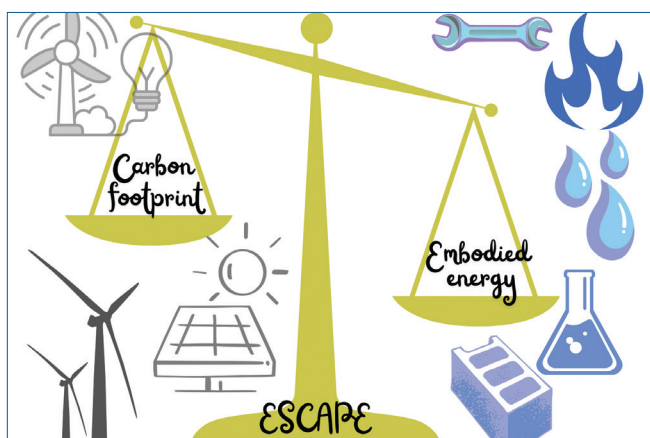




TECNOLOGIE EMERGENTI: IL METODO ESCAPE

Il metodo ESCAPE valuta la sostenibilità ambientale di tecnologie emergenti quando mancano i dati per una valutazione LCA completa. È basato su due indicatori - embodied energy e carbon footprint - per un'analisi ambientale rapida e preliminare, utile soprattutto nelle fasi iniziali di sviluppo. Applicato con successo a riciclo di batterie al litio, recupero del fosforo e progettazione di materiali sostenibili, consente valutazioni contestualizzate e guida a scelte progettuali più sostenibili.



Negli ultimi anni è stato sviluppato un nuovo approccio semplificato per valutare la sostenibilità ambientale delle tecnologie emergenti e dei materiali innovativi, denominato ESCAPE (Evaluation of Sustainability of material substitution using Carbon footPrint by a simplifiEd approach) [1]. Questo metodo nasce come risposta alle difficoltà spesso incontrate nell'applicazione della Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) completa, specialmente quando si opera in contesti di ricerca e sviluppo, dove i dati necessari sono ancora incompleti o incerti.

Alcune limitazioni dell'LCA riguardano, infatti, l'applicazione della valutazione del ciclo di vita alle tecnologie emergenti, in particolare a quelle in fase di laboratorio o di impianto pilota, che introducono una serie di sfide e problematiche specifiche. Questo è spesso il caso delle nuove tecnologie di recupero. Tali tecnologie, per loro stessa natura, non

sono ancora completamente sviluppate o commercializzate, il che comporta notevoli incertezze e una mancanza di dati affidabili necessari per valutazioni ambientali robuste. Di conseguenza, i metodi standard di LCA, generalmente pensati per tecnologie mature, risultano meno applicabili [2]. In questo contesto ESCAPE rappresenta uno strumento agile e accessibile, che consente una prima valutazione della sostenibilità ambientale basandosi su due soli indicatori: *embodied energy* e *carbon footprint*.

La *embodied energy* si riferisce alla quantità totale di energia necessaria per produrre un materiale o realizzare un processo, a partire dall'estrazione delle materie prime fino alla forma finale del prodotto. La *carbon footprint*, invece, quantifica la quantità di emissioni di anidride carbonica associate a tali processi.

Questi due parametri, pur non esaurendo l'intera complessità della sostenibilità ambientale, risultano efficaci per un'analisi preliminare, in particolare nelle fasi iniziali del ciclo tecnologico, quando le informazioni dettagliate sui flussi di materia ed energia, o sugli impatti lungo l'intero ciclo di vita, non sono ancora disponibili. In questo contesto, ESCAPE consente di orientare le decisioni progettuali, indirizzando lo sviluppo verso soluzioni a minore impatto ambientale (Fig. 1).

Il metodo si basa sul calcolo di un indice ESCAPE, un valore adimensionale ottenuto confrontando *embodied energy* e *carbon footprint* di una tecno-

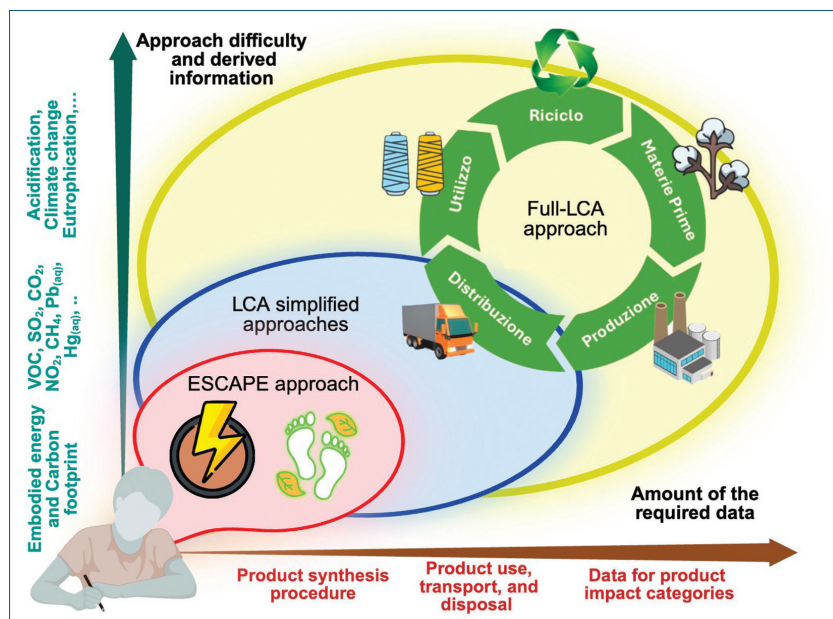


Fig. 1 - Differenza tra l'approccio ESCAPE e LCA, considerando anche LCA semplificati, in termini di dati necessari per la valutazione e impatti risultanti. Questa figura è stata realizzata con Biorender

logia con i valori corrispondenti di un riferimento (solitamente una tecnologia convenzionale già in uso). Un valore inferiore a 1 indica che la nuova tecnologia o materiale è più sostenibile rispetto al riferimento, mentre un valore superiore a 1 suggerisce un impatto ambientale più elevato [1].

ESCAPE è già stato applicato in numerosi contesti, dimostrando versatilità e capacità di adattamento. Un primo ambito di applicazione riguarda il riciclo delle batterie agli ioni di litio, oggi strategico per la transizione energetica e la diffusione della mobilità elettrica. In questo caso, ESCAPE è stato utilizzato

per confrontare i processi pirometallurgici e idrometallurgici. I primi risultano generalmente meno impattanti in termini di *carbon footprint* ed *embodied energy*, mentre i secondi, pur essendo più energivori, garantiscono un recupero più efficiente di metalli critici come nichel e cobalto [3]. Nel caso dello studio di un impianto pilota progettato per il recupero della *black mass* (derivante dalle batterie agli ioni di litio esauste), è stato possibile determinare il contributo di *embodied energy* e *carbon footprint* dei diversi step di processo, cioè il pre-trattamento, la flottazione, il *roasting* e lo *smelting* (vedi Fig. 2) [4]. ESCAPE ha permesso di identificare le soluzioni tecnologiche più promettenti anche in assenza di dati LCA completi, offrendo indicazioni utili per futuri sviluppi industriali.

Un altro esempio significativo riguarda il recupero del fosforo da ceneri di fanghi di depurazione e da lettiere avicole [5]. Il fosforo è un elemento essenziale per l'agricoltura, ma le riserve naturali sono in via di esaurimento. Diverse tecnologie di recupero sono state valutate attraverso l'indice ESCAPE, confrontando il loro *embodied energy* e *carbon footprint* con l'estrazione convenzionale da rocce fosfatiche. Anche in questo caso, il metodo ha consentito di individuare le soluzioni più promettenti, pur trattandosi spesso di processi ancora in fase di laboratorio o pilota.

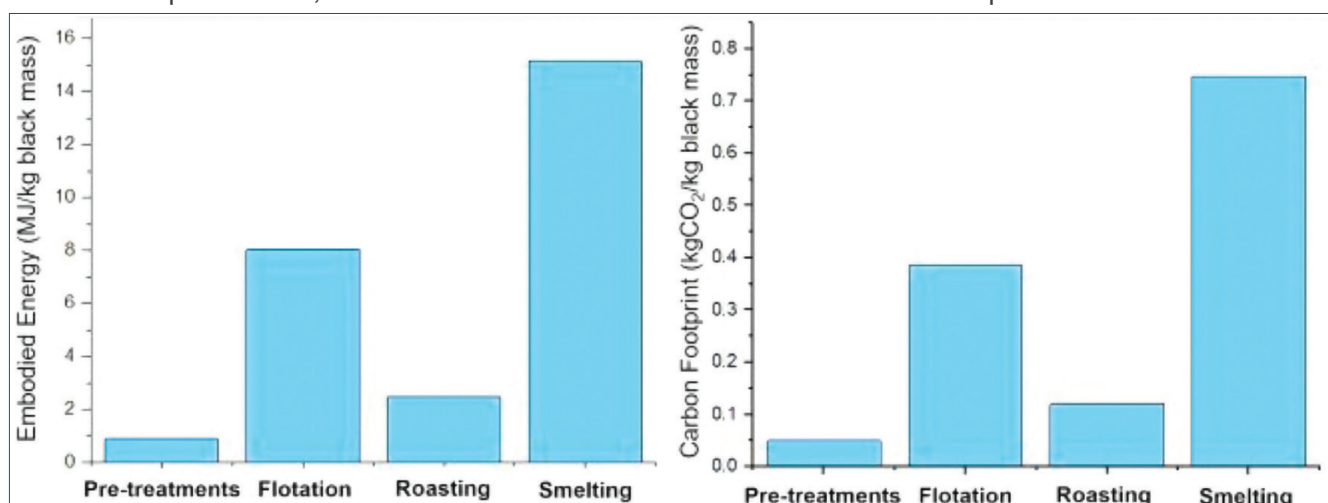


Fig. 2 - Embodied energy e carbon footprint dei diversi step di processo, valutate per un impianto pilota di recupero di batterie esauste [4]

ESCAPE è stato impiegato anche per valutare nuovi materiali adsorbenti prodotti a partire da rifiuti agroalimentari, come gusci di frutta o residui vegetali [6]. Questi materiali possono sostituire il carbone attivo tradizionale nel trattamento delle acque reflue, offrendo benefici ambientali significativi. L'analisi ESCAPE ha evidenziato che, rispetto al carbone attivo commerciale, i nuovi materiali possono avere un impatto inferiore, risultando quindi alternative più sostenibili. Ha però anche mostrato che molti dei materiali definiti sostenibili in realtà richiedono un grande dispendio energetico per il loro trattamento. La mancanza di metodologie di valutazione della sostenibilità nello sviluppo di nuove tecnologie e/o materiali contribuisce, quindi, alla mancanza di chiarezza e di adeguati supporti nell'identificazione dei processi che potrebbero essere più promettenti.

Nel settore dell'edilizia, il metodo è stato utilizzato per analizzare l'impiego di ceneri da fanghi di depurazione come sostituti di materiali da costruzione tradizionali [7]. Queste ceneri, derivanti da processi di incenerimento, possono essere incorporate in calcestruzzi o materiali per l'edilizia, riducendo l'uso di risorse vergini. ESCAPE ha permesso di dimostrare che, in alcuni casi, questi materiali secondari possono ridurre la carbon footprint complessiva, contribuendo alla promozione di pratiche circolari anche nel settore delle costruzioni.

Un altro esempio molto interessante è lo sviluppo di bioplastiche da paglia di riso, un materiale abbondante e a basso costo. Il biopolimero ottenuto è stato confrontato con materiali plastici convenzionali (come polistirene, PP e PLA), mostrando proprietà meccaniche simili ma un impatto ambientale sensibilmente ridotto [8]. ESCAPE ha fornito indicazioni importanti sulla maggiore sostenibilità del materiale *bio-based* rispetto ai polimeri fossili, in termini sia energetici che emissivi.

A rendere l'approccio ancora più interessante è la sua capacità di adattarsi a specifici contesti geografici e temporali. L'indice ESCAPE può infatti tener conto del mix energetico delle nazioni indagate: un processo che utilizza energia elettrica avrà impatti diversi in un paese con produzione elettrica da rinnovabili (es. Norvegia) rispetto a uno che utilizza una quota importante di carbone (es. Polonia). Inoltre, è possibile sviluppare valutazioni *time-dependent*, proiettando gli impatti ambientali nel futuro, in

funzione dell'evoluzione attesa del mix energetico. ESCAPE risulta così particolarmente adatto per supportare lo sviluppo di tecnologie in fase iniziale, come nuovi processi di riciclo chimico della plastica, recupero urbano di metalli da rifiuti elettronici (urban mining), valorizzazione dei rifiuti alimentari tramite digestione anaerobica o produzione di compost, e persino upcycling dei tessuti, settore oggi al centro delle strategie europee per la sostenibilità dell'industria della moda.

Un ulteriore campo di applicazione è l'eco-design, ovvero la progettazione di prodotti fin dall'inizio orientata alla riduzione dell'impatto ambientale. ESCAPE può fornire indicazioni rapide su quali scelte di materiali, processi o configurazioni risultino più sostenibili, fungendo da guida nelle prime fasi del ciclo di sviluppo.

Ovviamente è importante evidenziare che questa metodologia presenta alcune limitazioni. In particolare, i benefici ambientali associati a una catena del valore circolare dei processi dipendono anche da fasi non considerate nella metodologia ESCAPE. Per esempio, questa analisi generalmente non prende in considerazione fasi come raccolta, trasporto, selezione e smontaggio, in quanto tali operazioni sono generalmente indipendenti dallo sviluppo delle specifiche tecnologie che vengono esaminate. È comunque fondamentale valutare la sostenibilità dell'intero processo, includendo tutte le fasi operative (come per esempio il trasporto), per comprendere appieno le reali opportunità offerte dal riciclo. La metodologia proposta si configura quindi come una valutazione preliminare, semplificata, che può essere di supporto alle aziende. Rimane però la necessità di condurre un'analisi del ciclo di vita (LCA), una volta individuate le tecnologie più promettenti, allo scopo di ottenere un quadro accurato della sostenibilità complessiva.

In conclusione, l'approccio ESCAPE rappresenta uno strumento utile per analizzare la sostenibilità di nuove tecnologie, sviluppate a livello di laboratorio o di pilota, mettendo in evidenza gli stadi più onerosi del processo e capace anche di fornire indicazioni sui margini di miglioramento.

Ringraziamenti

Si ringrazia il progetto CARMEL "New CARbothermic approaches to Recovery critical METals from spent Lithium-ions batteries", finanziato dal FON-



DO ITALIANO PER LE SCIENZE APPLICATE (FISA)
per il supporto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Bontempi, *J. Clean. Prod.*, 2017, **162**, 162, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.028>.
- [2] C. van der Giesen, S. Cucurachi *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2020, **259**, 120904, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>.
- [3] A. Fahimi, S. Ducoli *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2022, **338**, 130493, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130493>.
- [4] A. Cornelio, E. Mousa *et al.*, *Sep. Purif. Technol.*, 2025, **359**, 130433, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130433>.
- [5] A. Fahimi, S. Federici *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2021, **289**, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125762>.
- [6] S. Ducoli, A. Zacco *et al.*, *Sustain. Mater. Technol.*, 2023, **38**, e00709, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00709>.
- [7] S. Ducoli, A. Zacco, E. Bontempi, *J. Environ. Manage.*, 2021, **282**, 111966, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111966>.
- [8] F. Bilo, S. Pandini *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2018, 200, **357**, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.252>.

Emerging Technologies: the ESCAPE Method

The ESCAPE method assesses the environmental sustainability of emerging technologies when data for a complete LCA assessment are lacking. It is based on two indicators - embodied energy and carbon footprint - for a rapid and preliminary environmental analysis, especially useful in the early stages of development. Successfully applied to lithium battery recycling, phosphorus recovery and sustainable material design, it allows contextualized assessments and guides more sustainable design choices.

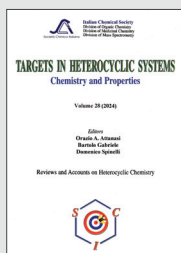
Libri e riviste Sci

Targets in Heterocyclic Systems Vol. 28

È disponibile il 28° volume della serie "Targets in Heterocyclic Systems", a cura di Orazio A. Attanasi, Bortolo Gabriele e Domenico Spinelli

https://www.soc.chim.it/libri_collane/th/s/vol_28_2024

Sono disponibili anche i volumi 1-27 della serie.



I seguenti volumi sono a disposizione dei Soci gratuitamente, è richiesto soltanto un contributo spese di € 10:

- G. Scorrano "La Storia della SCI", Edises, Napoli, 2009 (pp. 195)
- G. Scorrano "Chimica un racconto dai manifesti", Canova Edizioni, Treviso, 2009 (pp. 180)
- AA.VV. CnS "La Storia della Chimica" numero speciale, Edizioni SCI, Roma 2007 (pp. 151)
- AA.VV. "Innovazione chimica per l'applicazione del REACH" Edizioni SCI, Milano, 2009 (pp. 64)

Oltre "La Chimica e l'Industria", organo ufficiale della Società Chimica Italiana, e "CnS - La Chimica nella Scuola", organo ufficiale della Divisione di Didattica della SCI (www.soc.chim.it/riviste/cns/catalogo), rilevante è la pubblicazione, congiuntamente ad altre Società Chimiche Europee, di riviste scientifiche di alto livello internazionale:

- ChemPubSoc Europe Journal
- Chemistry A European Journal
- EURJOC
- EURJIC
- ChemBioChem
- ChemMedChem
- ChemSusChem
- Chemistry Open
- ChemPubSoc Europe Sister Journals
- Chemistry An Asian Journal
- Asian Journal of Organic Chemistry
- Angewandte Chemie
- Analytical & Bioanalytical Chemistry
- PCCP, Physical Chemistry Chemical Physics

**Per informazioni e ordini telefonare in sede,
06 8549691/8553968, o inviare un messaggio
a segreteria@soc.chim.it**