

LE FASI OPZIONALI DI NORMALIZZAZIONE E PESATURA NELL'ANALISI DEL CICLO DI VITA: APPROCCI POSSIBILI E STATO DELL'ARTE

Giulia Cavenago*, Lucia Rigamonti, Mario Grosso

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale

Sommario – Il presente articolo si pone due obiettivi: far luce sullo stato dell'arte delle fasi di normalizzazione e pesatura della metodologia di analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA) e indagare l'effettiva introduzione di tali fasi negli studi LCA applicati ai rifiuti. Per fornire una panoramica aggiornata, è stata valutata la letteratura ad oggi sviluppata su normalizzazione e pesatura e, nella prima parte dell'articolo, viene fatta chiarezza sugli obiettivi di tali fasi, sulle modalità di applicazione delle stesse e sulle conseguenze che la loro introduzione comporta nella presentazione dei risultati di uno studio LCA. Secondo la norma ISO 14044, standard tecnico che fornisce requisiti e linee guida su come condurre uno studio LCA, queste due fasi non sono obbligatorie, pertanto spesso gli studi si fermano alla fase precedente, quella di caratterizzazione degli impatti. Tuttavia, da una ricerca condotta nel 2015 nel contesto della Life Cycle Initiative, un'iniziativa congiunta del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e della Società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC), è emerso che, seppur ritenuto complicato e ancora poco robusto utilizzarle, entrambe le fasi vengano considerate rilevanti ai fini decisionali. Aggregare i risultati normalizzati e pesati, fornendo un unico punteggio indice dell'impatto ambientale complessivo del prodotto, è infatti d'aiuto per il decisore, per il quale l'interpretazione delle molteplici informazioni ambientali può risultare complessa. Per indagare dunque l'effettivo utilizzo di tali fasi, è stata condotta un'indagine sugli studi LCA applicati ai rifiuti e pubblicati nel biennio 2019-2020 su alcune note riviste scientifiche. Dall'analisi è emerso che nell'80% dei casi almeno una delle due fasi è applicata. L'approccio di normalizzazione principalmente usato per riportare i diversi impatti sulla stessa scala di misura e procedere con la fase di pesatura è quello esterno, mentre gli approcci di pesatura più spesso adottati sono quelli binari (*footprint* o *pesi uguali*).

Parole chiave: normalizzazione, pesatura, Life Cycle Assessment, aggregazione, rifiuti.

NORMALISATION AND WEIGHTING IN THE LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY: POSSIBLE APPROACHES AND STATE OF THE ART

Abstract – This article fits into the landscape of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which aims to evaluate the environmental impact of a product, a production process, a service, or an organisation. In the case of a product, its entire life cycle is taken into account; in the case of a process or service, all the phases that com-

pose it, therefore all the input and output flows of materials and energy, are considered. Eventually, in the case of an organisation, its environmental footprint is quantified by taking into account all the flows associated with its activities from a supply-chain perspective. The LCA methodology considers the impact of the system under analysis on different environmental effects such as climate change, acidification, marine eutrophication, human toxicity, photochemical ozone formation, land water and resources use. These effects are called impact categories and they are measured through dedicated indicators. An LCA study consists of four iterative phases: the goal and scope definition phase, the inventory analysis phase (LCI phase), the impact assessment phase (LCIA phase), and the interpretation phase. According to ISO 14044, the technical standard which provides requirements and guidelines on how to conduct an LCA study, the LCIA phase includes some mandatory elements, such as the classification and characterisation steps, and some optional elements, namely normalisation, grouping, and weighting. The first objective of this article is to provide an overview of normalisation and weighting phases, while grouping, which consists of sorting and possibly ranking of the normalised impacts related to different categories, is not discussed in this article; the second objective of this article is to investigate the actual use of normalisation and weighting in LCA studies applied to wastes. In order to provide an up-to-date overview, the literature developed until now on normalisation and weighting has been evaluated. In the first part of the article, it has been clarified the objective of these phases, how they can be applied, and which are the advantages and drawbacks of their application on the LCA results. As described in the technical standard ISO 14044, normalisation is the calculation of the magnitude of the category indicator results relative to a system taken as a reference. The impact of the system takes the name of the normalisation factor, and one normalisation factor is calculated for each impact category. Therefore, normalisation might help to state the relevance of the impacts by comparing the product of the study with something that the reader can more easily imagine, it might help the analyst to check for inconsistencies among the results and it might help to scale the results related to different impact categories to a common unit of measurement, thus making possible their aggregation into a single final score. The weighting phase, on the other hand, allows the analysts to assign a weight, which is a numerical factor based on value-choices, to each impact category making then possible to aggregate the normalised and weighted results to obtain a final score that indicates the environmental impact of the product. Since normalisation and weighting are not mandatory, many studies do not include them and they stop at the previous step, i.e., the characterisation. However, a research

* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano MI – +39 3341472168, E-mail: giulia.cavenago@live.it.

conducted in 2015 within the context of the Life Cycle Initiative, a joint initiative of the United Nations Environment Program (UNEP) and the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), showed that, although it is considered complicated and still not very robust to use them, both these phases are considered relevant for decision-making purposes. The aggregation of the normalised and weighted results, in order to provide a single score of the overall environmental impact of a product, is indeed helpful for the decision-maker for whom the interpretation of the multiple environmental information can be complex. Therefore, to investigate the current use of these optional phases, a survey has been conducted on LCA studies applied to wastes and published in the biennium 2019-2020 in the scientific journals "Waste Management" and "Resources, Conservation and Recycling". The analysis showed that in 80% of the cases at least one of the two phases is applied. Moreover, the normalisation approach mainly used to bring the different impacts on the same scale and proceed with the weighting phase is the external one, while the most often adopted weighting approaches are the binary ones (*footprint or equal weights*).

Keywords: normalisation, weighting, Life Cycle Assessment, aggregation, waste.

Ricevuto il 7-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 31-5-2021. Correzioni richieste il 29-6-2021. Accettazione il 6-7-2021.

1. INTRODUZIONE

La metodologia LCA (Life Cycle Assessment) si pone l'obiettivo di quantificare l'impronta ambientale di un prodotto, di un processo produttivo, di un servizio o di un'organizzazione. Nel caso di un prodotto si tiene conto del suo intero ciclo di vita, nel caso di un processo o servizio si considerano tutte le fasi che lo compongono e quindi tutti i flussi (di materia o energia) in ingresso e uscita e, nel caso di un'organizzazione, se ne quantifica l'impronta ambientale tenendo conto di tutti i flussi associati alle sue attività dal punto di vista della catena di approvvigionamento. A volte, di fronte ad alcune scelte d'acquisto, il consumatore finale, propenso per le opzioni più sostenibili, non riesce a operare in piena consapevolezza per carenza di strumenti a sua disposizione. Per esempio, di fronte alla scelta tra uno spazzolino in bambù e uno in plastica, data l'enorme quantità di plastica visibile oggi negli oceani, il consumatore potrebbe optare per quello in bambù in quanto potenzialmente biodegradabile e compostabile a fine vita, al contrario di quello in plastica. Tuttavia, per un'analisi completa, bisognerebbe tenere conto anche di altri fattori, come l'impronta idrica ed energetica dei due prodotti, o la distanza tra il luogo di produzione delle materie prime e quello di acquisto del bene. La metodologia LCA valuta l'impronta ambientale di un pro-

dotto guardando al suo intero ciclo di vita, considerando tutte le fasi: l'estrazione delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, l'uso e il fine vita. Uno degli obiettivi della metodologia è proprio quello di analizzare, e dunque cercare di evitare, il cosiddetto *spostamento dei carichi* da una fase all'altra o da un comparto ambientale all'altro.

L'ambiente infatti è un sistema complesso, perciò valutare l'impronta ambientale di un prodotto significa guardare gli effetti che quel prodotto ha sull'aria, sull'acqua, sul suolo e anche sull'uomo stesso. Per questo l'impronta ambientale di un prodotto calcolata tramite metodologia LCA viene descritta da molteplici categorie di impatto, che rappresentano gli effetti ambientali considerati, misurati tramite degli indicatori dedicati. Per fare alcuni esempi di categorie di impatto si possono citare il cambiamento climatico, la formazione di particolato atmosferico, la tossicità umana e sugli ecosistemi e il consumo di risorse idriche e fossili.

La metodologia LCA, che può essere applicata a studi di tipo comparativo o meno, può rispondere pertanto alla domanda: tra lo spazzolino in plastica e quello in bambù quale impatta di più sul fenomeno del cambiamento climatico? Quale dei due contribuisce di più alla tossicità umana? E così via. Tuttavia, per il decisore finale, ovvero un consumatore che deve indirizzare le sue scelte d'acquisto o un imprenditore che vuole limitare gli impatti causati dai propri prodotti, l'interpretazione delle molteplici informazioni fornite a livello delle categorie di impatto può risultare complessa: se un prodotto è migliore dell'altro in termini di cambiamento climatico, ma peggiore in termini di tossicità umana, cosa scegliere? E ancora, se venisse comunicato al decisore finale che il contributo al cambiamento climatico di uno spazzolino in bambù, prodotto esemplificativo di cui si vuole valutare la sostenibilità, è di 0,04 g di CO₂ equivalenti (Lyne et al., 2020), che cosa significherebbe questo?

All'interno della metodologia LCA sono previste delle fasi, ad oggi opzionali, che cercano di superare questi limiti rendendo i risultati maggiormente comprensibili anche ai non esperti di LCA e guidando il decisore nelle scelte finali.

La prima di tali fasi opzionali è la fase di normalizzazione, che permette di comprendere il significato dei risultati confrontandoli con riferimenti più familiari, ad esempio quantificando l'impatto sul cambiamento climatico dello spazzolino in bambù rispetto all'impatto medio globale annuo di una persona. La fase di pesatura permette invece di attribuire un peso a ogni categoria di impatto, sulla

base di determinati criteri, per arrivare a un punteggio finale indice dell'impatto ambientale dei prodotti: ad esempio, ritornando allo spazzolino, si può scegliere con opportuna giustificazione di dare più peso alla categoria di impatto del cambiamento climatico rispetto a quella di tossicità umana o viceversa. Il presente articolo si pone due obiettivi: far luce sullo stato dell'arte delle fasi di normalizzazione e pesatura e indagare l'effettiva introduzione di tali fasi negli studi LCA applicati ai rifiuti. Il primo obiettivo viene raggiunto facendo chiarezza sulle modalità di applicazione delle due fasi e sulle conseguenze che la loro introduzione comporta nella presentazione dei risultati di uno studio LCA. Il secondo obiettivo viene invece perseguito tramite un'indagine effettuata sugli studi LCA applicati ai rifiuti e pubblicati nel biennio 2019-2020 sulle riviste scientifiche "Waste Management" e "Resources, Conservation and Recycling".

2. MATERIALI E METODI

Dopo una breve introduzione alle diverse fasi della LCA presentata nel paragrafo 3, i paragrafi 4 e 5 si focalizzano rispettivamente sulle fasi di normalizzazione e pesatura, spiegandone gli scopi, gli approcci possibili, i vantaggi e gli svantaggi. L'analisi di queste due fasi è stata fatta valutando la letteratura ad oggi sviluppata sul tema e le discussioni emerse al 72esimo Swiss Discussion Forum sulla LCA tenutosi a Zurigo nel settembre 2019 e focalizzato su normalizzazione e pesatura (Roesch et al., 2020). I due principali articoli di review di riferimento, presenti nella letteratura in lingua inglese, sono Pizzol et al. (2017) e Roesch et al. (2020). Nel paragrafo 6 vengono riportati i fattori di normalizzazione e il set di pesi usati nel contesto della Product Environmental Footprint (PEF), ovvero la metodologia LCA sviluppata dal Joint Research Center (JRC) della Commissione Europea e proposta come metodologia comune per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti. Si è deciso nello specifico di riportare tali fattori, poiché proposti dalla Commissione Europea al fine di condurre studi LCA utilizzando una metodologia comune per la valutazione dell'impronta ambientale dei prodotti e rendendo quindi i risultati comparabili, guidando il decisore nelle scelte in maniera affidabile. Nei risultati di una ricerca condotta nel 2015 (Pizzol et al., 2017) nel contesto della Life Cycle Initiative (iniziativa congiunta del Programma del-

le Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e della Società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC)), emerge che seppur ritenuto complicato e ancora poco robusto utilizzarle, le fasi di normalizzazione e pesatura vengono considerate rilevanti ai fini decisionali. Pertanto, a partire da questi risultati, si è deciso di indagare l'effettivo utilizzo di tali fasi opzionali in studi LCA applicati ai rifiuti. Tale indagine, descritta nel paragrafo 7, è stata condotta considerando studi LCA applicati ai rifiuti e pubblicati nel biennio 2019-2020 sulle riviste scientifiche "Waste Management" e "Resources, Conservation and Recycling". Le due riviste scelte si classificano nelle prime dieci posizioni per *impact factor* relativo all'anno 2020 tra le riviste dell'ambito "Environmental Science – Waste Management and Disposal". I risultati vengono presentati indicando, tramite grafici a torta e istogrammi, le percentuali di studi che utilizzano le fasi di normalizzazione e pesatura e le tipologie di approcci adottati. Seguono nei paragrafi 8 e 9 una discussione sui risultati e le conclusioni della review ponendo anche uno sguardo critico all'utilizzo dell'approccio di normalizzazione esterno, per lo scopo di scalare e aggregare gli impatti in punteggi confrontabili in LCA comparative.

3. LIFE CYCLE ASSESSMENT – FASI OBBLIGATORIE E OPZIONALI

Una definizione della metodologia LCA, proposta nel 1993 dalla *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, suggerisce che «La Life Cycle Assessment sia uno strumento che permette di valutare gli impatti ambientali associati al ciclo di vita di un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti».

Uno studio di tipo LCA si compone di quattro fasi iterative. Nella prima vengono definiti gli obiettivi dello studio e viene individuato il campo di applicazione; nella seconda si svolge un inventario di tutti i flussi che dal sistema ambiente entrano nel sistema prodotto e viceversa. Il sistema ambiente è la fonte di materie prime e il ricevitore degli output del sistema prodotto, il quale invece è composto da tutte le operazioni atte a produrre un bene.

Nella terza fase i dati raccolti vengono elaborati e usati per valutare i potenziali impatti del prodotto sui diversi effetti ambientali considerati, ovvero le

categorie di impatto. Ad esempio, si può valutare l'impatto del prodotto in termini di consumo delle risorse idriche, tramite l'indicatore che misura questo effetto, ovvero il potenziale di privazione, espresso in metri cubi di acqua equivalenti, e si può valutare l'impatto del prodotto in termini di potenziale contributo al cambiamento climatico, tramite l'indicatore dedicato che è l'incremento della forzante radiativa infrarossa, la cui unità di misura sono i kg di CO₂ equivalenti. La terza fase si compone a sua volta di quattro principali sottofasi: classificazione, caratterizzazione, normalizzazione e pesatura. Nella prima sottofase i dati di inventario vengono classificati in modo da capire su quali categorie di impatto abbiano un'influenza, ad esempio le emissioni di CO₂ verranno classificate anche nella categoria cambiamento climatico. Nella seconda sottofase i dati di inventario vengono caratterizzati tramite dei fattori predefiniti che permettono di esprimere tutti i dati classificati nella stessa categoria nell'unità di misura dell'indicatore scelto: ad esempio il fattore di caratterizzazione del metano pari a 28 kgCO₂e (IPCC, 2013) dice che l'impatto di 1 kg di metano equivale a quello di 28 kg di CO₂ se si utilizza 100 anni come orizzonte temporale. Le due successive sottofasi, normalizzazione e pesatura, che vengono ampiamente descritte nei paragrafi successivi, sono indicate dalla ISO 14044 come opzionali e scarse linee guida sono fornite circa il loro utilizzo, pertanto spesso gli studi si fermano alla fase della caratterizzazione. Tuttavia, da una ricerca condotta nel 2015 nel contesto della Life Cycle Initiative, un'iniziativa congiunta del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e della Società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC), è emerso, come si legge in Pizzol et al. (2017), che, seppur ritenuto complicato e ancora poco robusto utilizzarle, entrambe le fasi vengono considerate rilevanti ai fini decisionali; aggregare i risultati normalizzati e pesati, fornendo un unico punteggio indice dell'impatto ambientale complessivo del prodotto, è infatti d'aiuto per il decisore, per il quale l'interpretazione delle molteplici informazioni può risultare complessa. Si è in attesa di un nuovo standard tecnico (ISO/WD TS 14074), per ora in definizione, che, in aggiunta ai contenuti delle ISO 14040 e 14044, dovrebbe fornire utili linee guida sull'applicazione di normalizzazione e pesatura. In particolare, questo nuovo standard, che conterrà anche nuove procedure e indicazioni sulla fase di interpretazione dei risultati, si pone l'obiettivo di trattare,

in maniera più esaustiva, l'uso di queste fasi in studi LCA, le limitazioni connesse alla loro introduzione, la scelta e la costruzione di fattori di pesatura e la generazione di punteggi ambientali finali. Per completezza, è bene specificare che nello standard ISO 14044 viene citata una terza sottofase opzionale inclusa nella fase di valutazione degli impatti, chiamata raggruppamento. Questa fase, ove applicata, permette all'analista di raggruppare alcune categorie di impatto secondo determinati criteri. Una procedura possibile (*sorting*) è quella di ordinare le categorie sulla base della loro appartenenza a una specifica area di protezione (ad esempio salute umana, ambiente naturale e consumo di risorse) o sulla base del loro impatto a livello spaziale (globale, regionale, locale). Un'altra procedura (*ranking*) è invece quella di stabilire delle classifiche delle categorie sulla base di criteri come la reversibilità degli impatti o il loro grado di certezza. Questa fase, che si basa spesso su scelte di tipo qualitativo, usando criteri soggettivi, non è però oggetto di discussione del presente articolo. Tuttavia, ulteriori approfondimenti potranno essere fatti negli sviluppi futuri di questo lavoro di ricerca, attendendo anche eventuali maggiori indicazioni sul suo utilizzo nello standard tecnico ISO/WD TS 14074.

Infine, la quarta fase di cui si compone uno studio LCA è quella dell'interpretazione dei risultati, che può comprendere un'analisi di sensibilità e incertezza dei dati e dei risultati, portando eventualmente l'analista a ritornare iterativamente sulle fasi precedenti.

4. LA FASE DI NORMALIZZAZIONE

Come descritto nello standard ISO 14044, la normalizzazione serve per quantificare l'impatto relativo di un oggetto rispetto a quello di un sistema preso come riferimento. L'impatto di quest'ultimo prende il nome di fattore di normalizzazione e ne viene calcolato uno per ogni categoria di impatto. La normalizzazione è quindi utile perché permette di:

- indicare la rilevanza degli impatti confrontando l'oggetto studiato con qualcosa che l'esecutore e il lettore dello studio LCA possano immaginare più facilmente, fornendo così una chiave di lettura più semplice (quanto sono rilevanti gli 0,04 g di CO₂ equivalenti dello spazzolino in bambù rispetto al contributo medio annuo di una persona sul potenziale di riscaldamento globale?);

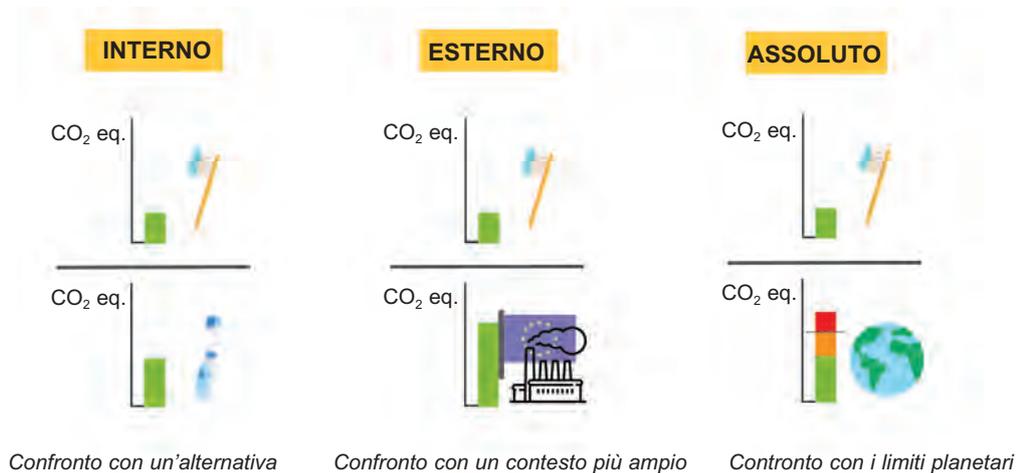


Figura 1 – Approcci di normalizzazione applicati all'esempio di uno spazzolino in bambù per la categoria di impatto cambiamento climatico. Nel caso interno il sistema di riferimento scelto è uno spazzolino elettrico, nel caso esterno il sistema di riferimento è il cittadino medio dell'Unione europea e nel caso assoluto il sistema di riferimento sono i limiti planetari. NOTA: l'immagine è ispirata alla presentazione di Arnaud Hélias tenutasi al 72esimo Swiss Discussion Forum sulla LCA a Zurigo nel settembre 2019, per le icone si attribuiscono i crediti a www.flaticon.com

- verificare la plausibilità dei risultati ottenuti (se il sistema di riferimento sono i consumi nel mondo e il prodotto studiato è una maglietta di cotone, se si ottiene un impatto relativo del 50% si sono probabilmente commessi degli errori);
- esprimere gli impatti relativi alle diverse categorie di impatto secondo unità di misura comparabili, rendendo così possibile il loro confronto e anche la loro eventuale aggregazione in un unico punteggio finale.

Ad oggi, nella letteratura scientifica, si trovano molteplici approcci usati per implementare la fase di normalizzazione, come riportato in Pizzol et al. (2017). Nel presente articolo è fornita una breve descrizione dei tre principali approcci di normalizzazione, ossia interno, esterno ed assoluto, che sono riassunti nella Figura 1.

Nell'approccio interno, applicabile ai solo studi di tipo comparativo e spesso usato inconsciamente, il sistema di riferimento è una delle alternative analizzate oppure una sua funzione. Per esempio, si può scegliere un'unica alternativa come riferimento ed esprimere gli impatti delle altre rispetto ad essa (*division by baseline*), si può scegliere per ogni categoria di impatto un riferimento diverso identificato nell'alternativa con impatto maggiore (*division by maximum*) oppure ancora si può usare come riferimento la somma degli impatti di tutte le alternative (*division by sum*). Il vantaggio della normalizzazione interna è che viene fatta a partire dai soli dati già a disposizione dello studio poiché il sistema di riferimento è uno dei prodotti studiati o una funzione degli stessi. In Figura 1, viene

mostrato un esempio pratico di normalizzazione interna, che permette di confrontare gli impatti ambientali di uno spazzolino da denti tradizionale con gli impatti di uno spazzolino elettrico: la normalizzazione può essere applicata per tutte le categorie di impatto, e nel caso in figura essa è applicata per la categoria di impatto cambiamento climatico. Applicando la fase di normalizzazione, gli impatti normalizzati relativi alle diverse categorie di impatto sono così riportati sulla stessa scala (adimensionali) e potrebbero essere aggregati per fornire un punteggio complessivo dell'impatto ambientale dei prodotti. Tuttavia, come si legge in Norris (2001), vi sono degli aspetti negativi nell'aggregazione tramite pesi degli impatti normalizzati secondo approccio interno, in quanto i pesi, solitamente determinati a livello generico e quindi indipendenti dallo studio analizzato, possono risultare incongruenti con la normalizzazione interna, che è invece specifica per lo studio. Si ricorda poi che vi sono altri approcci considerati appartenenti al gruppo della normalizzazione interna, come quello di *outranking*, che fa parte dei metodi di analisi decisionale multicriterio (MCDA), che non sono oggetto di questo articolo, ma ai quali si accenna nelle conclusioni.

Nell'approccio di normalizzazione esterna i risultati ottenuti (di uno studio comparativo o meno) vengono invece confrontati con quelli di un sistema di riferimento più ampio, come ad esempio la totalità dei carichi ambientali annui di un Paese o di una regione dovuti alle sue attività di consumo o produzione. Pertanto, i fattori di normalizzazio-

ne sopra citati sono ottenuti a partire da dati esterni allo studio, la robustezza dei quali sarà quindi rilevante.

Con questo approccio, per calcolare i fattori di normalizzazione viene eseguita a sua volta un'analisi LCA sul sistema di riferimento. Ciò si traduce nelle seguenti operazioni:

- vengono scelte le categorie d'impatto per le quali definire i fattori di normalizzazione e i rispettivi modelli di caratterizzazione, ad esempio viene scelta la categoria cambiamento climatico usando il modello proposto dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nel 2013 (IPCC, 2013);
- vengono raccolti i dati di inventario preferendo fonti statistiche ufficiali (come Eurostat o FAO) in quanto ampiamente documentate e sottoposte a revisioni periodiche di qualità;
- viene eseguita la fase di classificazione;
- viene fatta la caratterizzazione dei flussi elementari con i fattori di caratterizzazione definiti dai modelli adottati.

A questo punto gli impatti ambientali del sistema di riferimento rappresentano i fattori di normalizzazione, che spesso sono espressi in persone equivalenti dopo essere quindi stati divisi per il numero di abitanti del Paese o regione presi come sistema di riferimento. Nell'esempio in Figura 1, gli impatti ambientali di uno spazzolino da denti tradizionale vengono confrontati con gli impatti ambientali medi di un cittadino dell'Unione europea. A ogni fattore di normalizzazione ottenuto può essere associato poi un indice di robustezza che tiene conto della quantità e della qualità dei dati di inventario raccolti e inclusi nell'analisi e della solidità dei metodi di caratterizzazione scelti per le varie categorie di impatto.

Infine, l'approccio di tipo assoluto prevede di confrontare gli impatti del prodotto studiato con i limiti planetari, tenendo quindi presente la capacità di sopportazione del pianeta. Questo approccio presenta una grande utilità nel processo decisionale per la definizione degli obiettivi sociopolitici, ma porta anche numerose difficoltà nella determinazione e quantificazione dei limiti planetari (Sala et al., 2016, 2020). Nell'esempio in Figura 1, gli impatti ambientali di uno spazzolino da denti tradizionale vengono confrontati con i limiti planetari. Tra gli svantaggi legati all'uso della normalizzazione con approccio esterno o assoluto, si trovano le incertezze che si accumulano a causa dell'introduzione nello studio di dati esterni e delle scelte metodologiche fatte per la definizione dei fattori

di normalizzazione, come ad esempio quella di includere o meno, nel sistema di riferimento, i carichi dovuti alle attività di importazione ed esportazione di un Paese.

Tra le principali raccomandazioni che vengono fatte nel caso di utilizzo di questa fase, citate anche dallo standard ISO 14044, si trova quella di condurre un'analisi di incertezza e sensibilità rispetto ai dati utilizzati, come viene fatto ad esempio da Benini et al. (2016), per valutare la robustezza dei risultati finali rispetto alle diverse assunzioni e scelte metodologiche fatte per definire i fattori di normalizzazione.

Inoltre, per comparare i risultati ottenuti, viene consigliato di testare diversi sistemi di riferimento e di scegliere questi ultimi in modo coerente con il proprio studio. Ad esempio, se come sistema di riferimento per normalizzare gli impatti di un prodotto fabbricato in India e importato in Italia si scegliesse di usare le attività produttive all'interno dell'Unione europea, escludendo le importazioni, si rischierebbe di sovrastimare l'impatto normalizzato.

5. LA FASE DI PESATURA

La fase di pesatura consiste nello stabilire l'importanza relativa di ogni categoria d'impatto rispetto alle altre: ad ogni categoria viene associato un peso, ad esempio il 30% al cambiamento climatico e il rimanente 70% distribuito equamente tra le rimanenti categorie di impatto. In generale gli impatti pesati possono essere precedentemente normalizzati oppure no, con il vincolo che per poter sommare gli impatti pesati e ottenere un unico punteggio è necessario che questi siano espressi nella stessa unità di misura.

Questa fase, inevitabilmente condizionata da scelte non esclusivamente con base scientifica, permette la risoluzione di alcuni compromessi, come ad esempio la preferenza tra un'alternativa con impatto maggiore sull'eutrofizzazione marina, ma minore sul cambiamento climatico e un'altra con situazione ribaltata. La pesatura guida quindi il decisore nelle scelte tramite l'aggregazione dei risultati normalizzati e pesati in un unico punteggio, in modo da dare il giusto peso ai diversi impatti secondo il criterio adottato.

L'aggregazione di più risultati è in generale uno strumento utile per fornire una sintesi dell'impatto multidimensionale di un sistema; nel caso della LCA le multi dimensioni sono rappresentate dalle categorie d'impatto, che vengono aggregate tramite somma pesata lineare degli impatti normalizza-

ti, come riportato nell'equazione 1, dove i rappresenta l'indice progressivo delle categorie di impatto, n il numero delle categorie di impatto considerate, IC_i l'impatto caratterizzato, IC_i/FN_i l'impatto normalizzato attraverso il fattore di normalizzazione FN_i (ottenuto quasi sempre con approccio esterno) e P_i il relativo peso.

$$Punteggio = \sum_{i=1}^n \frac{IC_i}{FN_i} * P_i \quad (\text{eq. 1})$$

Per la definizione dei pesi si possono usare diversi approcci. In questo articolo si citano i più comuni usati fino ad oggi, ovvero:

- il gruppo degli approcci binari (*footprint* o *pesi uguali*);
- l'approccio *distance to target*;
- l'approccio *panel-based*;
- il gruppo degli approcci monetari.

Tra gli approcci binari, finora i più usati, troviamo l'approccio *footprint* e l'approccio *pesi uguali*. Il primo consiste nel concentrare tutto il peso su un'unica categoria d'impatto trascurando le altre; ciò avviene ad esempio con il calcolo della *carbon footprint* di un prodotto (CFP), approccio descritto nel dettaglio nella norma tecnica di riferimento (ISO 14067), che quantifica tutte le emissioni di gas ad effetto serra (GHG) lungo tutto il ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento finale del prodotto. Nel secondo approccio di tipo binario, chiamato *pesi uguali*, tutte le categorie sono poste invece sullo stesso piano di importanza, e quindi ad ognuna di esse è associato lo stesso peso. Il primo approccio porta con sé un limite, ovvero quello di rischiare di commettere uno degli errori che l'analisi LCA vuole evitare, ovvero lo spostamento dei carichi. La critica fatta invece al secondo è quella di non dare la giusta importanza agli aspetti più urgenti.

Nell'approccio *distance to target* (Castellani et al., 2016; Muhl et al., 2020), i pesi dati alle diverse categorie di impatto sono calcolati in base alla vicinanza degli attuali impatti di un sistema di riferimento agli obiettivi sociopolitici che sono stati posti per quel sistema di riferimento rispetto a quella data categoria. Per esempio, se ad oggi gli impatti del sistema di riferimento Unione europea relativi alla categoria del cambiamento climatico si discostano di molto dagli obiettivi prefissati per un dato anno, il peso attribuito alla categoria del cambiamento climatico dovrà essere elevato. Il vantaggio di questo approccio è che, in quanto basato su target sociopolitici, dovrebbe essere il frutto del consenso della maggioranza, tuttavia il rischio è

che vengano trascurate quelle categorie di impatto per le quali ad oggi non esistono obiettivi ambiziosi. Talvolta nell'approccio *distance to target* viene incluso anche lo scostamento degli attuali impatti di un sistema di riferimento rispetto alla capacità di sopportazione planetaria, creando così un confine molto sottile tra l'approccio di normalizzazione assoluto e l'approccio di pesatura di tipo *distance to target* dove i target sono appunto i limiti planetari. Di questo sottile confine se ne è discusso in parte anche nel 72esimo Swiss Discussion Forum on LCA tenutosi a Zurigo nel settembre 2019 (Roesch et al., 2020).

Passando all'approccio di tipo *panel-based*, come suggerisce il nome stesso, i pesi sono calcolati a partire dalle preferenze di un gruppo di persone rispetto alle diverse categorie di impatto, preferenze che vengono solitamente raccolte tramite un questionario. Il gruppo di persone interrogate può essere di varia natura, da comuni cittadini a esperti di LCA. La forte dipendenza dei pesi dalla composizione del *panel*, che rappresenta il punto di vista di un sottoinsieme della società, e dalla tipologia di questionario, in quanto non è previsto uno standard preciso, costano a questo approccio una critica di eccessiva soggettività.

Ci sono infine altri approcci, tra cui quelli monetari, nei quali i pesi, espressi nell'unità di misura della moneta corrente, sono definiti per esempio sulla base del danno economico conseguente al danno ambientale, oppure sulla quantificazione dei costi necessari a prevenire il danno stesso o ancora sulla base di quanto la popolazione è pronta a spendere per ridurre gli impatti. Non è scopo di questo articolo approfondire gli approcci monetari, che sono invece ampiamente descritti in altri lavori di letteratura (Eldh et al., 2006; Arendt et al., 2020).

Nella costruzione di un set di pesi, oltre a poter combinare differenti approcci, usando quindi dei *metamodelli*, si può scegliere di tenere conto delle informazioni relative alla robustezza dei risultati che devono essere pesati. Questo permetterebbe infatti di non trascurare le incertezze di tutte le fasi precedenti, dalla caratterizzazione alla normalizzazione, in quanto come ultima fase la pesatura si trascina tutto ciò che viene scelto e assunto nelle fasi precedenti. Un esempio di questo approccio è mostrato nel paragrafo 6 nel caso del set di pesi scelto dal gruppo di lavoro della Commissione Europea. Un grande ostacolo che si presenta nell'utilizzo della pesatura è che la ISO 14044 ne vieta l'applicazione nel caso di asserzioni comparative destinate ad essere divulgate al pubblico. In questo sen-

so la comunità LCA a favore di questa fase resta in attesa della pubblicazione dello standard ISO/WD TS 14074 che, seppur prevista per il 2020 risulta ancora in fase preparatoria, sperando che suggerisca un nuovo approccio rispetto alla questione.

6. FATTORI DI NORMALIZZAZIONE E PESI NEL CONTESTO DELLA PRODUCT ENVIRONMENTAL FOOTPRINT (PEF)

Le aziende che vogliono porre attenzione alle prestazioni ambientali della propria organizzazione e dei propri prodotti si trovano oggi davanti ad alcuni ostacoli. Infatti, la proliferazione di marchi e certificazioni ambientali nel panorama europeo e internazionale ha introdotto confusione per le aziende sull'iter più ottimale da seguire al fine di ottenere una certificazione di sostenibilità ambientale. Alcuni marchi e certificazioni sono inoltre applicabili in un Paese e non in un altro e ciò si traduce in una somma dei costi per un'azienda che vuole commercializzare i propri prodotti in più Paesi, nonché in una barriera alla circolazione di prodotti verdi. Inoltre, l'esistenza di molti marchi e certificazioni crea diffidenza nei confronti dei consumatori che sono spesso confusi e privi di strumenti che li rendano capaci di fare scelte consapevoli. A partire da queste considerazioni, la Commissione Europea aveva emesso nel 2013 una comunicazione per la costruzione di un mercato unico dei prodotti verdi (EC, 2013a) e la raccomandazione 2013/179/UE (EC, 2013b) sull'uso di metodologie comuni, denominate PEF (Product Environmental Footprint) e OEF (Organisation Environmental Footprint), per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni: l'obiettivo è quello di utilizzare una metodologia comune per la valutazione dell'impronta ambientale dei prodotti e delle organizzazioni e rendere quindi i risultati comparabili, guidando il decisore nelle scelte. In questo senso, la normalizzazione e la pesatura sono di grande aiuto per permettere il confronto degli impatti ambientali complessivi di beni, servizi e organizzazioni.

La Commissione Europea ha deciso che negli studi svolti secondo la PEF (EC, 2013b), ovvero negli studi conformi alla metodologia comune indicata nella raccomandazione 2013/179/UE e basati su un'analisi di tipo LCA, debbano essere adottati degli specifici fattori di normalizzazione esterna. Questi fattori sono costruiti prendendo come sistema di riferimento gli impatti dell'intero pianeta fo-

tografati al 2010, dividendoli poi per il numero di abitanti per esprimere così gli impatti pro capite. La costruzione di tali fattori di normalizzazione avviene seguendo il procedimento standard descritto nel paragrafo 4 del presente articolo, e maggiori dettagli tecnici si possono trovare nei report del Joint Research Center della Commissione Europea (Benini et al., 2014; Sala et al., 2017) e nei conseguenti articoli pubblicati (Crenna et al., 2019; Sala et al., 2015). I fattori di normalizzazione secondo PEF sono in continua evoluzione e aggiornamento, la versione più aggiornata si trova sul sito della *European Platform on Life Cycle Assessment* (EPLCA, 2003). Questa piattaforma è nata in risposta alla comunicazione della Commissione Europea sulla politica integrata dei prodotti del 2003 (EC, 2003) che identificò la valutazione del ciclo di vita (LCA) come il «miglior quadro per valutare i potenziali impatti ambientali dei prodotti». Lo scopo è quindi quello di aumentare la disponibilità di dati e metodi di qualità per effettuare analisi di tipo LCA.

Per quanto riguarda invece la pesatura, i pesi ad oggi proposti dalla Commissione Europea sono il frutto di una combinazione di diversi set di pesi ottenuti con approcci differenti. Nello specifico vengono considerati quattro set. Il primo è stato ottenuto selezionando un campione di 2400 cittadini provenienti da diversi Paesi dell'Unione europea di età compresa tra i 18 e i 65 anni, e sottoponendo loro un questionario sull'importanza percepita delle diverse categorie di impatto. Il secondo set è invece stato ottenuto sottoponendo lo stesso questionario a 512 esperti di LCA. Per il terzo set sono invece stati coinvolti tecnici esperti delle diverse categorie di impatto, ai quali è stato chiesto di valutare alcune caratteristiche, come ad esempio la reversibilità e l'intensità degli impatti causati e i loro effetti in termini di diffusione spaziale e temporale, tenendo conto delle evidenze scientifiche. Il quarto set utilizzato assegna ad ogni categoria di impatto un peso che è direttamente proporzionale alla robustezza del metodo di caratterizzazione adottato per quella categoria. Maggiori dettagli sulla combinazione di questi set di pesi per ottenere quello finale si trovano in Sala et al. (2018) e, come per i fattori di normalizzazione, la versione più aggiornata dei pesi è consultabile sul sito della *European Platform on Life Cycle Assessment* (EPLCA, 2003).

I fattori di normalizzazione e i pesi aggiornati a novembre 2019, che non hanno subito modifiche pubblicate fino a marzo 2021, sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1 – Fattori di normalizzazione e pesi proposti dal JRC della Commissione Europea nel metodo comune per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti (PEF) (EPLCA, 2003)

Categoria di impatto	Fattore di normalizzazione	Peso (%)
Acidificazione	5,56E+01 mol H ⁺ eq. persona ⁻¹	6,20
Cambiamento Climatico	8,10E+03 kg CO ₂ eq. persona ⁻¹	21,06
Ecotossicità delle acque dolci	4,27E+04 CTUe persona ⁻¹	1,92
Eutrofizzazione in acqua dolce	1,61E+00 kg P eq. persona ⁻¹	2,80
Eutrofizzazione marina	1,95E+01 kg N eq. persona ⁻¹	2,96
Eutrofizzazione terrestre	1,77E+02 mol N eq. persona ⁻¹	3,71
Tossicità umana cancerogena	1,69E-05 CTUh persona ⁻¹	2,13
Tossicità umana non cancerogena	2,30E-04 CTUh persona ⁻¹	1,84
Radiazioni ionizzanti – effetti sulla salute umana	4,22E+03kBq U-235 eq. persona ⁻¹	5,01
Uso e trasformazione del terreno	8,19E+05 pt persona ⁻¹	7,94
Assottigliamento dello strato di ozono	5,36E-02 kg CFC-11 eq. persona ⁻¹	6,31
Assunzione di materiale particolato	5,95E-04 incidenza malattie persona ⁻¹	8,96
Formazione di ozono fotochimico	4,06E+01 kg NMVOC eq. persona ⁻¹	4,78
Consumo di risorse – vettori energetici	6,50E+04 MJ persona ⁻¹	8,32
Consumo di risorse – minerali e metalli	6,36E-02 kg Sb eq. persona ⁻¹	7,55
Consumo di risorse idriche	1,15E+04 m ³ acqua eq. per persona ⁻¹	8,51

7. INDAGINE SULL'USO DELLE FASI OPZIONALI IN STUDI LCA APPLICATI AI RIFIUTI

Alla luce delle conclusioni della ricerca condotta nel 2015 nel contesto della Life Cycle Initiative (Pizzol et al., 2017), si è deciso di indagare se e come queste fasi vengano applicate in studi LCA sui rifiuti. L'indagine ha selezionato 115 studi pubblicati sulle riviste “Waste Management” e “Resources, Conservation and Recycling” relativi al biennio 2019 e 2020.

Sono stati inclusi studi che rientrano in una delle seguenti categorie:

- comparazione di diverse modalità di gestione di un rifiuto (es. smaltimento in discarica, incenerimento, riciclo...) o valutazione dei carichi ambientali legati a una singola modalità di gestione di un rifiuto senza fini comparativi;
- comparazione di diverse tecnologie disponibili per l'uso di un rifiuto come risorsa (es. syngas vs biogas) o valutazione dei carichi ambientali di una singola tecnologia per il riciclo di un rifiuto (es. tecnologia per il recupero di fibre tessili);
- comparazione di diversi prodotti tra i quali almeno uno è ottenuto a partire da un rifiuto;
- comparazione di diverse applicazioni di un rifiuto (es. comparazione del digestato da rifiuto organico come fertilizzante o trattato in un impianto di trattamento delle acque per recupero di acqua);

- confronto tra un'alternativa riusabile e l'equivalente monouso.

Dei 327 studi selezionati inizialmente poiché contenenti le parole chiave “LCA” e “waste”, solo 115 sono stati considerati nell'indagine dopo una scrematura che ha escluso studi che riguardavano considerazioni generiche sulla metodologia, suggerimenti per future analisi di tipo LCA, articoli di review, utilizzo di strumenti di valutazione della sostenibilità differenti dalla LCA o studi su prodotti diversi da rifiuti. L'elenco degli articoli selezionati, e la classificazione svolta, sono reperibili come materiale supplementare nelle tabelle MS1 e MS2. In Figura 2 (a pagina seguente) vengono mostrati i risultati dell'indagine: l'applicazione della sola fase di normalizzazione è presente in un elevato numero di studi (46) e viene spesso giustificata sottolineando l'esigenza di esprimere i risultati ottenuti con la fase di caratterizzazione in relazione a un altro sistema di riferimento, che può essere una delle alternative analizzate nello studio (normalizzazione interna, applicabile a soli studi comparativi), oppure un sistema di riferimento più ampio e concretamente immaginabile come l'impatto di un cittadino medio rispetto ai consumi e alle attività europee o mondiali (normalizzazione esterna) oppure i limiti di sopportazione planetari (normalizzazione assoluta).

In alcuni studi viene applicata la sola fase di pesatura senza essere preceduta da normalizzazione; ge-

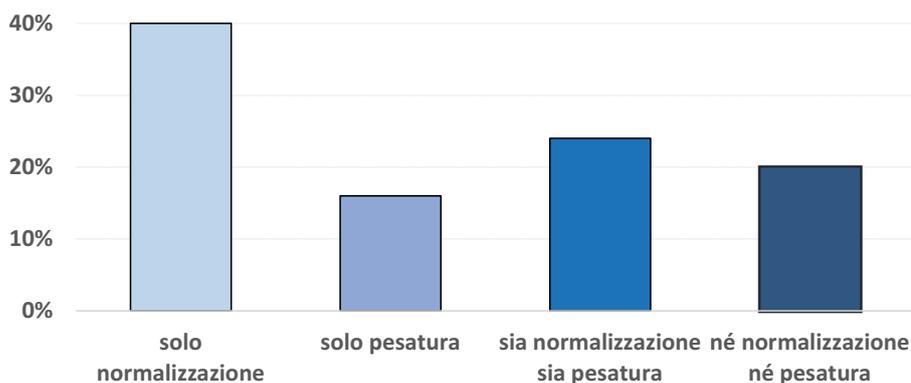


Figura 2 – Valutazione della percentuale di studi in cui viene applicata (i) solo la fase di normalizzazione (40%) (ii) solo la fase di pesatura (16%) (iii) entrambe le fasi (24%) (iv) nessuna delle due fasi (20%)

neralmente ciò accade nel caso di pesatura di tipo *footprint*. Gli studi che applicano entrambe le fasi giustificano la scelta con l'esigenza di esprimere l'impatto ambientale di un prodotto tramite un unico punteggio. Sono comunque presenti alcuni studi che si fermano alla fase di caratterizzazione senza applicare né normalizzazione né pesatura e spesso questa scelta viene giustificata solo affermando che si decidono di includere esclusivamente le fasi obbligatorie secondo lo standard ISO 14044.

Per quanto riguarda la normalizzazione, essa viene applicata in 74 studi, ovvero il 64% di quelli analizzati. Come illustrato in Figura 3, si può distinguere tra l'applicazione della fase di normalizzazione adottando un unico sistema di riferimento e l'applicazione di questa fase testandone più di uno. Infatti, lo stesso standard ISO 14044 consiglia di testare più sistemi di riferimento per capire la loro influenza sui risultati ottenuti nella fase di caratterizzazione. Nella presente indagine ciò si verifica in 16 studi. 14 di essi testano sia l'approccio interno sia quello esterno, un caso (Rosado et al., 2019) testa un sistema di riferimento esterno e quello assoluto e il

rimanente studio testa tre sistemi di riferimento: una delle alternative dello studio comparativo e due sistemi esterni, nello specifico l'insieme delle attività produttive in Europa nell'anno 2000 (Impact 2002+ methodology v.2.12, Jolliet et al., 2003) e quelle nel mondo sempre nell'anno 2000 (CML baseline methodology v.3.03, Guinée et al., 2002).

Il numero totale di normalizzazioni applicate negli studi analizzati è quindi pari a 91, avendo contato gli studi che testano più sistemi di riferimento tante volte quanti sono i sistemi di riferimenti testati (quindi 2 volte per 15 studi e 3 volte per uno studio). La Figura 4 riporta la percentuale di normalizzazioni di tipo interno, esterno o assoluto adottate. L'approccio interno viene applicato esclusivamente agli studi di tipo comparativo, con l'obiettivo di confrontare le alternative ed arricchire quindi l'interpretazione dei risultati. Soltanto in un caso (Khoo, 2019) la normalizzazione interna è invece applicata anche con l'obiettivo di riportare i diversi impatti sulla stessa scala di misura per poter procedere poi con la fase di pesatura. Nei 52 casi di normalizzazione interna applicata, sono

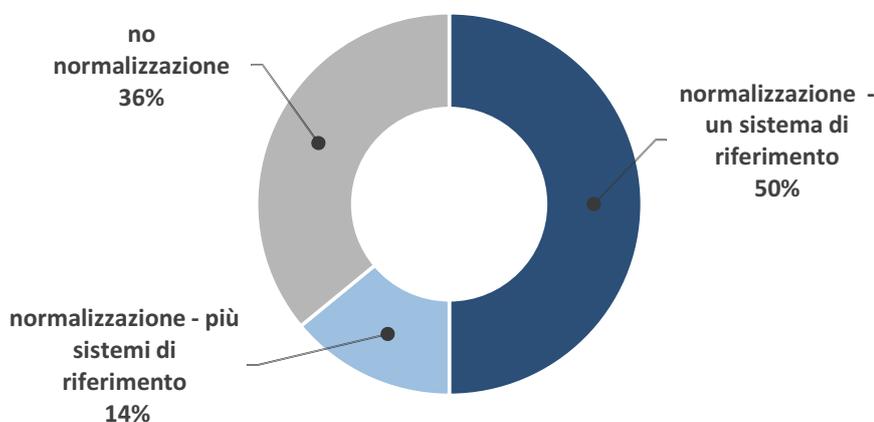


Figura 3 – Valutazione della percentuale di studi in cui (i) non viene applicata la normalizzazione, (ii) viene applicata usando un unico sistema di riferimento (iii) viene applicata testando più di un sistema di riferimento

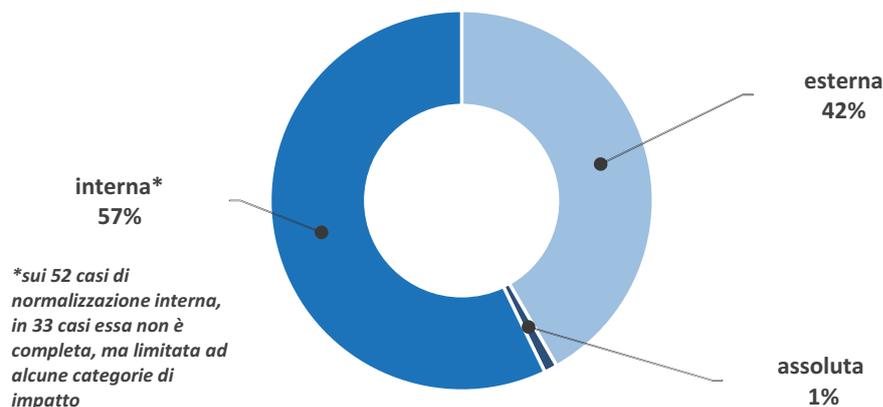


Figura 4 – Approcci di normalizzazione applicati: interna, esterna, assoluta

stati inclusi anche quelli in cui l'approccio non è applicato integralmente a tutte le categorie di impatto ma soltanto ad alcune. Per quanto riguarda gli altri approcci di normalizzazione rimanenti, è spesso preferito quello esterno, applicato scegliendo quasi sempre come sistema di riferimento l'impatto medio di un cittadino di una regione specifica, dell'Europa o del mondo. Solo in un caso (Liu et al., 2020) il sistema di riferimento usato è riconducibile ai limiti planetari.

Per quanto riguarda la pesatura, questa fase è applicata in 46 dei 115 studi analizzati, e, come si vede nella Figura 5, l'approccio maggiormente usato è quello binario di tipo *footprint*, seguito dagli approcci *pesi uguali* e *panel-based*. L'approccio *distance to target* viene applicato in un solo caso (Zhao et al., 2020) e in nessuno degli studi analizzati viene fatta una pesatura ricorrendo agli approcci monetari.

Negli studi in cui l'approccio di pesatura applicato è binario di tipo *footprint* (20%), la categoria nella quale viene concentrato tutto il peso è quasi sempre quella del cambiamento climatico, e si parla infatti di *carbon footprint*. Eccetto per un caso (Anshassi

et al., 2019), questo approccio di pesatura, non è mai preceduto da normalizzazione esterna e i ricercatori giustificano spesso il suo utilizzo con la sempre più urgente esigenza di dover diminuire la quantità di gas serra emessi. Tuttavia, negli studi nei quali questo approccio viene applicato, emerge spesso la consapevolezza del fatto che focalizzarsi su una sola categoria di impatto possa condurre allo spostamento dei carichi e infatti nelle conclusioni di tali studi viene molte volte citata la prospettiva futura di includere anche le altre categorie di impatto.

Anche per la pesatura lo standard ISO 14044 consiglia di testare diversi set di pesi esplorando tra gli approcci elencati; tuttavia, nel campione di studi analizzato ciò non si verifica mai.

8. DISCUSSIONE

Dall'analisi condotta sul campione di studi LCA applicati ai rifiuti è emerso che nell'80% di essi viene applicata almeno una delle due fasi di normalizzazione e pesatura (Figura 2). Come raccomandato dalla ISO 14044, i risultati a livello della caratterizzazione devono comunque essere forniti esplicitamen-

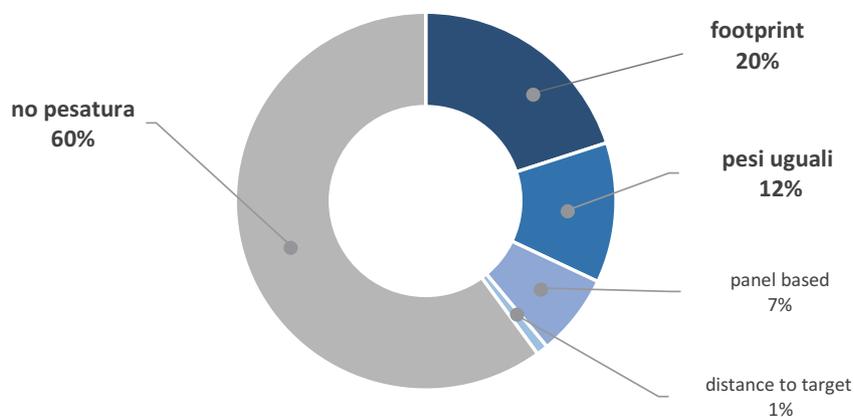


Figura 5 – Approcci di pesatura: percentuale degli studi in cui ogni approccio di pesatura è usato (*footprint*, *pesi uguali*, *panel-based*, *distance to target*) e percentuale degli studi in cui non viene usata questa fase

te, seguiti poi dagli eventuali impatti normalizzati e pesati. Questo permette al lettore di analizzare i risultati prima dell'applicazione di queste due fasi opzionali, facendo quindi le debite considerazioni. È ancora viva e attuale la discussione sul vantaggio di guidare il decisore finale nelle scelte tramite la comunicazione di un punteggio unico e lo svantaggio che, in questo modo, si possano perdere delle informazioni e fare assunzioni talvolta soggettive.

Per quanto riguarda la normalizzazione, si nota che è molto frequente l'utilizzo dell'approccio interno in studi di tipo comparativo. Per confrontare i risultati essa si rivela infatti uno strumento estremamente efficace che permette di arricchirne l'interpretazione. La normalizzazione interna però, viene raramente utilizzata come strumento preliminare a una fase di pesatura, poiché porta con sé alcune limitazioni ampiamente discusse da Norris (2001). Per questo scopo, l'approccio più usato è invece quello esterno: infatti, dei 28 studi nei quali vengono applicate sia normalizzazione che pesatura, 23 utilizzano una normalizzazione con approccio esterno al fine di riportare gli impatti sulla stessa scala e aggregarli tramite dei pesi. La scelta dei pesi, infine, viene ritenuta quella più critica in quanto può avvenire secondo criteri molto diversi tra loro; i più comuni usati fino ad oggi sono stati descritti nel paragrafo 6 di questo articolo. L'applicazione di questa fase è quindi molto delicata, ma sicuramente può, se ben motivata e correttamente esplicitata, aiutare il decisore finale ad effettuare delle scelte concrete basate su un approccio scientifico. È interessante osservare però che la scelta del metodo di aggregazione dei risultati tramite fattori di normalizzazione esterna descritto nel paragrafo 5 viene criticata da alcuni ricercatori (Rogers et al., 2009; Prado et al., 2014, 2018, 2020) poiché ritenuta incompatibile con gli obiettivi di una LCA comparativa. Viene infatti da loro sottolineato che, seppur i fattori di normalizzazione esterna (se costruiti a partire da un dataset robusto) siano ottimi per gli scopi di verifica dei risultati e loro interpretazione relativa (vedi paragrafo 4), quando usati ai fini dell'aggregazione possono condurre ad una totale compensazione dove le categorie di impatto più significative possono completamente guidare la scelta dell'alternativa migliore, mascherando le differenze degli impatti relativi alle altre categorie; in questo modo il punteggio finale è univocamente determinato da quelle categorie più impattanti, il cui primato è già noto nella fase della normalizzazione, rendendo la fase della pesatura inutilmente applicata (Prado et al., 2020).

9. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

L'analisi dello stato dell'arte delle fasi di normalizzazione e pesatura e l'indagine degli studi di LCA applicati ai rifiuti negli ultimi due anni ha permesso di osservare che l'applicazione di queste due fasi opzionali ha iniziato a trovare consenso nella comunità LCA. Nell'80% degli studi analizzati viene applicata almeno una delle due fasi di normalizzazione e pesatura. La normalizzazione interna è molto frequente in studi di tipo comparativo, mentre l'approccio di normalizzazione più usato come strumento preliminare a una fase di pesatura è quello esterno. La fase di pesatura è quella ritenuta più critica, in quanto può avvenire secondo criteri molto diversi tra loro, non sempre con base esclusivamente scientifica. È necessario ricordare che l'introduzione di queste due fasi in uno studio LCA porta con sé ulteriori variabili che possono rendere meno robusti i risultati finali. Tuttavia, per un consumatore che deve indirizzare le sue scelte d'acquisto, un imprenditore che vuole limitare gli impatti causati dai propri prodotti o ancora un decisore politico che deve effettuare delle scelte strategiche, le fasi di normalizzazione e pesatura possono essere di grande aiuto in quanto l'interpretazione delle molteplici informazioni fornite a livello delle categorie di impatto può risultare complessa. Normalizzazione e pesatura cercano quindi di rendere i risultati maggiormente comprensibili anche ai non esperti di LCA e di guidare il decisore nelle scelte finali. Molti analisti scelgono però oggi di fermarsi alla fase di caratterizzazione, anche perché scarse linee guida sono fornite circa l'utilizzo delle fasi opzionali. Tuttavia, specifiche linee guida dedicate a normalizzazione e pesatura dovrebbero essere introdotte con lo standard ISO/WD TS 14074; si spera che questo standard, ora in definizione, possa fare chiarezza, veicolando e incentivando l'utilizzo di queste due fasi negli studi LCA. Al fine di migliorare lo studio effettuato e irrobustire i risultati ottenuti, si potrebbe in futuro allargare l'indagine ad altre riviste scientifiche e ad altre tipologie di prodotti diversi dai rifiuti: questo potrebbe aiutare a capire se i risultati della ricerca sono generalizzabili anche ad altri contesti. Inoltre, saranno oggetto di studi futuri ulteriori indagini sugli aspetti critici della normalizzazione esterna (menzionati alla fine del paragrafo 8) e un'esplorazione più accurata dei metodi alternativi di aggregazione proposti per la LCA, come quello di *outranking*, strumento già ampiamente utilizzato nell'ambito dell'analisi decisionale multicriterio (MCDA).

10. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Anshassi M., Laux S., Townsend T. (2019) Approaches to integrate sustainable materials management into waste management planning and policy. *Resources, Conservation and Recycling* 148: 55-66.
- Arendt R., Bachmann T.M., Motoshita M. et al. (2020) Comparison of Different Monetisation Methods in LCA: A Review. *Sustainability* 12(24): 10493.
- Benini L., Mancini L., Sala S. et al. (2014) Normalisation method and data for Environmental Footprints. Report JRC 91531.
- Benini L. and Sala S. (2016) Uncertainty and sensitivity analysis of normalisation factors to methodological assumptions. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(2): 224-236.
- Castellani V., Benini L., Sala S. et al. (2016) A distance-to-target weighting method for Europe 2020. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(8): 1159-1169.
- Crenna E., Secchi M., Benini L. et al. (2019) Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalisation factors for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24(10): 1851-1877.
- Eldh P. and Johansson J. (2006) Weighting in LCA based on ecotaxes-development of a mid-point method and experiences from case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11(1): 81-88.
- EC (European Commission) (2003) Integrated Product Policy. Building on Environmental Life-Cycle Thinking. Communication from the Commission COM (2003), 302 final.
- EC (European Commission) (2013a) Building the Single Market for Green Products. Communication from the Commission COM (2013), 196 final.
- EC (European Commission) (2013b) Commission Recommendation of 9 April 2013 on the Use of Common Methods to Measure and Communicate the Life Cycle Environmental Performance of Products and Organisations 2013/179. EU, Brussels.
- EPLCA (European Platform on Life Cycle Assessment) (2003) Developer Environmental Footprint (EF). Disponibile su: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>
- Guinée J.B. and Lindeijer E (2002) Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Vol. 7., Springer Science & Business Media.
- IPCC, Myhre G., Shindell D., Bréon F. et al. (2013) Chapter 8: "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing". *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 659-740.*
- ISO 14040 (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- ISO 14044 (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- ISO/WD TS 14074 (under development) Environmental management – Life cycle assessment – Principles, requirements and guidelines for normalisation, weighting and interpretation.
- ISO 14067 (2018) Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.
- Jolliet O., Margni M., Charles R. et al. (2003) IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The international journal of life cycle assessment* 8(6): 324-330.
- Khoo H.H. (2019) LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*, 145: 67-77.
- Liu G., Agostinho F., Duan H. et al. (2020) Environmental impacts characterisation of packaging waste generated by urban food delivery services. A big-data analysis in Jing-Jin-Ji region (China). *Waste Management*, 117: 157-169.
- Lyne A., Ashley P., Saget S. et al. (2020) Combining evidence-based healthcare with environmental sustainability: using the toothbrush as a model. *British Dental Journal* 229(5): 303-309.
- Muhl M., Berger M. and Finkbeiner M. (2020) Distance-to-target weighting in LCA – A matter of perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26(1): 114-126.
- Norris G.A. (2001) The requirement for congruence in normalisation. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 6(2): 85-88.
- Pizzol M., Laurent A., Sala S. et al. (2017) Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22(6): 853-866.
- Prado-Lopez V., Seager T.P., Chester M. et al. (2014) Stochastic multi-attribute analysis (SMAA) as an interpretation method for comparative life-cycle assessment (LCA). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(2): 405-416.
- Prado V. and Heijungs R. (2018) Implementation of stochastic multi attribute analysis (SMAA) in comparative environmental assessments. *Environmental Modelling & Software* 109: 223-231.
- Prado V., Cinelli M., Ter Haar S.F. et al. (2020) Sensitivity to weighting in life cycle impact assessment (LCIA). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25: 2393-2406.
- Roesch A., Sala S. and Jungbluth N. (2020) Normalisation and weighting: the open challenge in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25(9): 1859-1865.
- Rogers K. and Seager T.P. (2009) Environmental decision-making using life cycle impact assessment and stochastic multiattribute decision analysis: a case study on alternative transportation fuels. *Environmental Science & Technology* 43: 1718-1723.
- Rosado L.P., Vitale P., Penteado C.S. et al. (2019) Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste management* 85: 477-489.
- Sala S., Benini L., Mancini L. et al. (2015) Integrated assessment of environmental impact of Europe in 2010: data sources and extrapolation strategies for calculating normalisation factors. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(11): 1568-1585.
- Sala S., Benini L., Crenna E. et al. (2016) Global environmental impacts and planetary boundaries in LCA. Data sources and methodological choices for the calculation of global and consumption-based normalisation factors. Report JRC 105141.
- Sala S., Crenna E., Secchi M. et al. (2017) Global normalisation factors for the environmental footprint and life cycle assessment. Report JRC 109878.
- Sala S., Cerutti A.K. and Pant R. (2018) Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Report JRC 106545.
- Sala S., Crenna E., Secchi M. et al. (2020) Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries. *Journal of environmental management* 269: 110686.
- Zhao H.L., Liu F., Liu H.Q. et al. (2020) Comparative life cycle assessment of two ceramsite production technologies for reusing municipal solid waste incinerator fly ash in China. *Waste Management* 113: 447-455.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo www.ingegneriadellambiente.net



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2021 è sostenuta da:

