

---

**XI Convegno della Rete Italiana LCA**

**Resource Efficiency e  
Sustainable Development Goals:  
il ruolo del Life Cycle Thinking**

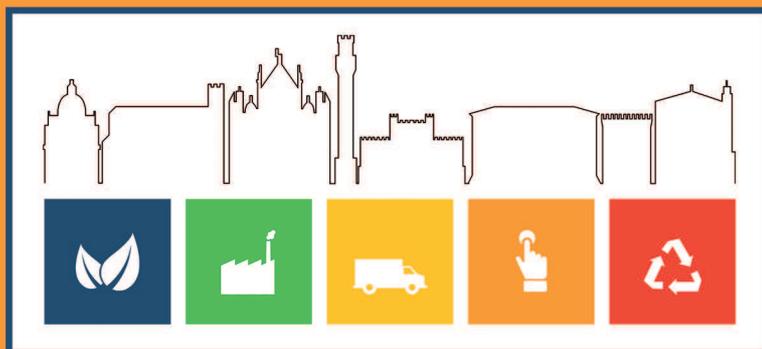
**Siena  
22 – 23 giugno 2017**

---

**a cura di Valentina Niccolucci, Arianna Dominici Loprieno,  
Simone Maranghi, Simona Scalbi**



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Atti del XI Convegno della Rete Italiana LCA

Resource Efficiency e Sustainable Development Goals: il ruolo del Life Cycle Thinking

Siena, 22-23 giugno 2017

*A cura di Valentina Niccolucci, Arianna Dominici Loprieno, Simone Maranghi, Simona Scalbi*

*Immagini del volume a cura di Paola Sposato*

2017 ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e  
lo sviluppo economico sostenibile

ISBN: 978-88-8286-352-4

Revisione editoriale: Giuliano Ghisu

Copertina: Cristina Lanari

# SOMMARIO

|   |     |
|---|-----|
| <b>COMITATO SCIENTIFICO</b>   | i   |
| <b>COMITATO ORGANIZZATORE</b>   | iii |
| <b>PREFAZIONE</b>   | iv  |
| <b>PRESENTAZIONI ORALI</b>  | 1   |
| <b><u>SESSIONE I: RESOURCE EFFICIENCY E LIFE CYCLE THINKING</u></b>   | 1   |
| <i>Assessment of resource efficiency in a life cycle perspective: the case of reuse</i><br>F. ARDENTE, P. TECCHIO, S. BOBBA, F. MATHIEUX                | 2   |
| <b><u>SESSIONE II: LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT, ECONOMIC GROWTH AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS</u></b>                                      | 10  |
| <i>Which role for Life Cycle Thinking in the definition of meaningful indicators for the circular economy?</i><br>M. NIERO, M.Z. HAUSCHILD              | 11  |
| <i>Biowaste for biofuel production: a sustainability assessment by means of LCA and emergy</i><br>F. SALADINI, N. PATRIZI, F.M. PULSELLI, S. BASTIANONI | 20  |
| <i>Life cycle assessment of a charging station for electric bicycles</i><br>G. MONDELLO, R. SALOMONE, L. GIUTTARI                                       | 29  |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Valutazione LCA per la minimizzazione dell'impatto ambientale nello sfruttamento della risorsa geotermica</i>                                    | 38  |
| M.L. PARISI, M. BRAVI, M.C. BARATTO, R. BASOSI  |     |
| <i>Analisi del ciclo di vita del laterizio: un caso studio in Piemonte</i>  | 47  |
| C. CARBONARO, F. THIEBAT  |     |
| <i>Life cycle assessment of rare earth elements production: case study from a monazite-based in Brazil</i>  | 55  |
| F.M. DA R. DE S. LIMA, G.A. LOVÓN-CANCHUMANI, L.M. TARAZONA ALVARADO, M. SERRA SAMPAIO  |     |
| <i>Analisi del ciclo di vita e Product Category Rules di prodotti emoderivati</i>   | 64  |
| E. NERI, R.M. PULSELLI, B. RUGANI, M. MARCHI, M. BONALDI  |     |
| <i>Life cycle assessment of a novel polyhydroxyalkanoates production process with mixed microbial cultures fed on winery waste</i>                  | 72  |
| L. VOGLI, S. RIGHI, S. MACRELLI, P. GALLETTI, C. SAMORÌ, R. CONTI, C. TORRI, E. TAGLIAVINI  |     |
| <b><u>SESSIONE III: SVILUPPI METODOLOGICI DI LCA, LCC E SLCA E INTEGRAZIONE CON ALTRI STRUMENTI PER STUDI DI SOSTENIBILITÀ</u></b>                  | 80  |
| <i>Organisational LCA for supporting environmental management towards sustainability of production patterns: the case of agricultural machinery</i> | 81  |
| S. D'ANGELO, G. GARAVINI, E. BREDA, S. RIGHI, M. QUARANTA, A. ZAMAGNI   |     |
| <i>The uncertainty analysis in LCA studies: state of the art</i>  | 89  |
| A. MAZZI, M. MASON, S. TONIOLO, F. MARZOTTO, A. SCIPIONI  |     |
| <i>Social Life Cycle Assessment of a textile product</i>  | 98  |
| P. LENZO, M. TRAVERSO, R. SALOMONE, G. IOPPOLO  |     |
| <i>Social Life Cycle Assessment per il settore lattiero caseario: focus sulla comunità locale</i>   | 109 |
| I. MASSA, M.C. LUCCHETTI, G. ARCESE, O. MARTUCCI  |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b><u>SESSIONE IV: WATER - FOOD - ENERGY - WASTE</u></b>  | 116 |
| <i>Il prolungamento della shelf-life come strategia di mitigazione dell'impatto nelle filiere agro-alimentari: il caso studio del grissino integrale</i>  | 117 |
| J. BACENETTI, V. GIOVENZANA, M. NIERO, C. INGRAO, R. GUIDETTI   |     |
| <i>Life Cycle Assessment applicata alla Provola delle Madonie</i>   | 125 |
| M. CELLURA, M. A. CUSENZA, S. LONGO, F. GUARINO, M. MISTRETTA   |     |
| <i>Structure and pattern of food consumption in Italian household: an analysis of impact on climate change and land use</i>   | 133 |
| A. K. CERUTTI, S. SALA, A. PIETTA, M. SECCHI  |     |
| <i>Valutazione dei potenziali impatti ambientali legati a due opzioni di trattamento dei rifiuti organici in Abruzzo</i>  | 142 |
| E. MANCINI, I. ARZOUMANIDIS, A. RAGGI   |     |
| <i>Evaluating exposure to pesticides in banana production systems: an expert elicitation approach</i>   | 150 |
| S. DI CESARE, C. MACOMBE, S. GRIMBUHLER, L. PETTI, D. LOEILLET  |     |
| <i>Improving resource efficiency in the cultivation of bread wheat through precision agriculture</i>  | 159 |
| R. VILLANI, S. BOSCO, F. DRAGONI, M. RUGGERI, P. MERIGGI, C. TOZZINI, G. RAGAGLINI  |     |
| <i>Substitution of energy crops with bio-waste in an existing anaerobic digestion plant: an environmental and energetic analysis</i>  | 166 |
| F. DI MARIA, F. SISANI, M. LASAGNI  |     |
| <i>Can renewable energy sources improve the environmental performances of microalgae oil production system?</i>   | 175 |
| S. JEZ, D. SPINELLI, A. FIERRO, M. ARESTA, A. DIBENEDETTO, E. BUSI, R. BASOSI   |     |
| <i>Diesel, benzina ed elettrica – un confronto sul ciclo di vita dall'utilitaria alla familiare</i>   | 182 |
| P. GIRARDI, C. BRAMBILLA  |     |
| <i>Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) applied to an innovative agri-food production practice: the aquaponics. A case study in the WWF Oasis of Valle Averte (Veneto, Italy)</i> | 191 |
| A. A. FORCHINO, E. CANNARSA, S. MAIOLO, D. BRIGOLIN, R. PASTRES   |     |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Evaluating the variability of life cycle inventories of primary tillage via different operational parameters</i> | 198 |
| S.H. MOUSAVI-AVVAL, G. TASSIELLI, P.A. RENZULLI, B. NOTARNICOLA   |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b><u>SESSIONE V: PEF E OEF - ESPERIENZE APPLICATIVE E POSSIBILI UTILIZZI NELLE POLITICHE AMBIENTALI</u></b> | 207 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| <i>Implementing life-cycle approaches and tools: experiences and learnings from Aptar Italia</i> | 208 |
| M. DEL GROSSO, A. SIMBOLI, A. RAGGI, N. CUTARELLA  |     |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Valutazione del profilo ambientale di un sistema di trattamento di rifiuti con un approccio tipo Organisation Environmental Footprint</i> | 217 |
| B. NOTARNICOLA, P. A. RENZULLI, G. TASSIELLI, G. FEDELE  |     |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Product Environmental Footprint and the wine sector: a recent case study</i> | 226 |
| D. TONON, A. ZAMAGNI, G. GARAVINI, L. CHIUSANO, P. MASONI                       |     |

|               |     |
|---------------|-----|
| <b>POSTER</b> | 235 |
|---------------|-----|

|  |     |
|--|-----|
| <i>Life Cycle datasets of the Italian stone production chain</i> | 236 |
| I. BIANCO, G. A. BLENGINI  |     |

|  |     |
|--|-----|
| <i>LCA methodology on solar radiation influx control strategies in buildings: a review</i> | 244 |
| J. D. BLANCO CADENA, M. LAVAGNA, T. POLI   |     |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Water Footprint Assessment vs Life Cycle Assessment: how spatiotemporal variation could influence impact assessments</i> | 253 |
| D. D. CHIARELLI, F. RECANATI, P. MELIÀ, M. C. RULLI   |     |

|  |     |
|--|-----|
| <i>LCA, raccolta dati di inventario e fasi del ciclo di vita degli edifici</i> | 262 |
| A. DALLA VALLE, M. LAVAGNA, A. CAMPIONI  |     |

|   |     |
|---|-----|
| <i>An integrated framework for the assessment of life cycle costs and environmental impacts of food waste</i> | 271 |
| F. DE MENNA, J. DAVIS, K. ÖSTERGREN, N. UNGER, M. LOUBIERE, M. VITTUARI                                       |     |

|   |     |
|---|-----|
| <i>La Social Life Cycle Assessment a supporto del Supply Chain Management</i><br>M. D'EUSANIO, A. ZAMAGNI, L. PETTI   | 279 |
| <i>LCA di prodotto-servizio: il caso di studio di un lavamano automatico</i><br>G. DOTELLI, E. VIGANÒ   | 288 |
| <i>Applicazione della Water Footprint sviluppata dal WF Network: il caso del Pomodorino del Piennolo del Vesuvio DOP</i><br>M. FERRARA, V. FANTIN, S. RIGHI, C. CHIAVETTA, P. BUTTOL, A. BONOLI     | 297 |
| <i>Analisi preliminare ambientale della produzione di nanofibre tramite electrospinning</i><br>P. FRONTERA, F. PANTÒ, A. MALARA, S. SANTANGELO, P. ANTONUCCI  | 305 |
| <i>Benchmark LCA e uso di EPD nei Green Building Rating System</i><br>S. GANASSALI, M. LAVAGNA, A. CAMPIOLI   | 312 |
| <i>Impronta idrica della produzione elettrica da cicli combinati a gas naturale in Italia</i><br>A. GARGIULO  | 321 |
| <i>Procedure di allocazione nella metodologia LCA e tendenze settoriali verso un'economia circolare</i><br>S. GIORGI, M. LAVAGNA, A. CAMPIOLI   | 330 |
| <i>Produzione di latte e impatto ambientale: effetto del sistema colturale e della razione somministrata alle bovine</i><br>G. GISLON, L. BAVA, J. BACENETTI, A. TAMBURINI, M. ZUCALI, A. SANDRUCCI | 339 |
| <i>Choosing the LCA impact categories for the building sector</i><br>A. INVIDIATA, M. LAVAGNA, E. GHISI   | 348 |
| <i>Un nuovo approccio per la valutazione del consumo e dell'impatto ambientale sulla risorsa idrica nei sistemi agricoli</i><br>D. LOVARELLI, J. BACENETTI  | 356 |
| <i>Sviluppo di un approccio integrato per la valutazione ambientale di sistemi fotovoltaici di nuova generazione: le perovskiti</i><br>S. MARANGHI, M. L. PARISI, A. SINICROPI, R. BASOSI           | 364 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Self cleaning nano-technology application on a new antibacterial insect screen: an attributional LCA study for quantifying energy and water savings</i>   | 373 |
| S. MARANGHI, F. BORGHETTI, R. BASOSI, E. BUSI  |     |
| <i>L'impronta carbonica delle organizzazioni: confronto tra due micro-birrifici italiani</i>   | 380 |
| P. MASOTTI, E. GIORGI, B. CAMPISI, P. BOGONI   |     |
| <i>Emergy resource-based life cycle analysis of solidoxide fuel-cell power systems</i>   | 389 |
| A. MEHMETI, C. BOIGUES MUÑOZ, S.J. MCPHAIL   |     |
| <i>La valutazione LCA nell'ambito del progetto cluster P.RE.MURA.</i>  | 397 |
| A. MELONI  |     |
| <i>City Environmental Footprint – a framework in support of urban sustainability and Sustainable Development Goals</i>   | 405 |
| N. MIRABELLA, K. ALLACKER  |     |
| <i>A review of industrial sustainability indicators for Life Cycle Sustainability Assessment</i>   | 414 |
| A. NERI, P. MELIÀ, E. CAGNO, A. TRIANNI  |     |
| <i>Studio di fattibilità della valorizzazione energetica di residui agro-industriali attraverso fermentazione anaerobica (biogas)</i>  | 423 |
| E. NERI, F. PASSARINI, M. BRIANI, I. VASSURA, U. MENCHERINI  |     |
| <i>Stima ex-ante della Carbon Footprint del Convegno annuale della Rete Italiana LCA 17: una proposta per il futuro</i>  | 430 |
| E. NERI, N. PATRIZI, N. MARCHETTINI, S. BASTIANONI   |     |
| <i>Aumentare la consapevolezza nel consumatore può indurre un cambiamento nelle abitudini alimentari? Un progetto dell'Università di Siena sui fontanelli per la distribuzione di acqua potabile</i> | 439 |
| V. NICCOLUCCI, M. MOZZILLO, M. L. PARISI, R. BASOSI, S. BASTIANONI   |     |
| <i>Valutazione del profilo ambientale di un sistema di trattamento di rifiuti con un approccio tipo Organisation Environmental Footprint</i>   | 447 |
| B. NOTARNICOLA, P. A RENZULLI, G. TASSIELLI, G. FEDELE   |     |
| <i>Water Footprint analysis (ISO 14046) of organic Chianti wine production in Tuscany, Italy</i>   | 455 |
| T.PACETTI, G. CASTELLI, L. ZANCHI  |     |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Tecnological breakthrough for energy efficiency in dyes production: bio-synthetic pathway versus chemical process</i>                       | 463 |
| M. L. PARISI, R. POGNI, R. BASOSI  |     |
| <i>LCA application in telecommunication service industries: a literature review</i>  | 471 |
| M. PAVLOVIC, L. RIGAMONTI  |     |
| <i>Sustainability assessment of the restoration of a historical building focusing on the installation of innovative building nanomaterials</i> | 480 |
| M. PINI, P. NERI, D. SETTEMBRE BLUNDO, A. M. FERRARI   |     |
| <i>Microalgae cultivation in wastewaters for energy purposes: a life-cycle based comparison</i>  | 489 |
| S. ROSSI, L. RIGAMONTI   |     |
| <i>Carbon footprint performance of public school lunch menu provided by an Italian catering company</i>  | 498 |
| M. SIMONETTO, C. PIERETTO, A. MANZARDO, L. CAMMISA, M.L. PUTIN, A. SCIPIONI  |     |
| <i>Analisi di sostenibilità del sistema di gestione dei rifiuti solidi in Baalbek (Libano)</i>   | 504 |
| R. SPINELLI, A.M. FERRARI, P. NERI, A. BONOLI  |     |
| <i>Life Cycle and Life Cycle Assessment within International Standards</i>   | 513 |
| S. TONIOLO, A. MAZZI, F. FORTUNA, A. SCIPIONI  |     |
| <i>The environmental profile of Pecorino Romano PDO. A case study</i>  | 521 |
| E. VAGNONI, A. FRANCA, C. PORQUEDDU, P. DUCE   |     |
| <i>Social hotspots of nanocellulose production</i>   | 530 |
| C. VALENTE, A. BREKKE  |     |
| <i>Produzione industriale di acido tereftalico: analisi del ciclo di vita di vie alternative da fonti rinnovabili</i>                          | 538 |
| M. VOLANTI, F. PASSARINI, D. CESPI, E. NERI, F. CAVANI   |     |
| <i>La sostenibilità nel restauro architettonico: valutazione comparativa delle tecniche di pulitura mediante analisi LCA</i>                   | 546 |
| L. VOLPI, R. SPINELLI, E. FRANZONI, A. BONOLI  |     |

*The role of Life Cycle Assessment (LCA) and energy efficiency optimization during the early stage of building design* 554  
S. ZHAO, M. LAVAGNA, E. DE ANGELIS

*Succinic acid from giant reed feedstock: greenhouse gas emissions and non-renewable energy use* 564  
A. ZUCARO, A. FORTE, A. FIERRO

## **PREMIO GIOVANI RICERCATORI** 573

### **1^ classificato**

*Packaging solutions for food waste prevention: a methodological framework for LCA-modelling* 574  
S. NESSI, L. RIGAMONTI, M. GROSSO

### **2^ classificato**

*Life Cycle Sustainability Assessment advancements in the automotive lightweight design* 583  
L. ZANCHI, A. ZAMAGNI, M. DELOGU, M. PIERINI

### **3^ classificato**

*Life cycle assessment of shale gas in the UK* 592  
C. TAGLIAFERRI, P. LETTIERI, C. CHAPMAN

# Valutazione dei potenziali impatti ambientali legati a due opzioni di trattamento dei rifiuti organici in Abruzzo

Eliana Mancini, Ioannis Arzoumanidis, Andrea Raggi\*

DEc – Dipartimento di Economia, Università "G. d'Annunzio", viale Pindaro 42,  
Pescara

Email\*: [a.raggi@unich.it](mailto:a.raggi@unich.it)

## Abstract

*Il presente articolo descrive uno studio di LCA applicato a due opzioni di trattamento della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) riferiti a un impianto ubicato in Abruzzo. La prima opzione corrisponde all'attuale linea di compostaggio dell'impianto, mentre nella seconda è stato ipotizzato l'affiancamento alla linea esistente di un processo di digestione anaerobica che tratterà parte dei rifiuti in ingresso. Dalla normalizzazione emerge che la seconda opzione ottiene risultati preferibili nella quasi totalità delle categorie d'impatto, mentre quella attuale resta la soluzione preferibile soltanto per la categoria "Formazione fotochimica di ossidanti". Tuttavia, in vista dei futuri incentivi sulla produzione di biometano per autotrazione, sarebbe auspicabile condurre una nuova LCA che includa tale opzione, al fine di ottenere informazioni più esaurienti riguardo le diverse alternative di trattamento della FORSU.*

## 1. Introduzione e contesto di riferimento

In Italia, grazie alla crescente adozione della raccolta differenziata, nonché al miglioramento della qualità della stessa, la quantità di rifiuti organici raccolti separatamente, da cui si ottiene un prodotto quasi del tutto biodegradabile, è in aumento. Questi prodotti, attraverso una corretta gestione integrata dei rifiuti, possono sostituire l'utilizzo di risorse prelevate tradizionalmente dai comparti ambientali in svariati campi: si pensi alla produzione di energia rinnovabile, a quella dei biopolimeri, o più semplicemente, all'ottenimento di compost e digestato, caratterizzati da un interessante potere ammendante e nutritivo per il terreno. Il presente articolo si riferisce ad un caso studio (Mancini, 2017) che si inserisce in tale contesto, concentrandosi in particolar modo sull'esame di due opzioni di trattamento della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) e sulla valutazione dei connessi impatti ambientali potenziali mediante LCA. Nello specifico, saranno analizzate la tradizionale tecnica del compostaggio e quella emergente della digestione anaerobica seguita da compostaggio. La rassegna critica della letteratura scientifica che ha accompagnato il lavoro, finalizzata ad acquisire lo stato dell'arte metodologico e implementativo sull'LCA dei processi di trattamento della FORSU, è stata eseguita principalmente attraverso siti web che permettono l'accesso a pubblicazioni scientifiche, quali, ad esempio, ResearchGate, ScienceDirect, e il servizio Discovery dell'Università degli Studi "G. d'Annunzio" (che integra più banche dati bibliografiche), oltre a motori di ricerca come Google Scholar e Google Books. Le parole chiave utilizzate per la ricerca sono state: "composting", "anaerobic digestion", "municipal organic waste", "LCA", "biogas", "digestate", "impact assessment", in varie combinazioni (Mancini, 2017). Sono stati reperiti e consultati 21 articoli scientifici e 3 tesi di

laurea magistrale. Gli studi consultati analizzano anche altre opzioni di trattamento della biomassa. Alcuni autori comparano il compostaggio con la digestione anaerobica (Di Ciaula et al., 2015), mentre Sonnesson et al. (2000) introducono anche l'incenerimento. Una parte esigua di studi tratta la digestione anaerobica seguita da compostaggio comparandola con il solo compostaggio e con la discarica (De Maglie, 2013) oppure con l'incenerimento (Di Maria e Micale, 2014). In linea generale, emerge che la produzione di energia da biogas - ancor meglio se seguita dal trattamento aerobico del digestato (De Maglie, 2013) - presenta migliori *performance* ambientali rispetto al recupero materico di biomassa, soprattutto in termini di risparmio dell'energia fossile e bilancio delle emissioni di gas serra, rispetto ai sistemi di riferimento fossili convenzionali (Cherubini e Strømman, 2010). Tuttavia, Di Ciaula et al. (2015) sostengono che il trattamento della FORSU dovrebbe avvenire mediante compostaggio, e non tramite digestione anaerobica, soprattutto per motivi igienico-sanitari. Le LCA analizzate riguardano principalmente il contesto italiano ed europeo e quella che si accosta meglio al caso studio oggetto di questo lavoro è quella di De Maglie (2013), che verrà descritta brevemente nel par. 2.4 relativo alla discussione.

## **2. Il caso studio**

Il caso studio di questo lavoro consiste nell'LCA di due processi di trattamento della FORSU: compostaggio e digestione anaerobica seguita da compostaggio. L'analisi riguarda l'impianto di selezione dei rifiuti solidi urbani e di compostaggio A.C.I.A.M. S.p.A., situato nel comune di Aielli, in provincia dell'Aquila, del quale è stata considerata esclusivamente la linea di compostaggio (Mancini, 2017). Verranno presentate due analisi LCA, una sull'opzione attuale (denominata "C", per "compostaggio") e una sull'opzione futura ("E", per "energetica") basata sul progetto di ampliamento dell'impianto. Nel seguito della trattazione verranno presentate le due opzioni, la metodologia adottata e i risultati ottenuti.

### **2.1. Descrizione dei processi**

Attualmente, l'impianto è dotato di una linea di trattamento aerobico del rifiuto organico, dal quale si produce ammendante compostato misto conforme all'Allegato 2 del D.Lgs. 75/2010 (MIPAAF, 2010), che trova pressoché totale collocazione nel distretto agricolo fucense. L'intero ciclo di lavorazione viene effettuato in ambiente chiuso, dotato di un sistema di aspirazione e trattamento dell'aria esausta, mentre le acque di processo vengono drenate da un sistema di griglie e recapitate a una vasca di raccolta. Il processo di compostaggio inizia con la ricezione del materiale organico e del verde presso un'area di stoccaggio, dove il verde subisce un pretrattamento meccanico per poi essere conferito nelle giuste proporzioni, insieme alla FORSU e allo strutturante di ricircolo, nella fase di miscelazione. Da qui, la miscela viene trasportata, tramite pala gommatata, in biocelle dove sarà attivata la fase di biossidazione accelerata, della durata di circa 15 giorni. La trasformazione biologica della biomassa in questa fase è repentina. La temperatura arriva e si attesta a 55°C per almeno tre giorni e successivamente, subisce un raffreddamento fino a 40°C. Terminato questo

ciclo, la biomassa viene caricata nuovamente su pale gommate e trasferita nell'aia di maturazione, dove resterà per circa tre settimane. Trattandosi di un processo di tipo statico, la pavimentazione forata delle biocelle e dell'aia di maturazione favorisce le condizioni di aerobiosi e allo stesso tempo la percolazione delle acque di processo. All'interno della stessa area di maturazione, il prodotto successivamente subisce un processo di raffinazione dal quale si ottengono tre *output*: l'ammendante compostato misto, una frazione intermedia lignocellulosica di sottovaglio, da avviare a ricircolo interno nella miscela, e una frazione a matrice prevalentemente plastica, da smaltire in discarica. La discarica si trova a circa 140 km di distanza dall'impianto, nel comune di Isernia (IS). Gli automezzi utilizzati per la distribuzione del compost possono trasportare un carico massimo di 10-11 t, mentre quelli utilizzati per il conferimento in discarica hanno una portata massima di 25 t. Tutti i viaggi di andata vengono effettuati a pieno carico, mentre il ritorno è a vuoto.

L'opzione "E" è stata modellizzata in base alle previsioni del progetto di ampliamento dell'impianto in oggetto, pertanto, si tratta di un'ipotesi che si prevede di porre in essere nei prossimi anni. Le differenze rispetto all'opzione "C" sono riassumibili in quattro punti:

- verrà inserita una fase di pretrattamento della FORSU, dalla quale si ricaveranno due frazioni: il sovrvallo e il sottovaglio, che saranno avviate rispettivamente a compostaggio e a digestione anaerobica;
- la linea di digestione anaerobica permetterà di trattare il 34% del materiale organico in ingresso nell'impianto. Biogas e digestato saranno gli *output* del processo. Il biogas alimenterà un motore a combustione interna con annesso generatore elettrico e scambiatore di calore, al fine di produrre 800 kW<sub>e</sub> e 500 kW<sub>t</sub>, che soddisferanno solamente in parte il fabbisogno energetico dell'impianto. La quota energetica necessaria a soddisfare il restante fabbisogno sarà fornita dalla rete (mix elettrico italiano), come accade per l'intero fabbisogno dell'opzione "C". Il digestato, invece, subirà un'ulteriore stabilizzazione passando alla linea di compostaggio, divenendo, così, un *input* del processo di miscelazione insieme al sovrvallo, alla frazione di ricircolo e al verde;
- un doppio processo di maturazione permetterà una maggior stabilizzazione del prodotto finale (in "C" vi è un solo processo di maturazione);
- vagliatura in due stadi (in "C" la vagliatura avviene in un unico stadio).

## **2.2. Analisi LCA delle opzioni di trattamento**

### **2.2.1. Obiettivi e campo di applicazione**

L'obiettivo dello studio è quello di individuare le criticità ambientali di due opzioni di trattamento della FORSU relative a un impianto di compostaggio in Abruzzo. Pertanto è stata condotta una LCA delle due opzioni, seguendo gli standard tecnici UNI EN ISO 14040 (2006) e 14044 (2006), nonché l'ILCD Handbook (European Commission, 2010). La funzione considerata consiste nel trattamento del

rifiuto organico in ingresso nell'impianto, mentre l'unità funzionale è il trattamento di 1.000 t di rifiuti organici. I sistemi oggetto di valutazione, le cui funzioni sono state considerate equivalenti, sono quello relativo al compostaggio e quello relativo alla digestione anaerobica seguita da compostaggio. Per semplicità, nella modellizzazione la qualità del compost ottenuto nelle due opzioni è stata considerata equivalente. Per entrambi i sistemi esaminati, i confini del sistema vanno dallo stoccaggio del materiale organico nell'area di ricezione dell'impianto fino alla distribuzione del compost, allo smaltimento degli scarti in discarica e delle acque di percolazione in un impianto di depurazione. Per quanto riguarda l'opzione "E", la produzione dell'energia derivante dal biogas è utilizzata esclusivamente all'interno della struttura e non è destinata al mercato. Inoltre, il bilancio di massa in uscita dell'ammendante (che è il prodotto principale) registra una percentuale rispetto al materiale organico di partenza, di circa il 21% in entrambi i casi (in "C" il 21%, in "E" il 20,6%). I dati utilizzati nell'opzione "C" sono prevalentemente primari e si riferiscono al 2015. In alternativa ai dati primari, quando necessario, si è fatto riferimento alla banca dati Ecoinvent vers. 2.2. (Ecoinvent Center, 2017). Per l'opzione "E" sono stati utilizzati dati secondari. La modellazione è stata effettuata per mezzo del codice di calcolo SimaPro, vers. 7.2.4 (Pré, 2010). Il metodo di valutazione ambientale è ReCiPe Midpoint (Goedkoop et al., 2009) con prospettiva gerarchica e normalizzazione mondiale. La frazione di ricircolo ottenuta dal processo di vagliatura è stata esclusa dal calcolo trattandosi di un caso di *closed loop*.

### 3. Risultati

Dalla caratterizzazione (fig. 1) è emerso che, nell'opzione "C", la fase di produzione del compost assume i valori più alti in 9 categorie di impatto su 18: Climate change (CC), Ozone depletion (OD), Terrestrial acidification (TA), Freshwater eutrophication (FEu), Particulate matter formation (PMF), Agricultural land occupation (ALO), Natural land transformation (NLT), Water depletion (WD), Fossil depletion (FD). La fase della discarica (comprensiva anche del trasporto degli scarti) predomina, invece, nelle restanti 9: Marine eutrophication (ME), Human toxicity (HT), Photochemical oxidant formation (POF), Terrestrial ecotoxicity (TE), Freshwater ecotoxicity (FE), Marine ecotoxicity (MEc), Ionising radiation (IR), Urban land occupation (ULO), Metal depletion (MD). Nell'opzione "E" la fase di depurazione del percolato (comprensiva anche del trasporto) influenza maggiormente 8 categorie (CC, OD, TA, POF, PMF, IR, MD, FD); segue la discarica che prevale in 6 (ME, HT, TE, FE, MEc, ULO), infine la produzione di compost, per le restanti 4 (FEu, ALO, NLT, WD).

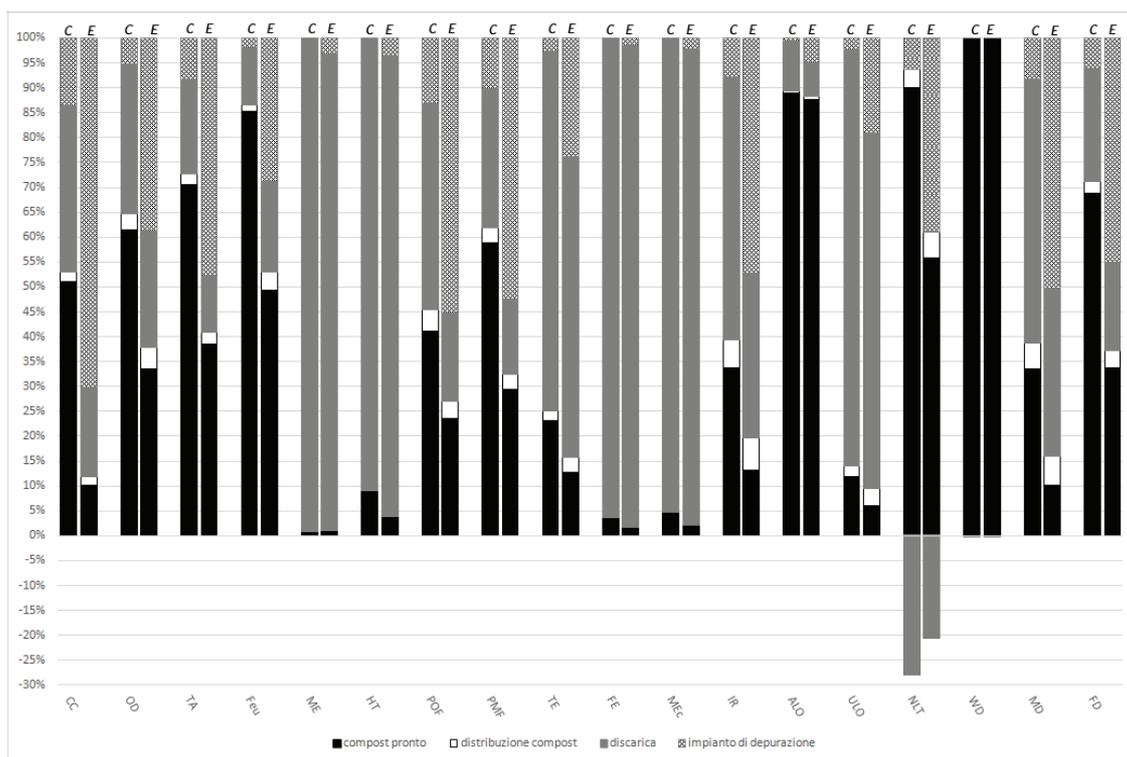


Figura 1: Profilo ambientale delle due opzioni ottenuto tramite la caratterizzazione. Le lettere “C” ed “E” si riferiscono rispettivamente alle opzioni “compostaggio” ed “energetica”.

I risultati della normalizzazione (fig. 2) mostrano che entrambe le tecniche di trattamento della FORSU influenzano principalmente tre categorie di impatto: HT, FE e MEc. Si consideri, infatti, che su un punteggio totale di 3.343,7 ottenuto da “C”, e 1.796 da “E”, le tre categorie incidono rispettivamente per circa il 91% e 90%. Nello specifico, HT assume 683,6 punti per “C” e 358,99 per “E”; FE 940,16 punti per “C” e 500,89 per “E” e MEc 1.435,53 punti per “C” e 765,31 per “E”. I principali flussi che determinano questi potenziali impatti sono riportati in tab. 1 e derivano essenzialmente dalla fase della discarica (trasporto e smaltimento).

Tabella 1: Principali responsabili delle categorie di impatto più colpite.

|             | Cat.d'impatto | Sostanza      | Compartim. | Sotto-compart.         | Unità        | Totale   |
|-------------|---------------|---------------|------------|------------------------|--------------|----------|
| Opzione “C” | HT            | Lead          | Acqua      | groundwater, long-term | kg 1,4-DB eq | 2.0803,2 |
|             | FE            | Vanadium, ion | Acqua      | groundwater, long-term | kg 1,4-DB eq | 1.629,18 |
|             | MEc           | Vanadium, ion | Acqua      | groundwater, long-term | kg 1,4-DB eq | 1.613,84 |
| Opzione “E” | HT            | Lead          | Acqua      | groundwater, long-term | kg 1,4-DB eq | 1.1138,9 |
|             | FE            | Vanadium, ion | Acqua      | groundwater, long-term | kg 1,4-DB eq | 872,63   |
|             | MEc           | Vanadium, ion | Acqua      | groundwater, long-term | kg 1,4-DB eq | 864,41   |

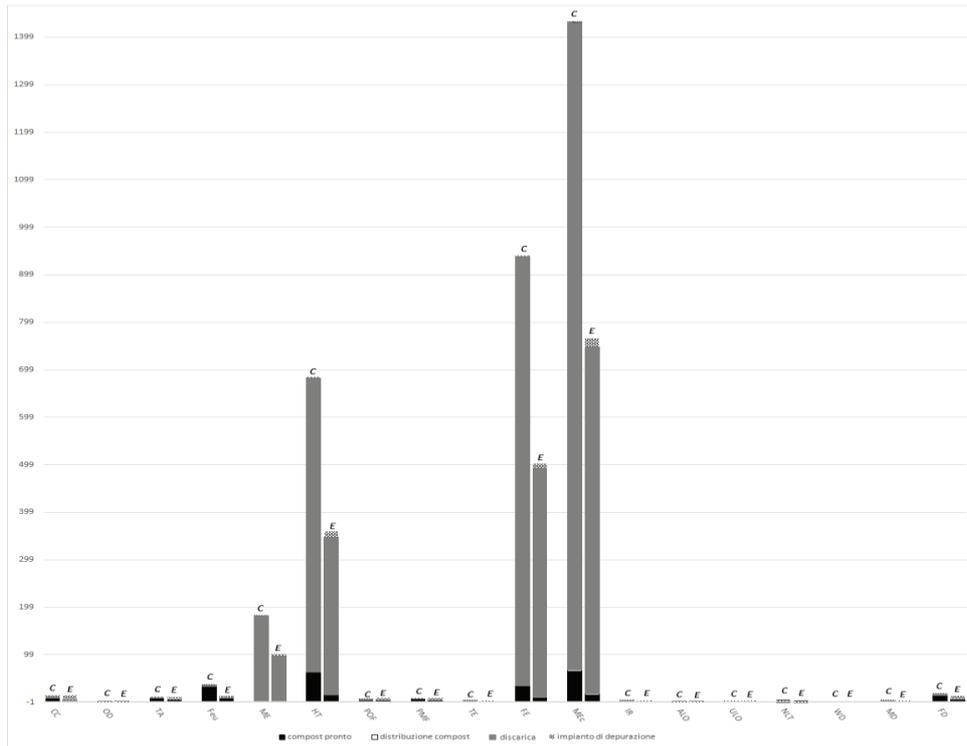


Figura 2: Istogrammi delle opzioni ottenuti dalla normalizzazione. Le lettere “C” ed “E” su ogni colonna si riferiscono rispettivamente alle opzioni “compostaggio” ed “energetica”.

#### 4. Discussione

L’analisi dei risultati è stata condotta esaminando i punteggi ottenuti dalla normalizzazione, riferiti alle due opzioni, per ciascuna categoria d’impatto, al fine di agevolarne la comprensione. L’opzione che presenta migliori *performance* ambientali, ottenendo il punteggio più basso per la quasi totalità delle categorie di impatto, è l’opzione “E”. “C”, invece, è preferibile soltanto per la categoria “Formazione fotochimica di ossidanti”, con 6,31 punti (rispetto a 7,79 di “E”).

Un obiettivo analogo a quello del caso studio oggetto di questo lavoro è rinvenibile nello studio di De Maglie (2013), nel quale vengono confrontati tre scenari riferiti a un impianto di trattamento dei rifiuti organici e del verde in provincia di Ravenna: lo scenario attuale, che consiste in un processo di digestione anaerobica seguita da compostaggio, lo scenario passato, riguardante l’adozione del solo processo di compostaggio e infine uno scenario ipotetico dove il rifiuto è smaltito in discarica. I risultati mostrano che lo scenario preferibile dal punto di vista ambientale è quello attuale, e ciò confermerebbe quanto emerso anche nel caso di Aielli (AQ) sebbene tra questo studio e quello di De Maglie (2013) esistano delle divergenze, come l’unità funzionale, i confini del sistema e il metodo di valutazione degli impatti, che non ne permettono una diretta comparazione. Anche ADEME (2007) mostra come l’uso dei rifiuti

biodegradabili per l'ottenimento di biogas sia più interessante del compostaggio in termini di bilancio di *Global Warming Potential* ed energia primaria. Si specifica, però, che in quel caso, il compostaggio è comparato soltanto alla digestione anaerobica (senza successivo compostaggio). Inoltre, il contesto di riferimento, la Francia, presenta sostanziali differenze soprattutto in termini di mix elettrico utilizzato, che dipende principalmente da fonte nucleare.

Dall'interpretazione dei risultati, dunque, emerge un netto vantaggio ottenuto dall'opzione "E", legato alla produzione di biogas da fonte rinnovabile. Tale soluzione consente all'impianto di dipendere in misura minore dal mix elettrico italiano, principalmente costituito da fonti fossili. Inoltre, le problematiche sollevate da Di Ciaula et al. (2015) riguardo alla possibilità di riscontrare elementi patogeni per l'uomo e le specie vegetali sul digestato, verrebbero risolte, in questo caso, dall'adozione di una successiva stabilizzazione del prodotto attraverso il compostaggio.

Il progetto di ampliamento dell'impianto attualmente è in fase autorizzativa, pertanto i risultati di questa analisi potrebbero risultare utili all'azienda per la successiva messa in atto delle nuove operazioni di trattamento. Si auspica che le criticità riscontrate in questa analisi, dovute soprattutto alla fase del trasporto e smaltimento degli scarti in discarica - che incide notevolmente sulle categorie di impatto più colpite - inducano l'azienda ad orientare le future scelte di investimento verso soluzioni in grado di apportare miglioramenti nella gestione degli scarti prodotti dal trattamento dell'organico.

## 5. Conclusioni

Il presente articolo descrive l'analisi LCA implementata su due opzioni alternative di trattamento della FORSU riferite a un impianto di compostaggio in Abruzzo: la situazione attuale dell'impianto, e una potenziale opzione futura. Dai risultati è emerso che l'impatto potenziale prevalente è attribuibile alla produzione dell'ammendante, nel caso dell'opzione "C", mentre nell'opzione "E" al trasporto e smaltimento del percolato presso un impianto di depurazione delle acque. Nelle tre categorie più colpite, tuttavia, la fase più impattante sembra corrispondere al trasporto e smaltimento degli scarti in discarica. "E" ha ottenuto il punteggio migliore per la quasi totalità delle categorie di impatto. "C", invece, è preferibile soltanto per la categoria "Formazione fotochimica di ossidanti". Dall'interpretazione dei risultati, si può affermare che il vantaggio dell'opzione "E" consista nel consumo dell'energia (da fonte rinnovabile) prodotta dall'impianto, e ciò collima con quanto riscontrato in letteratura.

Al fine di integrare le informazioni presentate, sarebbe interessante condurre un'analisi LCC sulle due opzioni, affiancando, in tal modo, indicazioni di carattere economico a quelle prettamente ambientali, di cui l'azienda potrebbe disporre in fase decisionale. Inoltre, in vista degli incentivi sulla produzione di biometano per autotrazione (dal 2018), non si esclude la possibilità che l'azienda contempi tale opzione, pertanto sarebbe utile effettuare un'analisi dei

potenziali impatti ambientali relativi all'adozione di questa tecnologia da parte dell'impianto.

## 6. Bibliografia

ADEME, 2007. Life Cycle Assessment of different uses of biogas from anaerobic digestion of separately collected biodegradable waste in France, viewed 9 Gen 2017 <<http://www.ademe.fr/en/lca-of-different-uses-of-biogas-from-anaerobic-digestion-of-separately-collected-biodegradable-waste-in-france>>.

De Maglie, F, 2013. Life Cycle Assessment di un impianto integrato di trattamento della frazione organica dei rifiuti. Il caso di Voltana di Lugo (RA), Tesi di laurea magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente, Università degli Studi di Bologna (Relatore: S.Righi).

Di Ciaula, A, Gentilini, P, Laghi, F, Tamino, G, Mocci, M, Migaleddu, V, (a cura di) 2015. Il trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU), viewed 9 Jan 2017 <<http://www.isde.it/wp-content/uploads/2014/02/2015-02-Position-Paper-FORSU-finale.pdf>>.

Di Maria, F, Micale, C, 2014. Life cycle analysis of incineration compared to anaerobic digestion followed by composting for managing organic waste: the influence of system components for an Italian district, Int. J. Life Cycle Assess. 20, n. 3, 377– 388.

Ecoinvent Center, 2017. The Ecoinvent Database, viewed 9 Mar 2017 <<http://www.ecoinvent.org/database/>>.

European Commission, 2010. Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance, Luxembourg. Publications Office of the European Union.

Goedkoop, M, Heijungs, R, Huijbregts, M, De Schryver, A, Struijs, J van Zelm, R, 2009. ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1st edn, report I: Characterization, viewed 13 Feb 2017 <<http://www.lcia-recipe.net.>>.

ISO, 2006. ISO 14040:2006(E) Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. 2<sup>nd</sup> Edition 2006. International Organisation for Standardisation, Geneva.

ISO, 2006. ISO 14044:2006(E) Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. 1<sup>st</sup> Edition 2006. International Organisation for Standardisation, Geneva.

Mancini, E, 2017. Life Cycle Assessment e gestione dei rifiuti organici: compostaggio e digestione anaerobica. Il caso A.C.I.A.M. S.p.A. di Aielli (AQ), Tesi di laurea magistrale in Ecologia Industriale, Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara (Relatore: A. Raggi).

MIPAAF, 2010. Decreto legislativo 29 aprile 2010, n.75 - Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88, GU Serie Generale n.175 del 30-7-2015.

Pré - Product Ecology Consultants (2010) SimaPro 7.2.4 software, PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands.

Sonesson, U, Björklund, A, Carlsson, M, Dalemo, M, 2000. Environmental and economic analysis of management systems for biodegradable waste, Resour. Conserv. Recy., n. 28, 29-53.