

Centro studi e ricerche MatER

Materia & Energia da Rifiuti

Progetto a tema: Digestione anaerobica

**“Bilancio energetico ed ambientale dei processi
di digestione anaerobica applicati alla FORSU”**

EXECUTIVE SUMMARY

**Ing. Mario Grosso (Responsabile)
Ingg. Chiara Nava e Roberta Testori
Ingg. Lucia Rigamonti e Federico Viganò**

Piacenza

Dicembre 2011

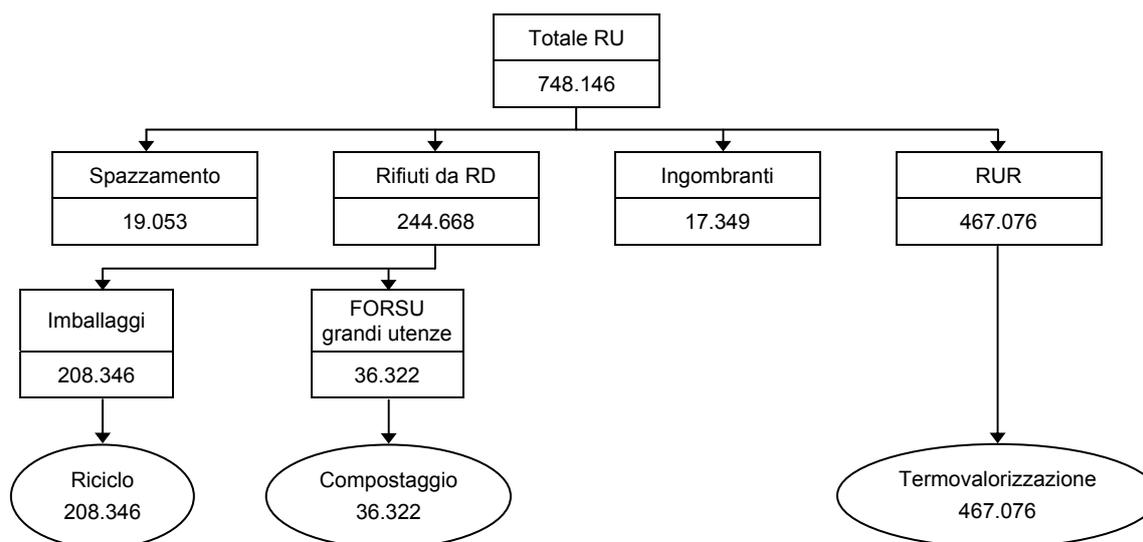
Il presente studio affronta la tematica della gestione della frazione organica da rifiuti solidi urbani (FORSU) all'interno di una realtà cittadina metropolitana, considerando come caso di studio rappresentativo il Comune di Milano. Nello specifico valuta come l'implementazione della raccolta differenziata della FORSU e il suo successivo trattamento mediante digestione anaerobica possa integrarsi all'interno del sistema di gestione dei rifiuti esistente.

Lo scopo è quello di elaborare nuovi scenari di raccolta e trattamento di tale frazione al fine di evidenziare eventuali benefici energetici ed ambientali derivanti da questa gestione alternativa.

1. Descrizione degli scenari: scenario attuale e scenari alternativi

Per l'elaborazione dello Scenario 0, che rappresenta l'attuale situazione di gestione, sono state considerate le quantità di rifiuti prodotti annualmente dal Comune di riferimento, pari a circa 750.000 t/a.

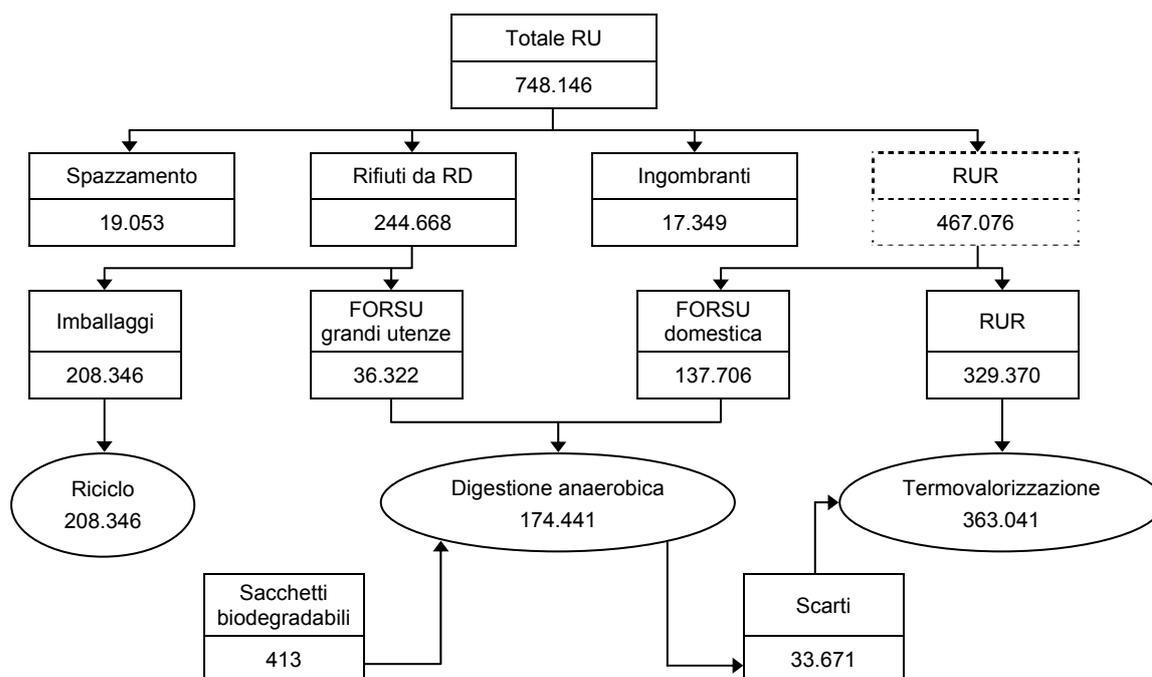
Figura 1 - Schema dei flussi di rifiuti nello Scenario 0 espressi in tonnellate all'anno (Produzione e raccolta dei rifiuti urbani – anno 2008, Provincia di Milano)



Di tale quantità, solo il 32,7% (244.668 t/a) è raccolto per via differenziata e, per quanto riguarda la frazione organica, è raccolta solo quella delle grandi utenze avviata a trattamento di compostaggio. Escludendo i rifiuti da spazzamento stradale e gli ingombranti che seguono filiere dedicate, il rifiuto urbano residuo (RUR) è inviato a termovalorizzazione. Sulla base delle analisi merceologiche, quest'ultimo flusso si compone per ben il 36% circa di materiale organico (scarti di cucina) che, se separato all'origine mediante una raccolta differenziata dedicata, può essere avviato a trattamento biologico per il recupero di materia (compost) e/o di energia (biogas). Tale pratica è peraltro incoraggiata dal Decreto 152/06 nella sua più recente riscrittura (Art. 182 ter).

Definita la necessità di operare una raccolta differenziata dell'organico domestico e inviare tale flusso ad un trattamento biologico, è stato sviluppato lo scenario alternativo di gestione (Scenario 1). Per garantire la qualità adatta alle esigenze dei processi a cui la FORSU deve essere avviata, si è individuata nella raccolta domiciliare (porta a porta) con sacchetti in materiale biodegradabile la modalità più adeguata. Per questa raccolta è stata ipotizzata una resa di intercettazione dell'organico domestico pari al 60%.

Figura 2 - Schema dei flussi di rifiuti nello Scenario 1 espressi in tonnellate all'anno

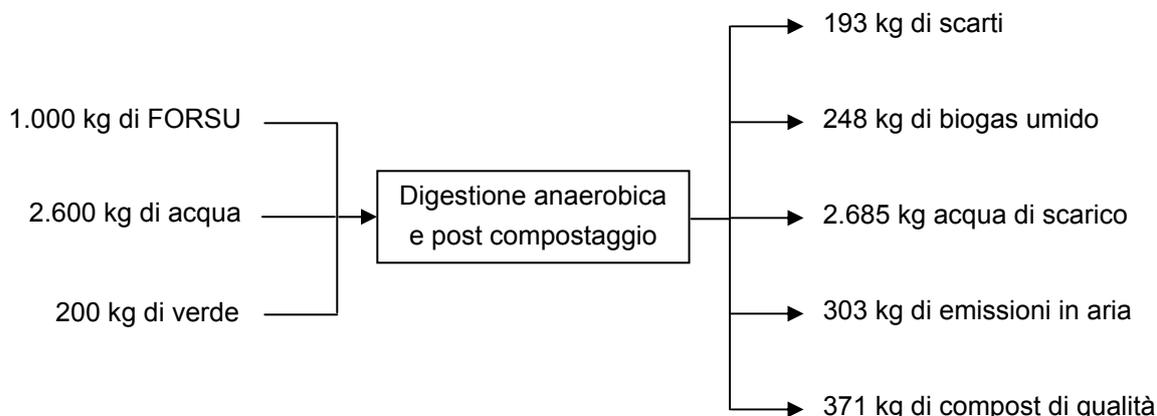


La quantità di FORSU di origine domestica sottratta al rifiuto inviato a termovalorizzazione, unitamente all'organico raccolto presso le grandi utenze, si ipotizza trattata mediante digestione anaerobica (DA) a umido, seguita da una fase di post compostaggio aerobico.

La modellizzazione del processo di DA a umido è stata effettuata mediante la valutazione del funzionamento (bilanci di massa e di energia) di impianti italiani ed europei realmente esistenti e da studi di letteratura. Tale processo, dopo un tempo di residenza nel digestore di 22 giorni, porta alla formazione di $600 \text{ m}_n^3/\text{t}_{\text{SV}}$ di biogas, costituito per circa il 60% da metano, mentre la restante parte è principalmente CO_2 . Tale flusso può essere utilizzato direttamente a fini energetici per la cogenerazione di energia elettrica e termica, oppure sottoposto a un processo di rimozione della CO_2 , denominato *upgrading*, che ne permette la trasformazione in biometano e dunque l'utilizzo in sostituzione diretta del gas naturale di origine fossile.

È stato quindi elaborato un bilancio di massa considerando la quantità annua di organico prodotto e complessivamente avviata all'impianto; lo si riporta di seguito in uno schema semplificato.

Figura 3 - Bilancio di massa dei processi di digestione anaerobica a umido e post compostaggio nello Scenario 1



In un'ottica di massima integrazione tra la situazione impiantistica esistente e quella aggiuntiva prevista, tutti gli scarti della selezione del rifiuto organico propedeutici al suo avvio a digestione anaerobica si ipotizzano conferiti all'impianto di termovalorizzazione. Infatti, da un lato tale impianto presenta una capacità aggiuntiva a causa della sottrazione del rifiuto organico dal RUR, dall'altro tali residui sono costituiti da materiale misto non riciclabile, ma dotato di buon potere calorifico.

In uscita dal processo di digestione anaerobica + post compostaggio si hanno inoltre i seguenti flussi: compost di qualità utilizzato a scopo agricolo e florovivaistico, emissioni in aria e acqua di scarico avviati a opportuni trattamenti, biogas umido successivamente sottoposto a deumidificazione e desolforazione.

Ricavata la quantità di biogas secco prodotta dal processo di DA, pari a $165 \text{ m}_n^3/\text{t}_{\text{FORSU}}$, si sono ipotizzate quattro differenti modalità di utilizzo, che definiscono quattro rispettivi sottoscenari:

- **Scenario 1A:** cogenerazione in motori a combustione interna (MCI), caratterizzati da un rendimento elettrico del 40,8% e termico del 41,7%, per la produzione di energia elettrica e termica; queste vengono immesse in rete al netto della copertura dei fabbisogni energetici del processo di DA e post compostaggio;
- **Scenario 1B:** combustione in una caldaia ausiliaria integrata al termovalorizzatore al fine di aumentare la temperatura del vapore prodotto e avviato in turbina per migliorare le prestazioni energetiche dell'impianto stesso ($\eta_{\text{EL}} = +18\%$ rispetto agli scenari A, C e D);
- **Scenario 1C:** *upgrading* a biometano ed immissione in rete in sostituzione di analoga quantità di gas naturale ($69 \text{ m}_n^3/\text{t}_{\text{FORSU}}$);
- **Scenario 1D:** *upgrading* a biometano e utilizzo per autotrazione in sostituzione di diesel ($64 \text{ m}_n^3/\text{t}_{\text{FORSU}}$).

In particolare, negli Scenari 1C e 1D è comunque previsto l'utilizzo di parte del biogas, prima dell'*upgrading*, in cogenerazione in MCI per sostenere i consumi della fase di DA e post

compostaggio (85 kWh_{EL} e 50 kWh_{TH} per t_{FORSU}), mentre nello Scenario 1B tali consumi sono sostenuti dalla termovalorizzazione.

Le operazioni di separazione della frazione organica dal rifiuto indifferenziato e di aggiunta a quest'ultimo degli scarti dai pretrattamenti della digestione anaerobica ne comportano una significativa modifica della composizione merceologica, con conseguente innalzamento del PCI (da 10,7 a 12,4 MJ/kg) e variazione delle produzioni energetiche specifiche.

2. Analisi con metodologia LCA

2.1 Metodologia e ipotesi adottate

Definiti gli scenari di interesse, si è effettuata una loro caratterizzazione di dettaglio finalizzata all'elaborazione di un'analisi energetica e ambientale completa mediante metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*).

L'unità funzionale è stata definita come la quantità complessiva di rifiuto organico e indifferenziato prodotta in un anno, pari a circa 504.000 t/a e considerata costante nei differenti scenari, di cui si considerano le intere filiere di raccolta, trattamento, recupero e smaltimento finale dei residui. L'analisi ha incluso dunque le percorrenze specifiche per la raccolta, la tipologia dei mezzi utilizzati, i bilanci completi di massa e di energia per le fasi di termovalorizzazione, compostaggio, digestione anaerobica e specifico utilizzo del biogas.

I confini del sistema racchiudono unicamente le due frazioni oggetto di studio, ovvero il rifiuto indifferenziato (RUR) e la frazione organica (da utenze domestiche e da grandi utenze); l'analisi non considera dunque la raccolta e il trattamento delle altre frazioni raccolte per via differenziata (i sei materiali da imballaggio: carta, plastica, vetro, legno, acciaio, alluminio), che viene ipotizzata costante nei differenti scenari, e come tale ininfluenza ai fini dell'implementazione di un'analisi di tipo comparativo.

Per effettuare il confronto tra lo Scenario 0 e lo Scenario 1, gli impatti ambientali potenziali sono stati calcolati sulla base di due metodi di caratterizzazione:

- CML 2000 Baseline, relativo alla valutazione ambientale complessiva degli scenari, all'interno del quale sono stati scelti gli indicatori "acidificazione", "riscaldamento globale", "tossicità umana", "smog fotochimico";
- CED (Cumulative Energy Demand), relativo alla sola valutazione energetica degli scenari, che considera non solo l'energia direttamente prodotta o consumata, ma anche quella associata a produzioni e consumi indiretti e quella contenuta nei materiali utilizzati o evitati (energia *feedstock*).

Per quanto riguarda l'energia elettrica evitata grazie a quella prodotta dai processi di termovalorizzazione e digestione anaerobica, si è fatto riferimento al mix di combustibili fossili attualmente utilizzati in Italia (9% olio combustibile, 18% carbone, 10% gas naturale in ciclo semplice e 63% gas naturale in ciclo combinato). L'energia termica avviata alla rete di

teleriscaldamento permette invece di evitare una pari quantità di calore prodotto da caldaie domestiche a metano.

Per ulteriori dettagli circa le ipotesi adottate nell'analisi LCA si rimanda al rapporto finale del presente studio.

2.2 Risultati

Di seguito sono riportate alcune rappresentazioni grafiche degli impatti stimati e le considerazioni in merito al confronto tra lo Scenario 0 e gli Scenari 1. In questa sede vengono riportati i soli indicatori "riscaldamento globale" e "CED". Per gli altri si rimanda al rapporto finale del presente studio.

I contributi di ciascun processo coinvolto risultano così caratterizzati:

- trasporti: contiene i contributi dati dalla raccolta dei vari flussi di rifiuto e per il loro invio dal centro di raccolta ai rispettivi impianti di trattamento, considerando il ciclo di vita del mezzo e della strada, la loro manutenzione e le emissioni associate all'utilizzo del mezzo stesso;
- termovalorizzazione: contiene i contributi degli input necessari al processo (risorse naturali, materiali di processo, combustibili, elettricità e calore), degli output energetici, delle emissioni dirette, del trasporto dei residui e del loro recupero o smaltimento;
- compostaggio: contiene i contributi dell'energia elettrica richiesta, dei trasporti degli scarti inviati a discarica e del loro smaltimento, del trasporto del compost di qualità e della sua sostituzione a torba e fertilizzanti chimici, del percolato inviato a depurazione;
- digestione anaerobica: contiene i contributi delle risorse naturali utilizzate, l'acqua di scarico inviata a depurazione, il trasporto del compost di qualità e la sostituzione di torba e fertilizzanti chimici, le componenti legate all'utilizzo del biogas in termini energetici, di sostituzione di materia e di emissioni in atmosfera;
- scarti della digestione anaerobica: contiene i contributi della termovalorizzazione degli scarti prodotti dalla fase di digestione anaerobica;
- sacchetti: contiene i contributi del processo di estrusione del film in materiale biodegradabile, dell'energia elettrica necessaria alla produzione, del trasporto del prodotto finito all'utenza e degli scarti a discarica, del trattamento degli scarti stessi.

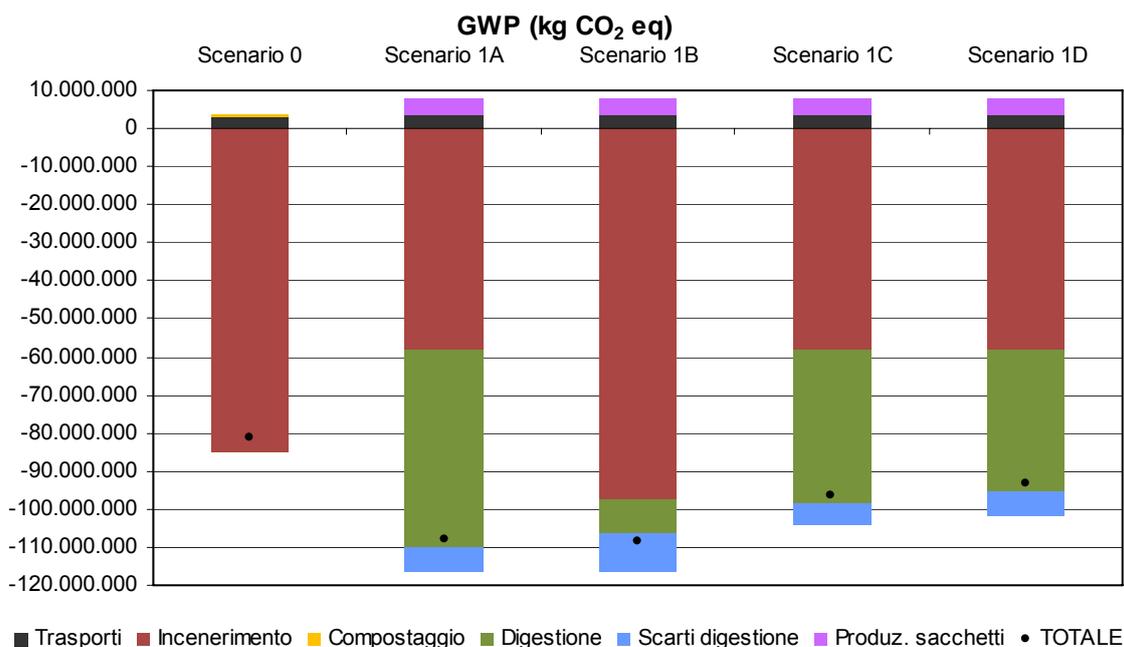
Come si può osservare in Figura 4, tutti gli scenari presentano valori negativi: ciò significa che sono tutti ambientalmente vantaggiosi per quanto riguarda il riscaldamento globale poiché gli impatti evitati sono maggiori di quelli aggiunti in ambiente e riescono quindi a compensarli.

In particolare, i trasporti, la produzione dei sacchetti in materiale biodegradabile e il compostaggio forniscono un contributo positivo: ciò è dovuto alle emissioni di CO₂ fossile legate alla combustione nei trasporti, ai consumi energetici e alle emissioni dirette del processo di compostaggio (N₂O in particolare), all'utilizzo di energia elettrica dalla rete e del processo di estrusione del film in materiale biodegradabile per la produzione dei sacchetti.

I contributi negativi, invece, sono forniti dai flussi di energia e materia prodotti nelle varie fasi degli scenari e considerati come prodotti evitati: le produzioni energetiche del

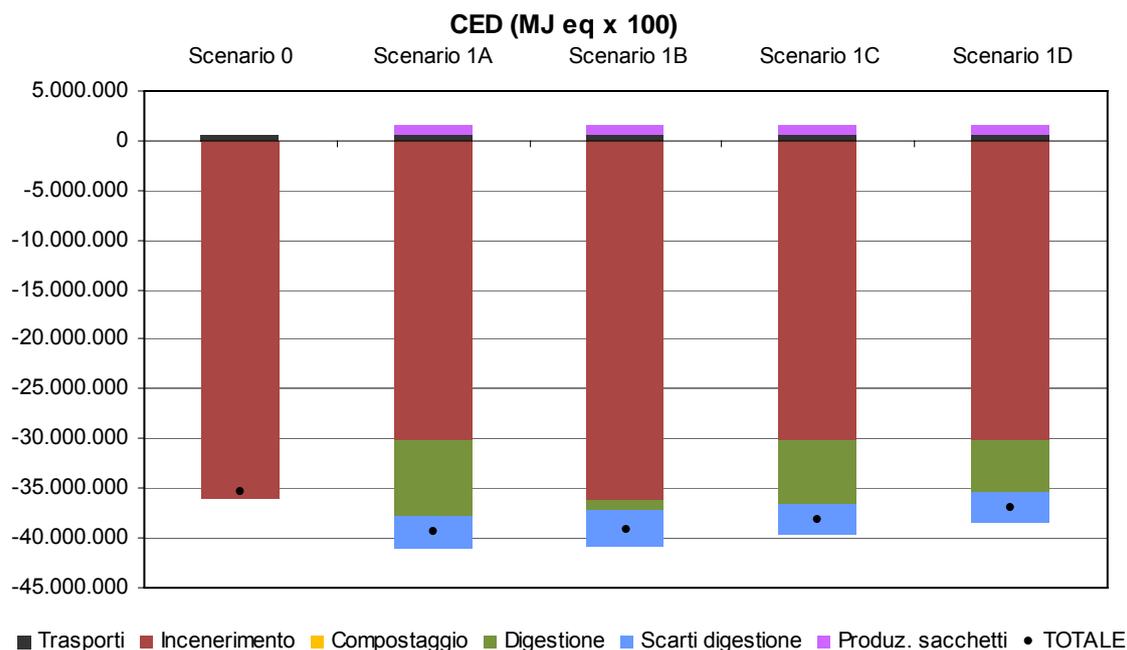
termovalorizzatore e del biogas utilizzato in MCI sostituiscono una pari quantità di energia prodotta da fonti fossili, evitando quindi in modo rilevante le emissioni di CO₂ fossile; la sostituzione di torba e fertilizzanti chimici con il compost di qualità prodotto dal post compostaggio evita maggiormente le emissioni di N₂O e CO₂ fossile; il biometano immesso in rete in sostituzione al gas naturale o utilizzato per l'autotrazione in sostituzione al diesel consente di evitare maggiormente l'emissione di CO₂ fossile.

Figura 4 - Risultati della LCA per l'indicatore "riscaldamento globale"



Come si può notare in Figura 5, anche per l'indicatore "CED" tutti gli scenari mostrano valori negativi poiché sono caratterizzati da una produzione di energia lorda superiore agli effettivi consumi dei vari processi, fornendo così un surplus di energia. Tali produzioni energetiche nette andranno a sostituire una pari quantità di energia prodotta da fonti fossili.

Figura 5 - Risultati della LCA per l'indicatore "CED"



Osservando nel dettaglio i vari scenari, si nota che i trasporti, il compostaggio e la produzione dei sacchetti forniscono ancora un contributo positivo poiché prevedono solo consumi energetici senza altri processi che possano portare a prodotti evitati, se non nel compostaggio dove però la sostituzione di torba e fertilizzanti chimici con compost di qualità non riesce a compensare completamente i contributi positivi citati in precedenza.

Per quanto riguarda i contributi negativi, la termovalorizzazione costituisce la componente più significativa poiché tale processo consente di ottenere notevoli produzioni nette di energia che differiscono tra i diversi scenari alternativi. Analogo discorso vale per il contributo degli scarti derivanti dalla DA. Anche il contributo negativo della digestione anaerobica è dato principalmente dall'utilizzo del biogas nei diversi scenari e, in modo meno rilevante, dalla sostituzione di materia con compost di qualità.

Analizzando tutti gli indicatori proposti e sulla base delle considerazioni più ampiamente sviluppate nel rapporto finale del presente studio, si può concludere che gli Scenari 1A e 1B risultano migliori rispetto allo Scenari0 per tutti gli indicatori presentati. Ciò significa che la nuova gestione del RUR e della FORSU domestica è vantaggiosa poiché, nonostante la diminuzione del rifiuto termovalorizzato, il contributo dato dal biogas permette di compensare le spese energetiche e ambientali dei nuovi impianti di digestione e post compostaggio e dell'implementazione del sistema di raccolta della FORSU.

Gli Scenari 1C e 1D, invece, risultano meno competitivi e, per l'indicatore "acidificazione", addirittura peggiori dello Scenari0. In questi due scenari, a differenza dei precedenti (1A e 1B), il prodotto evitato non è energia elettrica, che influisce in modo più significativo sugli indicatori, ma semplicemente gas naturale che nei diversi indicatori fornisce un contributo più o meno significativo.

In conclusione, lo Scenario 1B sembrerebbe il più vantaggioso, ma bisogna considerare che l'inserimento della caldaia ausiliaria integrata al termovalorizzatore richiede una modifica sostanziale dell'impianto. Lo Scenario 1A risulta, invece, di più semplice implementazione perché basato su una tecnologia largamente diffusa e affidabile. Gli Scenari 1C e 1D si prestano tuttavia ad interessanti considerazioni circa il loro possibile impatto diretto sull'area in esame; in particolare la sostituzione di gas naturale con biometano nella Scenario 1C consentirebbe di coprire il fabbisogno energetico di circa 8.600 abitazioni, mentre la sostituzione del diesel per autotrazione nello Scenario 1D consentirebbe di coprire percorrenze annue di circa di 125 milioni di km. In quest'ultimo caso, il biometano potrebbe essere utilizzato nel circuito cittadino di raccolta dei rifiuti poiché, oltre a coprire i circa 9 milioni di km per la raccolta del RUR e della FORSU domestica e da grandi utenze, garantirebbe un surplus utilizzabile per la raccolta delle altre matrici differenziate ed eventualmente per il trasporto pubblico cittadino.

3. Analisi di sensitività

Sono state sviluppate delle analisi di sensitività allo scopo di valutare le variazioni dei risultati dello scenario ottimo al variare dei principali parametri di interesse.

Nel caso in esame si è considerata la variazione di ciascuno dei seguenti parametri per ogni analisi:

- 1) resa di intercettazione della frazione organica domestica presente nel RUR (ridotta al 40%);
- 2) tecnologia di gestione anaerobica (a secco invece che a umido);
- 3) efficienza di recupero energetico del termovalorizzatore (funzionamento in assetto cogenerativo spinto);
- 4) tipologia di energia elettrica sostituita (caso del ciclo combinato a gas naturale);
- 5) distanza di trasporto del compost di qualità (in particolare incremento della stessa);
- 6) tipologia di utilizzo del biogas (caso della sua co-combustione in una centrale a ciclo combinato in parziale sostituzione del gas naturale).

Anche per queste analisi sono state elaborate delle rappresentazioni grafiche per tutti gli indicatori considerati, riportate nel rapporto finale.

4. Conclusioni

Dal confronto tra lo Scenario 0 e lo Scenario 1 nelle sue diverse declinazioni si può concludere che:

- gli Scenari 1A e 1B risultano migliori per tutti gli indicatori valutati grazie al contributo dato dal biogas che permette di sostenere le spese energetiche e ambientali dei nuovi impianti di digestione e post compostaggio, oltre che dell'implementazione del sistema di raccolta;

- gli Scenari 1C e 1D risultano meno performanti perché il prodotto evitato non è energia elettrica, che influisce in modo più significativo sugli indicatori in funzione del mix produttivo ipotizzato, ma semplicemente gas naturale;
- lo Scenario 1B sembrerebbe il più vantaggioso in assoluto, ma bisogna considerare che richiede una importante modifica del ciclo termico dell'impianto di termovalorizzazione per l'inserimento della caldaia ausiliaria;
- lo Scenario 1A risulta più realistico perché basato su una tecnologia largamente diffusa e affidabile (motori a gas cogenerativi);
- lo Scenario 1C, pur risultando all'apparenza meno vantaggioso, permette di sostituire gas naturale con il biometano ottenuto e quindi di coprire il fabbisogno energetico di circa 8.600 abitazioni;
- lo Scenario 1D, infine, pur risultando anch'esso meno vantaggioso, prevede la produzione di biometano in sostituzione al diesel impiegato per l'autotrazione, consentendo di percorrere annualmente più di 125 milioni di km.

Per quanto riguarda le analisi di sensitività si è osservato che:

- la riduzione al 40% della resa di intercettazione della FORSU domestica comporta un complessivo peggioramento di tutti gli scenari, principalmente a causa della minore quantità di biogas prodotto, solo in parte compensata dalla maggiore energia prodotta dal RUR termovalorizzato;
- la modifica della tecnologia di digestione anaerobica da umido a secco comporta un complessivo peggioramento degli scenari, poiché la maggiore quantità di biogas prodotto dalla tecnologia a secco non compensa l'aumento degli autoconsumi di tale processo rispetto al corrispondente ad umido;
- il funzionamento in assetto cogenerativo spinto del termovalorizzatore comporta una riduzione della produzione di energia elettrica a favore di quella termica, e questo si riflette in un peggioramento per il sottocaso B e in un miglioramento per i sottocasi C e D;
- la sostituzione di energia elettrica da centrale operante con ciclo combinato a gas naturale invece che con mix di combustibili fossili comporta un peggioramento degli indicatori poiché nel primo caso l'energia prodotta ha prestazioni ambientali migliori rispetto a quella derivante dal mix;
- l'incremento della distanza di trasporto del compost di qualità da 50 a 250 km comporta un modesto peggioramento per tutti gli scenari, ma senza influire sulla loro classificazione relativa.

Una nota a parte merita il caso AS6, che prevede una nuova ipotesi di utilizzo del biogas in parziale sostituzione di gas naturale in una centrale a ciclo combinato, che viene confrontata direttamente con lo Scenario 0. Tale scenario risulta peggiore o migliore nei diversi indicatori poiché i contributi di termovalorizzazione e di digestione anaerobica hanno rilevanza diversa per ognuno di essi.