

INDICATORE DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE ED ECONOMICA DI SISTEMI DI GESTIONE INTEGRATA DI RIFIUTI URBANI

Lucia Rigamonti^{1,2*}, Irene Sterpi², Mario Grosso^{1,2}

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) – Sezione Ambientale, Milano.

² Centro Studi MatER, c/o Consorzio L.E.A.P., Piacenza.

Ricevuto il 28-1-2015. Correzioni richieste il 9-4-2015. Accettazione il 20-4-2015.

1. INTRODUZIONE

La gestione integrata dei rifiuti è il complesso delle attività volte a massimizzare il recupero di materiali ed energia mediante un approccio “integrato”, ossia che intervenga su tutte le filiere, sia delle raccolte differenziate che del rifiuto urbano residuo. Questo modello gestionale prevede di considerare ogni aspetto del sistema rifiuti, dalla produzione fino al recupero/smaltimento finale, allo scopo di ottimizzarne i percorsi, di sfruttarne ogni contenuto di materia ed energia e di ridurre il più possibile l’impatto ambientale. Tale visione si inserisce nell’ottica più ampia di una gestione ambientale sostenibile, che impone la necessità di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse (fra le quali non solo le materie prime, ma anche i rifiuti) e di minimizzare la dispersione nell’ambiente di sostanze inquinanti derivanti da attività antropiche, come descritto nella gerarchia dei principi dettati a livello europeo in materia di rifiuti (Direttiva 2008/98/CE):

- prevenzione della produzione e della pericolosità dei rifiuti;
- riciclaggio & recupero;
- smaltimento finale.

* Per contatti: Lucia Rigamonti, Piazza Leonardo da Vinci 32 – 20133 Milano. Tel. 02.23996415; Fax 02.23996499. E-mail: lucia.rigamonti@polimi.it.

Ad oggi, però, risulta difficile condurre un'analisi di confronto fra i diversi sistemi di gestione integrata dei rifiuti implementati nelle diverse municipalità senza ricorrere a valutazioni complesse di Life Cycle Assessment (LCA) e di Life Cycle Costing (LCC). In particolare, non sembra essere disponibile un metodo semplice, condiviso e standardizzato per poter valutare il livello di sostenibilità ambientale ed economica del sistema di gestione implementato e delle azioni che si sono messe in atto. Il solo valore di raccolta differenziata (RD) non può essere infatti utilizzato come indicatore dell'efficienza del sistema in quanto non tiene conto dell'effettivo recupero di materia ed energia conseguiti a valle della stessa e dei costi sostenuti per conseguirli.

L'idea di misurare le prestazioni dei sistemi di gestione integrata dei rifiuti non è nuova (Tabella 1). È il caso dell'indice *Resource Conservation Efficiency* (RCE), sviluppato per definire la sostenibilità ambientale di un sistema di gestione dei rifiuti urbani in funzione dell'energia prodotta nei diversi trattamenti e dei materiali inviati a riciclo (Kaufman et al., 2010), oppure del *Maximum Practicable Recycling Rate Provision* (MPRRP), che è stato definito per valutare la percentuale massima di rifiuti prodotti che può essere ragionevolmente riciclata (Harder et al., 2008). Lo *Zero Waste Index* (ZWI) di Zaman e Lehmann (2013) consente invece di stimare il quantitativo di materie prime vergini potenzialmente evitate grazie al recupero di materia nel sistema, mentre Fragkou et al. (2010) hanno proposto un indicatore basato sulla *Material Flow Analysis* (MFA) per stabilire la capacità di un sistema di chiu-

dere i flussi di materia attraverso il recupero dai rifiuti ossia per valutare l'autosufficienza di un sistema di gestione dei rifiuti urbani. A livello italiano, nell'ambito dell'iniziativa *Comuni Riciclioni* (2014), è stato introdotto, a partire dal 2004, l'*indice di buona gestione*, per valutare la gestione dei rifiuti urbani nei suoi molteplici aspetti: recupero di materia, riduzione del quantitativo di rifiuti prodotti, sicurezza dello smaltimento ed efficacia del servizio. Altri studi si sono invece focalizzati non sull'intero sistema di gestione integrata bensì solo su alcune attività del sistema. È il caso del *Cleaner Treatment Index* (CTI) di Coelho et al. (2012) o dello studio di Herva e Roca (2013), entrambi con obiettivo l'individuazione della tecnologia di trattamento meno impattante sull'ambiente. Il *Transport Intensity Index* (TII) di Vivanco et al. (2012) valuta invece l'efficienza dell'attività di trasporto necessaria a gestire uno specifico flusso di rifiuti. Infine, ci sono studi che si sono occupati di specifici flussi di rifiuti: Yuan (2013) ha sviluppato degli indicatori per valutare le prestazioni economiche, ambientali e sociali della gestione dei rifiuti da attività di costruzione e demolizione, mentre il *Net Recovery Index* (NRI) di Vivanco et al. (2012) valuta il recupero di materia e di energia ottenibile da rifiuti organici.

Si può quindi affermare che, dalla letteratura esaminata, non si sono riscontrati indicatori simili a quello che qui di seguito verrà proposto. In particolare, verrà definito un indicatore per la valutazione della sostenibilità ambientale ed economica di un sistema di gestione integrata dei rifiuti urbani. La sfida consiste nel formulare un indicatore semplice ma completo, che possa essere calcolato

Tabella 1 – Confronto tra le tipologie di indicatori e indici esposti in precedenza

Fonte	Rifiuto esaminato	Parte del sistema di gestione integrata dei rifiuti considerata	Recupero considerato (materia o energia)	Inclusione di aspetti economici e sociali (oltre a quelli ambientali)
Coelho et al., 2012	Genericamente "rifiuti"	Impianti di trattamento	Materia e energia	No
Comuni Riciclioni, 2014	Rifiuto urbano	Produzione e raccolta	Materia	Sociali
Fragkou et al., 2010	Rifiuto urbano	Intero sistema	Materia	No
Harder et al., 2008	Rifiuto urbano	Intero sistema	Materia	Sociali
Herva e Roca, 2013	Rifiuto urbano	Impianti di trattamento	Materia e energia	No
Kaufman et al., 2010	Rifiuto urbano	Intero sistema	Materia e energia	No
Vivanco et al., 2012 (NRI)	Frazione organica	Trattamento della frazione organica	Materia e energia	No
Vivanco et al., 2012 (TII)	Rifiuto urbano	Fase di trasporto	Nessuno	No
Yuan, 2013	Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D)	Intero sistema (ma relativo ai soli rifiuti da C&D)	Materia	Economici e sociali
Zaman e Lehmann, 2013	Rifiuto urbano	Intero sistema	Materia	No

anche dagli amministratori locali e dai gestori del sistema di raccolta/trattamento e non solo da ricercatori o esperti in LCA e LCC. Tale strumento potrebbe essere utilizzato per valutare nel tempo le prestazioni di un sistema, in un'ottica di miglioramento continuo o anche per effettuare un confronto oggettivo tra diversi sistemi. L'indicatore non pretende naturalmente di sostituire uno studio di LCA ed LCC, ma può essere utilizzato come uno strumento di screening in una prima fase della valutazione e quando il tempo e le risorse economiche sono limitati.

2. MATERIALI E METODI

Nella definizione dell'indicatore di sostenibilità ambientale ed economica di un sistema di gestione integrata dei rifiuti urbani, si è deciso di lavorare fin dal principio a livello di sistema (e non di singole sotto-unità).

L'indicatore proposto è in realtà un indicatore composito, composto da tre indicatori:

- un indicatore che quantifica il recupero di materia;
- un indicatore che quantifica il recupero di energia;
- un indicatore che quantifica i costi.

Le prestazioni ambientali di un sistema integrato di gestione di rifiuti sono infatti strettamente dipendenti dai livelli di recupero di materia ed energia (Rigamonti et al., 2013a, 2013b; Giugliano et al., 2011; Rigamonti et al., 2010; Rigamonti et al., 2009a, 2009b). Si è pensato quindi di quantificarle tramite i due indicatori di recupero di materia e di recupero di energia. Si è poi aggiunto un terzo indicatore, ovvero quello sui costi, in modo da valutare le prestazioni economiche.

Una volta definiti i tre indicatori, è stata poi individuata una opportuna modalità di aggregazione degli stessi di modo da poterli rappresentare insieme su di uno stesso grafico. Successivamente il loro calcolo è stato testato per alcuni casi reali, al fine di verificare che il modello proposto fosse effettivamente di facile implementazione e immediato da utilizzare.

2.1. Definizione degli indicatori

La prima fase del progetto è consistita quindi nella definizione a livello di sistema dei tre indicatori: indicatore di recupero di materia, indicatore di recupero di energia ed indicatore relativo ai costi. Ogni indicatore è calcolato come rapporto tra alcune variabili. Tutte le variabili devono riferirsi allo stesso anno. Una variabile chiave, che rientra

nel calcolo di tutti e tre gli indicatori, è il quantitativo di rifiuti urbani (RU) raccolti.

In questo progetto si considerano come *RU raccolte* le seguenti frazioni:

- frazioni organiche (frazione umida e verde) raccolte con la raccolta differenziata;
- rifiuti di imballaggio in vetro, carta, plastica, legno, acciaio e alluminio e frazioni merceologiche simili (f.m.s.) (quali giornali e riviste raccolte contestualmente agli imballaggi in carta) raccolti con la raccolta differenziata, sia in modalità mono-materiale che multi-materiale;
- rifiuti urbani indifferenziati.

Sono quindi (per ora) esclusi dal calcolo:

- rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche;
- rifiuti ingombranti;
- abiti usati e i rifiuti tessili;
- raccolta selettiva (ossia pile e accumulatori, farmaci scaduti, contenitori T/F, inchiostri, vernici, oli, altri rifiuti urbani pericolosi);
- rifiuti da spazzamento stradale;
- rifiuti inerti.

2.1.1. Indicatore di recupero di materia

Per ogni sotto unità presente nel sistema integrato di gestione dei rifiuti urbani (riciclo delle diverse frazioni raccolte con RD, compostaggio/digestione anaerobica della frazione organica, termovalorizzazione del rifiuto residuo, ecc.) sono stati individuati i contributi di recupero di materia.

L'indicatore di recupero di materia è definito come il rapporto tra il quantitativo totale di materiale recuperato nel sistema in esame e il quantitativo di rifiuti raccolti.

L'indicatore di recupero di materia può quindi essere calcolato nel seguente modo (1):

$$\frac{\begin{array}{l} \text{MPS da RD imballaggi e f.m.s. [t]} + \\ \text{MPS da residui combustione [t]} + \\ \text{MPS da TMB [t]} + \\ \text{Compost [t]} \end{array}}{\text{RU raccolti [t]}} \quad (1)$$

Per il calcolo del denominatore (RU raccolti) si rimanda a quanto esposto nel paragrafo precedente. Per quanto riguarda il numeratore, i diversi contributi sono qui di seguito descritti.

Con *MPS da RD imballaggi e f.m.s.* si intendono le Materie Prime Secondarie (MPS) prodotte con le attività di riciclo dei materiali (imballaggi e frazioni merceologiche simili) raccolti con la raccolta differenziata, sia in modalità mono-materiale sia multi-materiale. Sono quindi i quanti-

tativi di materiali secondari (quali alluminio, metalli ferrosi, vetro, carta, legno e plastica) in uscita dagli impianti di riciclo previa eventuale separazione tra le diverse frazioni (se raccolte in modalità multi-materiale), selezione e processo di riciclo.

Con *MPS da residui combustione* si intendono le Materie Prime Secondarie ricavate dai materiali recuperati dai residui prodotti nella combustione dei rifiuti del circuito urbano (ad es. incenerimento del residuo tal quale, incenerimento delle frazioni prodotte negli impianti di pretrattamento oppure incenerimento degli scarti derivanti dalle attività di recupero dei materiali da imballaggio e f.m.s. e della frazione organica e derivanti dalle attività di pretrattamento). Tali MPS sono quindi ad esempio:

- metalli recuperati dalle scorie (in uscita dall'impianto di riciclo);
- materiale inerte ricavato dal trattamento delle scorie e utilizzato (dopo eventuale pretrattamento) ad es. nei sottofondi stradali o nei cementifici.

Con *MPS da TMB* si intendono le Materie Prime Secondarie ottenute con il riciclo dei materiali recuperati negli impianti di trattamento meccanico biologico (TMB) del rifiuto urbano residuo, quali, per esempio, metalli e polimeri plastici.

Con *Compost* si intende il compost prodotto direttamente da compostaggio aerobico oppure ottenuto dal digestato da digestione anaerobica. Esso deriva dal trattamento della frazione organica, sia l'umido (FORSU) sia il verde.

Tutti i termini (sia al numeratore che al denominatore) sono da esprimersi in tonnellate.

L'indicatore di recupero di materia, così calcolato, risulta essere un indice (essendo adimensionale) variabile tra 0 e 1 (0 se non viene effettuato nessun recupero di materia, 1 se tutto il rifiuto è recuperato come materiale con un'efficienza del 100%, opzione non realizzabile nella realtà).

Si sottolinea che i materiali da includere nei vari termini al numeratore sono solo quelli di cui ci sia evidenza (ad es., perché hanno un valore di mercato) che vengano davvero utilizzati come prodotti per scopi specifici.

A questo proposito si ricorda che sono già entrati in vigore alcuni regolamenti europei sull'*end of waste*, che regolamentano, cioè, i criteri che determinano quando un rifiuto cessa di essere tale:

- Regolamento (UE) n. 715/2013 della Commissione del 25 luglio 2013 (si applica dal 1° gen-

naio 2014) per i rottami di rame, che specifica i criteri che determinano quando i rottami di rame cessano di essere considerati rifiuti;

- Regolamento (UE) n. 1179/2012 della Commissione del 10 dicembre 2012, entrato in vigore l'11/06/2013 per i rottami del vetro. Esso stabilisce che alcuni rottami di vetro sottoposti a operazioni di recupero cessano di essere considerati rifiuti, diventando così prodotti o materie prime;
- Regolamento (UE) n. 333/2011 del Consiglio del 31 marzo 2011, applicato dal 9/10/2011, per i rottami metallici: stabilisce i criteri che determinano quando alcuni tipi di rottami metallici (i rottami di ferro, acciaio e alluminio, inclusi i rottami di leghe di alluminio) cessano di essere considerati rifiuti.

2.1.2. Indicatore di recupero di energia

Per il calcolo dell'indicatore di recupero di energia viene considerata non solo l'energia prodotta direttamente dai rifiuti, ma anche l'energia di quei prodotti che, pur avendo un contenuto energetico, non vengono impiegati per una produzione diretta di energia elettrica e/o calore.

Il recupero energetico diretto (elettrico e termico) avviene ad esempio:

- in discarica dalla combustione del biogas;
- in digestione anaerobica dalla combustione del biogas;
- in attività di combustione (termoutilizzazione o gassificazione) di combustibile solido secondario (CSS), di rifiuto urbano residuo (RUR) o di scarti derivanti dalle attività di recupero dei materiali raccolti con RD e/o derivanti dalle attività di pretrattamento.

I prodotti del sistema rifiuti con contenuto energetico ma non direttamente impiegati per la produzione di energia sono ad esempio:

- materiali provenienti dal circuito dei RU utilizzati in impianti produttivi, quale CSS utilizzato in cementifici e centrali termoelettriche in sostituzione dei combustibili tradizionali (pet-coke e carbone);
- biometano da biogas immesso nella rete di distribuzione del metano;
- syngas da impianti di piro-gassificazione.

Per tenere in considerazione sia la quantità sia la qualità dell'energia prodotta, è stato utilizzato il concetto di exergia, che rappresenta la quantità massima di lavoro che può essere ottenuta da un determinato processo o sistema tramite trasformazioni reversibili (Grosso et al., 2010). L'indicatore

proposto rappresenta l'exergia utile recuperata sul totale di exergia disponibile, e può essere calcolata con la seguente formulazione (2):

$$\frac{MJ_{el} + MJ_{th} * \left(1 - \frac{T_a}{T_{ml}}\right) + MJ_{indiretti}}{MJ_{disponibili}} \quad (2)$$

Al numeratore sono presenti i contributi spiegati di seguito:

- MJ_{el} = flusso di exergia associato alla produzione di energia elettrica che avviene direttamente nel sistema di gestione dei rifiuti: corrisponde all'elettricità prodotta (espressa in MJ). Tale contributo deve essere preso al netto degli autoconsumi dell'impianto;
- MJ_{th} = flusso di exergia associato alla produzione di calore che avviene direttamente nel sistema di gestione dei rifiuti: corrisponde al calore prodotto (espresso in MJ) moltiplicato per il fattore di Carnot. Anche tale flusso di exergia, come quello relativo all'elettricità, deve essere preso al netto degli autoconsumi dell'impianto. Quando il calore viene trasferito a una rete di teleriscaldamento, il fattore di Carnot corrisponde appunto a (3):

$$1 - \frac{T_a}{T_{ml}} \quad (3)$$

dove T_a è la temperatura ambiente e T_{ml} è la temperatura media logaritmica di T_{out} e T_{in} (le temperature del calore in uscita dall'impianto e quando rientra dalla rete di teleriscaldamento):

$$T_{ml} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \frac{T_{in}}{T_{out}}} \quad (4)$$

Se l'impianto fornisce calore industriale invece che a una rete di teleriscaldamento, T_{ml} viene sostituita da T_c , che è la temperatura del vapore fornito all'utilizzatore.

- $MJ_{indiretti}$ = flusso di exergia associato a prodotti con contenuto energetico non direttamente impiegati per la produzione di energia: corrisponde al potere calorifico inferiore (PCI) del prodotto (espresso in MJ per massa) moltiplicato per la massa del prodotto. Da questo termine va sottratta l'energia spesa per la produzione del prodotto.

Al denominatore sono presenti i $MJ_{disponibili}$, ovvero l'exergia totale disponibile associata ai RU

raccolti. Tale exergia è calcolata moltiplicando la massa di rifiuto lordo per il PCI del rifiuto lordo, come proposto di seguito (5):

$$MJ_{disponibili} = \sum_i t_{RD_i} * PCI_{RD_i} + t_{RUR} * PCI_{RUR} \quad (5)$$

dove RD_i è riferito ai materiali raccolti in modo differenziato e RUR indica il rifiuto urbano residuo.

Tutti i termini (sia al numeratore sia al denominatore) sono da esprimersi in MJ.

L'indicatore di recupero di energia, così calcolato, risulta essere un indice variabile tra 0 e 1 (0 se non viene effettuato nessun recupero di energia, 1 se tutto il rifiuto è recuperato sotto forma di energia, con un'efficienza pari al 100%, condizione che non si può realizzare in un caso reale).

2.1.3 Indicatore relativo ai costi

L'indicatore relativo ai costi è utile per comprendere a che costo si sono ottenute le prestazioni in recupero di materia ed energia calcolate con i due indicatori precedenti.

Anche questo indicatore, come quello di recupero di materia, presenta al denominatore i RU raccolti, mentre al numeratore presenta i costi del sistema (6):

$$\frac{\text{Costi di raccolta [€]} + \text{Costi dei processi di trattamento [€]} + \text{Costo di smaltimento [€]}}{\text{RU raccolti [t]}} \quad (6)$$

Al numeratore tutti i costi si intendono al netto dei ricavi diretti (quindi al netto dei proventi derivanti dalla vendita dei materiali e dell'energia recuperata e dei contributi CONAI), ma comprensivi degli eventuali ammortamenti e del costo d'uso del capitale.

In dettaglio i tre termini includono ciascuno i seguenti contributi:

- costi di raccolta e trasporto: costo della RD mono-materiale e multi-materiale e della raccolta del RUR, inclusi i costi di trasporto fino al primo impianto di trattamento;
- costi dei processi di trattamento;
- costo di smaltimento finale in discarica.

Questo indicatore fornisce così il costo associato alla gestione di una tonnellata di RU, infatti è espresso in [€ t⁻¹]: quindi, a differenza dei primi due, non è un indice.

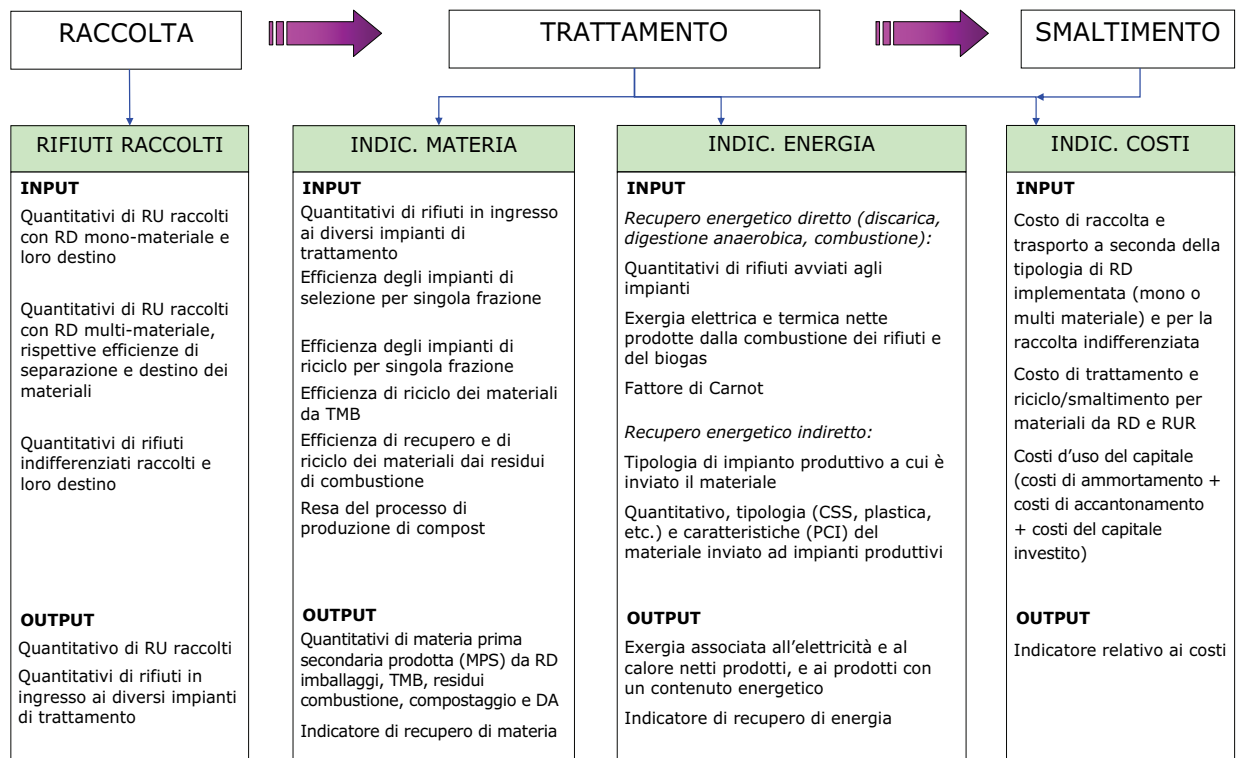


Figura 1 – Dati necessari per il calcolo dei tre indicatori

In Figura 1 sono indicati i dati necessari per il calcolo dei tre indicatori.

2.2. Modalità di aggregazione degli indicatori

Per poter rappresentare i tre indicatori su uno stesso diagramma di modo da avere una comprensione immediata delle prestazioni del sistema in esame, si è deciso di utilizzare un diagramma “costi vs recupero di materia ed energia”, in cui sull’asse y è posizionato l’indicatore dei costi e sull’asse x l’indice derivato dall’aggregazione dell’indicatore di recupero di materia con l’indicatore di recupero di energia. Al fine di aggregare correttamente i due indicatori, è stata proposta una somma pesata, affinché la somma sia uguale al massimo a 1 (7):

Indicatore di materia ed energia = indicatore di recupero energia * w_m + indicatore di recupero di energia * w_e

(7)

Per quanto riguarda il valore assunto dai pesi w_m e w_e , una prima opzione è quella di utilizzare lo stesso valore ossia $w_m = w_e = 0,5$. Volendo seguire la gerarchia dei rifiuti proposta dall’UE (in cui il recupero di materia è posizionato ad un livello supe-

riore rispetto al recupero di energia), si potrebbe eventualmente associare al peso dell’indicatore di recupero di materia un valore maggiore.

L’ultimo passo è consistito nel definire i 4 quadranti in cui potrebbe ricadere il punto rappresentativo del sistema in esame (Figura 2):

- I) Sistema non efficiente e costoso;
- II) Sistema efficiente ma costoso;
- III) Sistema non efficiente ma economico;
- IV) Sistema efficiente ed economico.

Nella delimitazione dei quadranti, in un’analisi a livello italiano, la suddivisione orizzontale, che definisce l’economicità del sistema, può essere tracciata in corrispondenza del valore dell’indicatore

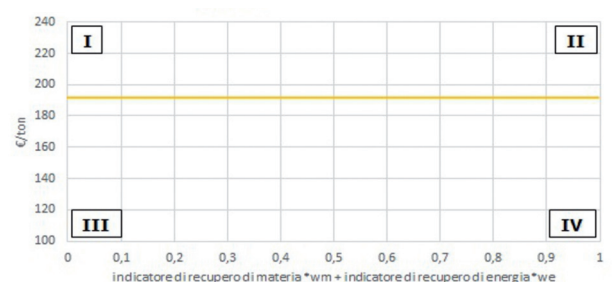


Figura 2 – Proposta di aggregazione degli indicatori e identificazione dei 4 quadranti, con il posizionamento della retta parallela all’asse x

dei costi calcolato sulla media nazionale (ricavabile per l'anno di interesse dall'elaborazione dei dati riportati nel Rapporto Rifiuti (ISPRA)). La suddivisione verticale, che definisce l'efficienza del sistema, deve invece ancora essere individuata: sarà infatti possibile stabilirla solo avendo a disposizione un'ampia casistica di risultati per gli indicatori, relativi a diverse realtà.

3. APPLICAZIONE A CASI REALI

Per determinarne l'efficacia, il calcolo dei 3 indicatori è stato testato per i sistemi di gestione integrata dei rifiuti urbani implementati in Regione Lombardia e nelle 4 province di Milano, Bergamo, Pavia e Mantova.

I sistemi di gestione dei rifiuti delle province citate e dell'intera Regione Lombardia sono già stati analizzati in precedenza (Rigamonti et al., 2013a e 2013b), quindi la maggior parte dei dati necessari per il calcolo degli indicatori di recupero di materia e di recupero di energia era già disponibile.

I dati della gestione dei rifiuti, sintetizzati nella Tabella 2, sono relativi all'anno 2009.

Nel 2009 in Lombardia sono state raccolte circa 4,4 milioni di tonnellate di RU (Rigamonti et al., 2013b), di cui il 51% in modo differenziato. Il rifiuto residuo (2.166.350 t) è stato inviato per la maggior parte (70%) a recupero termico tramite termovalorizzazione, in parte a TMB (26%) ed il resto è stato smaltito in discarica. I rifiuti da imballaggio sono stati inviati agli impianti di riciclo (dopo un'eventuale separazione delle diverse frazioni e selezione delle singole frazioni), mentre la frazione organica è stata trattata in parte in impianti di digestione anaerobica (43%) e in parte in impianti di compostaggio (57%).

Le 4 province considerate (Rigamonti et al., 2013a) presentano numerose differenze tra di loro. La pri-

ma differenza che si riscontra riguarda, come si può notare dai dati riportati in Tabella 2, la raccolta differenziata, compresa tra il 29% di Pavia e il 59% di Bergamo. I rifiuti residui raccolti sono stati inviati per la maggior parte direttamente a termovalorizzazione nel caso di Milano e Bergamo, mentre per Pavia e Mantova il primo destino dominante è stato il TMB. Infine, nelle province di Milano e Bergamo rispettivamente il 44% e il 59% dei rifiuti organici sono stati trattati in impianti di digestione anaerobica, mentre a Pavia e Mantova i rifiuti organici sono stati inviati solo a compostaggio.

Il fattore di Carnot richiesto nel calcolo dell'indicatore di recupero di energia è stato posto uguale a 0,217: tale valore si riferisce ad una situazione media italiana ed è stato calcolato assumendo le seguenti temperature: $T_a = 289,2$ K, $T_{out} = 408,15$ K e $T_{in} = 333,15$ K (Grosso et al., 2010). Non erano infatti disponibili dati specifici per i singoli impianti.

Per quanto riguarda l'indicatore dei costi, i dati non erano disponibili da precedenti studi, per cui si è deciso di utilizzare come fonte il Rapporto Rifiuti Urbani ISPRA 2012, che riporta le voci di costo secondo quanto previsto nel DPR 158/99 ("Regolamento recante norme per la elaborazione del metodo normalizzato per definire la tariffa del servizio di gestione del ciclo dei rifiuti urbani"). Più in dettaglio, sono stati considerati i costi di gestione dei rifiuti differenziati e indifferenziati escludendo i costi di spazzamento strade (in particolare le voci "costi di raccolta e trasporto CRT" e "costi di trattamento e smaltimento CTS" per i rifiuti indifferenziati e le voci "costi di raccolta differenziata dei singoli materiali CRD" e "costi di trattamento e riciclo CTR" – al netto dei proventi derivanti dalla vendita dei materiali e dell'energia recuperata e dei contributi CONAI – per i rifiuti differenziati) e i costi d'uso del capitale (che comprendono costi di ammortamento, costi di accantonamento e costi relativi alla remunerazione del capitale investito). Si tratta, però, di costi medi a livello regionale, e non provinciale: per questo motivo, i costi espressi in [€ t^{-1}] sono gli stessi per tutti i casi di studio e differiscono solo i quantitativi di tonnellate avviati ai diversi trattamenti per cui sono moltiplicati.

3.1. Risultati

L'indicatore di recupero di materia, calcolato per le 4 province e per la Regione Lombardia, è rappresentato in Figura 3: Bergamo ha ottenuto il valore

Tabella 2 – Alcuni valori di sintesi della gestione dei rifiuti nei casi di studio considerati

	RU nel 2009 (tonnellate)	RD (%)	RUR direttamente a termovalorizzazione (%)	FORSU a digestione anaerobica (%)
Lombardia	4.403.069	51	70	43
Milano	1.436.639	47	79	44
Bergamo	423.063	59	74	60
Pavia	278.582	29	0	0
Mantova	208.993	51	0	0

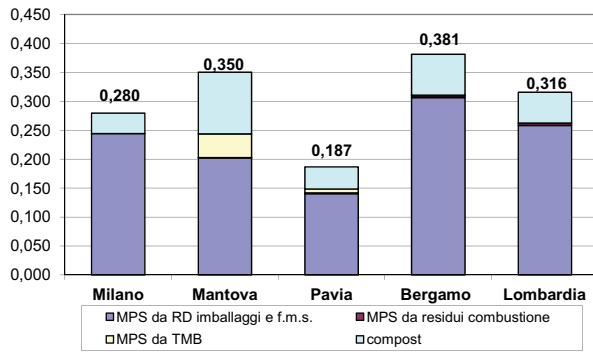


Figura 3 – Indicatore di recupero di materia per i casi di studio considerati

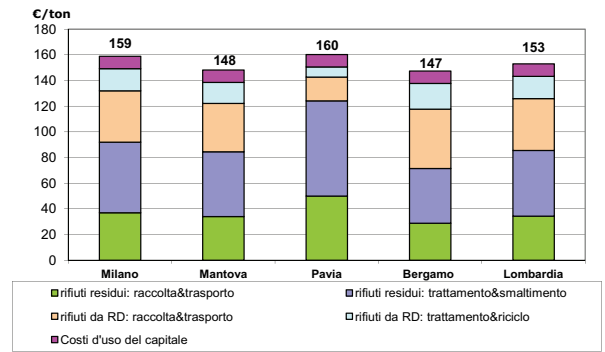


Figura 5 – Indicatore dei costi per i casi di studio considerati

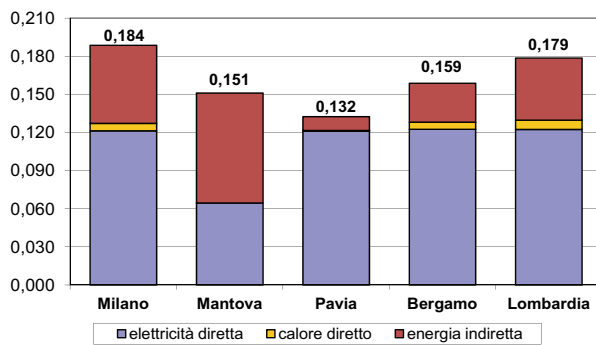


Figura 4 – Indicatore di recupero di energia per i casi di studio considerati

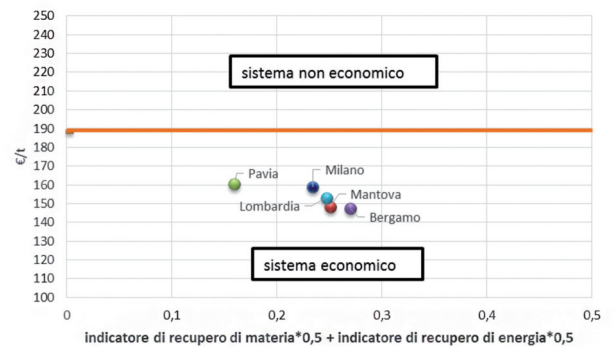


Figura 6 – Aggregazione degli indicatori per i casi di studio esaminati

più elevato (0,387), soprattutto grazie alle MPS ottenute dal riciclo degli imballaggi raccolti in modo differenziato. Le prestazioni migliori per la produzione di compost riguardano invece la provincia di Mantova.

L'indicatore di recupero di energia è invece riportato in Figura 4: il miglior risultato è stato ottenuto da Milano, con un valore pari a 0,184. In questo caso il maggior contributo è dato dalla produzione di energia elettrica negli impianti di termovalorizzazione. Il miglior risultato per quanto riguarda la produzione di energia indiretta (da co-combustione dei rifiuti, per esempio nei cementifici) è stato ottenuto da Mantova.

Da ultimo, in Figura 5 è rappresentato l'indicatore dei costi: Bergamo e Mantova risultano le province con i minori costi associati alla gestione dei rifiuti, anche se il divario con le altre realtà non è molto marcato. Si segnala la situazione negativa della provincia di Pavia, che ha ottenuto le peggiori prestazioni per tutti e tre gli indicatori.

Una volta calcolati i tre indicatori, essi sono stati rappresentati utilizzando il diagramma "costi vs recupero di materia ed energia" (Figura 6). In questo

caso, gli indicatori di recupero di materia ed energia sono stati sommati utilizzando lo stesso peso ($w_m = w_e = 0,5$).

Si osserva che Pavia è il solo caso di studio in cui l'indice di materia ed energia è inferiore a 0,2, ed è anche il caso più costoso.

È stata effettuata un'analisi di sensitività aumentando il peso w_m e diminuendo il peso w_e (coerentemente con quanto previsto dalla gerarchia dei rifiuti): anche assumendo $w_m=0,75$ e $w_e=0,25$, la "graduatoria di merito" tra i diversi casi studio rimane inalterata.

Sul diagramma è stata collocata anche la linea orizzontale di primo tentativo che divide il diagramma in due quadranti (retta posizionata in corrispondenza del costo medio nazionale di gestione dei rifiuti calcolato elaborando i dati riportati nel Rapporto Rifiuti (ISPRA, 2012) e risultato pari a 189 € t⁻¹).

Si osserva, quindi, che tutti i casi considerati ricadono nel quadrante inferiore (corrispondente ad un sistema economico). Come già detto, al momento non è ancora possibile definire la posizione della retta verticale che delimiterà gli altri due quadranti.

ti, identificando quando un sistema può essere considerato efficiente.

4. DISCUSSIONE

Gli indicatori di recupero di materia ed energia, così come sono stati proposti, hanno un significato fisico immediato e non includono considerazioni di natura economica: l'indicatore di recupero di materia esprime i materiali recuperati utilizzabili sul totale dei rifiuti raccolti, mentre l'indicatore di recupero di energia rappresenta l'exergia utile recuperata sull'exergia totale disponibile nei rifiuti raccolti. Le valutazioni economiche sono demandate al terzo indicatore, indipendente dai primi due.

Tuttavia, le formulazioni proposte non sono le uniche possibili: durante la definizione degli indicatori sono state prese in considerazione anche altre opzioni, i cui vantaggi e svantaggi sono descritti di seguito.

4.1. Indicatore di recupero di materia – formulazione alternativa 1

Questa opzione prevede, a differenza della formulazione descritta nel paragrafo 2.1.1, che al numeratore le tonnellate di ciascun materiale recuperato (MPS) vengano moltiplicate per il rispettivo rapporto di sostituzione (Rigamonti et al., 2009a), che indica quanto prodotto primario (che è quello prodotto a partire dalle materie prime vergini) può essere sostituito dalle MPS. Il rapporto di sostituzione tiene in considerazione l'eventuale scadimento qualitativo conseguente all'attività di riciclo e quindi risulta essere un numero compreso tra 0 e 1.

Il denominatore non subisce variazioni rispetto all'opzione originaria (tonnellate di rifiuti raccolti). La formulazione dell'indicatore sarebbe quindi la seguente (8):

$$\frac{\text{Somma di ogni MPS di materiale [t]} * \text{il rispettivo rapporto di sostituzione}}{\text{RU raccolti [t]}} \quad (8)$$

Questa formulazione presenta delle criticità legate alla definizione dei rapporti di sostituzione: questa è infatti possibile nel caso in cui i materiali riciclati vadano a sostituire gli analoghi materiali vergini (Rigamonti et al., 2009a). Tuttavia nel caso, per esempio, della plastica, il granulo ottenuto dal riciclo delle frazioni di plastiche miste spesso viene utilizzato per la realizzazione di manufatti tra-

dizionalmente costituiti da un materiale diverso (tipicamente il legno per le applicazioni di arredo urbano). Anche per il compost si presenta un problema analogo, in quanto sostituisce torba e concimi chimici, in quantità che dipendono dalle caratteristiche chimico-fisiche del compost stesso. Attribuire dei rapporti di sostituzione, laddove possibile, vorrebbe comunque dire effettuare delle assunzioni simili a quelle che vengono adottate in una valutazione di tipo LCA, che non è l'obiettivo del presente progetto.

4.2. Indicatore di recupero di energia – formulazioni alternative 1 e 2

La formulazione proposta nel paragrafo 2.1.2. prevede l'introduzione del fattore di Carnot, per tenere conto della qualità dell'energia prodotta. Una possibile alternativa è quella di definire il numeratore dell'indicatore di recupero di energia semplicemente come "energia netta" (somma dei contributi di energia recuperata), senza utilizzare il fattore di Carnot e quindi senza introdurre il concetto di exergia. La formulazione dell'indicatore sarebbe quindi la seguente:

$$\frac{MJ_{el} + MJ_{th} + MJ_{indiretti}}{MJ_{disponibili}} \quad (9)$$

In questo modo si prenderebbe in considerazione solo la quantità di energia recuperata e non anche la sua qualità. Questo approccio è concettualmente analogo a quello adottato per definire l'indicatore di recupero di materia (paragrafo 2.1.1.), in cui le tonnellate di materiale recuperato sono sommate insieme a prescindere dalla tipologia di materiale. Il risultato per i casi di studio esaminati è mostrato in Figura 7.

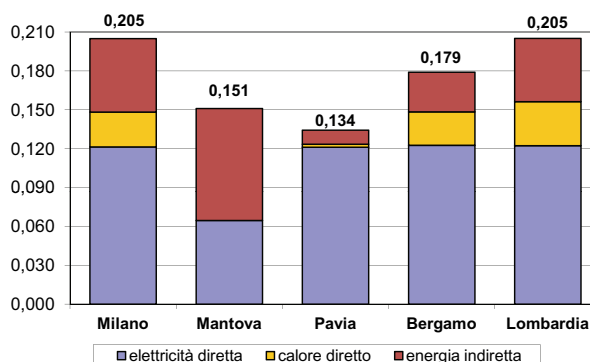


Figura 7 – Indicatore di recupero di energia calcolato senza considerare il fattore di Carnot (alternativa 1)

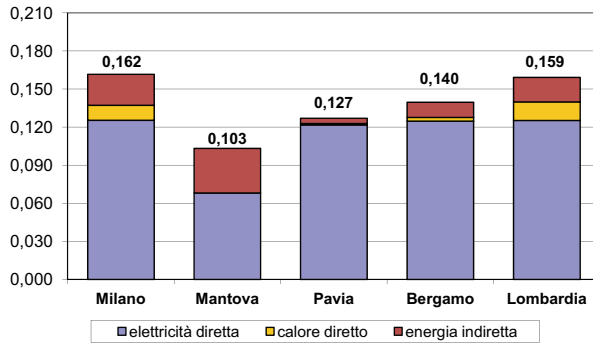


Figura 8 – Indicatore di recupero di energia calcolato secondo l'alternativa 2 (PESE)

Un'altra formulazione (alternativa 2) è data dal rapporto tra l'energia primaria sostituita dal sistema reale in esame e l'energia primaria potenzialmente sostituibile da un sistema ideale che soddisfi le medesime necessità locali di calore e CSS oltre a tutta l'elettricità teoricamente possibile. La formulazione di questo nuovo indice (PESE – Primary Energy Saving Efficiency) è la seguente:

$$PESE = \frac{a * \eta_{EL} + b * \eta_Q + c * \eta_{CSS}}{a + \left[b - a * \left(1 - \frac{T_a}{T_{ml}} \right) \right] * \eta_Q + (c - a) * \eta_{CSS}} \quad (10)$$

dove i coefficienti a e b sono i rendimenti di conversione energetica da fonte primaria rispettivamente a elettricità ($a=2,6$) e calore ($b=1,1$), già utilizzati nella formula dell'indice di recupero energetico R1 (Direttiva 2008/98/CE), mentre il coefficiente c quantifica l'efficienza di sostituzione della fonte energetica primaria con il CSS. η_{EL} , η_Q e η_{CSS} rappresentano i rendimenti di produzione di elettricità, calore e CSS. Per la descrizione di T_a e T_{ml} vale quanto già riportato nella formulazione originaria dell'indicatore di recupero di energia.

Il risultato per i casi di studio esaminati è mostrato in Figura 8.

4.3. Indicatori di recupero di materia ed energia – formulazione alternativa con approccio economico

Questa diversa formulazione, che viene proposta sia per l'indicatore di recupero di materia sia per l'indicatore di recupero di energia, nasce con l'in-

tento di uniformarli il più possibile, e di renderli confrontabili con l'indicatore dei costi.

Indicatore di recupero di materia (11):

$$\frac{\text{Somma di ogni MPS [t]} * \text{il suo valore di mercato specifico [€/t]}}{\text{RU raccolti [t]}} \quad (11)$$

Indicatore di recupero di energia (12):

$$\frac{MJ_{cl} * \left[\frac{€}{MJ} \right] + MJ_{th} * \left[\frac{€}{MJ} \right] + MJ_{indiretti} * \left[\frac{€}{MJ} \right]}{\text{RU raccolti [t]}} \quad (12)$$

In questa formulazione entrambi i denominatori rappresentano le tonnellate di rifiuti raccolti. Per l'indicatore di recupero di materia il numeratore è calcolato moltiplicando ogni materiale ottenuto dalle attività di riciclo per il suo valore economico specifico [€/t]. Analogamente, anche per l'indicatore di recupero di energia (secondo l'opzione senza fattore di Carnot), al numeratore ciascun termine è moltiplicato per il proprio valore di mercato specifico [€/t].

Così calcolati, i due indicatori rappresentano rispettivamente i ricavi generati dal sistema rifiuti per aver conseguito un determinato livello di recupero di materia e di energia, tenendo in considerazione le tipologie di prodotti recuperati (materiali o energia che siano).

A differenza delle altre formulazioni proposte, in questo caso i due indicatori non sono più indici adimensionali, ma risultano espressi in [€/t], diventando così paragonabili all'indicatore dei costi, essendo anch'esso espresso in [€/t]: in questo modo è possibile confrontare i costi di funzionamento del sistema di gestione dei rifiuti con i ricavi che lo stesso ha generato.

Questa formulazione presenta il vantaggio di tenere in considerazione sia la quantità che la qualità dei prodotti recuperati. Nello stesso tempo questo tipo di formulazione prevede l'inserimento dei valori di mercato dei singoli materiali, che però sono variabili nel tempo e anche a seconda della realtà considerata. Non è detto che il gestore del sistema rifiuti ne sia a conoscenza, quindi sarebbe necessario mettere a disposizione dei valori di default, che dovrebbero essere aggiornati frequentemente per tener conto delle oscillazioni delle quotazioni o che potrebbero essere calcolati come media del valore di mercato degli ultimi (per esempio) cinque anni. Per quanto riguarda l'energia, occorrerebbe

Tabella 3 – Confronto tra le proposte di calcolo per l'indicatore di recupero di materia

	Prima formulazione (paragrafo 2.1.1)	Formulazione alternativa 1 (paragrafo 4.1)	Formulazione alternativa approccio economico (paragrafo 4.3)
Tiene conto della quantità di materia	X	X	X
Tiene conto della qualità della materia		X	X
Ha un significato immediato ed è di facile comprensione	X	X	X
Si ferma allo stato di fatto senza introdurre ipotesi sulla materia sostituita	X		X
Non introduce coefficienti non strettamente legati al sistema in esame	X		

Tabella 4 – Confronto tra le proposte di calcolo per l'indicatore di recupero di energia

	Prima formulazione (paragrafo 2.1.2)	Formulazione alternativa 1 (paragrafo 4.2)	Formulazione alternativa 2 – PESE (paragrafo 4.2)	Formulazione alternativa approccio economico (paragrafo 4.3)
Tiene conto della quantità di energia	X	X	X	X
Tiene conto della qualità dell'energia	X		X	X
Ha un significato immediato ed è di facile comprensione	X	X		X
Si ferma allo stato di fatto senza introdurre ipotesi sull'energia sostituita	X	X		X
Non introduce coefficienti non strettamente legati al sistema in esame	X	X		

decidere anche se includere i soli valori di mercato od anche eventuali incentivi (es. i certificati bianchi/verdi).

4.4. Confronto tra le diverse opzioni di calcolo

Nella Tabella 3 vengono confrontate criticamente le tre proposte per il calcolo dell'indicatore di recupero di materia, mentre nella Tabella 4 vengono confrontate le quattro proposte per il calcolo dell'indicatore di recupero di energia.

5. CONCLUSIONI

È stato proposto un indicatore composito per la valutazione della sostenibilità ambientale ed economica di un sistema di gestione integrata dei rifiuti urbani: l'indicatore di recupero di materia e l'indicatore di recupero di energia valutano le prestazioni ambientali del sistema quantificando il recupero di materia e di energia conseguiti mentre l'indicatore dei costi valuta le prestazioni economiche.

Per l'indicatore di recupero di materia e per l'indicatore di recupero di energia è stata proposta una

formulazione che ha un significato fisico immediato (quantitativo di materiale recuperato nel sistema in esame su quantitativo totale di rifiuti raccolti e exergia utile recuperata sul totale di exergia disponibile, rispettivamente). Molto promettente risulta anche essere la formulazione basata su di un approccio economico, che tiene conto, oltre che della quantità di materia ed energia recuperata, anche della loro qualità introducendo dei fattori moltiplicativi rappresentati dai valori specifici di mercato dei diversi prodotti.

Tale strumento potrà essere utilizzato dalle amministrazioni pubbliche e dai soggetti gestori del sistema di raccolta / trattamento per valutare nel tempo le prestazioni del proprio sistema (in un'ottica di miglioramento continuo) o anche per effettuare un confronto oggettivo tra diversi sistemi. L'indicatore non pretende comunque di sostituire uno studio di LCA ed LCC, ma può essere utilizzato come uno strumento di screening in una prima fase della valutazione e quando il tempo e le risorse economiche sono limitati.

Ulteriori studi potranno essere finalizzati a perfezionare l'indicatore, in particolare sarebbe interessante poter svolgere:

- ulteriori test su casi reali per poter identificare, nel diagramma “costi vs recupero di materia ed energia”, la suddivisione tra “sistemi efficienti” e “sistemi non efficienti”;
- test dell’indicatore dei costi su casi reali mediante l’acquisizione di dati primari;
- studi per l’acquisizione dei valori di mercato dei prodotti (sia materiali che energia) del sistema di gestione dei rifiuti, in modo da poter valutare i due indicatori di recupero di materia e di energia secondo la formulazione basata sull’approccio economico.

Infine, sarebbe utile predisporre un file Excel facilmente compilabile da parte dei gestori del sistema rifiuti al fine di ottenere il valore dei tre indicatori. La struttura del file potrebbe ripercorrere l’impostazione stessa dei tre indicatori, con la costruzione di diversi fogli di calcolo, come da Figura 1.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Coelho H., Lange L., Coelho L. (2012) Proposal of an environmental performance index to assess solid waste treatment technologies. *Waste Management* 32, 1473-1481.
- Comuni Ricicloni (2014). Indice di buona gestione. Disponibile su: <http://www.ricicloni.it>.
- Fragkou M.C., Vicent T., Gabarrell X. (2010) A general methodology for calculating the MSW management self-sufficiency indicator: Application to the wider Barcelona area. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 390-399.
- Giugliano M., Cernuschi S., Grosso M., Rigamonti L. (2011) Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. *Waste Management* 31, 2092-2101.
- Grosso M., Motta A., Rigamonti L. (2010) Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management* 30, 1238-1243.
- Harder M.K., Stantzos N., Woodard R., Read A. (2008) Development of a new quality fair access best value performance indicator (BVPI) for recycling services. *Waste Management* 28, 299-309.
- Herva M., Roca E. (2013) Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis. *Ecological Indicators* 25, 77-84.
- Kaufman S., Krishnan N., Themelis N. (2010) A Screening Life Cycle Metric to Benchmark the Environmental Sustainability of Waste Management Systems. *Environmental Science & Technology*, 44, 5949-5955.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (2012). Rapporto rifiuti urbani Edizione 2012. Disponibile su: www.isprambiente.gov.it.
- Rigamonti L., Grosso M., Sunseri M.C. (2009a) Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14 (5), 411-419.
- Rigamonti L., Grosso M., Giugliano M. (2009b) Life cycle assessment for optimising the level of separated collection in integrated MSW management systems. *Waste Management* 29, 934-944.
- Rigamonti L., Grosso M., Giugliano M. (2010) Life cycle assessment of sub-units composing a MSW management system. *Journal of Cleaner Production*, Volume 18, Issues 16-17, Pages 1652-1662.
- Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. (2013a) Improvement actions in waste management systems at the provincial scale based on a life cycle assessment evaluation. *Waste Management*, 33, 2568-2578.
- Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. (2013b). Improving integrated waste management at the regional level: the case of Lombardia. *Waste Management Research*, 31(9), 946-953.
- Vivanco D.F., Ventosa I.P., Durany X.G. (2012) Building waste management core indicators through Spatial Material Flow Analysis: Net recovery and transport intensity indexes. *Waste Management* 32, 2496-2510.
- Yuan H. (2013) Key indicators for assessing the effectiveness of waste management in construction projects. *Ecological Indicators* 24, 476-484.
- Zaman A.U., Lehmann S. (2013) The zero waste index: a performance measurement tool for waste management system in a “zero waste city”. *Journal of Cleaner Production* 50, 123-132.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l’ing. Francesca Lovato per il suo contributo all’elaborazione dei dati relativi ai costi e l’ing. Federico Viganò per aver proposto la formulazione alternativa 2 (PE-SE) per il calcolo dell’indicatore di recupero di energia.