto va in discarica) senza il lavaggio.

Caso4_analisi_LCA_scenario2_India: è l'analisi effettutata considerando l'utilizzo dello scenario di smaltimento 2 (riciclo del packaging) senza il lavaggio.

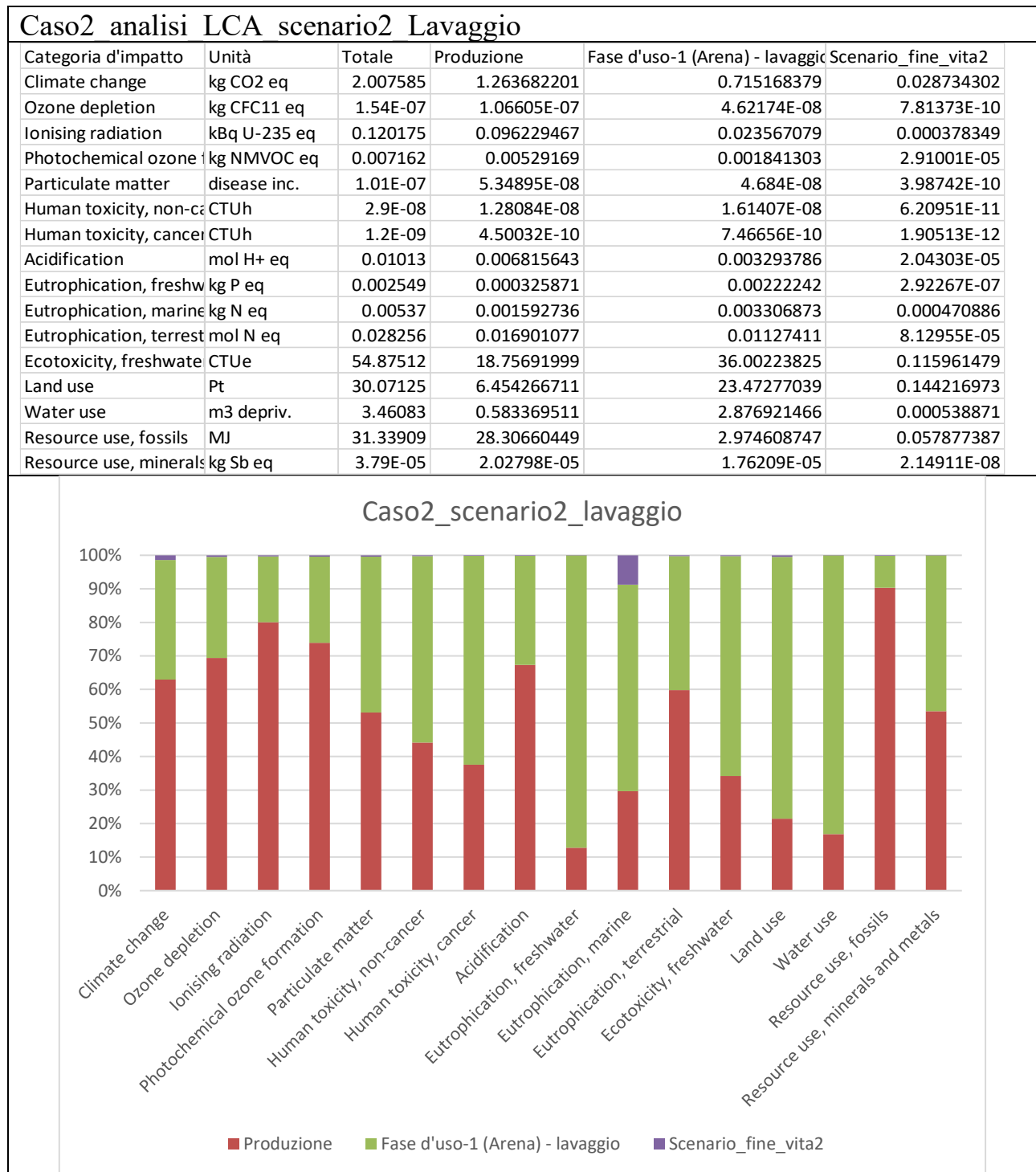
3.6.1 Analisi con dataset generici

Il primo caso analizzato si riferisce allo scenario in cui la produzione è riferita ad un generico Paese con parametri medi. Questo scenario è stato analizzato per poter fare un confronto con gli impatti derivanti dalla produzione in India. La fase d'uso prevede il lavaggio delle ciabatte una volta al mese per un periodo di vita ipotizzato di due anni. Lo scenario di fine vita prevede un conferimento in discarica al 100%.



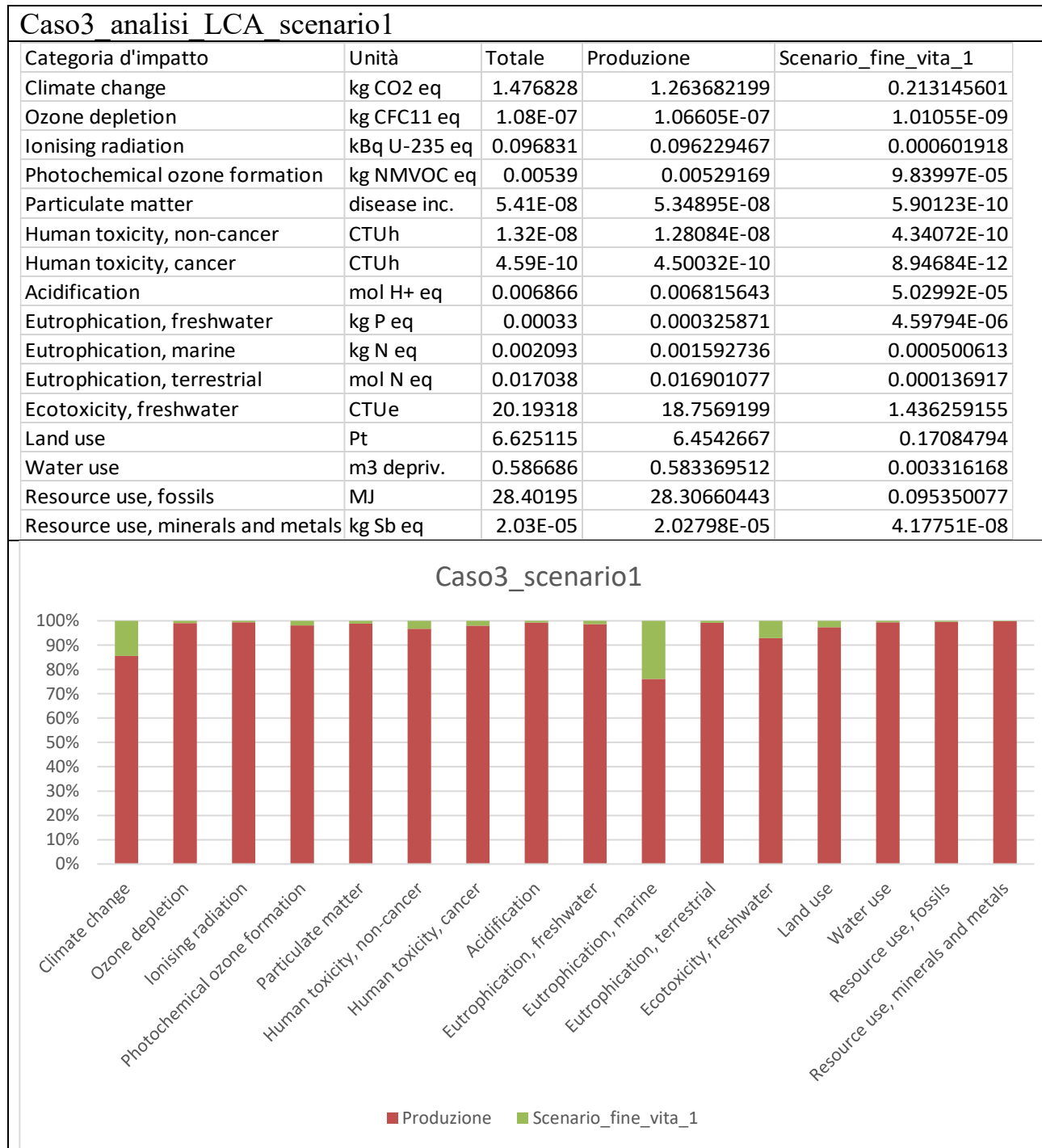
Notiamo che la fase d'uso impatta maggiormente sull'eutrofizzazione delle acque dolci, sul consumo di acqua e sull'uso del territorio. L'impatto della produzione è maggiore sull'uso delle risorse fossili. Percentualmente il fine vita impatta poco, in maniera significativa su cambiamento climatico ed eutrofizzazione marina.

Il secondo caso analizzato si differenzia dal primo relativamente alla fase di fine vita in quanto si prevede il riciclo del packaging ed il conferimento in discarica del rimanente.



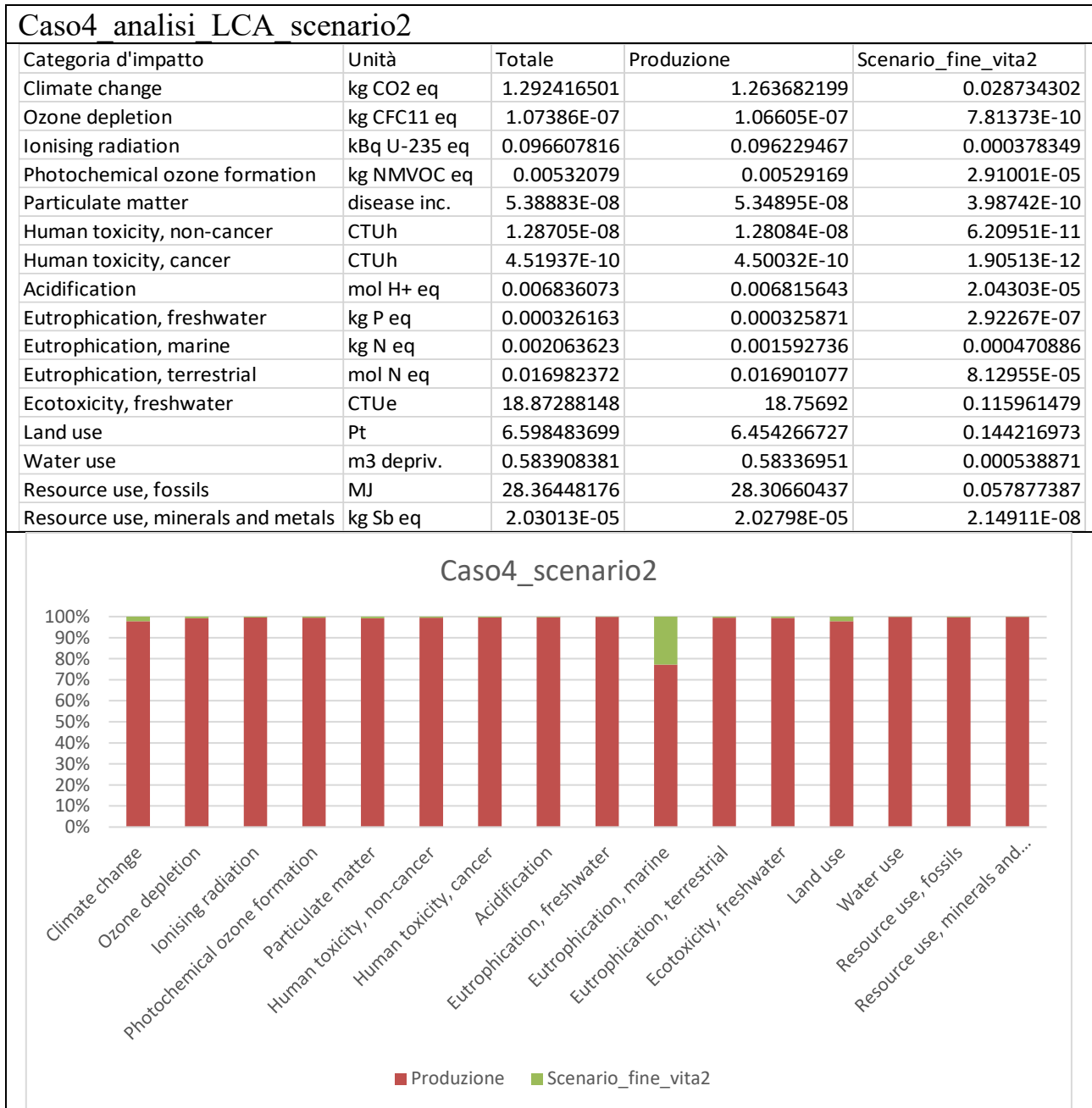
Possiamo notare una diminuzione quasi totale dell'impatto sulla categoria cambiamento climatico dovuto al riciclo del packaging. Analizzando i dati assoluti della tabella, si nota un miglioramento anche in altre categorie di impatto come ad esempio quello sulla tossicità per le acque dolci (un fattore dieci).

Nel terzo caso analizzato, non si considera la fase di lavaggio e il fine vita prevede un conferimento totale in discarica.



L'analisi mostra un impatto quasi totale della fase di produzione. L'impatto, anche se minore, del fine vita, è più evidente sul cambiamento climatico, sull'eutrofizzazione marina e sull'ecotossicità per le acque dolci.

L'ultimo caso analizzato usando questo scenario globale, si differenzia dal precedente perché prevede il riciclo del packaging.

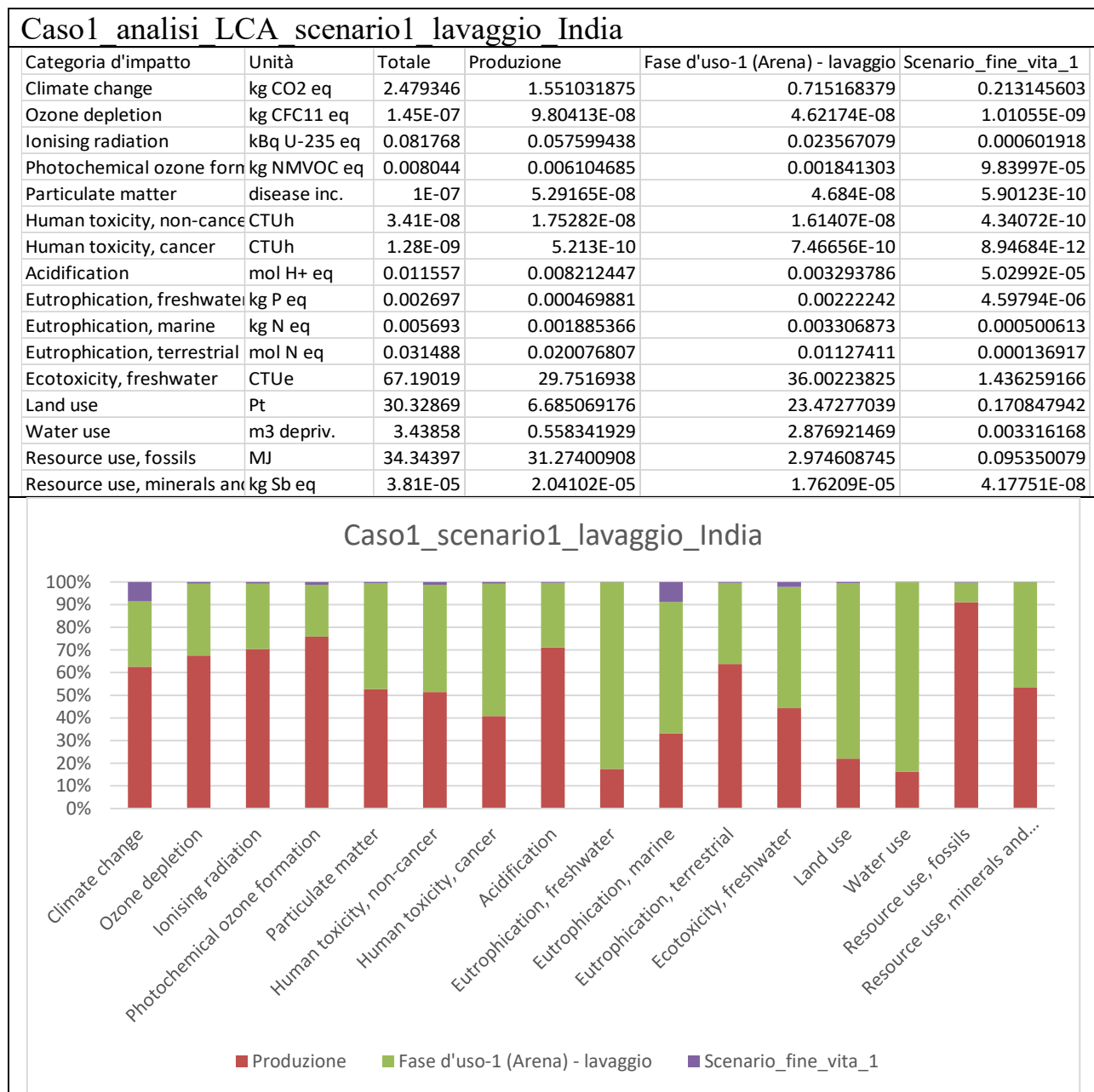


Grazie al riciclo del packaging, notiamo una minor incidenza della fase di fine vita su parecchie categorie, tra cui cambiamento climatico e l'ecotossicità per le acque dolci.

3.6.2 Analisi con dataset Indiani

Successivamente sono stati utilizzati dataset previsti per il mercato indiano. In particolare, è stata considerata la produzione in India di energia elettrica relativamente ai processi di thermoforing with calendering, injection molding e il coreboard.

Analizziamo il primo caso dove sono previsti la fase di lavaggio, con le stesse modalità utilizzate precedentemente, ed il conferimento totale in discarica.

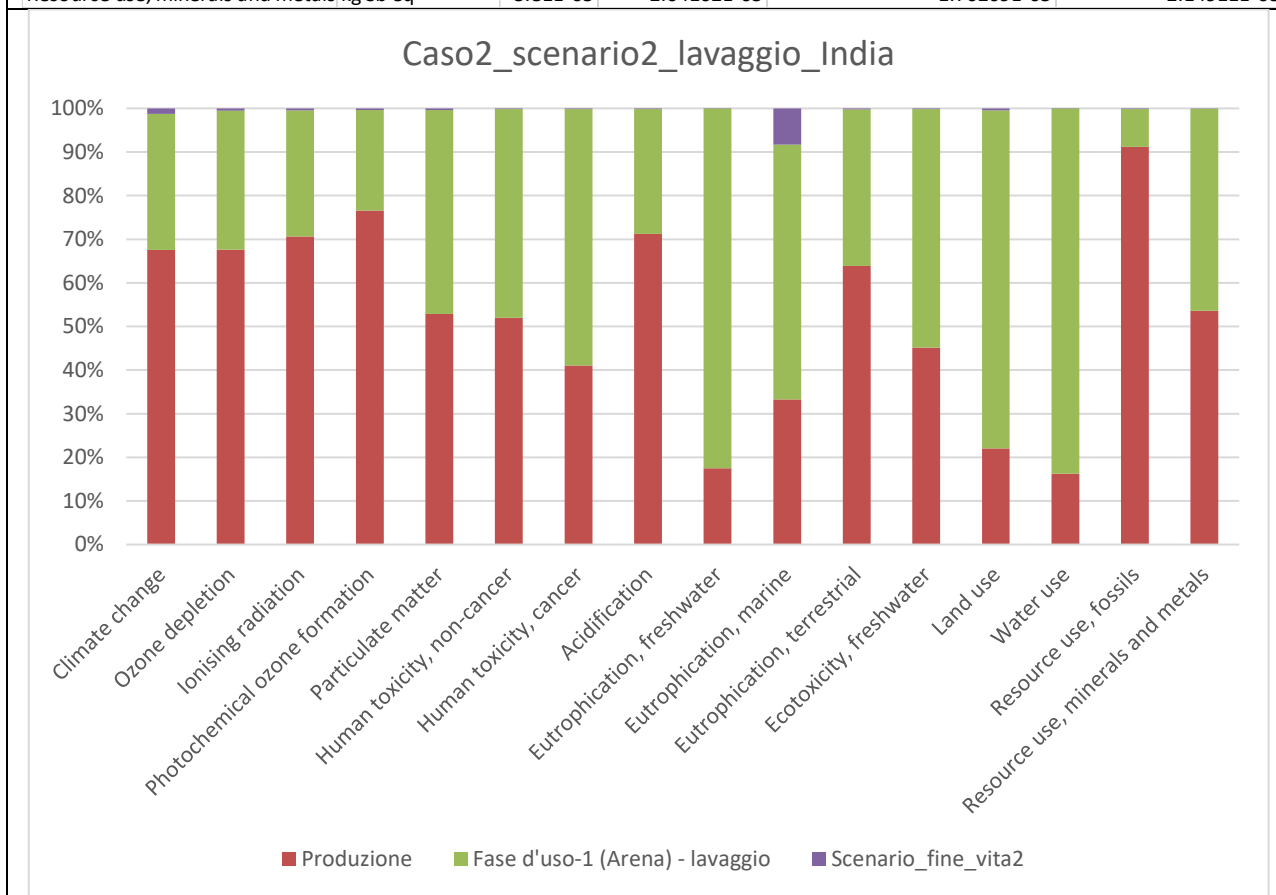


Notiamo nella fase di produzione un aumento dell'impatto per diverse categorie se confrontato con i corrispondenti risultati del paragrafo 3.6.1. Le variazioni saranno quantificate dettagliatamente nel capitolo successivo.

Il secondo caso analizzato assumendo la produzione in India, prevede il lavaggio delle ciabatte ed il loro conferimento in discarica, mentre il packaging viene riciclato.

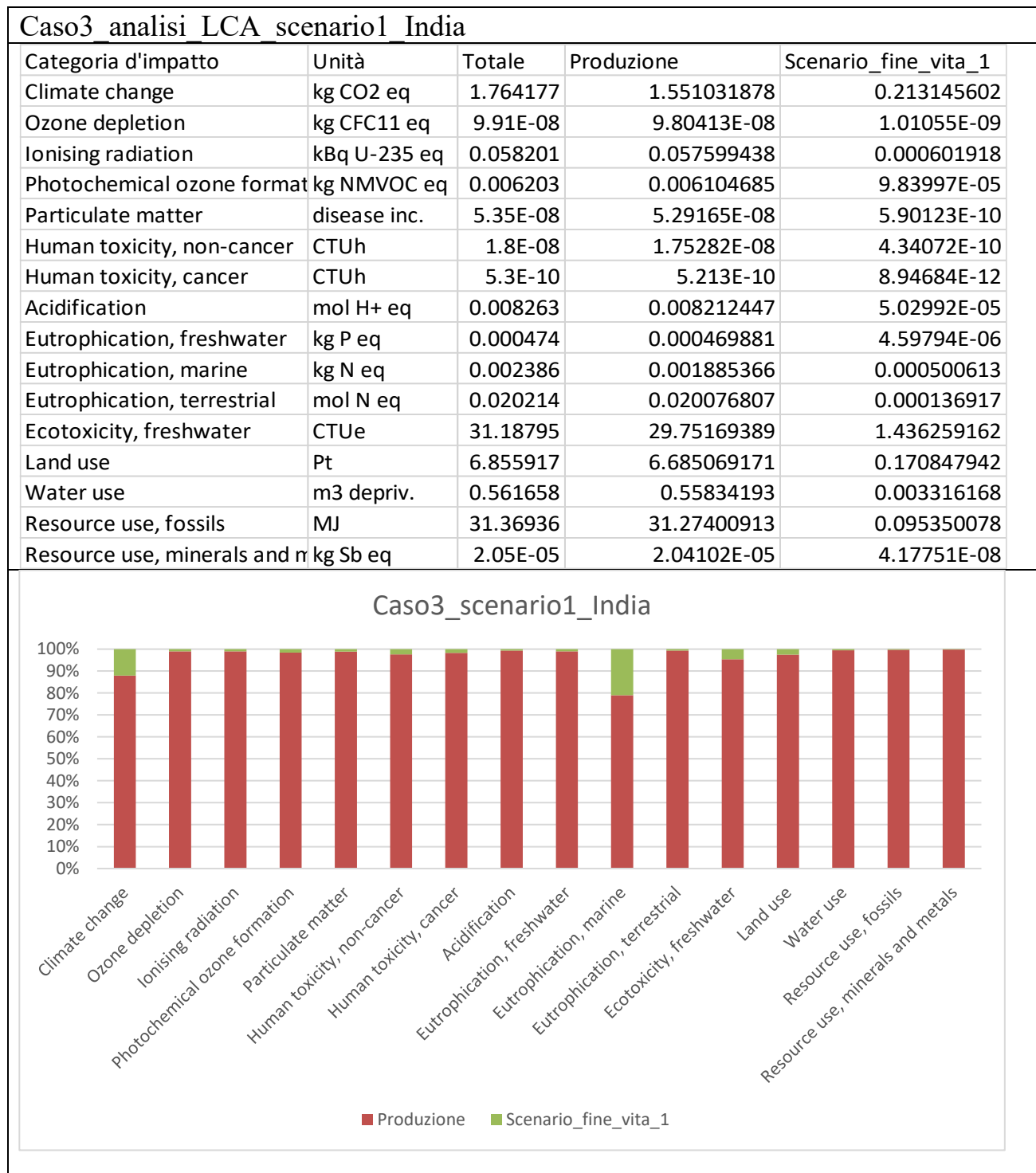
Caso2 analisi LCA scenario2 Lavaggio India

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Produzione | Fase d'uso-1 (Arena) - lavaggio | Scenario_fine_vita2 |
|-----------------------------------|--------------|----------|-------------|---------------------------------|---------------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 2.294935 | 1.551031877 | 0.715168379 | 0.028734302 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.45E-07 | 9.80413E-08 | 4.62174E-08 | 7.81373E-10 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.081545 | 0.057599438 | 0.023567079 | 0.000378349 |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq | 0.007975 | 0.006104685 | 0.001841303 | 2.91001E-05 |
| Particulate matter | disease inc. | 1E-07 | 5.29165E-08 | 4.684E-08 | 3.98742E-10 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 3.37E-08 | 1.75282E-08 | 1.61407E-08 | 6.20951E-11 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 1.27E-09 | 5.213E-10 | 7.46656E-10 | 1.90513E-12 |
| Acidification | mol H+ eq | 0.011527 | 0.008212447 | 0.003293786 | 2.04303E-05 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 0.002693 | 0.000469881 | 0.00222242 | 2.92267E-07 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.005663 | 0.001885366 | 0.003306873 | 0.000470886 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.031432 | 0.020076807 | 0.01127411 | 8.12955E-05 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 65.86989 | 29.75169374 | 36.00223825 | 0.115961479 |
| Land use | Pt | 30.30206 | 6.685069154 | 23.47277039 | 0.144216973 |
| Water use | m3 depriv. | 3.435802 | 0.55834193 | 2.876921469 | 0.000538871 |
| Resource use, fossils | MJ | 34.3065 | 31.27400911 | 2.974608745 | 0.057877386 |
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq | 3.81E-05 | 2.04102E-05 | 1.76209E-05 | 2.14911E-08 |



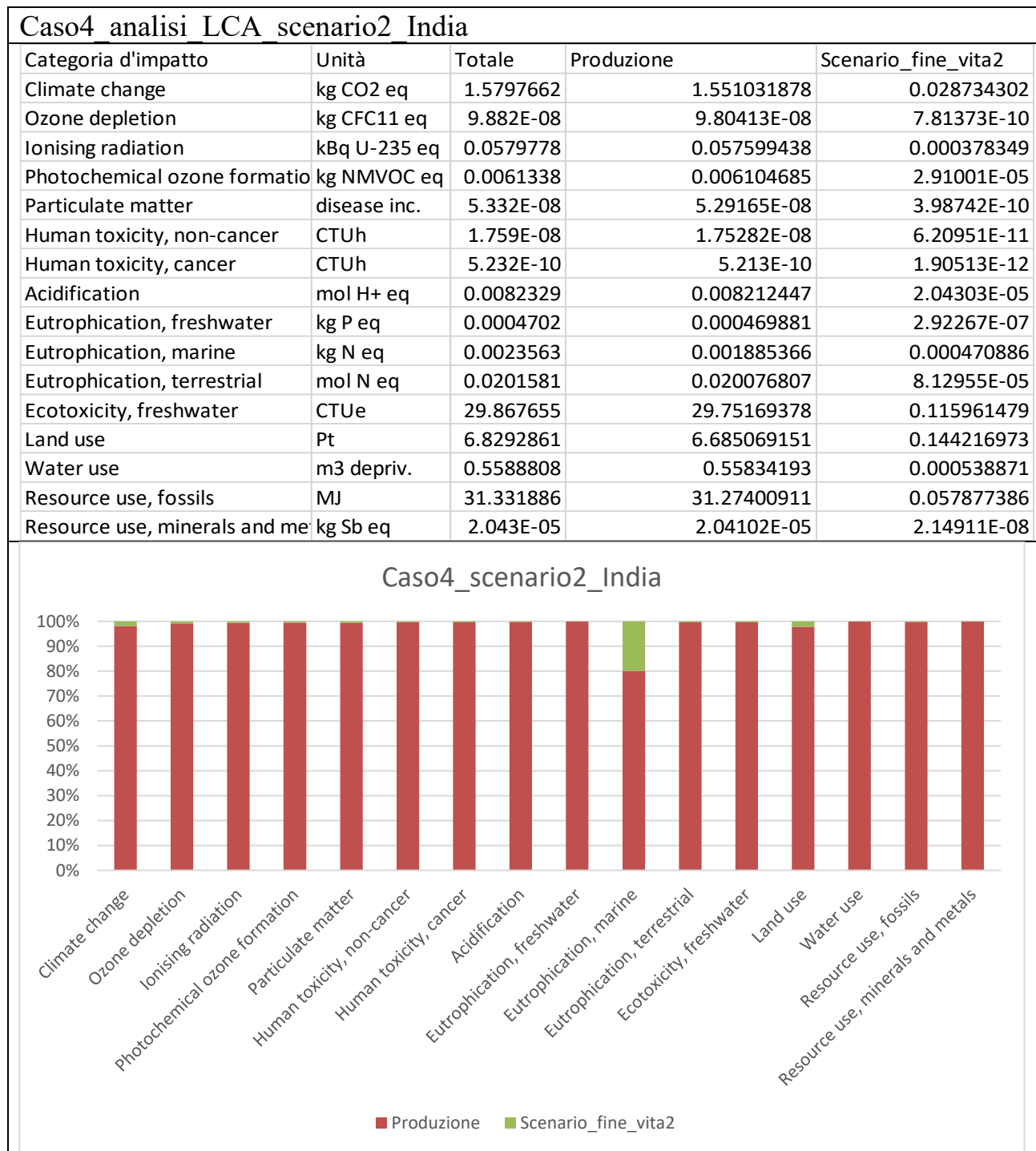
La differenza nelle percentuali di impatto è simile a quanto visto per il caso della produzione con parametri generici.

Il terzo caso esaminato non prevede il lavaggio ma il conferimento totale in discarica.



Anche in questo caso, percentualmente l'impatto della produzione è dominante rispetto al fine vita, con un certo aumento generalizzato dovuto alla produzione in India.

L'ultimo caso analizzato non prevede il lavaggio ma il riciclo del packaging.



Naturalmente l'impatto del fine vita si riduce in maniera analoga a quanto visto nel corrispondente caso effettuato con parametri generici, fermo restando il maggior impatto nella fase di produzione.

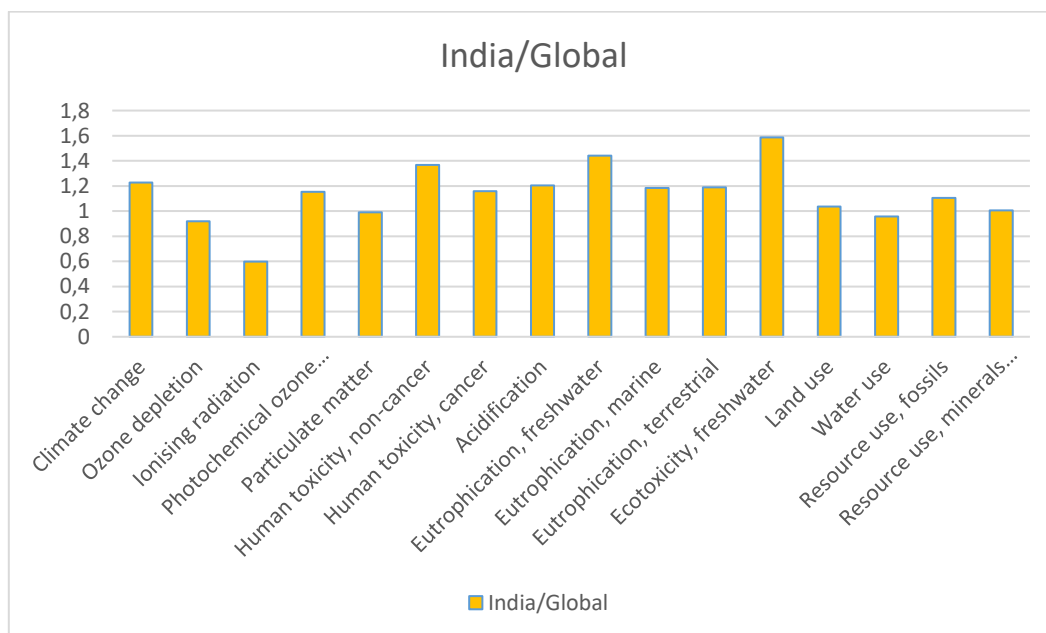
3.7 Valutazione e interpretazione dei risultati

In questo paragrafo viene presentato un confronto diretto, in termini di rapporto, tra gli impatti dovuti alla produzione, alla fase d'uso, ed al fine vita nei vari casi analizzati.

Nella tabella seguente vengono comparati gli impatti derivanti dall'utilizzo di parametri globali rispetto a quelli caratteristici di una produzione in India. Prendiamo in considerazione la fase di produzione.

| Categoria d'impatto | Unità | Produzione_Global | Produzione_India | India/Global |
|-----------------------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 1.263682204 | 1.551031875 | 1.22739077 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.06605E-07 | 9.80413E-08 | 0.91966909 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.096229467 | 0.057599438 | 0.59856341 |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq | 0.00529169 | 0.006104685 | 1.15363612 |
| Particulate matter | disease inc. | 5.34895E-08 | 5.29165E-08 | 0.98928697 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 1.28084E-08 | 1.75282E-08 | 1.36849411 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 4.50032E-10 | 5.213E-10 | 1.15836258 |
| Acidification | mol H+ eq | 0.006815643 | 0.008212447 | 1.20494084 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 0.000325871 | 0.000469881 | 1.44192221 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.001592736 | 0.001885366 | 1.18372789 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.016901077 | 0.020076807 | 1.18790108 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 18.75692006 | 29.7516938 | 1.58617159 |
| Land use | Pt | 6.454266751 | 6.685069176 | 1.03575967 |
| Water use | m3 depriv. | 0.583369512 | 0.558341929 | 0.95709823 |
| Resource use, fossils | MJ | 28.30660453 | 31.27400908 | 1.10483082 |
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq | 2.02798E-05 | 2.04102E-05 | 1.00642667 |

Per comodità di analisi si riporta il grafico del rapporto tra gli impatti.

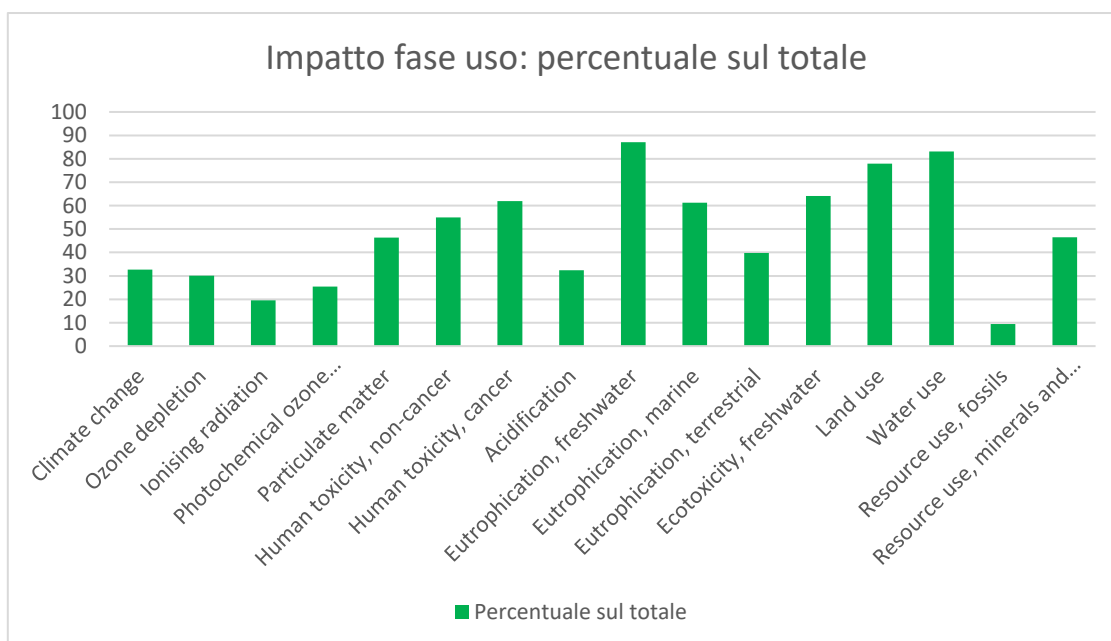


Vi sono, come prevedibile, parecchie categorie dove l'impatto della produzione in India è maggiore. Le più evidenti sono il cambiamento climatico, la tossicità per

l'uomo, l'eutrofizzazione e l'ecotossicità. Vi sono però alcune categorie sulle quali vi è un minor impatto, la differenza maggiore si riscontra nell'ambito delle radiazioni ionizzanti.

Nella tabella successiva, e relativo grafico, vengono confrontati gli impatti dovuti alla fase d'uso, che prevede il lavaggio. In particolare, si determina la percentuale di impatto sul totale delle varie categorie prendendo ad esempio come riferimento il caso1, ovvero produzione con parametri generici e fine vita totalmente in discarica.

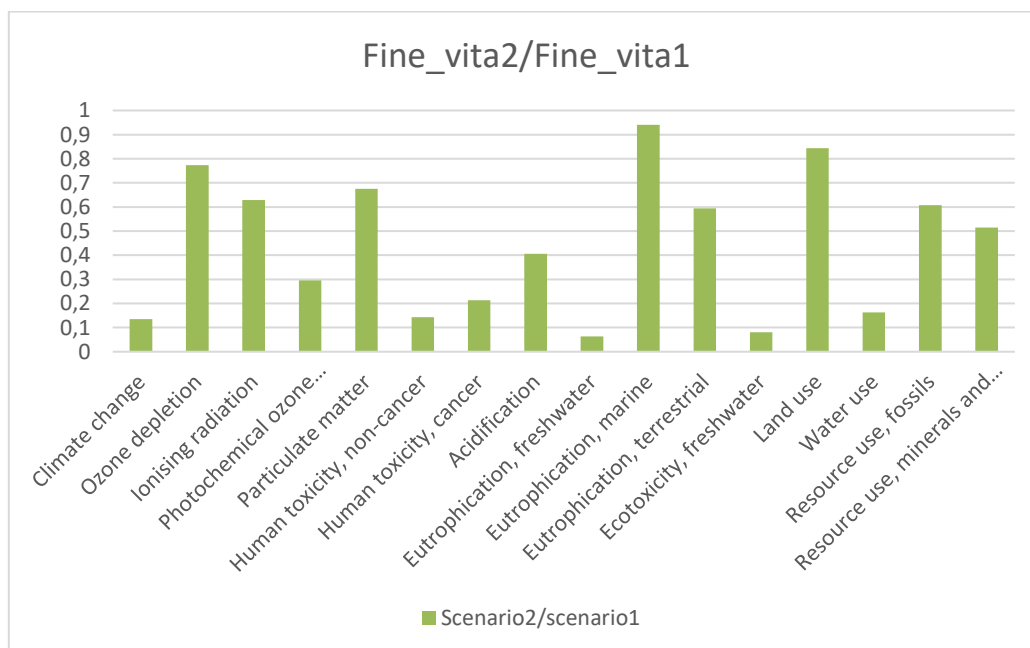
| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Fase d'uso-1 (Arena) - lavaggio | Percentuale sul total |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------------------------------|-----------------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 2.191996 | 0.715168379 | 32.62635144 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.54E-07 | 4.62174E-08 | 30.04387886 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.120398 | 0.023567079 | 19.57423556 |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq | 0.007231 | 0.001841303 | 25.46263471 |
| Particulate matter | disease inc. | 1.01E-07 | 4.684E-08 | 46.41316929 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 2.94E-08 | 1.61407E-08 | 54.9318379 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 1.21E-09 | 7.46656E-10 | 61.93051425 |
| Acidification | mol H+ eq | 0.01016 | 0.003293786 | 32.42001989 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 0.002553 | 0.00222242 | 87.05509441 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.0054 | 0.003306873 | 61.23587137 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.028312 | 0.01127411 | 39.8208132 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 56.19542 | 36.00223821 | 64.06614605 |
| Land use | Pt | 30.09789 | 23.47277048 | 77.98810563 |
| Water use | m3 depriv. | 3.463607 | 2.876921449 | 83.06142533 |
| Resource use, fossils | MJ | 31.37656 | 2.974608737 | 9.480352277 |
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq | 3.79E-05 | 1.76209E-05 | 46.44101865 |



Impatti superiori al 50% del totale si evidenziano su 7 delle 16 categorie considerate. I maggiori sono quelli sull'eutrofizzazione, l'uso del territorio e l'uso d'acqua (80%).

Nella successiva tabella, e relativo grafico, vengono invece confrontati gli impatti derivanti dai due diversi scenari di fine vita: riciclo del packaging vs. tutto in discarica (scenario fine vita 2 vs. scenario fine vita 1). Il confronto è effettuato sull'impatto della fase stessa. I dati considerati si riferiscono alla produzione con dataset generici.

| Categoria d'impatto | Unità | Scenario_fine_vita_1 | Scenario_fine_vita2 | Scenario2/scenario1 |
|------------------------------|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 0.213145603 | 0.028734302 | 0.13481067 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.01055E-09 | 7.81373E-10 | 0.773214902 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.000601918 | 0.000378349 | 0.62857233 |
| Photochemical ozone formati | kg NMVOC eq | 9.83997E-05 | 2.91001E-05 | 0.295734091 |
| Particulate matter | disease inc. | 5.90123E-10 | 3.98742E-10 | 0.675692958 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 4.34072E-10 | 6.20951E-11 | 0.143052437 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 8.94684E-12 | 1.90513E-12 | 0.212939039 |
| Acidification | mol H+ eq | 5.02992E-05 | 2.04303E-05 | 0.406176489 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 4.59794E-06 | 2.92267E-07 | 0.063564641 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.000500613 | 0.000470886 | 0.940619716 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.000136917 | 8.12955E-05 | 0.593755664 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 1.436259166 | 0.115961479 | 0.080738548 |
| Land use | Pt | 0.170847942 | 0.144216973 | 0.844124735 |
| Water use | m3 depriv. | 0.003316168 | 0.000538871 | 0.162498037 |
| Resource use, fossils | MJ | 0.095350078 | 0.057877387 | 0.606998836 |
| Resource use, minerals and m | kg Sb eq | 4.17751E-08 | 2.14911E-08 | 0.514449063 |



La riduzione dell'impatto è evidente per tutte le categorie, meno significativa per l'eutrofizzazione marina e per l'uso del territorio. Molto significativa è la riduzione relativa a: cambiamento climatico, tossicità per la salute, eutrofizzazione ed ecotossicità per le acque dolci e uso dell'acqua.

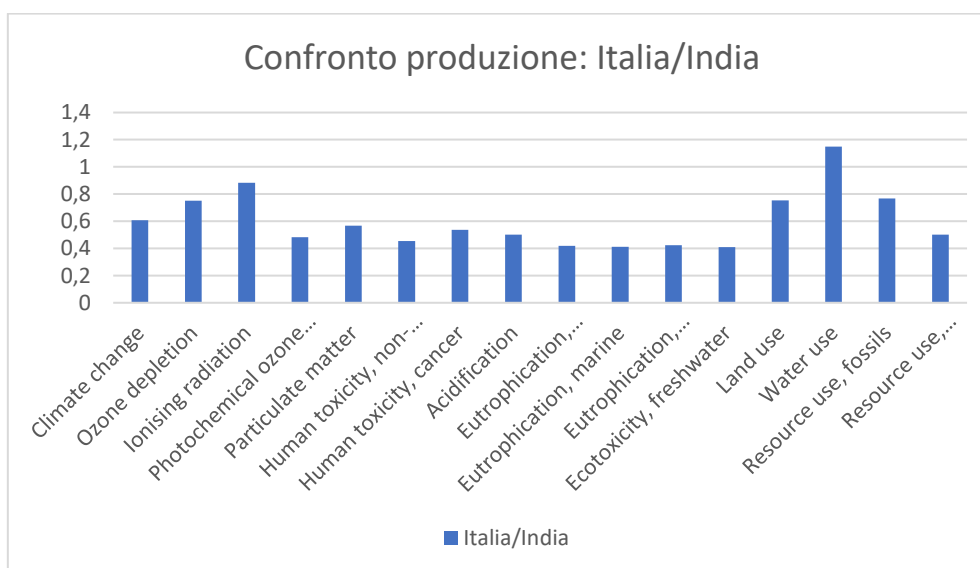
Capitolo 4 – SCENARI DI MIGLIORAMENTO

In questo capitolo vengono analizzati possibili scenari di miglioramento. Il primo è relativo ad una produzione realizzata tutta in Italia. Il secondo è relativo alla produzione delle ciabatte con l'uso, per il cinquanta per cento, di materiale riciclato da scarti di produzione. Infine ho valutato l'ipotesi di ciabatte realizzate interamente in PLA, un materiale biodegradabile di origine naturale.

4.1 Produzione in Italia

Per confrontare la variazione di impatto grazie alla produzione in Italia, nella tabella seguente vengono riportati gli impatti nella sola fase di produzione, ottenuti con i due dataset (Indiano, Italiano), ed il rapporto dei relativi impatti. Il grafico successivo evidenzia direttamente questo rapporto.

| Categoria d'impatto | Unità | Produzione_India | Produzione Italia | Italia/India |
|-----------------------------------|--------------|------------------|-------------------|--------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 1.551031875 | 0.943353943 | 0.608211 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 9.80413E-08 | 7.361E-08 | 0.750806 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.057599438 | 0.050904104 | 0.88376 |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq | 0.006104685 | 0.0029453 | 0.482465 |
| Particulate matter | disease inc. | 5.29165E-08 | 3.00046E-08 | 0.567018 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 1.75282E-08 | 7.95402E-09 | 0.453784 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 5.213E-10 | 2.80281E-10 | 0.537658 |
| Acidification | mol H+ eq | 0.008212447 | 0.004127447 | 0.502584 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 0.000469881 | 0.000197062 | 0.419388 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.001885366 | 0.000774715 | 0.41091 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.020076807 | 0.008490618 | 0.422907 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 29.7516938 | 12.19089007 | 0.409754 |
| Land use | Pt | 6.685069176 | 5.03017235 | 0.752449 |
| Water use | m3 depriv. | 0.558341929 | 0.642322026 | 1.15041 |
| Resource use, fossils | MJ | 31.27400908 | 24.03000074 | 0.76837 |
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq | 2.04102E-05 | 1.02358E-05 | 0.501503 |



Notiamo che la produzione in Italia riduce l'impatto ambientale di circa il 50% mediamente, tranne sull'uso dell'acqua in cui aumenta quasi del 15%. Per quanto

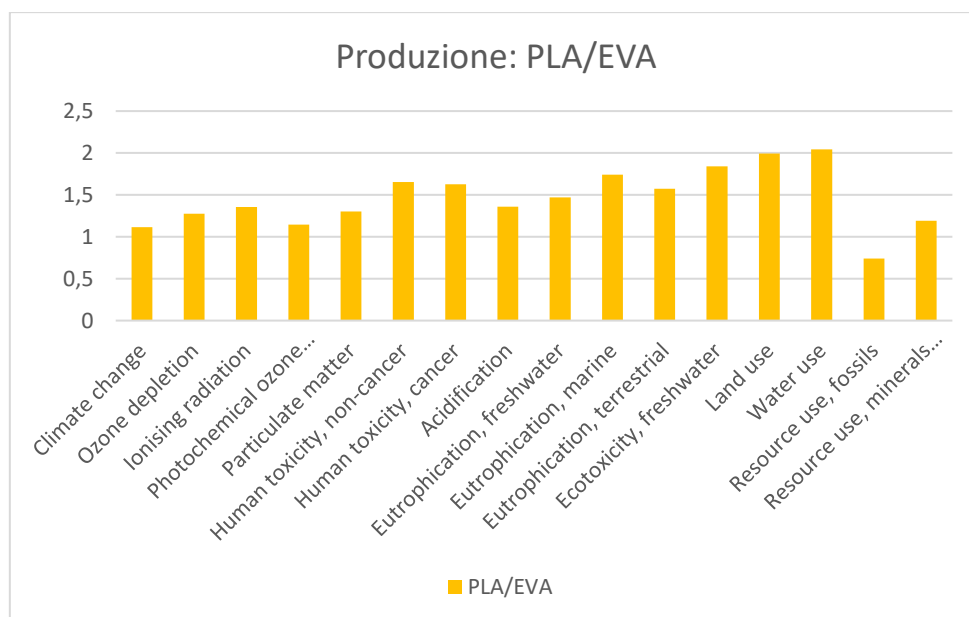
riguarda la fase d'uso ed il fine vita, non vi sono variazioni rispetto agli scenari precedenti in quanto erano già effettuate in Italia e il materiale è rimasto lo stesso.

4.2 Utilizzo materiale Bio-based per la ciabatta

Il materiale PLA, Polilattato, è il polimero dell'acido lattico. Ha caratteristiche simili al poliestere, è trasparente, lucido e con ottime caratteristiche di resistenza. La caratteristica principale è la biodegradabilità, inoltre è prodotto con materie prime naturali e rinnovabili come il mais, la barbabietola e la canna da zucchero. Nella tabella seguente sono quindi ricalcolati i valori di impatto sulla produzione con PLA, confrontati con quelli relativi alla produzione in Eva.

| Categoria d'impatto | Unità | Produzione_PLA | Produzione_EVA | PLA/EVA |
|----------------------------|--------------|----------------|----------------|-------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 1.410988159 | 1.263682204 | 1.116568829 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.35989E-07 | 1.06605E-07 | 1.275629356 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.130611954 | 0.096229467 | 1.357296865 |
| Photochemical ozone for | kg NMVOC eq | 0.006055516 | 0.00529169 | 1.144344276 |
| Particulate matter | disease inc. | 6.96688E-08 | 5.34895E-08 | 1.30247459 |
| Human toxicity, non-canc | CTUh | 2.11654E-08 | 1.28084E-08 | 1.652460365 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 7.31759E-10 | 4.50032E-10 | 1.626014756 |
| Acidification | mol H+ eq | 0.00927303 | 0.006815643 | 1.360550952 |
| Eutrophication, freshwat | kg P eq | 0.000479535 | 0.000325871 | 1.471547533 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.002773927 | 0.001592736 | 1.741611245 |
| Eutrophication, terrestria | mol N eq | 0.0266136 | 0.016901077 | 1.574668922 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 34.54370836 | 18.75692006 | 1.841651414 |
| Land use | Pt | 12.87372326 | 6.454266751 | 1.994606631 |
| Water use | m3 depriv. | 1.192941306 | 0.583369512 | 2.044915412 |
| Resource use, fossils | MJ | 20.91142234 | 28.30660453 | 0.738747112 |
| Resource use, minerals a | kg Sb eq | 2.41574E-05 | 2.02798E-05 | 1.191204788 |

Nel grafico successivo viene riportato il rapporto per le varie categorie.

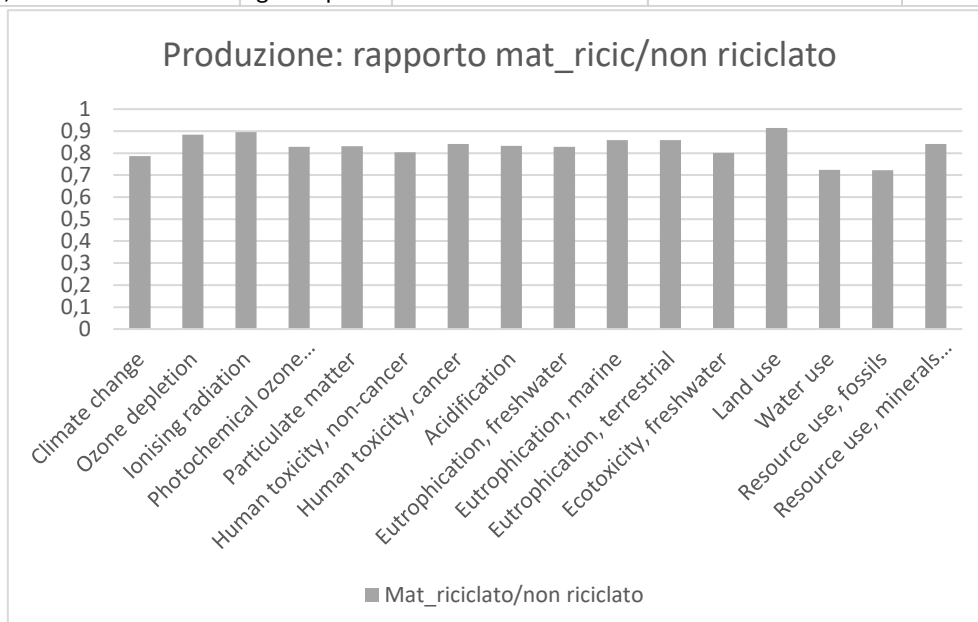


Notiamo che, nonostante il PLA sia un materiale di origine naturale, l'impatto della produzione, risulta essere maggiore in tutte le categorie tranne nell'uso delle risorse fossili. Addirittura, per quanto riguarda l'uso del territorio e dell'acqua l'impatto diventa praticamente doppio, in quanto il materiale deriva da produzione agricola.

4.3 Utilizzo di materiale riciclato da scarti di produzione

E' stata considerata la possibilità di utilizzare per le ciabatte il 50% di materiale EVA derivante da scarti di produzione. Pertanto, sono state ripetute le analisi negli stessi casi precedenti, relativi ai parametri globali, considerando questa nuova composizione. La tabella seguente, ed il relativo grafico, mostrano la riduzione di impatto nella fase di produzione.

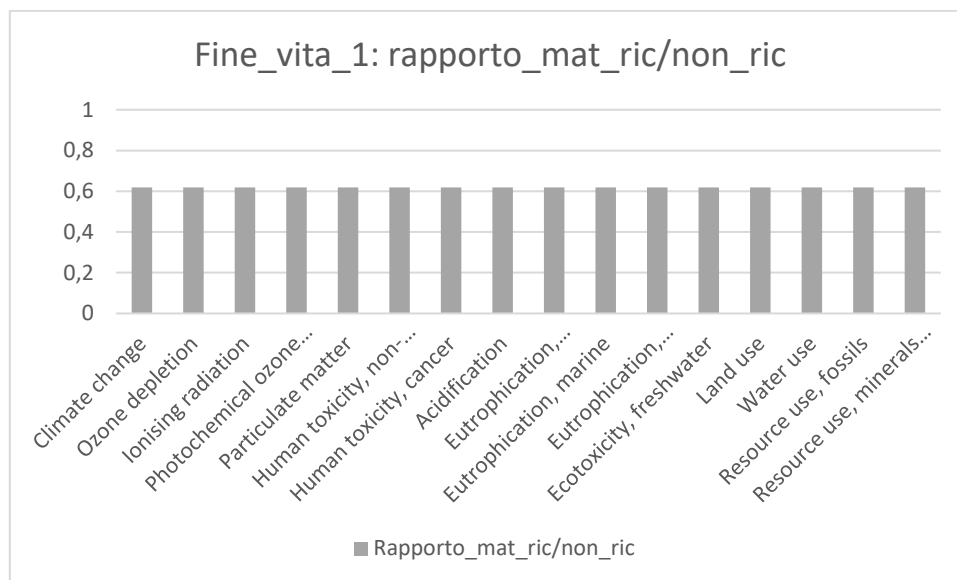
| Categoria d'impatto | Unità | Produzione_no_ricicl | Produzione_50%_ric | Mat_riciclato/non riciclato |
|-----------------------------------|--------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 1.263682204 | 0.993739413 | 0.786383958 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.06605E-07 | 9.42067E-08 | 0.883698882 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.096229467 | 0.086238163 | 0.896172095 |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq | 0.00529169 | 0.004382738 | 0.828230334 |
| Particulate matter | disease inc. | 5.34895E-08 | 4.4518E-08 | 0.832273901 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 1.28084E-08 | 1.03018E-08 | 0.804298904 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 4.50032E-10 | 3.78871E-10 | 0.841874314 |
| Acidification | mol H+ eq | 0.006815643 | 0.005678712 | 0.833188058 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 0.000325871 | 0.000270195 | 0.829145702 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.001592736 | 0.001368631 | 0.859295655 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.016901077 | 0.014523227 | 0.859307776 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 18.75692006 | 15.03534196 | 0.801589062 |
| Land use | Pt | 6.454266751 | 5.903507001 | 0.91466734 |
| Water use | m3 depriv. | 0.583369512 | 0.422528139 | 0.724289032 |
| Resource use, fossils | MJ | 28.30660453 | 20.46719366 | 0.723053648 |
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq | 2.02798E-05 | 1.70676E-05 | 0.841604259 |



Notiamo una riduzione dell’impatto su tutte le categorie, grazie all’uso in produzione del 50% di materiale riciclato da scarti di lavorazione. La riduzione è in media di circa il 20% anche se ad esempio sull’uso del territorio è solo del 10% mentre sull’uso dell’acqua e sulle risorse fossili è quasi del 30%.

E’ stata notata anche una riduzione dell’impatto nella fase di fine vita, per lo scenario 1 (tutto in discarica) i risultati sono riportati nella tabella seguente e relativo grafico che mostra il rapporto rispetto allo scenario in cui veniva usato materiale non riciclato.

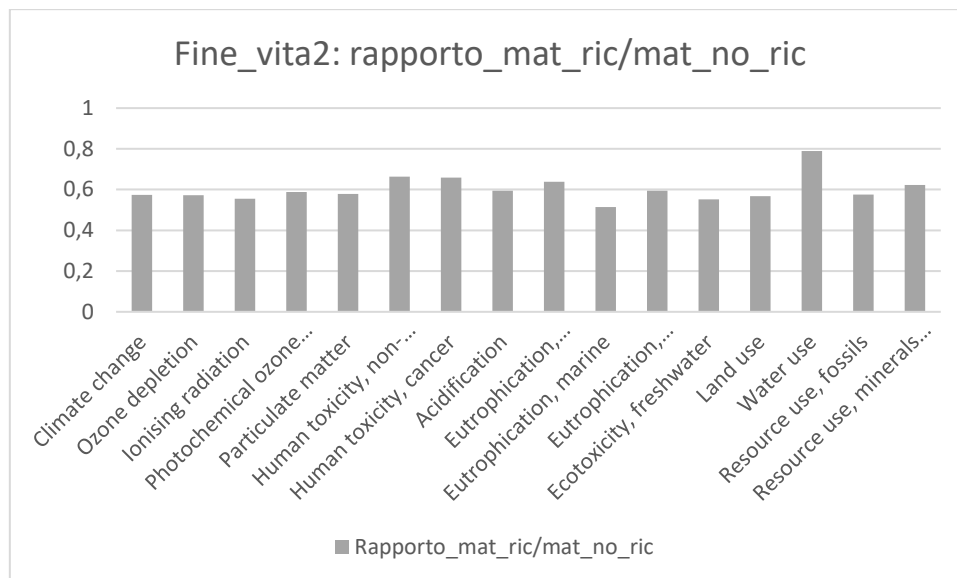
| Categoria d'impatto | Unità | Scenario_fine_vita_1 | Scenario_fine_vita_1_con_mat_50%_ric | Rapporto_mat_ric/non_ri |
|---------------------------------|--------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 0.213145603 | 0.13172552 | 0.618007211 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 1.01055E-09 | 6.24528E-10 | 0.618007211 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.000601918 | 0.00037199 | 0.618007211 |
| Photochemical ozone formation | kg NMVOC eq | 9.83997E-05 | 6.08117E-05 | 0.618007211 |
| Particulate matter | disease inc. | 5.90123E-10 | 3.647E-10 | 0.618007211 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 4.34072E-10 | 2.6826E-10 | 0.618007211 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 8.94684E-12 | 5.52921E-12 | 0.618007211 |
| Acidification | mol H+ eq | 5.02992E-05 | 3.10853E-05 | 0.618007211 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 4.59794E-06 | 2.84156E-06 | 0.618007211 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.000500613 | 0.000309382 | 0.618007211 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 0.000136917 | 8.46159E-05 | 0.618007211 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 1.436259166 | 0.887618522 | 0.618007211 |
| Land use | Pt | 0.170847942 | 0.10558526 | 0.618007211 |
| Water use | m3 depriv. | 0.003316168 | 0.002049416 | 0.618007211 |
| Resource use, fossils | MJ | 0.095350078 | 0.058927036 | 0.618007211 |
| Resource use, minerals and meta | kg Sb eq | 4.17751E-08 | 2.58173E-08 | 0.618007211 |



L’impatto si riduce a circa il 60% rispetto al caso iniziale, ed è costante per tutte le categorie.

Lo stesso confronto è stato poi ripetuto per l'altro scenario di fine vita, quello che prevede il riciclo del packaging. Di seguito la tabella con il calcolo del rapporto ed il relativo grafico.

| Categoria d'impatto | Unità | Scenario_fine_vita2 | scenario_fine_vita2_con_mat_ric | Rapporto_mat_ric/mat_no_ric |
|------------------------------|--------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Climate change | kg CO2 eq | 0.028734302 | 0.016502809 | 0.574324345 |
| Ozone depletion | kg CFC11 eq | 7.81373E-10 | 4.47247E-10 | 0.572385409 |
| Ionising radiation | kBq U-235 eq | 0.000378349 | 0.000210087 | 0.555272234 |
| Photochemical ozone formati | kg NMVOC eq | 2.91001E-05 | 1.7107E-05 | 0.587867982 |
| Particulate matter | disease inc. | 3.98742E-10 | 2.30874E-10 | 0.579005559 |
| Human toxicity, non-cancer | CTUh | 6.20951E-11 | 4.11968E-11 | 0.663446062 |
| Human toxicity, cancer | CTUh | 1.90513E-12 | 1.25369E-12 | 0.658060078 |
| Acidification | mol H+ eq | 2.04303E-05 | 1.21475E-05 | 0.594582661 |
| Eutrophication, freshwater | kg P eq | 2.92267E-07 | 1.86638E-07 | 0.638588081 |
| Eutrophication, marine | kg N eq | 0.000470886 | 0.000242417 | 0.514810675 |
| Eutrophication, terrestrial | mol N eq | 8.12955E-05 | 4.83349E-05 | 0.594558126 |
| Ecotoxicity, freshwater | CTUe | 0.115961479 | 0.064068532 | 0.552498404 |
| Land use | Pt | 0.144216973 | 0.081786222 | 0.567105383 |
| Water use | m3 depriv. | 0.000538871 | 0.000425218 | 0.789091159 |
| Resource use, fossils | MJ | 0.057877387 | 0.033295315 | 0.5752733 |
| Resource use, minerals and m | kg Sb eq | 2.14911E-08 | 1.33984E-08 | 0.623437631 |



Notiamo che nel caso di riciclo del packaging, l'impatto sul fine vita si riduce in media al 60% rispetto al caso in cui non venga utilizzato materiale riciclato in fase di produzione. Vi sono delle lievi fluttuazioni in funzione delle varie categorie, in particolare notiamo la riduzione maggiore (circa 50%) per l'eutrofizzazione marina ed una riduzione minore (circa 22%) sull'uso dell'acqua.

CONCLUSIONI

L'analisi LCA effettuata sulle ciabatte Hydrossoft prodotte dall'azienda Arena, ha evidenziato un maggior impatto della produzione in India, se confrontato con parametri medi globali, sulla maggior parte delle categorie di impatto ambientale considerate nella simulazione, come ad esempio il cambiamento climatico, la tossicità per l'uomo, l'eutrofizzazione e l'ecotossicità. Va notato che solo in poche categorie vi è un minor impatto: una lieve riduzione si ha relativamente alla riduzione della fascia di ozono e all'uso dell'acqua, mentre una più significativa riduzione dell'impatto si ha sulla categoria delle radiazioni ionizzanti.

Un deciso miglioramento rispetto ai due scenari di produzione precedenti, si otterrebbe spostando la produzione in Italia. L'impatto ambientale diminuirebbe su tutte le categorie tranne sull'uso dell'acqua.

Per quanto riguarda le fasi d'uso e di fine vita ipotizzate, poiché esse sono svolte interamente in Italia, ed il materiale utilizzato in assemblaggio è lo stesso (EVA), non si rilevano variazioni dell'impatto spostando la produzione. A tal proposito, si evidenzia che la fase d'uso ipotizzata, che prevede il lavaggio una volta al mese per due anni, ha un'incidenza superiore al 50% dell'impatto totale su circa la metà delle categorie considerate. I maggiori sono quelli sull'eutrofizzazione, l'uso del territorio e l'uso d'acqua (superiori al 70% del totale), i minori (inferiori al 20%) sull'uso delle risorse fossili e sulle radiazioni ionizzanti. Il confronto delle due fasi di fine vita ipotizzate, ha invece evidenziato come il riciclo del packaging determina una riduzione importante su categorie come la tossicità per la salute, eutrofizzazione ed inquinamento delle acque dolci e uso dell'acqua. Molto inferiore è la riduzione dell'impatto su eutrofizzazione marina e sull'uso del territorio.

E' stato poi analizzato l'impatto derivante dall'uso di un materiale prodotto con materie prime naturali e rinnovabili, il PLA. I risultati hanno mostrato che, nonostante il PLA sia un materiale di origine naturale, l'impatto in fase di produzione risulta essere maggiore in tutte le categorie tranne nell'uso delle risorse fossili. Addirittura, l'impatto risulta essere quasi il doppio per quanto riguarda l'uso del territorio e dell'acqua.

Infine, è stata considerata la possibilità di utilizzare in fase di produzione il 50% di materiale, sempre EVA, derivante da scarti di lavorazione. In questo caso, gli impatti in produzione diminuirebbero in media di un 20% (in media sulle varie categorie) e di circa un 40% sulle fasi di fine vita, sia quella che prevede tutto in discarica sia quella che prevede un riciclo del packaging.

Pertanto, concludendo, la produzione in Italia, di materiale EVA, riciclato al 50% da scarti di produzione, permetterebbe di avere il prodotto più sostenibile dal punto di vista ambientale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Our Common Future”, World Commission on Environment and Development (WCED), 1987.
- [2] “Agenda 21”, United Nations Conference on Environment & Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3 to 14 June 1992
- [3] A. Lanza, “Lo sviluppo sostenibile”, Ed. Il Mulino Bologna, 2006.
- [4] E. Holden, K. Linnerud, D. Banister, “Sustainable development: Our Common Future revisited”, *Global Environmental Change*, Volume 26, 2014, pp. 130-139.
- [5] A. Huang, F. Badurdeen, I.S. Jawahir, “Towards Developing Sustainable Reconfigurable Manufacturing Systems”, *Procedia Manufacturing*, Volume 17, 2018, pp. 1136-1143.
- [6] I.S. Jawahir, R. Bradley, “Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing”, *Procedia CIRP*, Volume 40, 2016, pp. 103-108.
- [7] T. Lu, A. Gupta, A. Jayal, F. Badurdeen, S. Feng, O. Dillon Jr, I. S. Jawahir, (2011). “A Framework of Product and Process Metrics for Sustainable Manufacturing”. In book: *Advances in Sustainable Manufacturing*. 10.1007/978-3-642-20183-7_48.
- [8] W. Faulkner, F. Badurdeen, “Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 85, 2014, Pages 8-18.
- [9] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. “A safe operating space for humanity”. *Nature* 461, 472–475 (2009).
- [10] M. Reynolds, M. D. Checkel, and R. A. Fraser. “Application of Monte Carlo Analysis to Life Cycle Assessment.” *SAE Transactions* 108 (1999): 1–9.