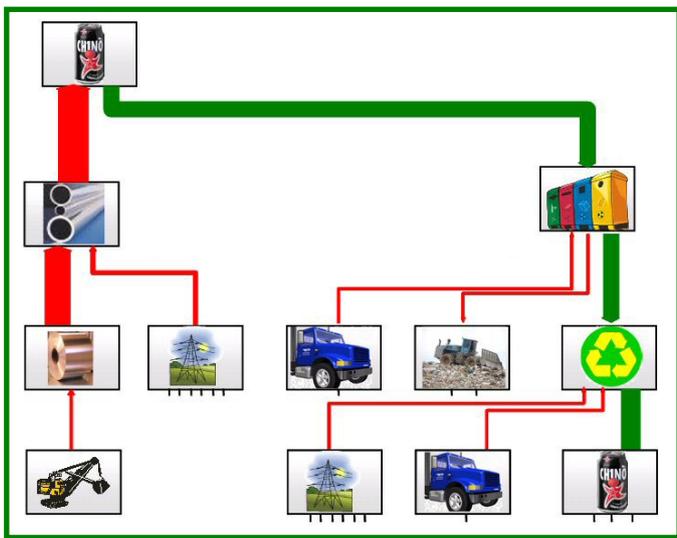


Torino, Novembre 2008

RAPPORTO DI RICERCA

LCA del sistema integrato dei RSU nella Provincia di Torino

Analisi energetico ambientale con metodologia LCA ed analisi economica dell'attuazione del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti alla luce dei nuovi obiettivi di Raccolta Differenziata introdotti dal D.lgs. 152/06



Politecnico di Torino

DITAG – Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie

DISPEA – Dipartimento di Sistemi di Produzione ed Economia dell'Azienda

Autori della ricerca:

Ing. PhD. Gian Andrea Blengini

Prof. Giuseppe Genon

In collaborazione con:

Ing. Morris Fantoni



Ricerca realizzata da: Politecnico di Torino DITAG e DISPEA

Responsabile scientifico LCA: Gian Andrea Blengini (Project Manager)

Supervisione scientifica: Giuseppe Genon (Project Director)

Committente della ricerca: Provincia di Torino

Copyright: Provincia di Torino, Servizio Pianificazione Sviluppo Sostenibile e Ciclo Integrato Rifiuti

Referente: Dott Giorgio GOLLO

Provincia di Torino - Osservatorio Provinciale Rifiuti

Servizio LB2 - Pianificazione sviluppo sostenibile e ciclo integrato dei rifiuti

Via Valeggio, 5 - 10128 TORINO

tel +39-011 8613969 - cell +39-328 0088663

email: giorgio.gollo@provincia.torino.it

Ringraziamenti:

Un sincero ringraziamento a tutti coloro che hanno collaborato attivamente alla realizzazione della ricerca fornendo dati ed informazioni per la predisposizione del modello LCA o contribuendo con critiche e revisioni al miglioramento del prodotto finale.

Si ringraziano in particolare:

- L'Assessore allo Sviluppo Sostenibile e alla Pianificazione Ambientale della Provincia di Torino: Dott.ssa Angela Massaglia
- Il Presidente del Consiglio di Amministrazione dell'Associazione d'Ambito Torinese per il governo dei rifiuti: Arch. Paolo Foietta
- Dott. Luca Rossi (IPLA)
- Dott. Riccardo Civera
- Ing. Vita Tedesco e Ing. Palma Urso

Responsabilità su contenuti e risultati:

Gli autori hanno elaborato la ricerca con cura, utilizzando al meglio informazioni e dati forniti dal committente, unitamente all'esperienza maturata dal gruppo di ricerca sulla LCA del Politecnico di Torino. I risultati presentati sono i più accurati possibili, compatibilmente con la qualità dei dati ricevuti, e devono essere utilizzati coerentemente con gli obiettivi della ricerca ed il campo d'applicazione previsto. Il Politecnico di Torino e gli autori declinano ogni responsabilità per decisioni o azioni intraprese al di fuori del contesto entro il quale la ricerca è stata sviluppata.



Sommario

Il rapporto di ricerca presenta i risultati ottenuti in seguito all'applicazione della metodologia LCA (Life Cycle Assessment) a diversi scenari di gestione e smaltimento dei RSU nella provincia di Torino, con l'obiettivo di individuare lo scenario con migliori prestazioni energetico-ambientali, tenuto conto dei costi di gestione e dei fabbisogni per trattamenti e smaltimenti finali.

Sono stati predisposti quattro modelli LCA per valutare l'effetto dell'incremento percentuale di raccolta differenziata e dell'eventuale pre-trattamento del RSU residuo, ritenuti elementi chiave da analizzare in dettaglio.

Nell'analisi dei modelli sono stati privilegiati gli indicatori energetici come il GER (Gross Energy Requirement) e indicatori ambientali riconducibili ai cambiamenti climatici come il GWP100 (Global Warming Potential), ritenuti molto significativi per quanto riguarda il settore dei rifiuti.

Sono stati valutati i costi associati alle ipotesi di cui sopra e i fabbisogni impiantistici e di discarica.

Restano all'esterno dell'analisi LCA l'aspetto gestionale e la valutazione degli impatti ambientali a scala locale.

I risultati acquisiti possono essere utili al committente per l'individuazione di soluzioni con migliore sostenibilità energetica ed ambientale, compatibilmente con le esigenze gestionali ed organizzative nonché di spesa della Pubblica Amministrazione.



INDICE

Sommario	3
1. Introduzione	5
2. Oggetto dello studio: descrizione scenari da analizzare	6
3. Applicazione della Metodologia LCA ai RSU in Provincia di Torino	9
3.1 <i>Introduzione alla metodologia LCA</i>	9
3.2 <i>Indicatori energetici ed ambientali utilizzati</i>	10
3.3 <i>Specificità delle applicazioni LCA nel settore dei rifiuti</i>	12
3.3 <i>Impatti causati e impatti evitati</i>	12
4. Obiettivi specifici e ipotesi di lavoro	13
4.1 <i>Obiettivi dello studio LCA</i>	13
4.2 <i>Unità funzionale</i>	13
4.3 <i>Confini di sistema</i>	14
4.4 <i>Fonti di dati diretti/indiretti e strumenti informatici LCA</i>	15
4.5 <i>Ipotesi e assunzioni</i>	15
5. Analisi di Inventario (LCI)	17
5.1 <i>Fase di raccolta</i>	17
5.2 <i>Filiera di riciclaggio e valorizzazione delle frazioni da RD</i>	18
Trattamento Aerobico FORSU e verde da RD	18
Trattamento Anaerobico FORSU da RD	20
Riciclaggio Plastica	21
Riciclaggio Carta	22
Riciclaggio Legno e tessuti	23
Riciclaggio Vetro	24
Riciclaggio Metalli	24
Trattamento/ Riciclaggio Altro	26
5.3 <i>Filiera di trattamento, termovalorizzazione e smaltimento RSU</i>	27
Pretrattamento del RSU residuo	27
Termovalorizzazione	29
Discariche	32
6. Analisi degli impatti (LCIA)	34
6.1 <i>Analisi comparata dei 4 scenari (modello LCA baseline)</i>	34
6.2 <i>Analisi di contributo</i>	35
6.3 <i>Analisi di sensitività</i>	38
7. Stima fabbisogni impiantistici e di discarica ed analisi economica	42
DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI	44
Programma di ricerca per le fasi successive	47
Bibliografia	48
Allegato (Tavole grafiche – Diagramma di flusso del Ciclo di Vita formato A1)	50

1. Introduzione

Il presente rapporto di ricerca intende fornire un'analisi energetico-ambientale ed una visione d'insieme del sistema integrato di raccolta, gestione e smaltimento finale dei RSU nella Provincia di Torino. La ricerca, sviluppata presso i Dipartimenti DITAG e DISPEA del Politecnico di Torino, su incarico del Servizio Pianificazione Sviluppo Sostenibile e Ciclo Integrato Rifiuti della Provincia di Torino, costituisce uno strumento di supporto alla programmazione e gestione dei rifiuti della Provincia di Torino e si inserisce nel contesto del *Tavolo di confronto* sul PPGR attualmente in essere.

Obiettivi dello studio:

Finalità dello studio è l'utilizzo della metodologia LCA (Life Cycle Assessment) come strumento di programmazione e gestione dei rifiuti.

Obiettivo specifico è l'individuazione dello scenario con migliori prestazioni energetico-ambientali attraverso l'ottimizzazione dei principali elementi che costituiscono il sistema di gestione integrata dei RSU.

Sono stati presi in considerazione ed analizzati ruolo ed implicazioni energetico-ambientali delle filiere di valorizzazione delle frazioni provenienti dalla raccolta differenziata, ponendo l'accento su vantaggi e svantaggi conseguenti all'attuazione dei nuovi obiettivi di RD previsti dal Dlgs.152/06. Sono stati altresì analizzati ruolo e implicazioni energetico-ambientali di pre-trattamenti e trattamenti finali del RSU residuo, attraverso la realizzazione di un modello LCA esteso a tutto il sistema integrato.

Gli scenari alternativi oggetto della ricerca LCA sono stati poi analizzati dal punto di vista economico, andando a stimare costi e fabbisogni impiantistici per il trattamento del RSU residuo e conferimento a discarica.

Il ruolo e le implicazioni energetico-ambientali dell'attuazione di politiche di riduzione a monte dei rifiuti sono state inquadrare sotto l'aspetto metodologico, ma non sono ancora state analizzate nel modello LCA, in attesa di una eventuale seconda fase della ricerca.

Base di partenza scientifica:

Per la realizzazione del presente studio, sono stati utilizzati i risultati acquisiti dal Gruppo di ricerca sulla LCA del Politecnico di Torino durante studi passati ed in corso.

In particolare, sono state utili le esperienze acquisite attraverso l'applicazione della LCA al sistema integrato di gestione dei rifiuti della Provincia di Asti (Blengini & Fantoni, 2007) o a singoli impianti di smaltimento (Blengini, 2008). Per completare il modello LCA, oltre ai dati forniti dalla Provincia di Torino, sono state utilizzate fonti di letteratura, come verrà di seguito specificato.

Tipologia dei risultati attesi:

Per la quantificazione delle prestazioni energetico-ambientali dei diversi scenari sono stati utilizzati opportuni indicatori energetici (Energia totale, Energia non rinnovabile, Energia rinnovabile) indicatori ambientali puntuali (Gas serra: totale, fossile, bio) ed indicatori energetico-ambientali integrati (Ecoindicator 99: salute umana+qualità ecosistema+uso risorse).

L'interpretazione dei risultati dell'analisi LCA ha consentito di pervenire ad una valutazione di diversa sostenibilità ambientale dei vari scenari. A raffronto sono stati valutati gli oneri di tipo impiantistico e gestionale corrispondenti alle diverse ipotesi.

Nota: data la complessità del modello LCA da realizzare, tenuto conto delle limitazioni di tempo e di risorse imposte da esigenze urgenti di programmazione degli enti preposti al governo del settore rifiuti, di comune accordo con il committente, la presente ricerca è stata indirizzata prioritariamente su alcuni aspetti, lasciando a successivi approfondimenti altri elementi che non è stato possibile affrontare.

2. Oggetto dello studio: descrizione scenari da analizzare

Con riferimento al sistema integrato di gestione dei rifiuti della Provincia di Torino, gli scenari presi in considerazione per la realizzazione del modello LCA sono i seguenti:

- ✓ **scenario 1A:** RD al 52,1%, valorizzazione della raccolta differenziata, rifiuto residuo direttamente al termovalorizzatore a griglia e scorie da incenerimento a discarica.
- ✓ **scenario 1B:** RD al 52,1%, valorizzazione della raccolta differenziata, rifiuto residuo al pretrattamento, FOS a discarica, FSL al termovalorizzatore e scorie a discarica;
- ✓ **scenario 2A:** RD al 65,7%, valorizzazione della raccolta differenziata, rifiuto residuo direttamente al termovalorizzatore a griglia e scorie da incenerimento a discarica.
- ✓ **scenario 2B:** RD al 65,7%, valorizzazione della raccolta differenziata, rifiuto residuo al pretrattamento, FOS a discarica, FSL al termovalorizzatore e scorie a discarica;

Con riferimento all'anno 2012, i flussi di dettaglio dei rifiuti caratterizzanti gli scenari oggetto di valutazione sono presentati in Tabella 2.1 e nelle Figure 2.1-4 così come sono stati definiti dal *Tavolo di confronto*.

Tabella 2.1 – Composizione merceologica dei rifiuti in provincia di Torino in relazione agli scenari oggetto dello studio all'anno 2012 (Fonte: Tavolo di confronto)

	Frazioni	Scenario 1A/B (PPGR) RD=52,1%			Scenario 2A/B (Dlgs.152/06) RD=65,6%		
		ton x 1000	%	kg/ab/ anno	ton x 1000	%	kg/ab/ anno
RIFIUTO TOTALE (tal quale)	Organico e carta "sporca"	346,5	27,5%	154	330,9	27,5%	147
	Verde	67,0	5,3%	30	63,9	5,3%	28
	Plastica	173,9	13,8%	77	166,1	13,8%	74
	Frazione cartacea	289,8	23,0%	129	276,7	23,0%	123
	Legno e tessili	99,1	7,9%	44	94,6	7,9%	42
	Vetro	93,9	7,5%	42	89,7	7,5%	40
	Metalli	39,3	3,1%	17	37,5	3,1%	17
	Altro	150,8	12,0%	67	144,0	12,0%	64
	TOTALE	1260,3	100%	560	1203,4	100%	535
RACCOLTA DIFFERENZIATA	Organico e carta "sporca"	190,0	28,9%	84	219,7	27,7%	98
	Verde	51,7	7,9%	23	51,8	6,5%	23
	Plastica	35,1	5,3%	16	47,4	6,0%	21
	Frazione cartacea	193,4	29,4%	86	260,0	32,8%	116
	Legno e tessili	54,0	8,2%	24	52,3	6,6%	23
	Vetro	67,5	10,3%	30	74,2	9,4%	33
	Metalli	20,2	3,1%	9	24,7	3,1%	11
	Altro	45,0	6,8%	20	63,2	8,0%	28
	TOTALE	656,9	100%	292	793,4	100%	353
RIFIUTO INDIFFERENZIATO (residuo)	Organico e carta "sporca"	156,5	25,9%	70	111,1	26,8%	49
	Verde	15,2	2,5%	7	12,1	2,9%	5
	Plastica	138,9	23,0%	62	118,7	28,6%	53
	Frazione cartacea	96,4	16,0%	43	16,7	4,0%	7
	Legno e tessili	45,1	7,5%	20	42,3	10,2%	19
	Vetro	26,4	4,4%	12	15,4	3,7%	7
	Metalli	19,0	3,2%	8	17,2	4,2%	8
	Altro	105,9	17,5%	47	80,9	19,5%	36
	TOTALE	603,4	100%	268	414,4	100%	184

Si evidenzia che gli scenari sono basati su differenti ipotesi di crescita/riduzione del rifiuto totale generato e smaltito dal sistema: negli scenari 1A e 1B è previsto un trend di crescita dell'1% annuo, mentre negli scenari 2A e 2B non è prevista alcuna crescita rispetto ai dati 2006.

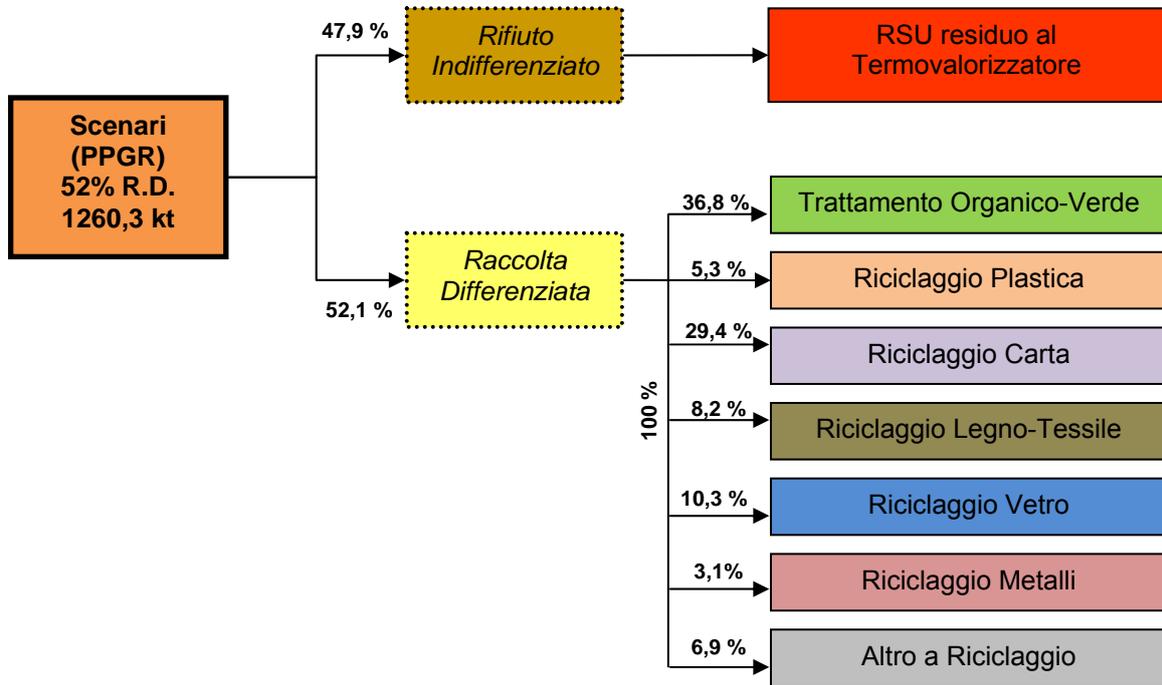


Figura 2.1 – Scenario 1A: destinazione e ripartizione % dei flussi (Fonte: Provincia di Torino)

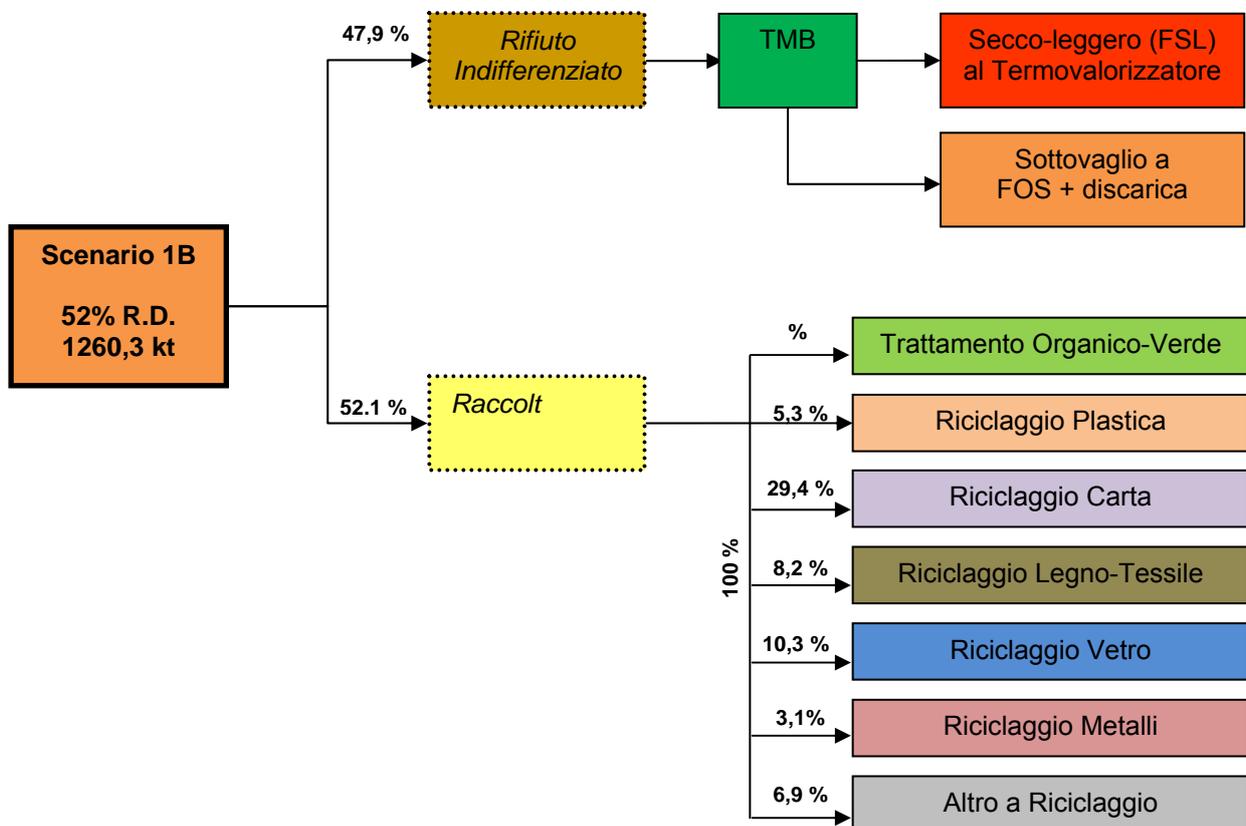


Figura 2.2 – Scenario 1B: destinazione e ripartizione % dei flussi (Fonte: Provincia di Torino)

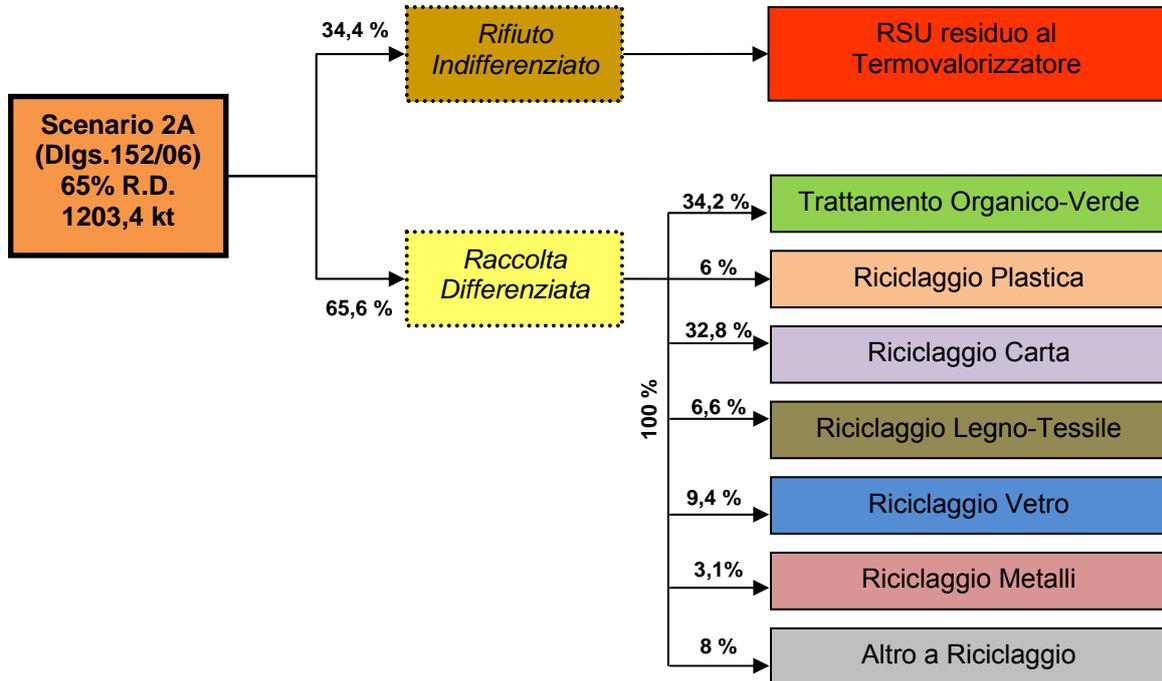


Figura 2.3 – Scenario 2A: destinazione e ripartizione % dei flussi (Fonte: Provincia di Torino)

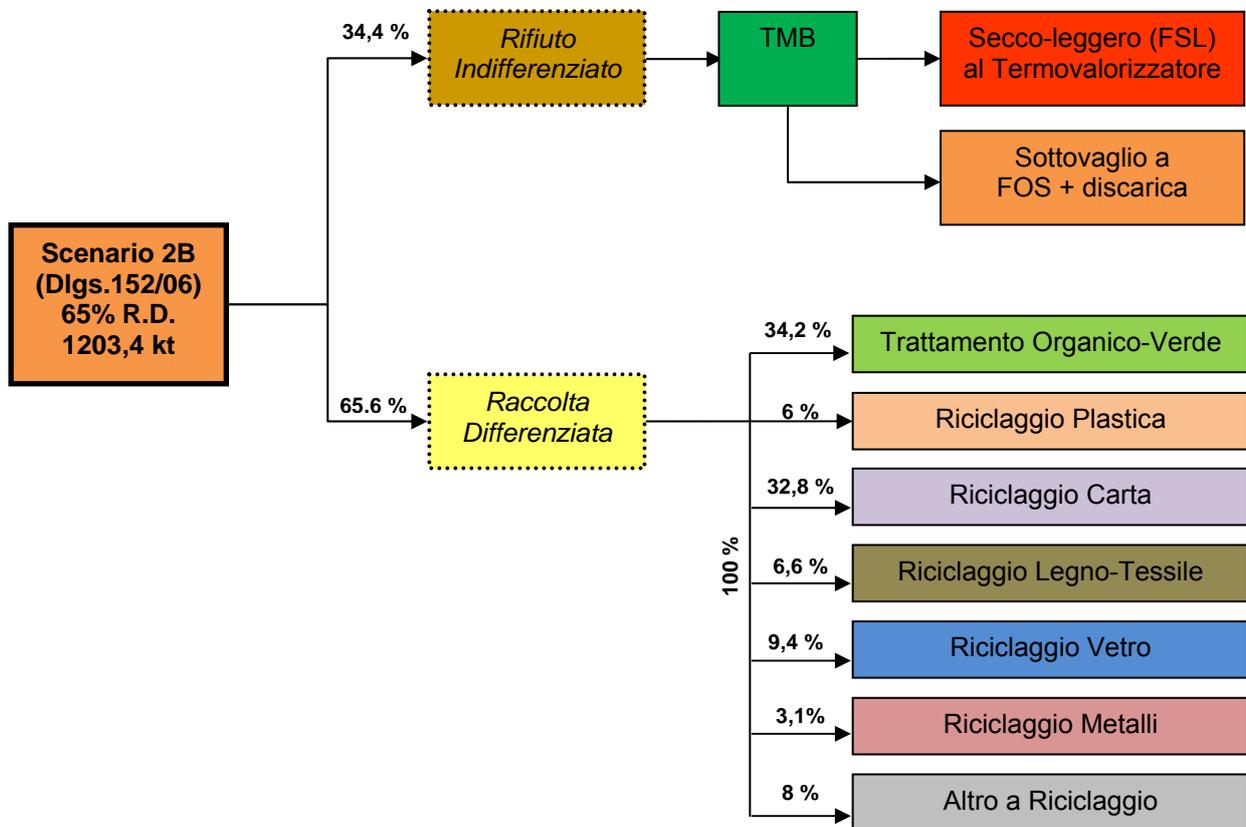


Figura 2.4 – Scenario 2B: destinazione e ripartizione % dei flussi (Fonte: Provincia di Torino)

3. Applicazione della Metodologia LCA ai RSU in Provincia di Torino

Nel presente studio è stata utilizzata la metodologia LCA (Life Cycle Assessment) coerentemente con la normativa ISO 14040 (serie), le linee guida SETAC e la letteratura scientifica internazionale.

3.1 Introduzione alla metodologia LCA

La metodologia LCA è definita "*strumento oggettivo che consente di identificare, valutare e quantificare i carichi energetici ed ambientali associati ad un processo od un'attività durante tutte le fasi del suo ciclo di vita, dall'approvvigionamento, la lavorazione e la trasformazione delle materie prime, alla fabbricazione del prodotto, il trasporto, la sua distribuzione ed il suo utilizzo, incluso lo smaltimento finale*" [SETAC, 1993].

Una LCA individua e quantifica in modo sistematico ed oggettivo l'energia ed i materiali utilizzati nonché le sostanze rilasciate nel sistema ambiente e quantifica gli impatti potenziali attraverso l'intero ciclo di vita. Le implicazioni ambientali riguardano tutti i tipi di impatto sull'ambiente, inclusi il consumo di risorse e l'emissione di sostanze dannose per l'uomo e l'ecosistema.

La struttura moderna della LCA è regolamentata dalle norme ISO serie 14040 ed è sintetizzabile nei seguenti quattro momenti principali:

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi: è la fase preliminare, in cui sono definite le finalità, il campo di applicazione e i confini dello studio LCA, nonché l'unità funzionale cui riferire i risultati. Descrive inoltre le categorie e la qualità dei dati da reperire, le assunzioni ed i limiti determinando quindi tutta l'impostazione di uno studio LCA.

2. Analisi d'inventario: consiste nella compilazione dettagliata di un bilancio fisico degli input (materiali, energia, risorse naturali) e degli output (emissioni in aria, acqua, suolo, rifiuti prodotti) attraverso la realizzazione di un modello che esemplifichi il sistema oggetto dello studio.

3. Valutazione degli impatti: consiste nell'elaborazione dei risultati dell'inventario, con lo scopo di valutare la portata dei potenziali impatti e quindi di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci di emissioni o reflui nell'ambiente e del consumo di risorse provocati dalla sequenza di attività incluse nel sistema.

4. Interpretazione dei risultati e miglioramento: è la parte conclusiva della valutazione del ciclo di vita in cui si effettua l'interpretazione dei risultati delle due fasi precedenti e la definizione delle possibili linee di intervento, al fine di individuare i miglioramenti necessari per ridurre efficacemente gli impatti ambientali prodotti.

Si ritiene doveroso (ed utile) ricordare, in estrema sintesi, alcune importanti potenzialità e limiti dell'analisi LCA.

La metodologia ha ricevuto grande interesse ed attenzione da parte della comunità scientifica internazionale per le notevoli potenzialità nel misurare in modo rigoroso ed efficace le implicazioni ambientali di prodotti e processi a scala globale e regionale (consumo di risorse, effetto serra, buco nell'ozono, acidificazione, eutrofizzazione, ecc.).

Una buona parte della stessa comunità scientifica ritiene però meno affidabili (rispetto alla scala globale), o comunque da intraprendere con particolari accorgimenti, le valutazioni a scala minore, quelle cioè a scala regionale/locale come ad esempio gli effetti ambientali legati all'emissione di sostanze tossiche per l'uomo o l'ecosistema.



3.2 Indicatori energetici ed ambientali utilizzati

Per rendere fruibili al meglio i risultati ottenuti dall'analisi LCA, per apprezzarne a fondo il significato ambientale e per comunicarli agli addetti ai lavori e al pubblico, devono essere individuate delle aree di interesse ambientale (categorie di impatto) e per ognuna di esse occorre selezionare opportuni indicatori.

Detti indicatori (cosiddetti di categoria = riferiti ad un singolo impatto ambientale) sintetizzano gli effetti ambientali potenziali associabili ai flussi di materia/energia in ingresso/uscita dal sistema studiato.

Nel presente studio, nella fase di analisi degli impatti sono stati privilegiati gli indicatori di categoria energetici come il GER (Gross Energy Requirement) e indicatori ambientali riconducibili ai cambiamenti climatici come il GWP100 (Global Warming Potential), ritenuti molto significativi per quanto riguarda il settore dei rifiuti.

Indicatori energetici

Per quanto riguarda il consumo/risparmio di risorse energetiche sono stati selezionati i seguenti indicatori:

- **ENERGY Total GER** = Gross Energy Requirement definito da Boustead and Hancock, (1979) come somma di tutti gli usi energetici di ciclo vita, ovvero dalla somma di tutti i contributi energetici *Diretti + Indiretti + Capital Energy + Energy Feedstock*;
- **ENERGY non renewable** = quota del GER proveniente da fonti non rinnovabili;
- **ENERGY renewable** = quota del GER proveniente da fonti rinnovabili;

Il GER fornisce un'indicazione sul consumo di risorse (con contenuto energetico), le quali possono essere suddivise in rinnovabili e non rinnovabili.

Indicatori relativi ai cambiamenti climatici

Per quanto riguarda l'emissione di gas ad effetto serra (climalteranti) gli indicatori prescelti sono i seguenti:

- **GWP100 total** = Global Warming Potential dato dalla somma pesata delle quantità dei gas serra emessi dal sistema (IPCC 2006);
- **GWP100 fossil** = quota del Global Warming Potential dato dalla somma pesata delle quantità dei gas serra ad esclusione dell'anidride carbonica di origine biogenica;
- **GWP100 bio** = quota del Global Warming Potential dato dal solo contributo dell'anidride carbonica di origine biogenica;

L'indicatore GWP100 fornisce un risultato in termini di impatti ambientali causati dall'emissione in atmosfera di gas climalteranti, valutati con orizzonte temporale di 100 anni (IPCC 2006). Per ciascun gas serra, il valore del potenziale è espresso dal rapporto tra l'assorbimento di radiazione infrarossa causata dall'emissione di 1 kg di tale sostanza e quello causato da una stessa emissione di anidride carbonica, sostanza presa come riferimento.



Indicatori misti risorse/ambiente/salute

Per non limitare l'analisi alle sole sfere dell'energia e dell'effetto serra, è stato utilizzato anche il metodo Eco-Indicator 99, basato su un articolato processo di valutazione del danno ambientale e pesatura degli effetti conseguenti (Goedkoop and Spriensma, 1999). La metodologia è disponibile sul sito http://www.pre.nl/download/EI99_methodology_v3.pdf.

Il metodo Eco-Indicator 99, benché criticato da una parte della comunità scientifica, è tra i metodi di valutazione e pesatura degli effetti ambientali più utilizzati in ambito LCA ed ha certamente il vantaggio di esprimere con indicatori sintetici i risultati di una valutazione ambientale estesa alle tre sfere: *risorse naturali*, *salute umana* e *qualità dell'ecosistema*.

Il metodo Eco-indicator 99 tiene conto dei più importanti effetti ambientali attraverso una valutazione "end-point" ovvero focalizzata sull'entità del danno ambientale e consente di tradurre gli impatti ambientali evidenziati durante l'analisi di inventario nei corrispondenti effetti ambientali.

L'Eco-Indicator 99 si basa su una combinazione degli indicatori di danno ambientale (*Damage Analysis*) che ricadono all'interno dei tre seguenti gruppi:

1. Danno alla salute umana: espressa in termini di numero di anni di vita persi e numero di anni vissuti in condizioni di disabilità. Il Disability Adjusted Life Years (DALYs), è appunto l'indice che misura questa categoria di impatto (usato anche dalla Worldbank and WHO);

2. Danno alla qualità degli ecosistemi: espresso come la perdita di specie (perdita di biodiversità animale/vegetale) su una data area in un certo intervallo temporale, in base agli indicatori PDF (Potentially Disappeared Fraction) e PAF (Potentially Affected Fraction);

3. Danno alle risorse: espresso in termini di surplus di energia necessario per l'estrazione futura di minerali e combustibili fossili (MJ surplus energy).

Nella presente ricerca il metodo Eco-Indicator 99 è stato utilizzato limitatamente alla fase di "Analisi del danno", sulla quale c'è un maggior consenso da parte della comunità scientifica internazionale. Le fasi di pesatura e raggruppamento (quelle più criticate dagli esperti) che consentono di giungere ad un valore dell'Eco-Indicatore a punteggio singolo attraverso l'adozione di uno dei set di pesatura H/E/I (stabiliti da un gruppo di lavoro internazionale), non sono state considerate, in quanto è stato ritenuto opportuno tenere separate le tre aree di interesse ambientale.

Nota: Danno alla salute umana corrisponde alla traduzione dell'indicatore *Human Health* riportato nella metodologia Ecoindicator-99 e considera le emissioni in aria di specifici inquinanti tossici http://www.pre.nl/download/EI99_methodology_v3.pdf.

3.3 Specificità delle applicazioni LCA nel settore dei rifiuti

Benché l'utilizzo della LCA consenta di valutare in modo completo ed organico gli impatti ambientali di prodotti e sistemi di produzione attraverso l'analisi del loro ciclo di vita, devono essere considerati alcuni aspetti peculiari legati all'ambito della gestione dei rifiuti (Finveden, 1999; Ekvall et al., 2007). Infatti, l'approccio dalla-culla-alla-tomba, tipicamente utilizzato per i sistemi produttivi, deve essere modificato in una filosofia dal-cancello-alla-tomba o dal-cancello-alla-culla quando si effettuano analisi del ciclo di vita relativi alla gestione dei rifiuti.

In questi contesti, infatti, il materiale in input è rappresentato dal rifiuto il quale può essere smaltito direttamente in discarica o entrare in ulteriori cicli di vita in sostituzione di prodotti vergini. In tale ottica la potenzialità della LCA consiste nella possibilità di includere i processi a monte e a valle dei confini fisici degli impianti, consentendo una visione integrata e di insieme (Badino & Baldo, 1998).

Nonostante l'espansione dei confini del sistema oggetto dello studio sia consigliata (Finveden, 1999), includendo ad esempio la produzione e l'uso dei sacchetti e dei contenitori per la raccolta del rifiuto, i trasporti e valutando i benefici forniti dal riciclaggio dei materiali e dalla produzione di energia dal rifiuto, è da sottolineare come la definizione di "*confini estesi del sistema*" (*expanded system boundaries*) sia ancora un punto controverso (Guinée et al., 2001; Ekvall et al., 2007).

Nel presente studio LCA i confini del sistema, che solitamente includono la raccolta, il trattamento del rifiuto, il riciclaggio, il recupero energetico e lo smaltimento in discarica del rifiuto residuo e degli scarti, sono stati estesi a monte e a valle dei confini fisici degli impianti, abbracciando l'intera filiera dei rifiuti come verrà più avanti meglio puntualizzato.

3.3 Impatti causati e impatti evitati

In ottica LCA, nel presente studio si considerano i bilanci di ciclo vita in termini di energia ed impatti ambientali. Tali bilanci sono costituiti dalla somma di impatti/consumi generati oppure evitati lungo l'intero arco del ciclo di vita. Il risultato finale dipende dalla somma algebrica dei singoli contributi di ciascuna delle fasi del ciclo di vita che sono state incluse nel modello LCA.

Questo significa che il valore finale degli indicatori di ciclo vita può avere segno algebrico positivo oppure negativo: positivo quando gli impatti generati sono maggiori di quelli evitati, negativo quando accade il contrario.

Quando il valore finale dell'indicatore è negativo, questo significa che il bilancio energetico/ambientale del sistema di gestione dei rifiuti porta ad un beneficio ambientale netto. Nel caso dell'energia, il valore negativo degli indicatori implica che il sistema di gestione dei rifiuti produce più energia di quanta ne consuma. Tuttavia, le conseguenze di questo tipo di risultato non devono essere trattate con superficialità, in quanto potrebbero essere causa di malintesi.

In effetti, il bilancio energetico, e per alcuni indicatori ambientali, può evidenziare una prevalenza dei consumi/impatti evitati rispetto a quelli causati, solo perché non si considera il ciclo di vita dei prodotti prima del momento in cui diventano rifiuti.

La conseguenza è che qualcuno potrebbe erroneamente pensare che più rifiuti si producono e più energia si può ottenere. Questa è l'immediata (e banale) conseguenza di un indicatore di ciclo vita con segno algebrico negativo.

Nel ciclo di vita dei prodotti il bilancio energetico ed ambientale non si può chiudere con la produzione netta di energia e, conseguentemente, con benefici ambientali netti. Quel che si può (e si deve) fare è studiare (e progettare) il ciclo vita in modo rigoroso per cercare soluzioni con minori conseguenze energetico ambientali.

4. Obiettivi specifici e ipotesi di lavoro

In uno studio LCA nel settore dei rifiuti gli obiettivi devono essere definiti con cura, per non creare l'illusione di avere a disposizione uno strumento capace di comprendere tutte le implicazioni ambientali e di dare una risposta a tutte le problematiche: questo non è ragionevolmente possibile. I modelli LCA possono essere utili ad interpretare sistemi complessi e individuare soluzioni efficaci solo se obiettivi ed approccio sono delineati con chiarezza.

Per esempio, se la definizione dei confini di sistema, ovvero delle fasi del ciclo di vita a cui estendere l'analisi, non tiene conto di criteri rigorosi e chiari, ci possono essere gravi conseguenze in termini di qualità dei risultati.

4.1 Obiettivi dello studio LCA

Obiettivo della ricerca è l'applicazione della metodologia LCA al sistema integrato dei rifiuti solidi urbani della Provincia di Torino, finalizzata all'individuazione dello scenario con migliori prestazioni energetico-ambientali, tenuto conto dei recenti dispositivi di legge in materia di raccolta differenziata (Dlgs. 152/06).

Al di là dell'analisi LCA dei diversi scenari definiti dal *Tavolo di confronto*, è stato considerato obiettivo sensibile la definizione delle efficienze energetiche ed ambientali delle filiere reali di riciclaggio/valorizzazione dei rifiuti provenienti dalla raccolta differenziata. In tal senso, la presente ricerca è finalizzata all'individuazione dei contributi di diversi materiali, filiere e processi al conseguimento di obiettivi di recupero energetico e contenimento degli impatti ambientali.

E' stato altresì ritenuto obiettivo sensibile la definizione del ruolo e delle prestazioni energetico-ambientali della termovalorizzazione del RSU residuo.

Dall'analisi LCA sono attese indicazioni per l'attuazione del PPGR alla luce dei nuovi obiettivi di RD introdotti dal D.lgs. 152/06.

4.2 Unità funzionale

La scelta dell'unità funzionale, ovvero il termine di riferimento a cui associare consumi di risorse ed impatti ambientali, è particolarmente complessa quando si opera nel settore dei rifiuti.

Per poter utilizzare la semplificazione comunemente indicata con il termine "ZERO BURDENS", tipicamente adottata nelle analisi LCA nella gestione dei rifiuti, in base alla quale "IL RIFIUTO IN INGRESSO AL SISTEMA NON HA MEMORIA STORICA DI IMPATTI AMBIENTALI PREGRESSI", è necessario confrontare scenari che trattano la stessa quantità di rifiuto in ingresso al sistema.

Questo perché, come giustamente richiede la normativa ISO14040, nelle analisi LCA comparative non è lecito escludere parti del ciclo di vita che non siano comuni agli scenari da confrontare.

Di conseguenza, poiché gli scenari identificati dal *Tavolo di confronto* si riferiscono a quantitativi complessivi diversi, in un primo momento sarà necessario utilizzare come unità funzionale:

1 tonnellata di rifiuto in ingresso al sistema

Tale unità funzionale permette di valutare e confrontare l'efficienza energetica ed ambientale di scenari alternativi, con riferimento ad una quantità unitaria di rifiuto, ma non consente di valutare l'efficacia delle politiche di riduzione.

Si ribadisce il concetto, già introdotto, in base al quale l'esclusione delle fasi di vita precedenti alla produzione del rifiuto può creare l'illusione di ottenere dei vantaggi assoluti dalla gestione dei rifiuti stessi.

Solo l'analisi LCA estesa a tutto il ciclo di vita, dalla culla alla tomba, può consentire l'adozione di una diversa unità funzionale.

In una estensione successiva della ricerca, l'unità funzionale adottata potrebbe divenire la quantità di rifiuto prodotta da 1 abitante all'anno (oppure al giorno). In questo modo sarebbe possibile valutare l'efficacia e l'interesse collettivo, sempre dal punto di vista energetico ed ambientale, delle politiche di riduzione.

4.3 Confini di sistema

L'estensione dei confini di sistema di uno studio LCA nel settore dei rifiuti è probabilmente l'elemento più importante e delicato di cui tenere conto, poiché le ipotesi sulla definizione di tali confini influenzano in modo pesante i risultati finali.

In primo luogo è necessario definire in modo preciso a quali elementi del ciclo di vita dei beni, che diventeranno rifiuti, e a quali elementi della filiera dei rifiuti, l'analisi verrà estesa.

Questo perché gli impatti legati alla gestione dei rifiuti non sono solo quelli generati negli impianti di smaltimento, ma, come spesso si verifica, le conseguenze ambientali di ciò che accade al rifiuto al di fuori dei confini fisici degli impianti di trattamento possono essere addirittura maggiori di quelle dirette (Ekvall et al., 2007).

Ciò premesso, il presente studio LCA si riferisce all'intero Sistema Integrato dei RSU della Provincia di Torino.

I confini del sistema oggetto dello studio non si limitano ai confini fisici degli impianti di trattamento e/o smaltimento che costituiscono il sistema integrato, ma si estendono a monte e valle fino a comprendere l'intera filiera dei rifiuti: a partire dalla produzione dei sistemi di raccolta (a monte della produzione dei rifiuti), fino allo smaltimento finale dei rifiuti residui (non ulteriormente oggetto di lavorazioni) o alla produzione di materie prime secondarie e/o di energia.

Le fasi del ciclo di vita prese in considerazione nel modello LCA sono le seguenti (Fig. 4.3.1):

- raccolta (inclusa la produzione dei contenitori e l'utilizzo dei mezzi per la raccolta);
- trattamenti di recupero di materia e riciclaggio delle frazioni provenienti dalla raccolta differenziata (incluse le operazioni di trasporto, selezione, processi di riciclaggio/compostaggio, prodotti vergini evitati e scarti a discarica);
- trattamento finale del rifiuto residuo a valle della raccolta differenziata (incluso trasporto, eventuale pre-trattamento, termovalorizzazione, recupero energetico con conseguente evitata produzione energetica da fonti convenzionali e messa a discarica dei residui).

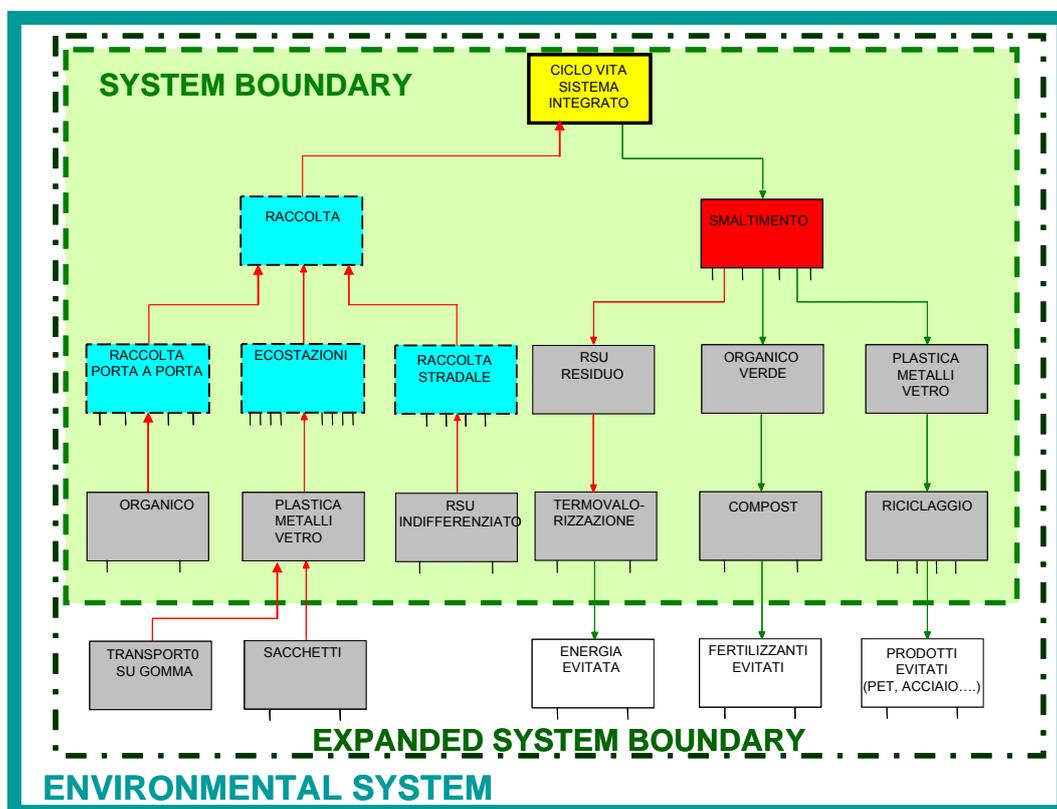


Figura 4.3.1 – Definizione dei confini di sistema

4.4 Fonti di dati diretti/indiretti e strumenti informatici LCA

Vengono qui schematicamente elencate le fonti di dati utilizzati nel modello LCA ed i soggetti responsabili del loro reperimento:

Provincia di Torino + Osservatorio rifiuti + ATO + Tavolo di confronto:

- Quantitativi totali dei rifiuti ed ipotesi di crescita/riduzione;
- Andamento della Raccolta Differenziata e strategie future;
- Definizione degli scenari principali oggetto dello studio;
- Definizione dei flussi dei rifiuti per composizione merceologica (sia RD che RSU residuo);
- Definizione dei bilanci di massa in ingresso ed in uscita dal pre-trattamento.

IPLA (Istituto per le piante da legno e l'ambiente)

- Stima del potere calorifico dei rifiuti RSU residuo e FSL (frazione secco-leggera) dopo pre-trattamento nelle diverse ipotesi di RD;

Politecnico di Torino DITAG-DISPEA:

- Definizione dei dati LCA relativi al trattamento aerobico ed anaerobico della FORSU (studi LCA pregressi del DITAG);
- Verifica flussi dei rifiuti da e verso pre-trattamento (studi LCA pregressi del DITAG);
- Individuazione dei dati LCA relativi alle filiere di riciclaggio da RD (analisi di filiere reali + studi LCA pregressi del DITAG + database Ecoinvent 2 + database Buwal 250)
- Definizione dei dati LCA relativi alla termovalorizzazione (dati TRM + dati Politecnico di Milano + dati ANPA)

Gli strumenti informatici di supporto per lo sviluppo e l'analisi del modello LCA sono i seguenti:

- ✓ Software LCA: Sima Pro 7
- ✓ Database LCA: Ecoinvent 2 e Buwal 250

4.5 Ipotesi e assunzioni

La semplificazione spesso adottata in altri studi LCA, in base alla quale il ciclo della CO₂ biogenica è neutro, ovvero la CO₂ prodotta dal trattamento di fine vita delle biomasse è compensata dalla CO₂ assorbita nella fase di accrescimento vegetativo, non è accettabile nel caso in cui si consideri l'analisi comparata di scenari di smaltimento dei rifiuti con diverse potenzialità di emissioni di gas serra di origine biogenica (CO₂ e CH₄).

Per chiarire meglio il contesto e la metodologia del presente studio si considerino i seguenti esempi:

Esempio 1: nel caso dell'incenerimento delle biomasse, l'ipotesi che il ciclo biogenico del carbonio sia neutro può essere in prima approssimazione accettata. In sostanza, la stessa quantità di carbonio assorbito dall'atmosfera in fase di accrescimento viene restituito all'atmosfera stessa.

Esempio 2: nel caso di smaltimento a discarica delle biomasse, poiché l'emissione di 1kg di metano ha un potenziale serra 23 volte superiore a quello di 1 kg di CO₂, l'ipotesi di neutralità non è più accettabile a priori. In questo caso, come nel caso del compostaggio o della digestione anaerobica (Blengini, 2008) occorre predisporre un bilancio dei gas serra di origine biogenica (CO₂ e CH₄).



Esempio 3: nel caso di riuso o di riciclaggio delle biomasse, il credito di CO₂, ovvero la quantità di CO₂ sequestrata in fase di accrescimento viene, di fatto, “congelata” nella biomassa. In altri termini, la biomassa che viene avviata ad un nuovo ciclo di vita trattiene, anziché restituire all’atmosfera il carbonio sequestrato.

E’ dunque chiaro che, poiché l’effetto serra è determinato indifferentemente dalla CO₂ fossile e biogenica (Hogg et al 2008; Blengini, 2007) nell’analisi LCA estesa a tutto il sistema dei rifiuti, l’assunzione di escludere a priori la CO₂ biogenica non è scientificamente corretta. Diverso sarebbe un contesto in cui le emissioni di anidride carbonica biogenica sono le stesse in tutti gli scenari analizzati e quindi sono automaticamente escluse nel conteggio differenziale.

Il bilancio della CO₂ biogenica deve essere certamente esplicitato, così come raccomanda la rivista scientifica di riferimento nel settore della LCA (International Journal of Life Cycle Assessment).

Occorre dunque considerare anche la CO₂ biogenica (possibilmente evidenziandone il contributo rispetto a quella fossile, proprio come è stato fatto nel presente studio). Per un’analisi ancora più rigorosa, occorrerebbe inoltre prendere in considerazione la dimensione temporale del ciclo naturale ed antropogenico del carbonio.

Riassumendo, l’approccio relativo al conteggio della CO₂ di origine biogenica, raccomandato dalla comunità scientifica internazionale (International Journal of Life Cycle Assessment – Rabl et al. 2007) ed adottato nel presente studio, è il seguente:

- 1) ai prodotti di origine vegetale inseriti nel modello LCA vengono assegnati i crediti di CO₂ (assorbiti in fase di accrescimento dalle biomasse);
- 2) tuttavia, se la fase di accrescimento delle biomasse rientra nelle fasi del ciclo di vita precedenti alla generazione del rifiuto, i crediti non vengono conteggiati (ipotesi “zero burdens”: il rifiuto non ha memoria storica di impatti/benefici precedenti a quando è diventato rifiuto);
- 3) tutte le emissioni climalteranti di origine biogenica sono conteggiate nel momento in cui vengono generate (emissioni di CO₂ e CH₄ dalle discariche, da trattamenti aerobici ed anaerobici della FORSU, da combustione di biogas, da incenerimento);
- 4) i processi di riciclaggio dei prodotti di origine vegetale (in questo studio carta e legno) determinano l’immagazzinamento permanente dei crediti di CO₂ nelle biomasse, tenuto conto dei bilanci di massa transitori ed al netto dei materiali scartati. Nel modello LCA ciò avviene implicitamente in quanto, per carta o legno riusato o riciclato, non ci sono né crediti di CO₂ in ingresso, né emissioni di CO₂ biogenica in uscita.

5 Analisi di Inventario (LCI)

In questo capitolo vengono descritti i “*subsystems*” che costituiscono il modello LCA dei 4 scenari oggetto dello studio. Per *subsystem* si intende un sottoinsieme di attività/processi ovvero una sequenza limitata di *unità di processo* (ISO14040) all’interno del modello completo di ciclo di vita.

Poiché i 4 modelli LCA differiscono solo per alcuni dei *subsystems* che li costituiscono, la descrizione ed i dati quantitativi inseriti viene fatta senza specifico riferimento ad uno dei 4 scenari.

I processi e/o attività all’interno della sequenza che costituisce il ciclo di vita dei rifiuti sono descritti così come sono stati inseriti nell’applicazione software Sima Pro.

Ogni singola unità di processo è concepita come un sistema input/output, mettendo in evidenza e quantificando i flussi di materiali, emissioni ed energia in ingresso ed in uscita.

Nel caso in cui le grandezze che caratterizzano un *subsystem* siano dipendenti dallo scenario, i dati sono forniti con specifico riferimento alla filiera di cui entrano a far parte.

Nella descrizione delle unità di processo costituenti il modello LCA viene quindi considerata la generica sequenza di operazioni che si susseguono nel trattamento/valorizzazione del rifiuto, lasciando al lettore il compito di ricondurre le informazioni ad ognuno degli scenari.

5.1 Fase di raccolta

Nel presente studio, per fase di raccolta si intende l’insieme di operazioni che consentono di prelevare in modo capillare il rifiuto dal luogo di “produzione” e di trasportarlo in un ipotetico centro logistico dal quale vengono inviati verso le operazioni di trattamento, valorizzazione e smaltimento.

Per mancanza di dati completi e dettagliati nonché di risorse, per quanto riguarda sistemi di contenimento del rifiuto e sistemi di trasporto, è stato concordato con il committente di utilizzare dati derivanti da studi precedenti (Blengini & Fantoni 2007, ANPA 2000, Bovea & Powell 2006). Analogamente, si è scelto di considerare, sia per la raccolta del rifiuto differenziato, sia per la raccolta del rifiuto residuo, la stessa generica distanza pari a 50 km e l’impiego dello stesso sistema di trasporto. Questo al fine di dare una dimensione al contributo energetico-ambientale della fase di raccolta e per meglio ponderare l’opportunità di pianificare eventuali approfondimenti in una ricerca successiva, senza però influire sull’attuale confronto tra scenari alternativi.

Sarà necessario quantificare in una fase successiva le conseguenze energetico-ambientali dell’aumento della raccolta differenziata, poiché sull’eventuale aumento dei carichi ambientali la comunità scientifica è in disaccordo.

Raccolta Rifiuto Differenziato:

Il subsystem *Raccolta Rifiuto Differenziato* comprende le operazioni di trasporto su gomma lungo una distanza di 50 km e la produzione dei sacchetti in polietilene e dei cassonetti stradali in polietilene ad alta densità.

Per i dati di inventario relativi al sistema di trasporto si è fatto riferimento all’unità di processo *Autocompattatore per RSU* presente nel database EcoInvent2.

Sacchetti in Polietilene: quantità pari a 5 g per ogni kg di rifiuto conferito (Fonte I-LCA ANPA e Blengini & Fantoni, 2006). Per quanto riguarda energia ed emissioni legate al processo di produzione del polietilene (Eco profilo) i dati sono stati ricavati dal database EcoInvent2.

Cassonetto in HDPE: quantità pari a 2 g per ogni kg di rifiuto conferito (Fonte I-LCA ANPA e Blengini & Fantoni, 2006). Eco profilo HDPE da EcoInvent2.

Raccolta Rifiuto Residuo:

Il subsystem *Raccolta Rifiuto Residuo* è identico alla raccolta del rifiuto differenziato, sia per quel che riguarda la distanza percorsa che per quel che riguarda i mezzi con cui si effettua la raccolta. Restano invariate anche le ipotesi relative al quantitativo di plastica imputabile alla produzione dei sacchetti e dei cassonetti.

5.2 Filiera di riciclaggio e valorizzazione delle frazioni da RD

Per Filiera di riciclaggio e valorizzazione delle frazioni da RD si intende quell'insieme di attività e/o operazioni che hanno inizio con il trasporto del rifiuto differenziato ad un sito di trattamento ed hanno termine con la produzione di materie prime secondarie e lo smaltimento finale di scarti e/o residui.

La tabella 5.2.1 è stata fornita dalla Provincia ed indica le distanze medie percorse dai principali centri di produzione sino ai siti di trattamento/smaltimento finale.

Tab. 5.2.1. – Distanze percorse nella fase di raccolta delle principali frazioni di RD (Fonte: Provincia di Torino)

FRAZIONE	QUANTITATIVI 2007 [t]	DISTANZA MEDIA [km]
carta - cartone	145.088	15,4
organico	122.336	36,3
verde - ramaglie	57.915	31,3
legno	27.451	23,6
plastica	31.900	37,4
metalli	9.920	16,1
RAEE	6.019	34,6
ingombranti	21.353	17,4
vetro	50.099	89,5

L'ipotesi di lavoro adottata prevede di mantenere invariate le prestazioni dei sottosistemi che costituiscono le filiere di valorizzazione delle frazioni da RD al variare della % di raccolta differenziata dal 52% al 65%. Tale semplificazione, senz'altro valida nel contesto della presente ricerca, potrà eventualmente essere ripresa ed approfondita in futuro. Come linea d'indirizzo per un'eventuale seconda fase dello studio, può essere utile fin d'ora considerare la possibilità che un aumento della raccolta differenziata comporti un aumento (da quantificare) degli impatti legati alle operazioni di raccolta e post raccolta. In seguito all'aumento della % di RD dovranno essere inoltre considerati l'eventuale diminuzione della qualità delle frazioni raccolte in modo differenziato e l'incremento dei sovralli generati dai processi di valorizzazione. Tuttavia, resta da verificare se tali peggioramenti possano essere compensati da un miglioramento delle filiere di valorizzazione (attualmente non sempre BAT Best Available Technologies).

Trattamento Aerobico FORSU e verde da RD

Il subsystem *Compostaggio Organico* comprende le operazioni di trasporto della FORSU (frazione organica RSU) e del rifiuto ligneo lungo una distanza di 36,3 km (Fonte Provincia di TO), incluso il successivo trattamento aerobico finalizzato alla produzione di compost di qualità, utilizzabile in agricoltura in parziale sostituzione di fertilizzanti chimici NPK (Azoto, Fosforo, Potassio).

Il modello LCA fa riferimento all'impianto di compostaggio di San Damiano d'Asti (20000 t/a) gestito da GAIA SpA e descritto in Blengini & Fantoni (2007) e Blengini (2008).

Tale impianto è stato scelto poiché ritenuto rappresentativo di una buona prassi di gestione dei rifiuti nel contesto piemontese.

I dati di inventario relativi a consumi energetici diretti, emissioni, scarti, rendita di processo sono stati desunti da ricerche del Politecnico di Torino (Blengini & Fantoni 2007, Blengini 2008). L'evitata produzione fertilizzanti è stata stimata in funzione delle suddette ricerche e integrata con dati di letteratura (Giugliano 2007).

Si precisa che i consumi energetici dell'impianto di San Damiano sono generalmente più elevati dei dati riscontrati in letteratura, così come le rese di produzione del compost (30%) sono mediamente inferiori. Il modello LCA che se ne ricava è dunque cautelativo, rispetto ai dati di letteratura (a titolo di esempio si cita il database I-LCA dell'ANPA dove il rendimento di produzione

del compost è del 43%). I valori che caratterizzano il processo di compostaggio sono infatti riconducibili all'attenzione del gestore verso la produzione di compost di qualità (marchio CIC). In sintesi, i parametri inseriti nel modello LCA per il trattamento aerobico della FORSU e della frazione verde sono i seguenti.

Per quanto riguarda i consumi energetici in impianto, comprensivi di tutte le operazioni relative al trattamento del rifiuto dall'ingresso all'uscita dello stabilimento, incluso il trattamento della acque reflue, i dati sono indicati in Tab. 5.2.2.

Tab. 5.2.2. – Consumi del processo compostaggio (per 1 t FORSU input)

Uso Diesel	2,06	l
Uso Acqua	89	l
Energia Elettrica	219	MJ

Il bilancio di massa all'impianto di compostaggio è riportato in tabella 5.2.3.

Tab. 5.2.3.– Ripartizione % output dal processo di compostaggio

	Valori inseriti nel modello	Valori impianto S.Damiano (AT) (Blengini & Fantoni 2007)
	%	%
Compost maturo	30	29,52
Emissioni in aria	40	39,52
Metalli a riciclaggio	0,11	0,11
Percolato a trattamento	14,89	19,78
Scarti a discarica	15	11,07

La composizione delle emissioni in aria che si verificano nelle fasi di maturazione accelerata e lenta (Tab. 5.2.4) è stata ricavata dal database I-LCA dell'ANPA ed integrata con valutazioni stechiometriche effettuate dal personale della Scuola Agraria del Parco di Monza e da dati di letteratura (Cernuschi et al. 2003).

Tab. 5.2.4. – Emissioni dal processo compostaggio (per 1 t FORSU input - Fonte: I-LCA ANPA)

Carbon dioxide, biogenic	156,25 ⁽¹⁾	kg
Ammonia	60 ⁽¹⁾	g
VOC, volatile organic compounds	50 ⁽²⁾	g
Hydrogen chloride	2	g
Hydrogen fluoride	0,2	g
Sulfuric acid	0,46	g
Benzene	0,2	g
Cadmium	0,025	g
Manganese	0,005	g
Mercury	0,125	g
Carbon monoxide	1500	g
Nickel	0,025	g
Sulfur oxides	1,2	g
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	0,00000002	g
Lead	0,125	g
Copper	0,005	g
Dioxins	0,00001	g
Zinc	0,075	g

⁽¹⁾ Fonte: dati della Scuola Agraria del Parco di Monza

⁽²⁾ Fonte: Cernuschi et al. (2003)

Per il trattamento del percolato è stato considerato un trasporto su 100 km ed il processo *Treatment, sewage, to wastewater treatment* di Ecoinvent 2.

Gli scarti non compostabili (20% putrescibili e 80% non putrescibili) sono stati trasportati a discarica per una distanza di 33 km (modello LCA descritto nel paragrafo relativo alle discariche).

I metalli (1,1 kg di metalli ferrosi per 1 t input) sono stati inviati al processo di riciclaggio descritto più avanti.

Per quanto riguarda l'evitata produzione di fertilizzanti NPK legata all'utilizzo di compost di qualità in agricoltura sono stati usati dati di letteratura (Blengini & Fantoni, 2007; Blengini, 2008; Giugliano 2007; AEI 2001). La tabella 5.2.5 riporta le tipologie ed i quantitativi di fertilizzanti inclusi nel modello e le corrispondenti voci relative agli ecoprofilo ricavati dal database Ecoinvent 2.

Tab. 5.2.5. – Fertilizzanti evitati corrispondenti a 1 t di compost maturo

Calcium ammonium nitrate, as N (27% N)	23	kg
Single superphosphate, as P ₂ O ₅ (21% P ₂ O ₅)	9,5	kg
Potassium sulphate, as K ₂ O (50% K ₂ O)	9	kg

Nel modello è stato infine considerato il potenziale di sequestro del carbonio legato all'utilizzo di compost di qualità in agricoltura, riconducibile sia al sequestro diretto di carbonio, sia al sequestro indiretto dovuto alla miglior lavorabilità del terreno agricolo. Il potenziale di sequestro del carbonio adottato nel presente studio è di 140 kg di CO₂ per 1 t di rifiuto umido da RD (Schleiss & Favoino, 2007).

Tattamento Anaerobico FORSU da RD

Considerata la presenza in Provincia di Torino dell'impianto di digestione anaerobica di Pinerolo (ACEA), con capacità nominale di 50000 t/a di rifiuto organico, nel modello LCA è stato previsto di inviare circa 1/3 della FORSU da RD al processo di digestione anaerobica e che i fanghi digeriti vengano poi avviati, unitamente al rifiuto ligneo, al trattamento aerobico per la produzione di compost.

Il subsystem *Digestione anaerobica FORSU* comprende le operazioni di trasporto della FORSU lungo una distanza di 36,3 km (Fonte Provincia di TO), il trattamento anaerobico e il successivo trattamento aerobico dei fanghi digeriti (uniti alla frazione verde). Sono altresì inclusi la cogenerazione di energia elettrica e vapore per teleriscaldamento dal biogas e la produzione di compost, inclusa la sostituzione di fertilizzanti NPK derivanti dall'uso di compost in agricoltura.

I dati di inventario sono quelli rilevati dall'impianto di Pinerolo (TO) gestito da ACEA e pubblicati in Blengini (2008).

Riassumendo, gli input e gli output caratterizzanti il subsystem digestione + compostaggio sono i seguenti:

- scarti all'impianto di digestione anaerobica 25%
- consumo di 0,7 l di gasolio per 1t rifiuto in ingresso
- produzione di 129 Nm³/t di biogas con potere calorifico pari a 25 MJ/Nm³
- produzione netta di elettricità pari a 276 MJ/t (autoconsumi 415 MJ/t)
- produzione netta di energia teleriscaldamento 490 MJ/t (autoconsumi 202 MJ/t)
- produzione di 129 kg/t di compost
- recupero di 6 kg/t di metalli

Nota: per il processo di compostaggio vale il modello descritto precedentemente.

La tabella 5.2.6 mostra le emissioni in aria dal processo di digestione e cogenerazione.

Tab. 5.2.6. – Emissioni in aria dai processi digestione e cogenerazione (per 1 t input – Fonte: I-LCA ANPA)

Hydrogen chloride	11	mg
Hydrogen fluoride	2,1	mg
Sulfuric acid	33	mg
Carbon dioxide, biogenic	206	kg
Cadmium	940	ng
VOC, volatile organic compounds	2,3	mg
Mercury	6,9	ng
Lead	850	ng
Copper	110	ng
Zinc	13	µg
Sulfur oxides	2,5	g
Dioxins	80	ng

La tabella 5.2.7 riporta le emissioni in acqua.

Tab. 5.2.7. – Emissioni in acqua dal processo di digestione (per 1 t input – Fonte: I-LCA ANPA)

COD, Chemical Oxygen Demand	73	g
Nitrogen	22,6	g

Si assume che gli impatti evitati dalla produzione di energia elettrica e di calore per teleriscaldamento siano rispettivamente quelli corrispondenti alla produzione elettrica da Mix energetico Italiano e calore da impianto domestico a gas naturale (dati Ecoinvent2, v. cap. 5.3).

Si precisa che i dati relativi al funzionamento dell'impianto di digestione anaerobica ACEA sono stati misurati nel 2006 e sono sicuramente cautelativi in quanto riferiti ad un impianto non ancora a regime. Il Politecnico di Torino, in collaborazione con ACEA sta acquisendo nuovi dati sui consumi, autoconsumi e produzione netta di energia da biogas.

Riciclaggio Plastica

Il subsystem *Riciclaggio Plastica* include il trasporto all'impianto di selezione lungo una distanza media di 37,4 km (Fonte: Provincia Torino) ed ai successivi impianti per il trattamento finale di valorizzazione/smaltimento per una distanza di circa 150 km. Sono altresì inclusi i processi di riciclaggio a freddo delle plastiche, la produzione di CDR (combustibile da rifiuti) e lo smaltimento in discarica di scarti e/o residui. Nel modello LCA sono inclusi i prodotti vergini evitati e la mancata produzione di energia da fonti convenzionali.

Per la definizione delle % di recupero di materia ed energia dalle diverse tipologie di plastica è stato assunto come riferimento principale l'impianto DEMAP Srl di Beinasco che su 32.340 tonnellate di plastica raccolte nel 2007 nella Provincia di Torino ne ha trattate l'85% (tabella 5.2.8)

Tab. 5.2.8. – Destinazione finale della plastica da RD (Fonte: Provincia di Torino)

	Quantitativi conferiti presso DEMAP		Recupero di materia			CDR			Smaltimento discarica		
	[t]	%	[t]	% (relativo)	% (sul totale)	[t]	% (relativo)	% (sul totale)	[t]	% (relativo)	% (sul totale)
LDPE/HDPE	2.765	10%	2.765	100%	10,0%						
PET	9.015	33%	9.015	100%	32,7%						
PP	410	1%	410	100%	1,5%						
MIX	8.503	31%	1.424	17%	5,2%	7.079	83%	25,7%			
Scarti	6.882	25%	5	0%	0,0%	118	2%	0,4%	6.750	98%	24,5%
Totale	27.575	100%	13.619		49,4%			26,1%			24,5%

Partendo dalle informazioni contenute nella tabella 5.2.8, tenuto conto dell'esperienza acquisita in ricerche precedenti (Blengini & Fantoni 2007), con particolare alla piattaforma Corepla di selezione delle plastiche di Valterza (GAIA) e considerati i dati medi del nord Italia relativi alle filiere di riciclaggio delle plastiche riportati in Grosso et al. (2007), il modello LCA è stato predisposto come di seguito descritto.

La selezione meccanico/manuale e l'imballaggio di 1t di plastiche in ingresso all'impianto utilizza 43 kWh di energia elettrica e 3,5 l di gasolio (dati Valterza riportati in Blengini & Fantoni, 2007).

Successivamente alla selezione, le plastiche vengono inviate in parte (59% della plastica in ingresso) ai processi di riciclaggio a freddo per il recupero di granulati, secondo la ripartizione di tabella 5.2.9 e in parte (26%) al processo di produzione del CDR. I rifiuti residui e gli scarti (15%) vengono destinati a discarica (ipotesi cautelativa da verificare in ricerche successive).

Tab. 5.2.9. – *Composizione relativa delle plastiche secondarie ottenute dai processi di riciclaggio*

Polyethylene, LDPE, granulate	10,2%
Polyethylene, HDPE, granulate	10,2%
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous	66,2%
Polypropylene, granulate	3,0%
MIX (57%LDPE+35%LLDPE+8%PP)	10,5%

Per quanto riguarda il processo di produzione dei granulati plastici riciclati (59% della plastica in ingresso), sono stati considerati il consumo di energia elettrica pari a 278 kWh/t e di metano pari a 1840 MJ/t (fonte: Grosso et al. 2007) comprensivi di lavaggio, triturazione, raffinazione, vagliatura ed essiccazione.

I dati di inventario relativi agli eco-profilo dei prodotti vergini evitati (LLDPE, LDPE, HDPE, PET, PP) sono stati desunti dal database Ecoinvent 2.

I dati di inventario del processo di produzione del CDR (possibile destinazione delle frazioni meno nobili provenienti dalla raccolta differenziata della plastica, benché la produzione di CDR dalla raccolta differenziata della plastica non costituisca probabilmente la maggior valorizzazione del materiale) sono stati dedotti dai dati forniti da IDEAGRANDA SpA che produce CDR a partire dalla frazione secco-leggera del RSU nell'impianto di Roccavione in Provincia di Cuneo, tenuto conto delle ovvie differenze relative alla composizione merceologica e al pci del materiale in ingresso e del diverso ciclo di lavorazione.

In sintesi, il subsystem *Produzione di CDR* include l'utilizzo di 100 kWh/t di energia elettrica per la triturazione e la raffinazione. Nel modello, il prodotto ottenuto è un combustibile derivato da rifiuti con un pci di 7600 kcal/kg in grado di evitare produzione e trasporto di 0,9 t di petcoke.

I dati di inventario relativi all'eco-profilo del petcoke evitato sono stati desunti dal database Ecoinvent 2.

Il subsystem discarica plastiche residue (materiali inerti dal punto di vista delle emissioni climalteranti) è descritto più avanti nella sezione 5.3.

Riciclaggio Carta

Il subsystem *Riciclaggio Carta* include il trasporto in cartiera lungo una distanza media di 15,4 km (Fonte: Provincia di Torino) ed i processi termo-meccanici per la produzione di impasto riciclato da utilizzare nella produzione di carta in sostituzione di fibra di cellulosa vergine.

Considerata la tipologia di raccolta differenziata della carta in Provincia di Torino (raccolta mista carta e cartone) e la qualità media del materiale consegnato in cartiera, si ritiene rappresentativo un processo di riciclaggio per la produzione di carta da imballaggio (liner-testliner). Non viene dunque preso in considerazione un eventuale processo di de-ink (disinchiostraggio) per la



produzione di carta bianca, poiché questo presupporrebbe una raccolta differenziata di carta e cartone separati.

Poiché nel ciclo produttivo della carta con e senza l'utilizzo di fibra riciclata i processi successivi alla produzione dell'impasto sono analoghi, nel caso di materia prima vergine oppure riciclata, il bilancio dei benefici/impatti ambientali può essere limitato al confronto delle fasi di stock-prep. Il modello LCA prende dunque in considerazione tutti i consumi e gli impatti generati nel processo di trattamento della carta da RD fino alla produzione e raffinazione dell'impasto che verrà usato in sostituzione di fibra vergine.

In base a dati medi ed informazioni forniti dalle cartiere Burgo, la sequenza di processi a partire dalla consegna di carta da RD fino alla produzione dell'impasto raffinato comportano il consumo di 46,9 kWh di energia elettrica per la triturazione (pulper) di 1 tonnellata di polpa e di ulteriori 42,2 kWh/t di energia elettrica per il processo di raffinazione. Gli scarti al pulper sono mediamente il 13-15 %, in buona parte plastiche o prodotti resistenti ad umido con parti di metalli.

Il processo di triturazione della cellulosa vergine comporta invece il consumo di 93,8 kWh/t, mentre servono 140,6 kWh/t per la raffinazione.

Di conseguenza, la produzione di 1t di impasto a partire da 1,15 t di carta riciclata comporta un risparmio di 145,3 kWh/t di energia elettrica, a cui si devono poi sommare altri 15,6 kWh/t di risparmi nel circuito di trattamento delle acque.

In sintesi, a fronte di energia consumata ed impatti causati per il trasporto di 1,15 t di carta da RD in cartiera e per lo smaltimento a discarica di circa il 15% di scarto, il risparmio netto nel processo di riciclaggio consiste nell'evitata produzione di 160,9 kWh di energia elettrica e 1 tonnellata di fibra vergine. Nel modello LCA sono stati inoltre considerati gli scarti al pulper, costituiti per il 20% da plastiche miste inviate a termovalorizzazione con recupero energetico, e per l'80% da residui smaltiti in discarica.

Per l'evitata produzione (e trasporto) di fibra vergine è stata considerata la tipica miscela in ingresso alle cartiere italiane, costituita da: 40% di cellulosa al solfato LBKP (fibra lunga), 30% di cellulosa al solfato NBKP (fibra corta) e 30% di pasta a base legno TMP thermo-mechanical-pulp.

Gli eco-profilo delle diverse cellulose sono stati desunti dal database Ecoinvent 2.

Poiché, com'è stato descritto nella sezione metodologica del presente studio, il riciclaggio della carta corrisponde al sequestro "permanente" di CO₂ nella biomassa, all'operazione di riciclaggio corrisponde, implicitamente, un credito di CO₂ pari alla quantità assorbita nella fase di accrescimento della biomassa stessa (1,96 t/t di fibra vergine, Fonte Ecoinvent 2).

Riciclaggio Legno e tessuti

Il subsystem *Riciclaggio Legno e tessuti* include il trasporto all'impianto di selezione e triturazione lungo una distanza media di 23,6 km (Fonte: Provincia Torino).

Si considera uno scarto del 10% del rifiuto in ingresso e un consumo di energia elettrica di 22 kWh/t e di gasolio 2,07 l/t per la triturazione del rifiuto ligneo (dati impianto Valterza riportati in Blengini & Fantoni, 2007).

Il prodotto così ottenuto andrà a spiazzare un pari quantitativo di cippato importato dal Brasile via nave.

Il legno scartato viene utilizzato in stabilimento per l'auto-produzione di energia termica in sostituzione di cippato vergine e quindi il bilancio energetico ed ambientale può essere considerato in prima approssimazione neutro.

Analogamente a quanto accade per la carta, il riciclaggio del legno corrisponde al sequestro "duraturo" di CO₂ nella biomassa. L'operazione di riciclaggio del legno corrisponde, implicitamente, ad un credito di CO₂ pari alla quantità assorbita nella fase di accrescimento della biomassa stessa (1,36 t/t di cippato, Fonte Ecoinvent 2).

Riciclaggio Vetro

Il subsystem *Riciclaggio Vetro* include il trasporto in vetreria lungo una distanza media di 89,5 km (Fonte: Provincia Torino).

L'efficienza di selezione del vetro da RD è del 91% (Fonte: Regione Piemonte)

Il processo di riciclaggio del vetro può essere assimilato, in buona sostanza, alla produzione di vetro cavo verde da rottame di vetro (vedi Fig. 5.2.1). I dati relativi ai consumi energetici del processo di riciclaggio sono stati rilevati nell'impianto della Saint Gobain di Deگو (SV) e sintetizzati in tabella 5.2.10. I dati dettagliati sono riportati in Cotella (2005).

Tab. 5.2.10. – Energia utilizzata nel processo di produzione di vetro cavo da rottame di vetro (Fonte: vetreria Saint Gobain di Deگو SV riportati in Cotella 2005)

Gas naturale	495	MJ
Energia Elettrica MIX-IT	1197	MJ
Olio combustibile	2055	MJ

Nel modello LCA, al processo di produzione del vetro riciclato corrisponde l'evitata produzione di vetro da materia prima vergine. L'eco-profilo del prodotto evitato è quello del vetro sodico-calcico da materie prime vergini (sabbia silicea, carbonato di calcio/magnesio, soda, ecc.) riportato nel database Ecoinvent 2.

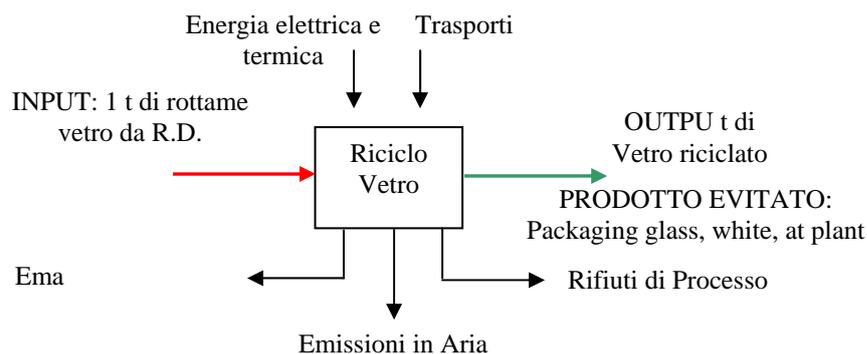


Figura 5.2.1 – Schema del processo di riciclaggio del vetro

Riciclaggio Metalli

Il subsystem *Riciclaggio Metalli* include il trasporto all'impianto di trattamento/fusione ad una distanza media di 89,5 km.

Poiché la voce "Metalli" da RD di Tab. 2.1 include sia i metalli ferrosi che l'alluminio, è stata considerata la seguente composizione: Alluminio: 22 %, Ferro: 78 % (Fonte: Provincia di Torino).

Il modello LCA si divide dunque in due sotto-unità corrispondenti alla filiera di riciclaggio dell'acciaio e dell'alluminio.

Riciclaggio Acciaio:

La resa di selezione è stata considerata pari all'85%. La resa di processo (melting) utilizzata nel modello LCA è il 90% (Fonte: Ecoinvent). Per confronto la resa di processo secondo IISI (International Iron and Steel Institute) è 93,5%.

La resa complessiva di riciclaggio, ottenuta dal prodotto della resa di selezione e processo, è di 0,765 t di acciaio riciclato per ton di rifiuti ferrosi da RD.

Nel modello LCA (Fig. 5.2.2), il processo di riciclaggio dell'acciaio si basa sul processo di fusione e raffinazione di 1t di rottame, con i conseguenti impatti ambientali, e termina con l'evitata produzione di 0,9 t di acciaio primario.

Per i dati di inventario da inserire nel modello sono stati utilizzate le unità di processo *Steel electric* di Ecoinvent 2 (che comprende tutta la filiera di trattamento del rottame fino alla produzione di acciaio riciclato) e *Steel Converter* (che comprende tutta la filiera di produzione di acciaio primario).

Si fa presente che, come sottolinea l'IISI (International Iron and Steel Institute), la qualità dell'acciaio riciclato non decade, rispetto al prodotto da materia prima vergine.

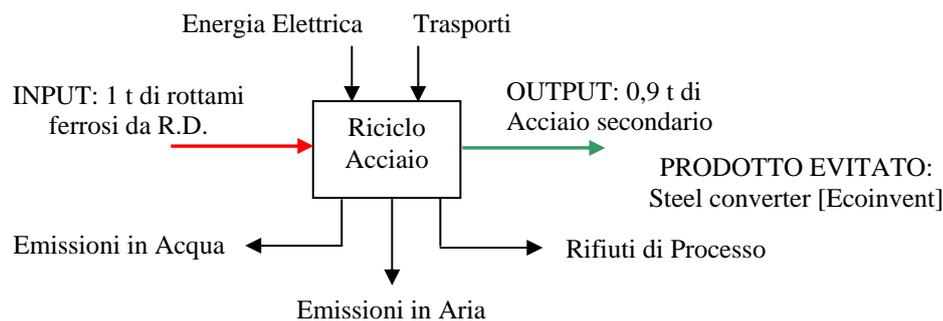


Figura 5.2.2 – Schema del processo di riciclaggio dell'acciaio

Riciclaggio Alluminio:

La resa di selezione è stata considerata pari al 95% (Fonte: Regione Piemonte 2005). La resa di processo (melting) utilizzata nel modello LCA è il 95% (Fonte: Ecoinvent).

La resa complessiva di filiera, ottenuta dal prodotto tra resa di selezione e processo, è di 0,9 t di alluminio riciclato per ton di alluminio da RD.

Nel modello LCA (Fig. 5.2.3), il processo di riciclaggio dell'alluminio si basa sul processo di fusione e raffinazione di 1t di rottame, con i conseguenti impatti ambientali, e termina con l'evitata produzione di 0,95 t di alluminio primario.

Per i dati di inventario da inserire nel modello sono stati utilizzate le unità di processo *Aluminium 100% scrap* di Ecoinvent 2 (che comprende tutta la filiera di trattamento del rottame fino alla produzione di alluminio riciclato) e *Aluminium primary* (che comprende tutta la filiera di produzione di alluminio primario dalla bauxite).

Anche nel caso dell'alluminio, la qualità del metallo non decade in seguito al processo di ri-fusione.

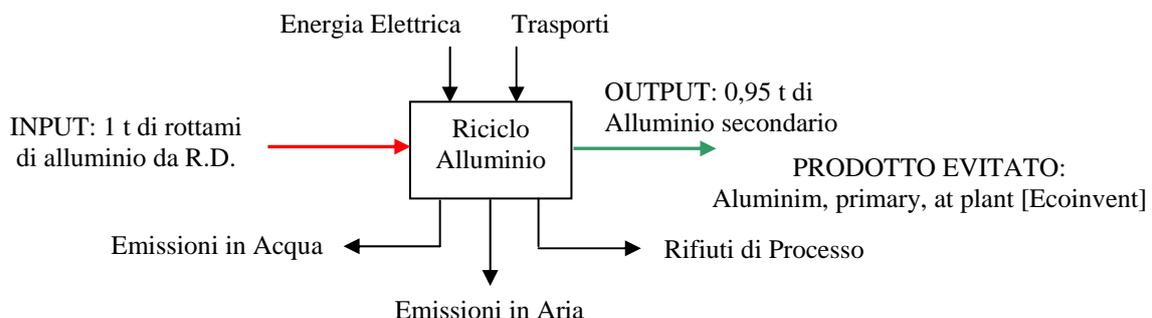


Figura 5.2.3 – Schema del processo di riciclaggio dell'alluminio



Trattamento/ Riciclaggio Altro

Il subsystem *Trattamento/Riciclaggio Altro*, comprende un insieme di frazioni la cui composizione merceologica è piuttosto varia. In accordo con il committente e con analisi effettuate sul materiale in esame, ed in attesa di ulteriori approfondimenti che potranno essere ripresi in una fase di ricerca successiva, si è prudenzialmente destinato il 50 % di tale frazione in discarica e la restante parte a riciclaggio.

Per la quota destinata alle filiere di riciclaggio (50%) sono state assunte le seguenti destinazioni, riferibili ai subsystem descritti nei paragrafi precedenti:

- Riciclaggio Plastiche: 25%
- Riciclaggio Legno: 10%
- Riciclaggio Alluminio: 3 %
- Riciclaggio Ferro: 12 %

Si è inoltre considerata un'ipotetica distanza di trasporto all'impianto di smaltimento o riciclaggio pari a 50 km.

5.3 Filiera di trattamento, termovalorizzazione e smaltimento RSU

La filiera *trattamento, termovalorizzazione e smaltimento RSU* comprende i trattamenti e gli smaltimenti finali del RSU residuo e degli scarti generati dalle filiere di valorizzazione della raccolta differenziata.

Pretrattamento del RSU residuo

Il subsystem *Pretrattamento del rifiuto residuo* (presente solo negli scenari 1B e 2B) include, oltre alla costruzione dell'impianto, le operazioni per la separazione meccanica della parte cosiddetta *Umida* del RSU (sottovaglio) dalla frazione *Secco-leggera* (FSL - sopravaglio). Nel modello LCA, la pre-selezione meccanica corrisponde allo sdoppiamento del flusso dei rifiuti nelle due linee principali:

- ✓ **Linea FOS**, che include le operazioni di bio-stabilizzazione del sottovaglio e la produzione di FOS (frazione organica stabilizzata) da inviare a discarica;
- ✓ **Linea FSL** (frazione secco-leggera), dalla quale proviene la frazione combustibile da inviare a termovalorizzazione.

Deve essere precisato che la tecnologia di pre-trattamento e le caratteristiche dell'impianto da adottare nel modello LCA non sono state specificate in sede di *Tavolo di confronto*. I dati necessari al completamento dello studio sono stati pertanto concordati con i partecipanti alla ricerca con l'obiettivo di adottare una tecnologia di livello coerente con il resto del modello LCA (mediamente BAT, Best Available Technology), riservandosi la possibilità di tornare sull'argomento in sede di analisi di sensitività o in ricerche successive.

Ciò premesso, prima di presentare i dati inseriti nel modello LCA, si riassumono le uniche indicazioni fatte pervenire dal *Tavolo di confronto* in merito ai bilanci di massa in uscita dall'impianto di pre-trattamento (Tab. 5.3.1).

Tab. 5.3.1. – Bilanci di massa all'impianto di pre-trattamento definiti dal Tavolo di confronto

Output	Ripartizione
Metalli:	1%
Secco-leggero (FSL):	55-65%
Umido (FOS):	25-30%
Perdite di processo (evaporazione e percolato)*:	12-15%

Costruzione dell'impianto di pre-trattamento

In Tabella 5.3.2. sono riportati i principali materiali utilizzati nella costruzione dell'impianto di pre-trattamento. I dati inseriti nel modello LCA sono limitati ad acciaio e calcestruzzo, come riportato in Giugliano (2007) e sono riferiti al kg di rifiuto trattato.

Tab. 5.3.2. – Quantitativo di materiali necessari alla costruzione dell'impianto di termovalorizzazione (per 1 kg di RSU input - Fonte: Giugliano, 2007)

Materiali	Quantità	U.d.m.
Acciaio	0,4	g
Calcestruzzo	3,6	g

I dati di inventario relativi alla produzione di acciaio e calcestruzzo sono desunti dal database Ecoinvent 2.

LINEA FSL:

I consumi energetici necessari al funzionamento della linea secco-leggero sono stati desunti dall'impianto di Valterza (AT), riportati in Blengini & Fantoni (2007). Nel modello LCA sono stati inseriti 19,7 kWh di energia elettrica per 1 t in ingresso alla linea FSL.

Per la stima del potere calorifico della frazione secco-leggera in uscita dall'impianto di pre-selezione meccanica è stata adottata la procedura di seguito descritta.

In primo luogo sono stati definiti i coefficienti di rimozione al vaglio per ciascuna delle frazioni merceologiche in ingresso, al variare del livello di RD (v. Tab. 2.1). Tali valori sono stati ottenuti da un'analisi della letteratura disponibile e da dati medi di impianti italiani.

I coefficienti di rimozione sono indicati in Tabella 5.3.3 (nell'ultima colonna sono stati indicati anche i coefficienti suggeriti dai rappresentanti di Legambiente, ma non utilizzati nel modello LCA).

Tab. 5.3.3. – Coefficienti di rimozione medi degli impianti di pre-selezione meccanica (Fonte: Scuola Agraria del Parco di Monza, USEPA e Ambiente Italia)

% rimozione	Diametro del vaglio			Coeff. legambiente
	60mm	80mm	150mm	
carta e cellullosici	12,7%	21,5%	59,5%	21,5%
legno+verde	39,3%	50,0%	73,2%	50%
plastica	21,3%	31,0%	53,4%	31%
vetro e inerti	56,6%	80,2%	81,6%	80,2%
metalli	22,7%	48,0%	81,3%	48%
organico	63,3%	83,4%	87,2%	83,5%

Utilizzando i coefficienti di rimozione corrispondenti al vaglio da 80 mm (Tab. 5.3.3), unitamente ai poteri calorifici per ciascuna macro-classe merceologica, desunti dallo studio pubblicato da Federambiente (2002), sono state ottenuti i bilanci di massa ed i poteri calorifici di tabella 5.3.4 che verranno in seguito utilizzati nel modello LCA del subsystem *Termovalorizzazione*.

Tab. 5.3.4. – Bilancio di massa e poteri calorifici del RSU in ingresso e della FSL in uscita dall'impianto di pre-trattamento (Fonte: elaborazione da Federambiente 2002)

Bilanci di massa ed energia al pre-trattamento	RSU pci MJ/kg	%FSL	FSL pci MJ/kg
Scenario 1A	11,8	59%	-
Scenario 1B	-		13,9
Scenario 2A	12,4	54%	-
Scenario 2B	-		15,4

LINEA FOS:

I consumi energetici e di acqua necessari al funzionamento dell'impianto di bio-stabilizzazione sono stati desunti dall'impianto di Valterza (AT), riportati in Blengini & Fantoni (2007).

I valori si riferiscono a 1 t input nella linea FOS:

- ✓ Consumi elettrici 63,7 kWh/t
- ✓ Consumi diesel 0,56 litri/t
- ✓ Consumi acqua 211 litri/t

Le emissioni dal processo di biostabilizzazione sono state considerate analoghe a quelle del processo di compostaggio del rifiuto organico precedentemente descritte, ridotte del 20% per tener conto della presenza di materiali non putrescibili.

La FOS (66% del sottovaglio) viene successivamente conferita in discarica controllata per organico stabilizzato (descritta in seguito) dopo il trasporto per una distanza di 15 km.

Termovalorizzazione

Il subsystem *Termovalorizzazione* include le emissioni in aria dal processo di combustione, la produzione di reagenti, additivi ed energia per il funzionamento dell'impianto ed il trattamento dei fumi, la costruzione dell'impianto, il trattamento dei residui, l'evitata produzione di energia elettrica ed energia termica ed il recupero di metalli dalle scorie. Non si considera il trasporto del rifiuto presso l'impianto, in quanto già incluso nella fase di raccolta.

I dati inseriti nel modello LCA sono stati forniti da TRM SpA (reperibili sul sito www.trm.to.it) ed integrati e/o confrontati, ove necessario, con i dati disponibili nel database I-LCA dell'ANPA o in letteratura (Giugliano, 2007).

Il modello LCA per la termovalorizzazione è basato sulle caratteristiche tecniche del termocombustore a griglia del Gerbido (www.trm.to.it).

In sintesi, la tecnologia di riferimento è un impianto a griglia mobile con sistema di raffreddamento misto aria/acqua. La linea di trattamento dei fumi è costituita da un elettrofiltro, un reattore a secco con iniezione di bicarbonato di sodio, un reattore a secco con iniezione di carboni attivi, un filtro a maniche e un sistema DeNOx catalitico (SCR) con utilizzo di ammoniaca.

In base alle informazioni disponibili presso TRM, l'impianto ha una capacità nominale di 421'000 t/a di RSU con pci compreso tra 11 e 16 MJ/kg (informazioni dettagliate sull'impianto sono disponibili sul sito di TRM SpA).

Emissioni in aria

Per le emissioni in aria derivanti dalla combustione e dal successivo trattamento dei fumi sono stati utilizzati i dati TRM riportati nel sito <http://www.trm.to.it/ufficio/brochure.htm>.

Parametro	Unità	Limite di legge (D. Leg. 133/05)		Valori raggiungibili dall'impianto del Gerbido
		Semiorari	Giornalieri	Giornalieri
Ossido di Carbonio (CO)	mg/Nm ³	100	50	30
Carbonio organico totale (TOC)	mg/Nm ³	20	10	5
Ossidi di Zolfo (SO ₂)	mg/Nm ³	200	50	5
Ossidi di Azoto (NO ₂)	mg/Nm ³	400	200	70
Acido Cloridrico (HCl)	mg/Nm ³	60	10	4
Acido Fluoridrico (HF)	mg/Nm ³	4	1	0.5
Polveri	mg/Nm ³	30	10	3
Mercurio (Hg)	mg/Nm ³		0.05*	0.05*
Metalli pesanti (somma di Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	mg/Nm ³		0.5*	0.5*
Metalli pesanti (somma di Cd, Tl)	mg/Nm ³		0.05*	0.05*
Diossine e Furani (PCDD + PCDF)	ngTEQ/Nm ³		0.1**	0.1**
Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)	mg/Nm ³		0.01**	0.01**

Figura 5.3.1 – Tabella emissioni dal termovalorizzatore del Gerbido (<http://www.trm.to.it/ufficio/brochure.htm>)

Per il calcolo dei fattori di emissione riferiti all'unità di rifiuto in ingresso, è stato utilizzato il valore di produzione di fumi pari a 6,22 Nm³/kg fornito sempre da TRM.

Poiché il valore dichiarato da TRM relativo ai metalli pesanti (antimonio, arsenico, cromo, cobalto, manganese, nichel, rame, piombo e vanadio), è dato come somma dei 9 elementi considerati, si è provveduto ad effettuare una ripartizione prendendo in esame i valori delle stesse emissioni pubblicati da Giugliano (2007) che riporta i fattori di emissione per alcuni inceneritori di tipologia simile a quello del presente studio.

Il quadro emissivo è stato inoltre integrato con altre sostanze riportate nel medesimo studio come specificato in Tab. 5.3.5. Con riferimento alla combustione ed al trattamento dei fumi corrispondenti ad 1 kg di rifiuto in ingresso al termovalorizzatore, nel modello LCA sono stati inserite le emissioni di Tabella 5.3.5.

Ad eccezione delle emissioni di CO₂ di origine fossile e biogenica, riportate nella Tabella 5.3.6, il quadro emissivo è stato mantenuto costante in tutti gli scenari. E' infatti accettabile ritenere che le emissioni di Tabella 5.3.5 dipendano più dall'impianto di depurazione dei fumi che dalla composizione merceologica del rifiuto.

Tab. 5.3.5. – Emissioni in aria da termovalorizzazione (escluso CO₂)
(per 1 kg di RSU input - Fonte: TRM)

Emissioni in aria	Quantità	U.d.m.
Acido Cloridrico	31,1	mg
Acido Fluoridrico	3,11	mg
Ammoniaca	12 ⁽¹⁾	mg
Antimonio	0,13	mg
Arsenico	0,13	mg
Cadmio	0,311	mg
Cobalto	0,03	mg
Cromo VI	0,15	mg
Diossine	0,62	ng
Idrocarburi policiclici aromatici	0,062	mg
Manganese	0,28	mg
Mercurio	0,31	mg
Monossido di Carbonio	311	mg
Nichel	0,13	mg
Ossidi di azoto	435,4	mg
Ossido nitroso	12 ⁽¹⁾	mg
Ossidi di zolfo	62,2	mg
Piombo	1,62	mg
Polveri	31,1	mg
PM 10	12 ⁽¹⁾	mg
Rame	0,47	mg
Selenio	0,00724 ⁽¹⁾	mg
Stagno	0,0965 ⁽¹⁾	mg
Vanadio	0,18	mg
VOC	31,11	mg
Zinco	1,94 ⁽¹⁾	mg

⁽¹⁾ Fonte: Giugliano (2007)

La Tabella 5.3.6 riporta il quadro emissivo della CO₂ di origine fossile e biogenica al variare della composizione dei rifiuti nei quattro scenari. Tali valori sono stati ottenuti combinando le composizioni merceologiche di Tabella 2.1 con i coefficienti di rimozione al vaglio e le indicazioni riportate nelle Tabelle 5.3.3 e 5.3.4 ed il contenuto in carbonio fossile e biogenico delle diverse classi merceologiche riportati da Federambiente (2002).

Tab. 5.3.6. – Emissioni di CO₂ da termovalorizzazione (Fonte: elaborazione su dati Federambiente 2002)

	CO ₂ Totale	CO ₂ Biogenica	CO ₂ Fossile
	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Scenario 1A	1,281	0,728	0,553
Scenario 1B	1,469	0,821	0,648
Scenario 2A	1,296	0,609	0,688
Scenario 2B	1,538	0,666	0,872

Reagenti, additivi ed energia per il funzionamento del termocombustore

In Tabella 5.3.7. sono riportati i dati di progetto TRM relativi alle sostanze e all'energia necessari al funzionamento dell'impianto. Tali dati, comprensivi dei consumi di acqua ed additivi, nonché delle sostanze utilizzate come reagenti nel trattamento fumi e delle sostanze utilizzate per l'inertizzazione delle ceneri sono esplicitati in relazione al trattamento di un kg di rifiuto solido urbano in ingresso. Le sostanze di Tab. 5.3.7 sono mediamente trasportate lungo una distanza di 200 km. I dati si intendono comprensivi delle 3 linee.

Tab. 5.3.7. – *Quantitativi di sostanze ed energia necessari al funzionamento dell'impianto di termovalorizzazione (per 1 kg di RSU input - Fonte: TRM)*

Materiali/Energia	Quantità	U.d.m.
Acqua Industriale	1,77	kg
Ammoniaca	3,06	g
Bicarbonato di sodio	17,82	g
Carbone attivo	0,6	g
Cemento	20	g
Bentonite	0,4	g
Silicato di sodio	1	g
Additivi per acqua (ammine quaternarie)	1,78	g
Gas Naturale	0,00273	m ³

I dati di inventario relativi alla produzione di materiali ed energia sono del database Ecoinvent 2.

Costruzione del termocombustore

In Tabella 5.3.8. sono riportati i principali materiali utilizzati nella costruzione del termocombustore. I dati inseriti nel modello LCA sono limitati ad acciaio e calcestruzzo, come riportato in Giugliano (2007) e sono riferiti al kg di rifiuto trattato.

Tab. 5.3.8. – *Quantitativo di materiali necessari alla costruzione dell'impianto di termovalorizzazione (per 1 kg di RSU input - Fonte: Giugliano, 2007)*

Materiali	Quantità	U.d.m.
Acciaio	15	g
Calcestruzzo	20	g

I dati di inventario relativi alla produzione di acciaio e calcestruzzo sono del database Ecoinvent 2.

Trattamento finale dei residui

Nel modello LCA sono stati considerati i trattamenti finali delle scorie di fondo (22%RSU) e delle ceneri inertizzate (4%RSU), nonché il trattamento delle acque reflue (blow-down). Dopo il trasporto lungo una distanza di 40 km le scorie pesanti sono collocate in una discarica per rifiuti speciali non pericolosi (descritta nel paragrafo dedicato alle discariche) e le ceneri inertizzate sono collocate in una discarica per rifiuti pericolosi (*Disposal, average incineration residue* di Ecoinvent 2). Per le acque reflue (0,34 l/kg RSU) è stato considerato il trattamento *Treatment, sewage, to wastewater treatment* di Ecoinvent 2.

Produzione di elettricità e calore e recupero metalli

In base ai dati forniti da TRM come media stagionale tra l'assetto cogenerativo e l'assetto solo elettrico, nel modello LCA sono stati considerati i rendimenti di produzione di energia elettrica e calore per teleriscaldamento, al netto degli autoconsumi.

In base ai dati TRM, è stata considerata la produzione di 300'000 MWh/a di energia elettrica e 140'000 MWh/a di energia termica, partendo da 421'000 t di rifiuti con pci di 11 MJ/kg, questo corrisponde ad un rendimento medio annuo del 23% per la produzione di elettricità e dell'11% per quel che riguarda la produzione di calore. Tali rendimenti sono stati mantenuti costanti per tutti gli scenari analizzati, adattando dunque la quantità di energia prodotta (impatto evitato) in funzione del pci del rifiuto in ingresso.

Sulla base di tali rendimenti e del potere calorifico del rifiuto avviato all'impianto nei 4 scenari analizzati, sono stati ricavati i quantitativi di energia elettrica e termica prodotti (Tabella 5.3.9.), espressi per kg di rifiuto alimentato.

Si è ipotizzato che tali quantitativi corrispondano agli impatti evitati rispettivamente in seguito alla mancata produzione di energia elettrica da una centrale media (mix energetico italiano ad alta tensione) e dalla produzione di energia termica da caldaie domestiche a metano. Per quest'ultima sono stati considerate anche i rendimenti al netto delle perdite di trasporto e distribuzione (90%). Tra i prodotti evitati sono stati considerati anche il metalli (prevalentemente acciaio), recuperati dal trattamento delle scorie ed inviati a riciclaggio nella misura di 17,8 g/kg per tutti gli scenari.

Tab. 5.3.9. – Produzione di energia elettrica e termica da termovalorizzatore (per 1 kg di RSU in ingresso al termovalorizzatore - Fonte: elaborazione su dati TRM)

	RSU	FSL	rendimento elettrico	rendimento termico	elettricità evitata	en.termica evitata
	pci	pci			MJ/kg	MJ/kg
	MJ/kg	MJ/kg			MJ/kg	MJ/kg
Scenario 1A	11,8	-	23%	11%	2,72	1,30
Scenario 1B	-	13,9			3,20	1,53
Scenario 2A	12,4	-			2,85	1,36
Scenario 2B	-	15,4			3,53	1,69

Discariche

I subsystems *Discarica FOS*, *Discarica RSU non putrescibile* e *Discarica scorie incenerimento* includono i dati di inventario relativi alla costruzione della discarica, inclusa la produzione e il trasporto dei materiali (Tabella 5.3.10), l'utilizzo di acqua, energia elettrica e diesel necessari alle operazioni di conferimento del rifiuto (Tabella 5.3.11), nonché le emissioni in aria (solo FOS) ed in acqua per un orizzonte temporale di 100 anni.

Per le quantità dei materiali messi in opera nella costruzione della discarica, sono stati utilizzati i dati relativi alla discarica per RSU di Cerro Tanaro (AT) riportati in Blengini & Fantoni (2007).

Tab. 5.3.10. – Materiali relativi alla costruzione della discarica (per 1 t di rifiuto input - Fonte: Blengini & Fantoni, 2007)

Concrete not reinforced	127,4	kg
HDPE A	0,465	kg
St13 I	0,336	kg
Clay, at mine	9,93	kg
Gravel	47,1	kg
Polypropylene, granulate	1,99	kg
HDPE A	0,021	kg
Excavation, hydraulic digger	1,02	m3
Excavation, skid-steer loader	1,02	m3

Tab. 5.3.11. – Consumi energetici, di acqua e gasolio relativi allo smaltimento del rifiuto in discarica (per 1 t di rifiuto input - Fonte: Blengini & Fantoni, 2007)

Energia elettrica	1,14	kWh
Diesel	0,54	l
Acqua	2,58	l

Per quanto riguarda le emissioni, i modelli LCA dei diversi scenari fanno riferimento alle tre suddette tipologie di discarica:

- discarica per rifiuto organico stabilizzato (FOS);
- discarica per i rifiuti inerti (non putrescibili);
- discarica per scorie di fondo da incenerimento RSU.

La scelta di considerare diverse tipologie di discariche è stata dettata dalla necessità di poter distinguere le emissioni in funzione della qualità e della quantità del rifiuto. In questo modo è stato possibile attribuire emissioni (principalmente emissioni serra) in relazione alla tipologia di rifiuto conferito.

Per quel che riguarda la discarica per rifiuto organico stabilizzato, il quadro emissivo è stato desunto dal database dell'ANPA (Tabella 5.3.12) che si riferisce allo smaltimento di organico stabilizzato in una discarica per rifiuti solidi urbani con captazione del biogas e trattamento del percolato.

Si noti che la Tab. 5.3.12 riporta solo le emissioni in aria. Le emissioni in acqua, conformi a quanto riportato nel database I-LCA dell'ANPA, sono state inserite nel modello LCA, ma non sono esplicitate nel rapporto di ricerca (v. I-LCA ANPA 2000).

Poiché nel database I-LCA dell'ANPA è considerata la captazione del biogas (efficienza di captazione al 55%), sono stati conteggiati i benefici derivanti dall'energia elettrica prodotta (0,0692 MJ/kg) con modalità analoghe a quanto descritto in precedenza.

Tab. 5.3.12. – Emissioni in aria dalla discarica per rifiuto organico stabilizzato (per 1 kg di rifiuto input - Fonte: ANPA)

Ammonia	0,000692	g
Benzene	4,55E-07	g
Carbon dioxide, biogenic	71,5	g
Carbon monoxide	0,439	g
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	5,78E-10	g
Hydrogen	0,0198	g
Hydrogen chloride	0,00174	g
Methane, biogenic	5,61	g
Nitrogen oxides	0,115	g
Particulates	0,000622	g
Sulfur oxides	0,00214	g
Sulfuric acid	0,000932	g
toluene	0,000441	g
VOC, volatile organic compounds	0,0099	g
xylene	0,000178	g

Nell'inventario relativo alla discarica per RSU non putrescibili e per le scorie pesanti si sono inseriti solo i quantitativi inerenti la costruzione ed i consumi per la gestione.

6. Analisi degli impatti (LCIA)

La valutazione degli impatti è stata organizzata nei tre momenti principali:

- ✓ **analisi comparata dei 4 scenari;**
- ✓ **analisi di contributo;**
- ✓ **analisi di sensitività.**

6.1 Analisi comparata dei 4 scenari (modello LCA baseline)

Nella fase di valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment) sono stati confrontati i bilanci energetico-ambientali dei 4 scenari oggetto dello studio LCA e ritenuti rappresentativi della situazione reale.

Come evidenziato nella sezione metodologica del presente rapporto di ricerca, sono stati privilegiati gli indicatori di categoria GER (Gross Energy Requirement) e GWP100 (Global Warming Potential), poiché ritenuti senz'altro significativi per quanto riguarda il settore dei rifiuti.

Tuttavia, per non limitare l'analisi alle sole sfere dell'energia e dell'effetto serra, è stato utilizzato anche il metodo Eco-Indicator 99.

Nelle Tabella 6.1.1 e nelle Figure 6.1.1 e 6.1.2 sono mostrati i risultati restituiti dal modello con riferimento a 1 tonnellata in ingresso al sistema.

Tab. 6.1.1. – Indicatori energetici ed ambientali associati ai 4 scenari analizzati (per 1 t di rifiuto input)

Indicatore di categoria	U.d.m.	1A (52RD)	1B (52RD+TMB)	2A (65RD)	2B (65RD+TMB)
ENERGY total GER	MJ	-13.898	-12.858	-17.362	-16.497
ENERGY non-renew	MJ	-7.476	-6.499	-8.811	-8.001
ENERGY renew	MJ	-6.422	-6.359	-8.551	-8.496
GWP100total	kg CO2eq	233	142	26	-46
GWP100fossil	kg CO2eq	-156	-160	-230	-241
GWP100bio	kg CO2eq	389	302	256	195

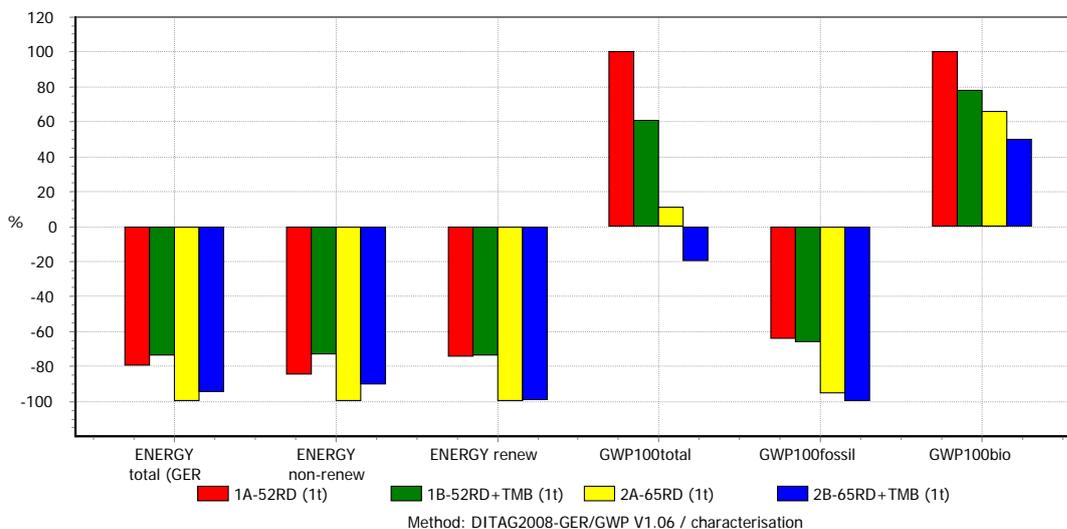


Figura 6.1.1 – Valutazione degli impatti di ciclo vita: confronto tra i 4 scenari (Energia e gas serra)

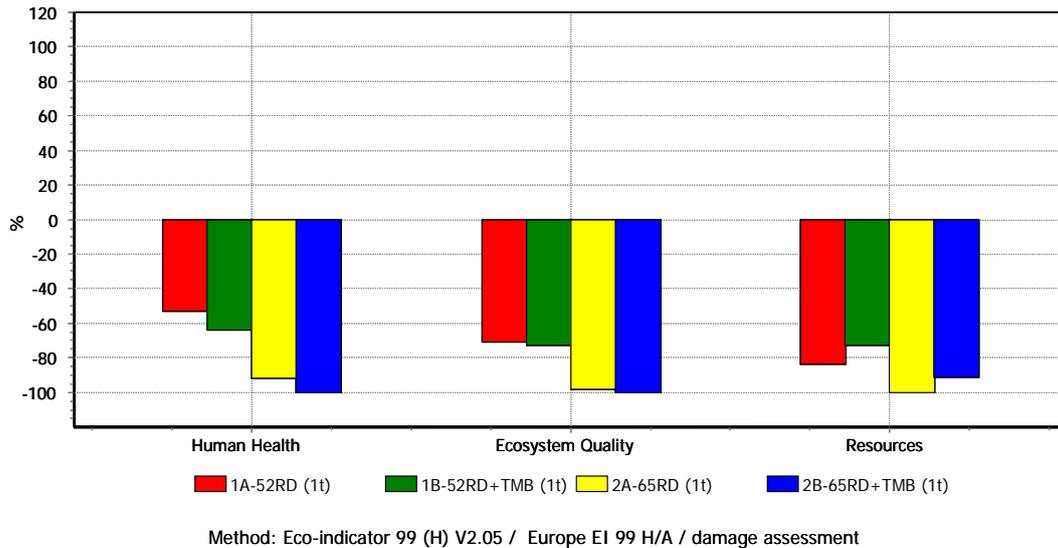


Figura 6.1.2 – Valutazione degli impatti di ciclo vita: confronto tra i 4 scenari (Ecoindicator 99 H/A)

6.2 Analisi di contributo

In questo paragrafo sono evidenziati i contributi di singoli processi o gruppi di operazioni agli indicatori energetici ed ambientali dell'intero sistema nei diversi scenari. La Fig. 6.2.1 evidenzia i contributi all'indicatore GER, mentre la Fig. 6.2.2 evidenzia i contributi al GWP totale.

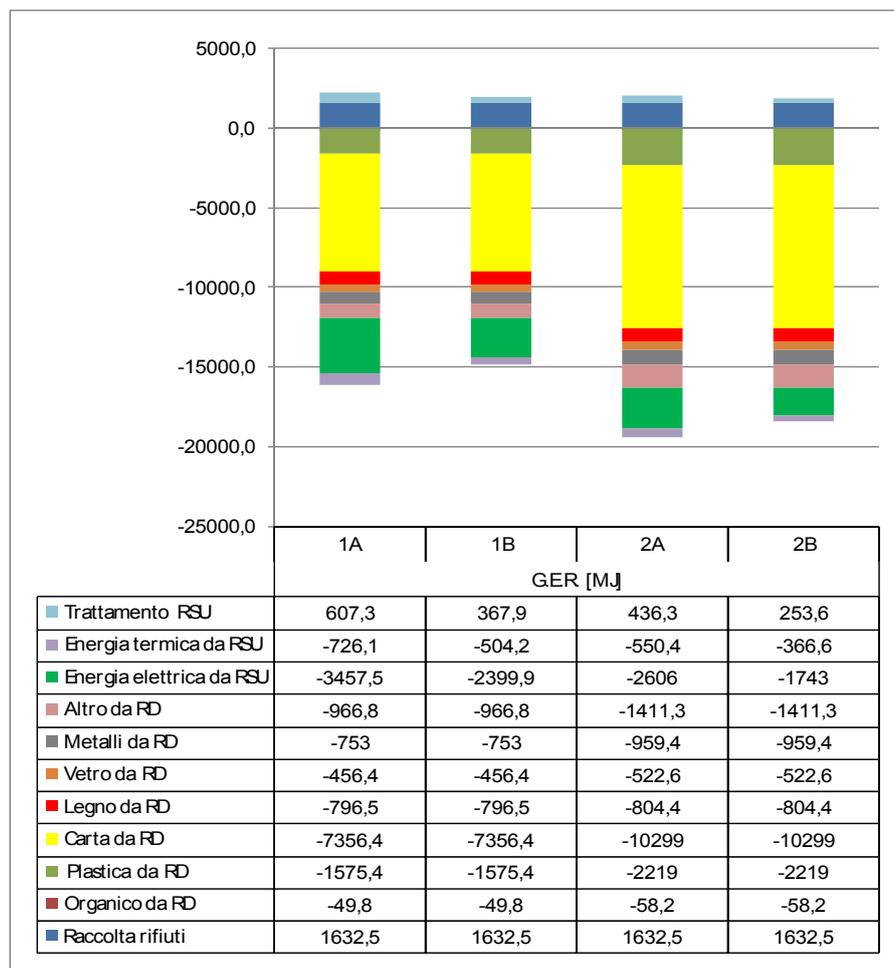


Figura 6.2.1 – Analisi del contributo agli indicatori di ciclo vita nei 4 scenari (Energia GER) dati per 1 t

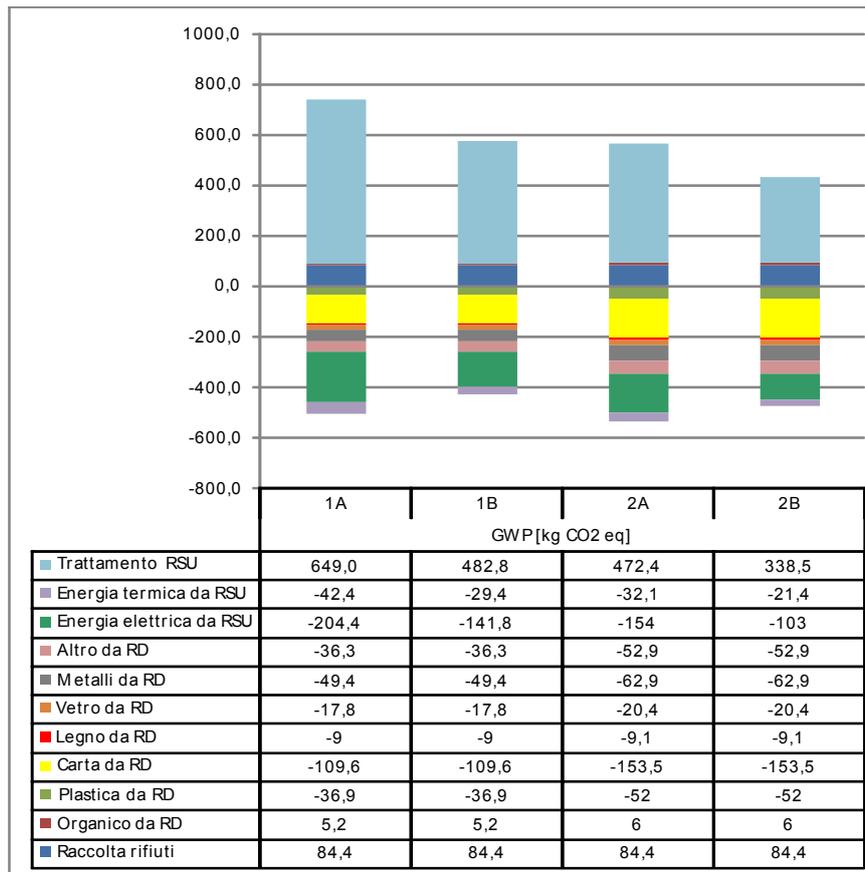


Figura 6.2.2 – Analisi del contributo agli indicatori di ciclo vita nei 4 scenari (Gas serra GWP) dati per 1 t

Si precisa, ancora una volta, che i contributi della fase di raccolta sono stati stimati in modo speditivo, avendo ipotizzato la stessa distanza di trasporto di 50 km, l'utilizzo del veicolo con i più alti carichi energetico-ambientali (autocompattatore) ed un identico utilizzo di contenitori per rifiuto differenziato ed indifferenziato. Nella successiva fase della ricerca, sarà da quantificare la variazione del contributo della fase di raccolta corrispondente al passaggio da 52% a 65% di RD legato soprattutto ai trasporti. Si sottolinea comunque che nell'attuale modello il contributo dei trasporti del rifiuto differenziato contribuisce al GER di tutto il sistema per circa il 3%.

Dopo aver analizzato il contributo dei sottosistemi principali al bilancio energetico ed ambientale dell'intero sistema integrato, sono stati presi in considerazione i bilanci energetico-ambientali interni ai singoli sottosistemi.

In primo luogo si considera il bilancio energetico-ambientale della termovalorizzazione (filiera RSU residuo) nei 4 scenari (Tab. 6.2.1.) dato dalla somma algebrica di impatti causati e impatti evitati.

Tab. 6.2.1. – Bilancio energetico e dei gas serra del processo di termovalorizzazione nei 4 scenari analizzati (per 1 t di rifiuto input)

Impact category	Unit	Inceneritore TRM (1A)	Inceneritore TRM (1B)	Inceneritore TRM (2A)	Inceneritore TRM (2B)
ENERGY total GER	MJ	-7.471	-9.013	-7.897	-10.076
ENERGY non-renew	MJ	-6.903	-8.340	-7.301	-9.331
ENERGY renew	MJ	-565	-670	-594	-743
GWP100total	kg CO2eq	840	937	831	943
GWP100fossil	kg CO2eq	112	116	221	277
GWP100bio	kg CO2eq	729	822	610	667

Si noti che il bilancio energetico al termovalorizzatore indica sempre un recupero netto di energia.



Il bilancio della CO₂ totale mostra sempre un impatto netto: questo significa che la CO₂ evitata con la produzione di energia elettrica e calore non compensa le emissioni climalteranti totali al camino. Lo stesso ragionamento vale per la CO₂ fossile e biogenica, tenuto conto dell'impostazione metodologica illustrata al capitolo 4.5.

In modo analogo a quanto è stato fatto per la filiera del RSU residuo, è stato considerato il bilancio energetico ed ambientale delle filiere di riciclaggio/trattamento dei rifiuti da RD. Si noti che i bilanci sono stati eseguiti applicando l'approccio LCA ad una filiera reale e comprendono la somma algebrica di impatti generati ed impatti evitati, tenuto conto di perdite di processo e trasporti.

Tab. 6.2.2. – Bilancio energetico e dei gas serra delle filiere dei rifiuti da RD (per 1 t di rifiuto input)

Impact category	Unit	Organico-Verde	Plastica	Carta	Legno-Tess.	Vetro	Metalli	Altro RD
ENERGY total GER	MJ	-259	-56.599	-47.939	-18.590	-8.525	-46.905	-27.078
ENERGY non-renew	MJ	-261	-56.090	-13.770	-3.559	-7.400	-39.978	-24.338
ENERGY renew	MJ	2	-509	-34.169	-15.031	-1.125	-6.927	-2.740
GWP100total	kg CO2eq	27	-1.326	-714	-211	-332	-3.075	-1.015
GWP100fossil	kg CO2eq	-163	-1.323	-714	-211	-391	-3.083	-1.016
GWP100bio	kg CO2eq	190	-3	0	0	59	8	0

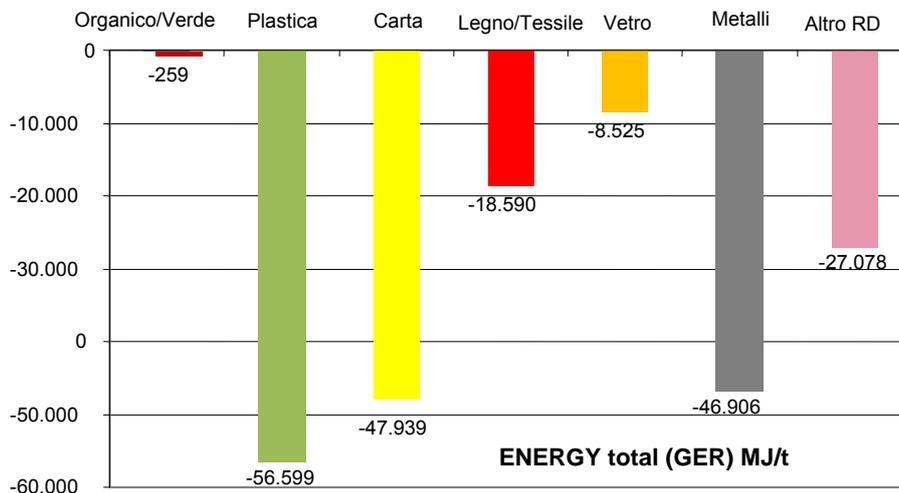


Figura 6.2.2 – Bilancio energetico delle filiere di riciclaggio/trattamento da RD - dati per 1 t input

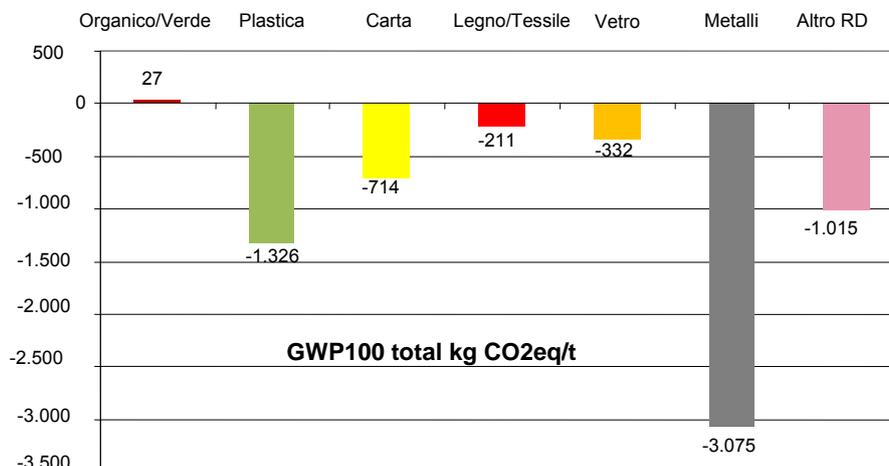


Figura 6.2.3 – Bilancio dei gas serra nelle filiere di riciclaggio/trattamento da RD - dati per 1 t input

6.3 Analisi di sensitività

Nell'analisi di sensitività sono stati inizialmente confrontati i modelli LCA di porzioni di ciclo vita (sottosistemi) "sensibili" con dati di letteratura.

La Figura 6.3.1 mostra il confronto tra gli indicatori energetici e relativi ai gas serra di tre termovalorizzatori a griglia, utilizzando diverse fonti di dati. Il modello LCA del termovalorizzatore utilizzato nel presente studio è stato messo a confronto con il modello presente nel database I-LCA dell'ANPA e con il modello illustrato in una ricerca del Politecnico di Milano (Giugliano, 2007). Per omogeneità, l'analisi comprende emissioni e consumi energetici riconducibili al processo di termovalorizzazione, ma esclude gli impatti evitati correlati alla produzione di energia.

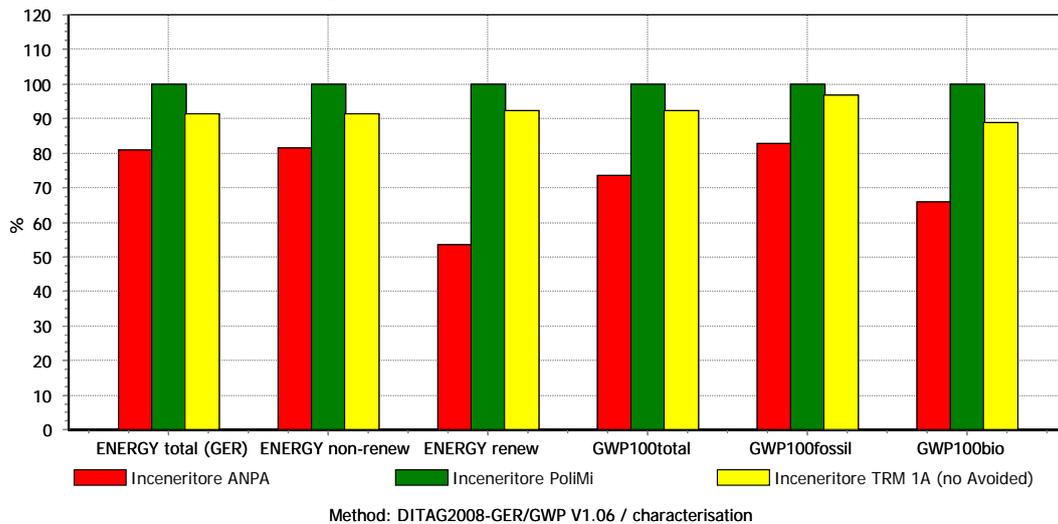


Figura 6.3.1 – Confronto tra i termovalorizzatori di ANPA, PoliMi e TRM - dati per 1 t input

Come si può vedere, il modello LCA adottato per il termovalorizzatore TRM presenta indicatori energetici e produzione di gas serra simili ai modelli basati su dati ANPA e dati di letteratura (Giugliano 2007).

I modelli LCA delle filiere di riciclaggio relativi al contesto Torinese sono poi stati confrontati con dati di letteratura (Grosso et al. 2007) riferibili ad impianti medi rappresentativi del nord Italia.

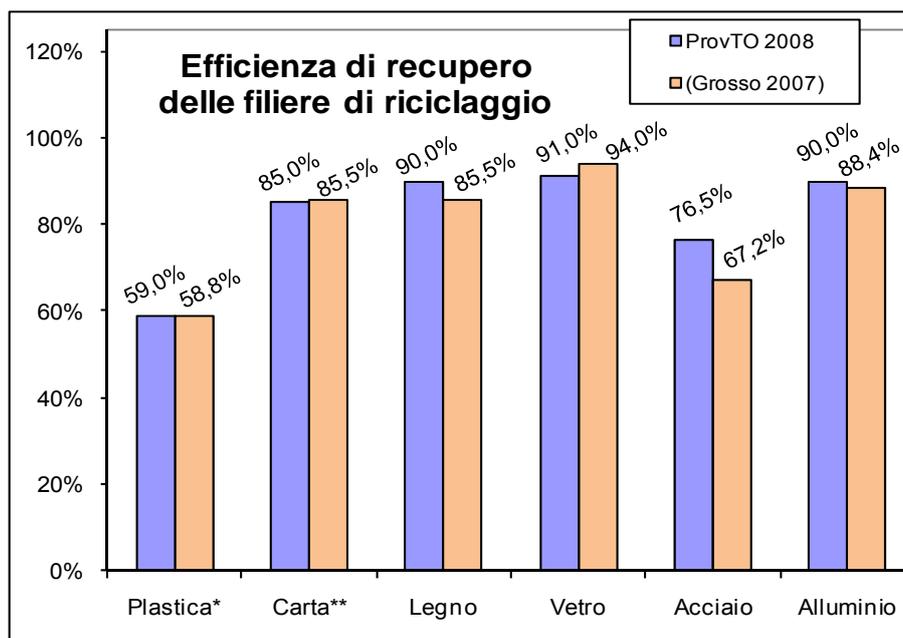


Figura 6.3.2 – Efficienza di recupero delle filiere di riciclaggio – Confronto tra i dati del modello e dati di letteratura (Grosso et al. 2007) - * solo riciclaggio plastica, ** carta 100% TMP

Le Fig. 6.3.2, 6.3.3 e 6.3.4 si riferiscono rispettivamente alle rese effettive di recupero delle filiere, rendimento energetico netto di filiera e risparmio netto di gas serra.

Si noti che per rendere gli studi omogenei, e quindi confrontabili, nella filiera della plastica è stato considerato solo il riciclaggio (è stata esclusa la produzione di CDR), mentre nel riciclaggio della carta è stata considerata l'evitata produzione di pasta a base legno TMP.

Anche per quanto riguarda i modelli dei riciclaggi non ci sono differenze sostanziali rispetto ai dati di letteratura.

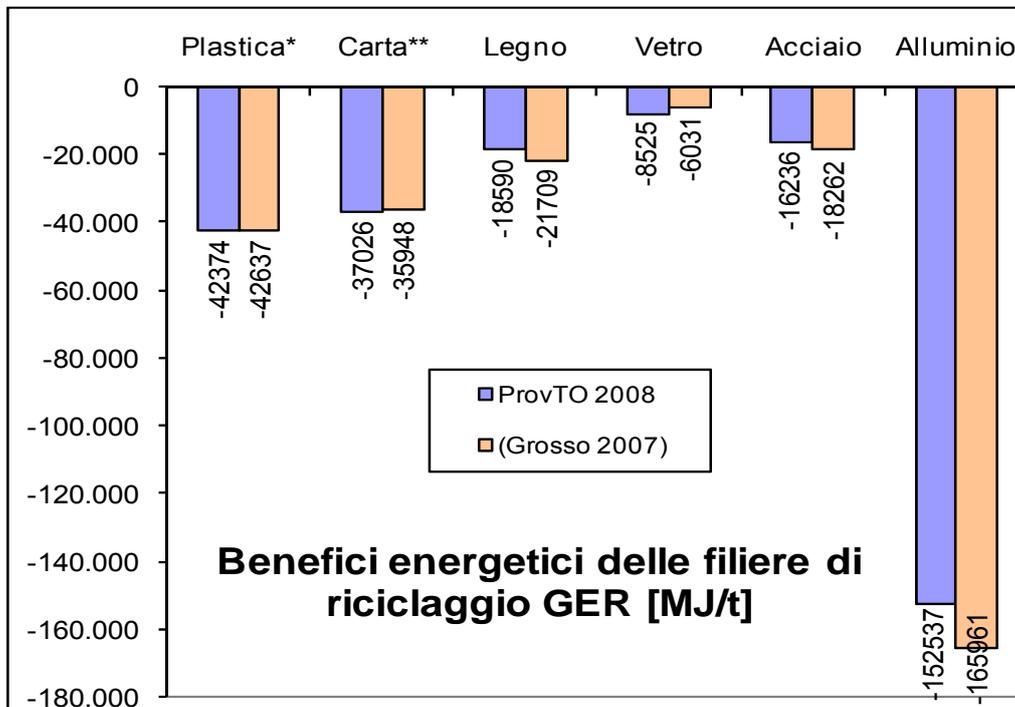


Figura 6.3.3 – Benefici energetici delle filiere di riciclaggio in termini di GER [MJ/t] – Confronto tra i dati del modello e dati di letteratura (Grosso et al. 2007) - * solo riciclaggio plastica, ** carta 100% TMP

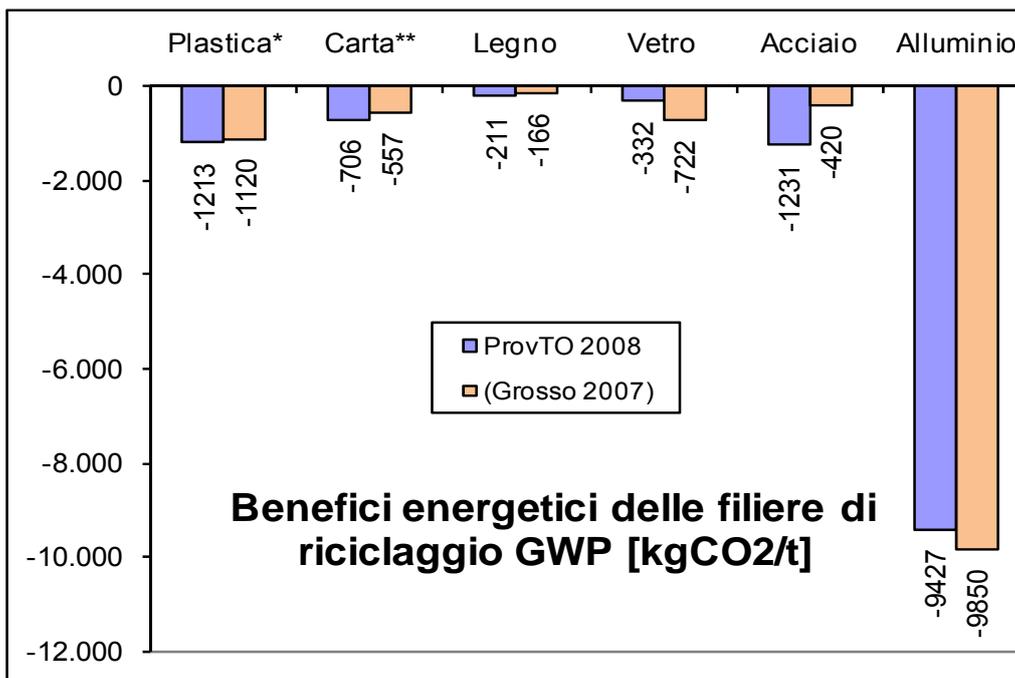


Figura 6.3.4 – Benefici energetici delle filiere di riciclaggio in termini di GWP [kgCO2/t] – Confronto tra i dati del modello e dati di letteratura (Grosso et al. 2007) - * solo riciclaggio plastica, ** carta 100% TMP

Poiché i modelli della termovalorizzazione e delle filiere di riciclaggio possono essere, in questa fase, ritenuti affidabili con un ragionevole livello di confidenza, l'analisi di sensitività è stata indirizzata su altri elementi del modello LCA ritenuti sensibili: il pre-trattamento e la possibile destinazione del sottovaglio.

Scenario di sensitività N.1 (coefficienti di rimozione al pre-trattamento)

Nel primo scenario di sensitività sono stati utilizzati i coefficienti di rimozione al vaglio del pre-trattamento elaborati in collaborazione con la Provincia di Torino. Tali coefficienti di rimozione (relativi ad un vaglio molto efficiente) sono riportati in Tabella 6.3.1.

Tab. 6.3.1. – Scenario di sensitività N.1: nuovi coefficienti di rimozione al vaglio del pre-trattamento.

% rimozione	PROV-TO 12luglio
carta e cellulosici	22%
legno+verde	21%
plastica	18%
vetro e inerti	87%
metalli	87%
organico	92%

Utilizzano i nuovi coefficienti di rimozione, le % di passante al vaglio, i poteri calorifici e le emissioni di CO₂ dal termovalorizzatore sono stati ricalcolati e riportati in Tabella 6.3.2.

Tab. 6.3.2. – Scenario di sensitività N.1: nuovi coefficienti di rimozione al vaglio del pre-trattamento.

Dati Provincia di Torino	RSU pci MJ/kg	FSL pci MJ/kg	%FSL	Rendim. elettrico	Rendim. termico	elett. evitata MJ/kg	en.term. evitata MJ/kg	CO2TOT	CO2BIO	CO2 Foss
Scenario 1A	11,82		60%	23%	11%	2,72	1,30	1,281	0,728	0,553
Scenario 1B		15,6				3,59	1,72	1,615	0,861	0,754
Scenario 2A	12,41		56%			2,85	1,37	1,297	0,609	0,688
Scenario 2B		17,5				4,03	1,93	1,722	0,724	0,998

Il modello LCA è stato dunque ricalcolato ed i risultati sono riportati in Tabella 6.3.3.

Tab. 6.3.3. – Scenario sensitività N1: Impatti ambientali associati ai 4 scenari (per 1 t di rifiuto input)

Indicatore di categoria	U.d.m.	1A (52RD)	1B-S1 (52RD+TMB)	2A (65RD)	2B-S1 (65RD+TMB)
ENERGY total GER	MJ	-13.898	-13.265	-17.362	-16.881
ENERGY non-renew	MJ	-7.476	-6.878	-8.811	-8.358
ENERGY renew	MJ	-6.422	-6.387	-8.551	-8.523
GWP100total	kg CO2eq	233	166	26	-25
GWP100fossil	kg CO2eq	-156	-151	-230	-234
GWP100bio	kg CO2eq	389	317	256	209

Scenario di sensitività N.2 (TMB e captazione biogas discarica non efficienti)

Nel secondo scenario di sensitività è stata considerata simultaneamente l'eventualità di un processo di biostabilizzazione inefficiente (efficienza ridotta: produzione 50% FOS e 50% di organico non stabilizzato) ed un impianto di captazione del biogas dalla discarica inefficiente (efficienza di captazione ridotta dal 55% al 27;5%).

Questo scenario, considerato pessimistico, ha condotto ai risultati riportati in Tabella 6.3.4.

Tab. 6.3.4. – Scenario sensitività 2: Impatti ambientali associati ai 4 scenari (per 1 t di rifiuto input)

Indicatore di categoria	U.d.m.	1A (52RD)	1B-S2 (52RD+TMB-KO+ DISCARICA-KO)	2A (65RD)	2B-S2 (65RD+TMB-KO+ DISCARICA-KO)
ENERGY total GER	MJ	-13.898	-12.873	-17.362	-16.509
ENERGY non-renew	MJ	-7.476	-6.512	-8.811	-8.012
ENERGY renew	MJ	-6.422	-6.361	-8.551	-8.497
GWP100total	kg CO2eq	233	208	26	7
GWP100fossil	kg CO2eq	-156	-93	-230	-186
GWP100bio	kg CO2eq	389	301	256	193

Scenario di sensitività N.3 (digestione anaerobica del sottovaglio e smaltimento FOS in discarica)

Per coerenza con l'approccio scientifico LCA, è stata considerata una destinazione alternativa del sottovaglio in uscita dall'impianto di preselezione meccanica con recupero energetico.

Questa eventualità è infatti prevista nelle BAT Europee, anche se comporta complicazioni di tipo gestionale che meriterebbero un approfondimento attraverso un'analisi ingegneristica di fattibilità.

Tale estensione del modello LCA, predisposta in via preliminare nell'ambito della presente ricerca, in attesa di sviluppi futuri e di una migliore definizione di fattibilità del sistema e di una più precisa definizione dei parametri numerici, è stata basata sull'utilizzo del subsystem *Digestione anaerobica FORSU* descritto nel capitolo 5.2, ovviamente con le opportune modifiche.

Dopo il processo di digestione anaerobica del sottovaglio in uscita dall'impianto di pre-selezione meccanica, segue il trattamento di stabilizzazione aerobica ed il compost prodotto viene collocato a discarica (discarica controllata FORSU). Nel modello LCA non sono ovviamente conteggiati i benefici derivanti dall'evitata produzione di fertilizzanti chimici in quanto il compost non può essere utilizzato in agricoltura. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 6.3.5.

Tab. 6.3.5. – Scenario sensitività 3: Impatti ambientali associati ai 4 scenari (per 1 t di rifiuto input)

Indicatore di categoria	U.d.m.	1A (52RD)	1B-S3 (52RD+TMB+ DIGESTIONE)	2A (65RD)	2B-S3 (65RD+TMB+ DIGESTIONE)
ENERGY total GER	MJ	-13.898	-13.698	-17.362	-17.224
ENERGY non-renew	MJ	-7.476	-7.286	-8.811	-8.682
ENERGY renew	MJ	-6.422	-6.412	-8.551	-8.542
GWP100total	kg CO2eq	233	128	26	-54
GWP100fossil	kg CO2eq	-156	-211	-230	-281
GWP100bio	kg CO2eq	389	339	256	227

In sintesi, com'è possibile osservare nelle Tabelle 6.3.3-5 le variazioni degli indicatori energetico-ambientali degli scenari 1B e 2B in seguito all'analisi di sensitività è contenuta in un range ristretto. Di conseguenza, i giudizi e le osservazioni che possono essere espressi sui diversi scenari, non cambiano.

In ulteriori ricerche, potrebbe essere presa in considerazione l'ipotesi di non pieno utilizzo dell'energia termica per il teleriscaldamento, dovuta, ad esempio, a problemi di distribuzione (il contributo del teleriscaldamento è già stato evidenziato in figura 6.2.1. e 6.2.2).

Allo stesso modo, potrà essere studiata, in una fase successiva della ricerca, la possibilità di reimpiego delle scorie da incenerimento come materiale da costruzione. Questo comporterebbe una conseguente riduzione del fabbisogno di discarica.

7. Stima fabbisogni impiantistici e di discarica ed analisi economica

Per la stima dei fabbisogni impiantistici e di discarica e per l'analisi economica speditiva è stato creato un modello LCC (Life Cycle Costing) utilizzando le potenzialità dell'applicazione software SimaPro.

Tale modello LCC consente di rilevare automaticamente dal modello LCA dei vari scenari il fabbisogno di discarica, nonché il fabbisogno impiantistico per il pre-trattamento del RSU e per la termovalorizzazione del RSU. I fabbisogni sono dettagliati per tipologia e racchiudono i contributi derivanti da tutte le filiere e sottofilieri dei rifiuti. Si noti che il modello LCC associa in modo automatico, sia ai flussi principali dei rifiuti, sia agli scarti di processo, il relativo fabbisogno di smaltimento finale.

Nel secondo livello del modello LCC, è possibile assegnare ai fabbisogni impiantistici e di discarica i relativi costi unitari (per tonnellata di rifiuto trattato/conferito), comprensivi di ammortamenti e costi di esercizio.

I costi utilizzati nel modello LCC sono riportati in Tabella 7.1 e sono stati comunicati dalla Provincia di Torino, la quale ha proceduto ad una valutazione in coerenza con le tariffe e le condizioni di mercato a livello locale, ad eccezione del costo di pre-trattamento che è invece stato stimato dagli autori in base a dati di letteratura.

E' possibile variare con pochi e semplici passaggi nel software SimaPro i costi unitari in modo da ottenere diverse simulazioni, utili per valutazioni future ed approfondimenti.

Tab. 7.1. – Costi unitari per smaltimento in discarica, pre-trattamento e termovalorizzazione utilizzati nell'analisi dei costi (per 1 t di rifiuto input)

Smaltimento in discarica per rifiuti pericolosi (ceneri)	180 Euro/t
Smaltimento in discarica per rifiuti no pericolosi (scorie)	90 Euro/t
Smaltimento in discarica per rifiuti non pericolosi (FOS da TMB e RS da trattamento dei materiali della RD)	110 Euro/t
Trattamento meccanico-biologico	48 Euro/t
Incenerimento	75 Euro/t

Oltre alla stima automatica dei fabbisogni (Tab. 7.2), l'applicativo LCC consente quindi la valutazione dei costi di discarica, pre-trattamento e termovalorizzazione riferiti all'intero sistema dei rifiuti (Tab. 7.4).

In tal modo, è possibile stimare con buona approssimazione la differenza tra i costi di trattamento del RSU residuo e degli smaltimenti in discarica dello scenario definito nel PPGR (1A) e i costi degli scenari alternativi oggetto dell'analisi.

La differenza di costi indica il budget disponibile per attuare le politiche di incentivo della RD dal 52% al 65% e coprire il conseguente aumento di costi di raccolta. Resta da verificare in una fase successiva della ricerca se questo budget è sufficiente a coprire i nuovi costi.

Tab. 7.2 – Stima del fabbisogno annuale di discarica, di potenzialità di pre-trattamento e termovalorizzazione nella Provincia di Torino (ricavati dal modello SimaPro)

Fabbisogni impianti/discariche	Unit	1A-52RD	1B-52RD+TMB	2A-65%RD	2B-65RD+TMB
Fabbisogno Discarica Ceneri	tx1000	24	14	16	9
Fabbisogno Discarica Scorie	tx1000	133	79	92	49
Fabbisogno Discarica RSA da scarti RD	tx1000	75	75	91	91
Fabbisogno Discarica FOS da TMB	tx1000	0	159	0	123
<i>Discarica totale</i>	<i>tx1000</i>	<i>232</i>	<i>327</i>	<i>199</i>	<i>272</i>
Fabbisogno Inceneritore	tx1000	603	356	414	224
Fabbisogno TMB	tx1000	0	603	0	414

Le Tabelle 7.2 e 7.4 riportano la sintesi delle stime effettuate, basate sui dati disponibili, integrate con i quantitativi di RSA indicati in Tabella 7.3.

Tab. 7.3 – Altri fabbisogni annuali di smaltimento RSA (dati Provincia di Torino/PPGR)

Fanghi di depurazione delle acque reflue	tx1000	75
RSA assimilabili ai RSU*	tx1000	80

* i fabbisogni di smaltimento degli RSA provenienti dalle filiere di valorizzazione delle RD sono stati conteggiati nel modello LCA come scarti generati nelle diverse filiere, in corrispondenza del processo che li genera.

Tab. 7.4 – Stima dei costi per smaltimento a discarica, pre-trattamento e termovalorizzazione nella Provincia di Torino (valori riferiti all'intero sistema provinciale)

Costi di smaltimento TOTALI	Unit	1A-52RD	1B-52RD+TMB	2A-65%RD	2B-65RD+TMB
Totale	Eurox1000	69.689	91.015	52.225	66.263
Discarica Ceneri	Eurox1000	4.235	2.498	2.908	1.571
Discarica Scorie	Eurox1000	11.998	7.079	8.241	4.450
Discarica RSA da scarti RD	Eurox1000	8.213	8.298	10.003	10.061
Discarica FOS da TMB	Eurox1000	0	17.491	0	13.515
Inceneritore	Eurox1000	45.243	26.693	31.073	16.780
TMB	Eurox1000	0	28.955	0	19.887

Utilizzando i valori riportati nella simulazione di tab. 7.4 è stato possibile valutare la differenza in termini di costi di smaltimento finale dei RSU e degli scarti provenienti dalla valorizzazione della raccolta differenziata. La Tabella 7.5 riporta dunque una prima valutazione dei maggiori costi dello scenario 2B rispetto al 2A, riconducibile alla presenza del pre-trattamento (colonna 1). Sono altresì evidenziate le risorse finanziarie che si renderebbero disponibili per il passaggio da un sistema con RD al 52% e produzione di rifiuti di 1.260.000 t/a ad un sistema con RD al 65% e produzione complessiva dei rifiuti a 1.203.000 t/a, nel caso dell'incenerimento diretto del rifiuto residuo (colonna 2) e nel caso del pre-trattamento (colonna 3).

Tab. 7.5 – Confronto tra i costi di smaltimento finale di RSU e scarti RD tra diversi scenari (Euro x 1000)

maggior costo TMB	minor costo* da RD52 a 65	minor costo* da RD52 a 65
(a parità di RD65%)	senza TMB	con TMB
14.038	17.463	3.425
* rispetto allo scenario PPGR (1A)		

Si precisa che le stime dei costi complessivi sono state effettuate utilizzando i costi unitari comunicati, ma il modello LCC rende possibile ottenere automaticamente nuove stime usando costi unitari differenti.

Deve poi essere ancora una volta ricordato che occorre individuare una collocazione di smaltimento ai fanghi di depurazione che, a causa delle limitate risorse, soprattutto di tempo, non sono state incluse nella presente ricerca. Si precisa tuttavia che da un punto di vista energetico ed ambientale la destinazione dei fanghi costituisce un elemento invariabile nei vari scenari finora analizzati, che non modifica le conclusioni e le informazioni che è stato possibile trarre dal presente studio. Diverso è invece il ragionamento per quanto riguarda la disponibilità impiantistica. Si tratterà, una volta individuata la tipologia di smaltimento più idonea per i fanghi da depurazione, di verificare la disponibilità impiantistica esistente o di crearne di nuova.

Resta aperta, e da verificare in una fase successiva della ricerca, la possibilità di reimpiego delle scorie da incenerimento come materiale da costruzione. Questo comporterebbe una notevole riduzione del fabbisogno di discarica, con prospettive certamente interessanti.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

L'analisi dei risultati di uno studio LCA (Life Cycle Assessment) esteso all'intero sistema integrato dei rifiuti RSU della Provincia di Torino non può che essere articolata, se si vuole davvero cercare di comprenderne la complessità, mettendo in evidenza luci ed ombre. Né le conclusioni possono essere liquidate con poche battute, accogliendo o respingendo senza ulteriore discussione uno degli scenari alternativi oggetto dello studio.

La metodologia LCA, se utilizzata in modo rigoroso ed applicata in modo articolato e sistematico a tutti gli elementi del sistema integrato dei rifiuti, permette infatti di gestire l'enorme mole di dati e di informazioni che caratterizzano un sistema complesso, ottenendo risultati utili, e soprattutto oggettivi, verso obiettivi efficaci e sostenibili di pianificazione e gestione.

Quel che spesso accade, è che le conseguenze energetiche ed ambientali del ciclo di vita dei rifiuti cadono, in larga parte, all'esterno dei confini fisici degli impianti di trattamento/smaltimento, finendo fuori del controllo diretto dei gestori.

Solitamente, operatori e gestori non riescono a governare quel che accade prima del conferimento presso gli impianti o a valle nelle filiere di trattamento/valorizzazione. Analogamente, può accadere che soluzioni che portano vantaggi e/o benefici ambientali limitatamente ad un elemento del sistema integrato siano causa di guai peggiori in altri anelli della stessa filiera o in una filiera inter-dipendente.

L'utilizzo di una BAT, per esempio, può creare l'illusione di aver risolto in modo ambientalmente ed energeticamente sostenibile il problema dello smaltimento dei rifiuti, quando invece le maggiori conseguenze energetiche ed ambientali non sono più controllabili poiché esterne ai confini fisici degli impianti.

Senza l'approccio LCA e un'opportuna e rigorosa estensione dei confini dell'analisi (a tutto il sistema integrato e a tutto il ciclo di vita) il gestore può solo cercare di limitare i danni una volta che i rifiuti hanno varcato la soglia d'ingresso degli impianti, quando la situazione è ormai compromessa.

Uno studio LCA è un buon punto di partenza, anche se è complesso e relativamente dispendioso, ma deve essere condotto in modo scientificamente rigoroso se si vogliono avere risultati oggettivi.

In Italia l'impiego della LCA nel settore dei rifiuti non è ancora una pratica così diffusa come in molti altri paesi dell'Unione Europea. Com'è noto, la decisione finale sulla gestione dei rifiuti è prerogativa del decisore politico che ancora poco conosce ed apprezza gli strumenti della LCA e basa le scelte più su parametri di natura tecnico-impiantistica tarati su obiettivi e contesti ristretti e su esigenze di budget piuttosto che su obiettivi di ottimizzazione energetico-ambientale di sistema.

E' anche responsabilità degli esperti nel settore LCA lavorare fianco a fianco con gli amministratori pubblici in modo da esser certi che tutti i soggetti coinvolti possano comprendere i risultati di uno studio LCA ed operino in modo da mettere in pratica i risultati.

Fatta questa doverosa premessa, i risultati della ricerca possono essere così riassunti:

Parte prima (raccolta differenziata al 52% o al 65%)

In base ai dati resi disponibili ed ai risultati ottenuti, gli scenari al 65% di raccolta differenziata (RD) risultano migliori degli scenari al 52% di RD. L'analisi LCA di filiere reali, considerando cioè dati di sistemi/impianti esistenti relativi a flussi principali, scarti, sistemi di raccolta, trasporti e processi industriali, ha evidenziato che i nuovi limiti di legge sono coerenti con i conseguenti benefici energetici ed ambientali netti ed è quindi giustificabile un ulteriore sforzo per giungere ai nuovi (ed ambiziosi) livelli di raccolta differenziata. Resta da verificare con maggiore dettaglio l'incidenza della fase di raccolta, anche se, in base ai dati finora a disposizione, il contributo risulta relativamente contenuto, benché non trascurabile e meritevole di ulteriori approfondimenti.

Sia gli indicatori energetici che quelli relativi ai gas serra sono concordi nel supportare questa prima conclusione. Negli scenari con incenerimento diretto del rifiuto indifferenziato residuo, il

miglioramento delle prestazioni energetiche complessive nel passaggio dal 52% al 65% di RD è del 25% circa, mentre il bilancio dei gas serra passa da un'emissione netta di CO₂ pari a 233 kg per tonnellata conferita ad un valore di 26 kg/t.

Negli scenari con pre-trattamento del rifiuto residuo, mentre valgono le stesse considerazioni per l'energia, la produzione di gas serra passa da impatto netto (52% RD) a beneficio netto (65%), cioè il sistema assorbe e immagazzina più anidride carbonica di quanta ne produce.

Alla stessa conclusione si giunge anche analizzando il modello LCA con il metodo Ecoindicator 99 (miglioramento medio del 35%).

Benché come evidenziato nella sezione metodologica questo indicatore ambientale aggregato non abbia la stessa oggettività degli indicatori GER e GWP e non goda del consenso assoluto da parte della comunità scientifica internazionale (anche se è tra i metodi di pesatura degli effetti ambientali più utilizzato in ambito LCA), è utile evidenziare come sia la componente legata all'*Uso delle risorse naturali*, sia quella legata alla *Salute umana*, sia quella legata alla *Qualità dell'ecosistema* sono concordi nel giustificare, da questo punto di vista, una raccolta differenziata al 65%.

Poiché i modelli LCA delle filiere di riciclaggio/valorizzazione sono stati predisposti sulla base di esperienze italiane e rappresentative della realtà Torinese e sono stati confrontati con i risultati di esperienze di ricerca analoghe rappresentative del nord Italia, si può a buona ragione ritenere che il modello LCA sia attendibile ed i vantaggi energetici ed ambientali indicati siano non sovrastimati. Semmai le già ottime prestazioni di recupero energetico ed il notevole contributo alla diminuzione dei gas serra potrebbero addirittura essere incrementate attraverso una miglior organizzazione delle raccolte differenziate e delle filiere a valle, oggi non sempre eccellenti. A titolo di esempio si consideri l'attuale basso recupero delle plastiche (circa il 40% delle plastiche da RD non viene infatti riciclato). Si ritiene possibile, anche se da verificare con ulteriori ricerche, che una riorganizzazione delle filiere di valorizzazione delle frazioni da RD possa compensare la diminuzione della qualità delle raccolte differenziate all'aumentare della percentuale complessiva di RD.

Nel contesto di un sistema con un'eccellente raccolta differenziata, l'incenerimento del rifiuto residuo ha un ruolo energetico importante. La presente ricerca ha infatti evidenziato come le prestazioni energetiche dell'incenerimento migliorino all'aumentare della RD dal 52% al 65%, anche se peggiorano gli indicatori relativi alle emissioni di gas serra. Tale giudizio vale per l'unità di RSU termovalorizzata ed anche per quanto riguarda il sistema integrato nel suo insieme.

Parte seconda (alternativa incenerimento diretto del residuo o pre-trattamento)

Il giudizio relativo all'opportunità di prevedere un pre-trattamento prima della termovalorizzazione risulta invece più controverso e i risultati dell'analisi LCA certamente meno netti rispetto a quelli precedentemente esposti.

Questo è attribuibile alla notevole incertezza dei dati resi disponibili per la ricerca. Deve essere ricordato ancora una volta che non è stata definita la tecnologia del pre-trattamento, né tantomeno i risultati che ci si attende da tale processo. È dunque logico aspettarsi che i risultati del modello LCA riflettano la minor attendibilità dei dati in ingresso, sia per quanto concerne i poteri calorifici della frazione secco leggera in uscita dal pre-trattamento, sia per quanto riguarda i bilanci di massa e quindi la ripartizione tra secco-leggero e umido.

Pur con queste limitazioni, i modelli LCA degli scenari con pre-trattamento sono stati realizzati ed analizzati. Nelle affermazioni che seguono i ragionamenti sono estesi ai soli scenari con il 65% di RD, anche se non sono sostanzialmente diversi per gli scenari con 52% di RD.

I risultati ottenuti non possono ritenersi definitivi, ma sono senz'altro utili come base di partenza per una successiva ricerca che potrà delineare migliori obiettivi di sostenibilità energetico-ambientale del sistema.



- Gli indicatori energetici evidenziano che il sistema con pre-trattamento (2B) risulta meno efficiente (-5%) di un sistema che non lo prevede (2A). Questa affermazione è legata al destino previsto per la frazione organica stabilizzata aerobicamente ed inviata in discarica. Per questo motivo è stato predisposto lo scenario di sensibilità N. 3 in cui il rifiuto umido in uscita dal pre-trattamento viene inviato al processo di digestione anaerobica con produzione e recupero di biogas. In questo scenario le prestazioni energetiche del sistema con pre-trattamento migliorano, ma la ricerca andrebbe approfondita sotto molteplici aspetti: energetico, ambientale, economico e gestionale.
- Il bilancio dei gas serra evidenzia invece come il pre-trattamento conferisca al sistema le migliori prestazioni. Tuttavia, anche questo capitolo merita ulteriori approfondimenti. Se il processo di biostabilizzazione ed il sistema di captazione del biogas dalla discarica della FOS non fossero pienamente efficienti (ipotesi pessimistica) i vantaggi in termini di gas serra ci sarebbero ancora, ma drasticamente ridotti.

Si può ancora asserire che nel caso del pre-trattamento, le prestazioni energetiche della termovalorizzazione migliorano ulteriormente (non quelle relative ai gas serra), ma solo per tonnellata di RSU trattata. Nell'ottica del sistema integrato la situazione subisce invece un peggioramento.

Se si guardano poi gli indicatori aggregati della metodologia Ecoindicator 99, si possono fare le seguenti considerazioni:

- l'indicatore relativo alla *Salute umana* suggerirebbe, pur con valori non significativamente diversi, di optare per il pre-trattamento (ma il giudizio andrebbe confermato da un'analisi più di dettaglio dei fattori di emissione);
- per quanto concerne l'indicatore sulla *Qualità dell'ecosistema* il giudizio sull'optare o meno per il pre-trattamento è sostanzialmente neutro;
- per quel che riguarda invece l'uso razionale delle *Risorse naturali* (in questo caso essenzialmente combustibili fossili) l'ago della bilancia pende a favore dell'incenerimento diretto del RSU residuo (tale giudizio è condizionato dall'effettiva possibilità di recupero energetico dalla frazione umida in uscita dal pre-trattamento).

La questione pretrattamento o incenerimento diretto del rifiuto residuo (che deve essere veramente "residuo" poiché il recupero energetico e i benefici ambientali dei riciclaggi sono certamente maggiori) non può dunque essere decisa solo su basi energetiche ed ambientali, ma devono essere anche interessate le sfere economiche, gestionali e sociali. In particolare, per quanto riguarda l'aspetto gestionale, si deve considerare la complessità di conduzione di sistemi biologici, l'effettiva destinabilità del calore residuo per la termovalorizzazione (su questo punto potrebbe essere opportuno un ulteriore approfondimento), la reperibilità di destini finali per la frazione organica stabilizzata, etc.

Non deve poi essere dimenticato che l'attendibilità dell'analisi LCA diminuisce notevolmente quando la scala di valutazione degli impatti passa dal livello globale/regionale a quello locale. Resta dunque aperta la questione relativa all'analisi dei meccanismi di dispersione locale degli inquinanti, che debbono essere valutati (ed in quota parte lo sono già stati) per verificare la compatibilità.

Aspetti economici e considerazioni finali

L'analisi economica ha evidenziato i fabbisogni impiantistici per lo smaltimento finale del RSU residuo e degli scarti provenienti dalle filiere di valorizzazione della raccolta differenziata.

Utilizzando le elaborazioni dal modello LCA-LCC (Life Cycle Costing), unitamente ai costi unitari di smaltimento in discarica, di pre-trattamento e di termovalorizzazione, è stato possibile stimare le

risorse economiche che si renderebbero disponibili per il passaggio della raccolta differenziata dal 52% al 65%, nell'ipotesi di crescita nulla del quantitativo totale dei rifiuti in Provincia di Torino: circa 17 milioni di euro all'anno per uno schema senza pre-trattamento e circa 3 milioni di euro all'anno per uno schema con pre-trattamento. Tali risorse rappresentano una prima stima del budget disponibile per attuare le politiche di incentivo della RD dal 52% al 65% e coprire il conseguente aumento di costi di raccolta. Resta da verificare in una fase successiva della ricerca se questo budget è sufficiente a coprire i nuovi costi.

Per tutte queste articolate motivazioni, mentre si ritiene che i risultati acquisiti possano essere immediatamente utile al committente, si suggerisce di continuare la ricerca andando a studiare più in dettaglio alcuni aspetti chiave e definendo meglio tecnologie ed obiettivi.

Programma di ricerca per le fasi successive

In un'eventuale ed auspicata seconda fase della ricerca è possibile prevedere fin d'ora quali potrebbero essere alcuni tra gli aspetti/elementi importanti che andrebbero approfonditi.

- Approfondimento dell'analisi LCA e completamento del modello attraverso lo studio di dettaglio della fase di raccolta del rifiuto in funzione del livello di raccolta differenziata.
- Approfondimento dell'analisi LCA e completamento del modello attraverso lo studio di dettaglio della miglior opzione di smaltimento finale dei fanghi da depurazione delle acque.
- Integrazione del modello di ciclo di vita dei rifiuti, andando a completare l'analisi con le fasi precedenti alla produzione del rifiuto, anche avvalendosi di dati statistici. Questo permetterebbe, tra l'altro, di valutare dell'efficacia delle politiche di riduzione da un punto di vista energetico ed ambientale.
- Estensione del modello LCA includendo la produzione di CDR e successivo utilizzo in impianti di co-combustione (obiettivo con finalità di ricerca solo parzialmente applicabili nel contesto della Provincia di Torino)
- Approfondimento di ruolo e prestazioni di eventuali impianti di pre-trattamento (non sufficientemente chiariti nel contesto del presente studio, anche a causa della mancata definizione della tecnologia da impiegare da parte del committente)
- Approfondimento dell'alternativa di recupero energetico attraverso la digestione anaerobica del sottovaglio in uscita dal pre-trattamento.
- Considerare un eventuale processo di raffinazione della frazione organica stabilizzata (FOS)
- Approfondire lo studio sulle potenzialità di re-impiego delle scorie pesanti da incenerimento come materiale da costruzione.
- Completamento del modello LCA con l'utilizzo di distribuzioni di probabilità dei parametri input e stima dell'attendibilità dei risultati con il metodo Monte Carlo.
- Approfondimento e verifica dei valori di emissioni utilizzati nella stima dell'indicatore relativo alla salute umana.

Bibliografia

- AEA, (2001), "Waste Management Options and Climate Change". Final report to the European Commission, DG Environment. <http://europa.eu.int>
- ANPA, (2000), *I-LCA Banca Dati Italiana a supporto della valutazione del ciclo di vita*. Version 2.0.
- Arena, U., Mastellone, M.L. and Perugini, F., (2003), "The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study", *Chemical Engineering Journal*/Vol. 96, pp. 207–222.
- Badino, V. and Baldo, G. (1998), *LCA Istruzioni per l'Uso*. Progetto Leonardo. Esculapio. Bologna, Italy.
- Blengini G.A. (2008) – "Applying LCA to organic waste management in Piedmont-Italy", *Management of Environmental Quality*, Vol. 19 No. 5.
- Blengini, G.A. and Fantoni, M., (2007), "LCA (Life Cycle Assessment) del sistema integrato di gestione dei rifiuti ASTI-GAIA", Rapporto di ricerca, Politecnico di Torino, Torino, 66 p.
- Boustead, I. and Hancock, G.F. (1979), *Handbook of Industrial Energy Analysis*, ISBN 0-85312-064-1, EllisHorwood, Chichester/John Wiley, New York.
- Bovea, M.D. and Powell, J.C. (2006), "Alternative scenarios to meet the demands of sustainable waste management", *Journal of Environmental Management*, Vol. 79 No. 2, pp. 115-132.
- Brimacombe, L., and P. Shonfield. (2001), *Sustainability and Steel Recycling*. International Iron and Steel Institute.
- Buttol, P., Masoni, P., Bonoli, A., Goldoni, S., Belladonna V., Cavazzuti, C. (2007), "LCA of integrated MSW management systems: Case study of the Bologna District", *Waste Management*, Vol. 27, pp.1059–1070.
- BUWAL 250, (1998), *Life cycle inventory for packagings, Volume I and II. Environmental Series No.250/I and II*, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL), Berne, Switzerland.
- Cernuschi S., Giugliano M., Grosso M., Lonati G., (2003). "Trace organics atmospheric emissions from landfill gas production and flaring". Proc. Conf. Sardinia 2003, 9th International Waste Management and Landfill Symposium; S. Margherita di Pula, Cagliari, 6-10 October 2003.
- Cotella A., (2005), "Il packaging alimentare: valutazione ambientale di alternative di impiego di contenitori per acqua minerale con metodologia LCA". Tesi di laurea. Politecnico di Torino.
- Curran, M.A. (2001), "Developing a tool for environmentally preferable purchasing", *Environmental Management and Health*, Vol. 12 No. 3, pp. 244-53.
- Ecoinvent (2007), *Life cycle inventories of production systems*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Available online at <http://www.ecoinvent.ch>.
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O. and Finnveden, G. (2007), "What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management", *Waste Management*, Vol. 27, pp. 989–996.
- Favoino, E. (2003), "Separate Collection of Biowaste, Composting and Biological Treatment of Residual Waste: Trends and Driving Forces in European Policy", *Waste Management World, Review*, Issue, July – August 2003, pp. 95-106.
- Federambiente, (2002), "Bilancio ambientale, energetico ed economico di diverse strategie per il recupero di energia nel contesto di sistemi integrati di gestione dei rifiuti solidi urbani.". A cura di Consonni S., Giugliano M. <http://www.federambiente.it/dinamiche/study.aspx?IO=1C27C8AD-2321-46B3-94C8-1AC2831A1FA8>
- Federambiente, (2005). "Bilancio ambientale, energetico ed economico del recupero di energia da rifiuti urbani mediante produzione di CDR e co-combustione in impianti non dedicati". Relazione finale Volume I: Co-combustione in impianti non dedicati; Volume II: Bilancio energetico ed ambientale della filiera "Brescia". A cura di Consonni S., Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L.
- Finnveden, G. (1999), "Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 26, pp. 173–187.
- Gentil, E., Hall, D., Thomas, B., Shiels, S. and Collins, M. (2005), "LCA tool in waste management: new features and functionalities", *Proceedings of Sardinia 2005, Tenth International landfill Symposium, CISA publisher, Cagliari*.
- Georgakellos, D.A. (2005), "Evaluation of life cycle inventory results using critical volume aggregation and polygon-based interpretation", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13, pp. 567-82.
- Georgakellos, D.A. (2006), "The use of the LCA polygon framework in waste management", *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 17 No. 4, pp. 490-507.
- Giugliano, M. (2007). "Definizione dei flussi di inquinanti atmosferici dell'attività di termovalorizzazione dei rifiuti e valutazione degli impatti con la tecnica del ciclo di vita", Rapporto di ricerca, DIIAR Sezione Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, 39 p.
- Goedkoop, M. and Spriensma, R. (1999), *The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle Impact assessment*. PRé Consultants, Amersfoort.
- Grosso, M., Rigamonti, L., Giugliano, M. and Consonni, S. (2007). "Life Cycle Assessment of MSW recycling". Proc. Conf. Sardinia 2007, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 1-5 October 2007. ISBN 978-88-6265-003-8
- Guinée, J.B. (2002), *Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards*, Kluwer Academic



Publishers, Dordrecht.

- Guinée, J.B., Huppes, G. and Heijungs, R. (2001), "Developing an LCA guide for decision support", *Environmental Management and Health*, Vol. 12 No. 3, pp. 301-11.
- Hogg, D., Baddeley, A., Gibbs, A., North, J., Curry, R., Maguire, C. (2008). Greenhouse gas balance of waste management scenarios. Report for the Greater London Authority. Eunomia Research & Consulting Ltd. Bristol, UK, 80 pp. www.eunomia.co.uk
- IPCC. (1996), Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- ISO 14040 (2006), *Environmental management: life cycle assessment: principles and guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 14044 (2006), *Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva.
- Linzner, R. and Mostbauer, P. (2005), "Composting and its impact on climate change with regard to process engineering and compost application - a case study in Vienna", *Proceedings of Sardinia 2005, Tenth International landfill Symposium*, CISA publisher, Cagliari.
- McDougall, F.R. and Hruska, J.P. (2000), "The use of life cycle inventory tools to support an integrated approach to solid waste management", *Waste Management & Research*, Vol. 18, pp. 590–594.
- Rabl, A., Benoist, A., Dron, D., Peupartier, B., Spadaro, J.V. and Zoughaib, A. (2007) "How to account for CO₂ emissions from biomass in an LCA". *International Journal of Life cycle assessment* Volume 12, Number 5, 281.
- Regione Piemonte (2005), Il recupero effettivo delle raccolte differenziate nella Provincia di Torino, (2005), http://extranet.regione.piemonte.it/ambiente/rifiuti/camp_recupero.htm
- Schleiss, K. Favoino, E. (2007), "The contribution of biological treatment to reduce GHGs", Plenary Session, ISWA Annual Conference 2006, Copenhagen.
- SEMC (2000), *MSR 1999:2 - Requirements for Environmental Product Declarations*, Swedish Environmental Management Council, Available online at <http://www.environdec.com> (last access July 2007).
- SETAC (1993), *Guidelines Life Cycle Assessment: a code of practice* – SETAC Brussell
- SimaPro 7 (2006), Pre Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands.



Allegato: Tavole grafiche – Diagramma di flusso del Ciclo di Vita formato A1

- Tav. 1 Energia GER
- Tav. 2 Gas serra GWP100