

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio
Insegnamento di Ingegneria Sanitaria Ambientale

CONTROLLO DELLA PRODUZIONE DI BIOGAS DA
RIFIUTI SOLIDI

IL CASO DELLA DISCARICA DI
MAIOLATI SPONTINI

Tesi di laurea di:
Andrea Antonio Salcone
Matricola: 21 51 055334

Relatore:
Prof. Ing. Maurizio Mancini
D.I.S.T.A.R.T.

Anno Accademico 2001/2002 - Sessione II

PAROLE CHIAVE

Biogas

Discarica

Rifiuti solidi

RSU

Landfill gas

Metano

Smaltimento rifiuti

SOMMARIO

Introduzione.....	7
1. Rifiuti urbani e biogas.....	10
1.1. L'origine del biogas.....	10
1.2. La discarica controllata.....	13
1.3. Tecnologie di controllo e trattamento del biogas.....	17
2. Metodi per le valutazioni quantitative.....	22
2.1. I fattori che influenzano le previsioni sul biogas.....	22
2.2. Il metodo della "reazione semplificata".....	26
2.3. Il modello LandGEM della U.S. E.P.A.....	34
2.4. Il metodo del "pressure rebound".....	39
3. Un caso di studio reale.....	44
3.1. Caratterizzazione del territorio e del bacino d'utenza.....	44
3.2. La discarica di Maiolati Spontini (AN).....	52
4. Applicazione dei modelli al caso di studio.....	64
4.1. I dati a disposizione.....	64
4.2. La scelta dei modelli applicabili.....	69
4.3. L'applicazione del metodo della "reazione semplificata".....	72
4.4. L'applicazione del modello LandGEM.....	81
4.5. Il confronto tra i risultati dei due modelli esaminati.....	86
5. Conclusioni.....	88
Appendice.....	91
A.1. Equivalenze tra unità di misura.....	91
A.2. Abbreviazioni.....	92
Riferimenti bibliografici.....	93
Ringraziamenti.....	97

INDICE DELLE FIGURE

<i>Numero</i>	<i>Pagina</i>
Fig. 1 - Produzione di rifiuti urbani dal 1996 al 1999	8
Fig. 2 - Evoluzione tipica della composizione del biogas nel tempo.	11
Fig. 3 - Coltivazione di una discarica tradizionale	13
Fig. 4 - Destinazione dei rifiuti urbani (anno 1999)	16
Fig. 5 - Schema tipico dei condotti di captazione del biogas.	17
Fig. 6 - Particolare di un condotto per l'estrazione del biogas.....	18
Fig. 7 – Schemi semplificati per il recupero di energia dal biogas	19
Fig. 8 - Sistemazione dei rifiuti in discarica	23
Fig. 9 - Andamento qualitativo della velocità di reazione reale r_c e ipotizzata r'_c	31
Fig. 10 - Schermata principale di LandGEM US-EPA	37
Fig. 11 - Test del "pressure rebound"	41
Fig. 12 - Ubicazione della discarica di Maiolati	44
Fig. 13 - Composizione merceologica media italiana RSU	47
Fig. 14 - Discariche al servizio della Provincia di Ancona	49
Fig. 15 - Autocompattatore per la raccolta di RSU	50
Fig. 16 - Vista panoramica della discarica.....	52
Fig. 17 - Planimetria del sistema di captazione del biogas.....	56
Fig. 18 - Centrale per la generazione di energia elettrica dal biogas	57

INDICE DELLE FIGURE

<i>Numero</i>	<i>Pagina</i>
Fig. 19 – Sottostazione di trattamento con separatori di vapore	58
Fig. 20 - Torcia per il biogas.....	59
Fig. 21 - Lavorazione del compost di qualità	61
Fig. 22 - Planimetria della discarica di Maiolati Spontini.....	63
Fig. 23 - Pesatura dei rifiuti portati in discarica.....	65
Fig. 24 - Camino di aspirazione del biogas	67
Fig. 25 - Rapporto tra biogas prodotto ed estraibile	70
Fig. 26 - Composizione merceologica media RSU italiani	73
Fig. 27 - Foglio elettronico realizzato per il modello della "reazione semplificata"	76
Fig. 28 - Biogas teoricamente generabile e teoricamente captabile	77
Fig. 29 - Biogas teoricamente captabile e biogas effettivamente captato	78
Fig. 30 - LandGEM: biogas teoricamente captabile.....	82
Fig. 31 - LandGEM: biogas teoricamente captabile e captato	83
Fig. 32 - Confronto tra i modelli applicati al caso di studio.....	86

INDICE DELLE TABELLE

<i>Numero</i>	<i>Pagina</i>
Tabella 1 – Emissioni di CO ₂ evitate con l'utilizzo di biogas e biomasse, stime per l'anno 2002	21
Tabella 2 – Composizioni elementari dei rifiuti (adattata da Rif.4).....	27
Tabella 3 – Percentuali di biodegradabilità delle frazioni merceologiche	28
Tabella 4 – Percentuali velocità di biodegradazione delle frazioni merceologiche	29
Tabella 5 – Intervalli di tempo caratteristici delle reazioni	32
Tabella 6 – Quantitativi di rifiuti avviati al compostaggio.....	51
Tabella 7 – Afflusso di RSU e RSA dal 1989 al 2001	64
Tabella 8 – Quantitativi di biogas captati dall'impianto	66
Tabella 9 – Composizione merceologica analitica dei RSU (dati medi italiani, 1997)	72
Tabella 10 – Composizione chimica elementare media delle frazioni merceologiche	74
Tabella 11 – Percentuali di biodegradabilità usate nei calcoli	75
Tabella 12 - Biogas teoricamente captabile ed effettivamente captato	79
Tabella 13 - Risultati analitici del modello della "reazione semplificata"	80
Tabella 14 - Risultati analitici del modello LandGEM	85

*A mamma e papà
che hanno sempre avuto fiducia in me*

INTRODUZIONE

Le questioni legate alla produzione ed allo smaltimento dei rifiuti hanno assunto negli ultimi decenni importanza sempre più rilevante, a causa del miglioramento delle condizioni economiche, del rapido sviluppo industriale, dell'aumento della popolazione nelle aree urbane, ed, in molti casi, a causa di una gestione del problema non sempre efficiente e lungimirante. La produzione di rifiuti è, infatti, progressivamente cresciuta come segno del progresso economico e dell'aumento dei consumi. L'elevata diversificazione raggiunta nei processi produttivi ha, inoltre, generato la moltiplicazione delle tipologie di rifiuti con effetti sempre più nocivi per l'ambiente.

I problemi causati dall'aumento delle quantità di rifiuti da smaltire non possono essere affrontati solamente con una gestione più efficiente ed un maggiore ricorso al riciclaggio. E' sempre più evidente la necessità di analizzare e gestire il problema rifiuti come una componente dei flussi totali di materia che attraversano la società, inserendo la gestione dei rifiuti all'interno di una strategia integrata di sviluppo sostenibile, che abbia, tra le priorità, la riduzione dell'utilizzo delle risorse, il minore consumo di energia e la minimizzazione delle emissioni alla fonte.¹

Nonostante i progressi ottenuti a livello europeo, come la definizione di standard rigorosi per la realizzazione e gestione degli impianti di smaltimento al fine di ridurre sensibilmente le emissioni e, conseguentemente, i rischi, nonché con la determinazione di obiettivi

¹ Adattato da: ANPA, ONR, (2001). *Rapporto Rifiuti 2001*, ANPA, Roma, Italia. (Rif. 10).

di riciclaggio e recupero per alcuni tipi di rifiuti particolari (ad esempio: imballaggi, veicoli a fine vita), il volume dei rifiuti è comunque aumentato e non ci sono segnali di un'inversione di tendenza. Inoltre, con l'aumento del benessere e della produttività, cresce anche il mercato dei prodotti che hanno cicli di vita sempre più brevi, e ciò causa un incremento della quantità di rifiuti derivanti dai prodotti ormai fuori uso e dai relativi cicli d'estrazione e di fabbricazione.

La produzione dei rifiuti urbani in Italia nel 1999 (ultimo dato ufficiale pubblicato, contenuto nel Rapporto Rifiuti 2001) è pari a 28,4 milioni di tonnellate, con un incremento, rispetto al 1998, del 5,7%. Si tratta dell'aumento più elevato del periodo 1996-1999, che mostra complessivamente una crescita della produzione di rifiuti del 9,3%, pari al 3,1% medio annuo (Fig. 1). Se gli attuali modelli di consumo non subiranno modifiche sarà inevitabile una crescita sempre più consistente di rifiuti, in molti casi anche dei più pericolosi.

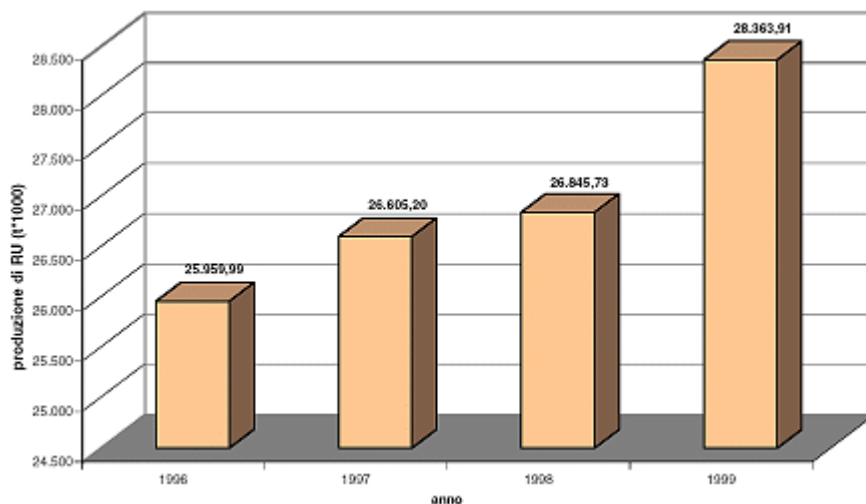


Fig. 1 - Produzione di rifiuti urbani dal 1996 al 1999

Nell'ottica di una gestione più efficiente dei rifiuti con lo scopo di ottenere uno smaltimento sempre più compatibile con i fragili equilibri ambientali e, soprattutto, cercando di ottenere il maggior recupero possibile di energia dagli stessi, un ruolo fondamentale è sicuramente svolto dallo sfruttamento del biogas prodotto nelle discariche.

Si tratta, infatti, di recupero di energia da materiali che, una volta depositati in discarica, non hanno più altre possibilità di sfruttamento. Inoltre, la captazione del biogas svolge anche un importante ruolo per quanto riguarda la limitazione degli impatti ambientali: con un'efficace intercettazione si ottiene una forte limitazione della diffusione in aria di composti maleodoranti provenienti dalla discarica, con effetti sicuramente positivi sul territorio situato nelle vicinanze dell'impianto di trattamento. In più, si evita che grandi quantità di gas serra climoalteranti vengano disperse nell'atmosfera.

Un efficace controllo della produzione di biogas, con l'applicazione di metodologie ingegneristiche, è fondamentale per poter effettuare delle corrette scelte, sia impiantistiche, sia d'investimento di capitali, nell'ottica di una gestione valida ed efficiente del problema rifiuti.

1. RIFIUTI URBANI E BIOGAS

1.1. L'origine del biogas

Le discariche sono sorgenti significative di metano (CH_4) e diossido di carbonio (CO_2). In aggiunta a questi due gas sono prodotte anche minori quantità di composti organici non metanici (NMOCs) tra i quali alcuni composti organici volatili reattivi (VOCs) e pericolosi (HAPs).

Il metano ed il diossido di carbonio sono i costituenti primari di quello che viene comunemente chiamato “biogas” (LFG, “landfill gas” in terminologia anglosassone) e sono prodotti durante la decomposizione anaerobica della cellulosa e delle proteine presenti nei rifiuti smaltiti in discarica che vengono inizialmente trasformati in zuccheri, poi principalmente in acido acetico ed, infine, in CH_4 e CO_2 . La decomposizione anaerobica ha luogo in assenza di ossigeno ed è un processo complesso nel quale le condizioni ambientali giocano un ruolo fondamentale. Tra i fattori ambientali più importanti sono da considerare: il contenuto d'acqua del rifiuto, la presenza e distribuzione dei microrganismi, la concentrazione di nutrienti necessaria alla loro sussistenza e riproduzione, la pezzatura media e la composizione dei rifiuti, il pH e la temperatura all'interno del cumulo di rifiuti, ed infine l'eventuale infiltrazione di acqua.

A causa della complicata combinazione di condizioni che devono concorrere per poter osservare la generazione di biogas, i rifiuti possono rimanere inattivi anche per più di un anno, prima che inizi la decomposizione anaerobica e venga prodotto il biogas.

Nella generazione del biogas si possono individuare quattro fasi caratteristiche di tutto il ciclo di vita della discarica. Durante tali fasi varia sia la velocità di formazione del biogas, sia la sua composizione.

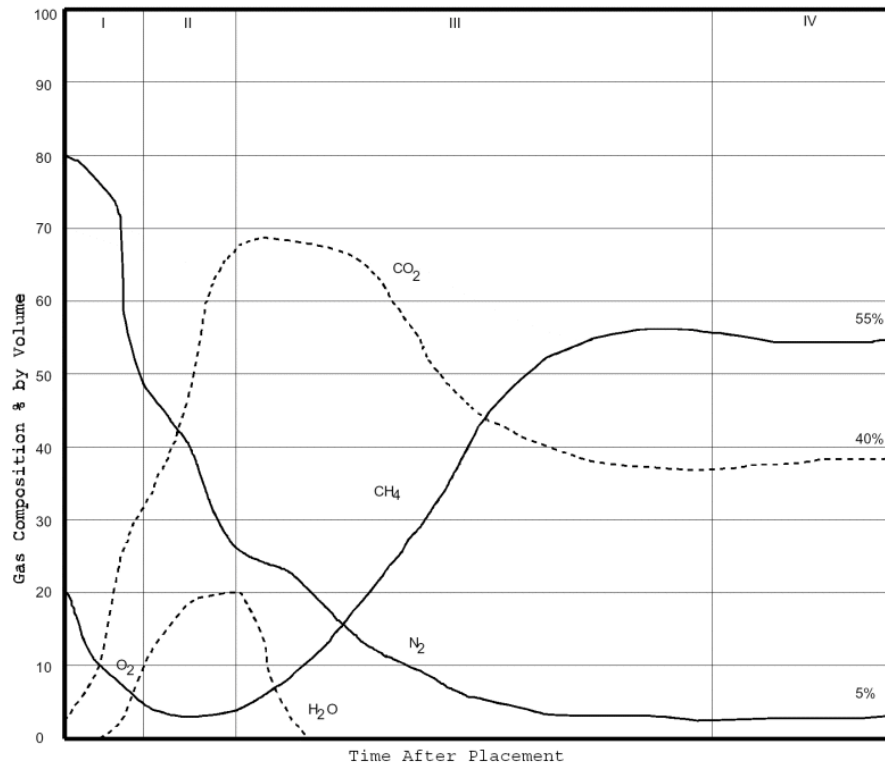


Fig. 2 - Evoluzione tipica della composizione del biogas nel tempo.

Fasi del processo: I. Aerobica; II. Anaerobica, non-metanica; III. Anaerobica, metanica, non-stazionaria; IV. Anaerobica, metanica, stazionaria.

La prima fase è “aerobica” (con ossigeno disponibile all’interno della massa di rifiuti) ed il principale gas prodotto è l’anidride carbonica (CO₂). La seconda fase è caratterizzata da una forte diminuzione dell’ossigeno disponibile che porta l’ambiente in condizioni anaerobiche. Si ha grande produzione di CO₂ ed, in misura minore, di idrogeno (H₂). Nella terza fase (anaerobica) inizia la generazione di CH₄ accompagnata da una riduzione della CO₂ prodotta. Il contenuto di

azoto (N_2) nel biogas è inizialmente elevato nella prima fase aerobica e decresce molto velocemente durante la seconda e terza fase (anaerobiche). Nella quarta fase la produzione di biogas raggiunge condizioni di quasi stazionarietà e la composizione del biogas non varia quasi più. La durata delle varie fasi e dell'intera sequenza (la cui evoluzione in composizione è osservabile in Fig. 2) dipende dalle condizioni presenti in discarica² (composizione del rifiuto, caratteristiche del materiale di copertura, schema progettuale) e può variare anche in funzione delle condizioni climatiche, come la quantità delle precipitazioni atmosferiche e la temperatura ambientale. I rifiuti smaltiti in una discarica controllata possono produrre biogas per 20 – 30 anni; al contrario, i rifiuti smaltiti in discariche abusive, e quindi esposti all'aria, subiscono un processo di decomposizione aerobica risultante principalmente in CO_2 ed acqua.

² U.S. Environmental Protection Agency. Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills - Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. March 1991. EPA-450/3-90-011a. Chapter 3 and 4.

1.2. La discarica controllata

La discarica controllata è un sistema di smaltimento dei rifiuti solidi che prevede il deposito nel suolo, in condizioni di impianto e di esercizio ben precisate, in modo tale che gli effetti negativi sull'ambiente e sulla salute pubblica siano minimi. Il progetto di una discarica e le procedure per la sua gestione possono seguire diversi schemi, ma alla base del processo di smaltimento c'è una metodologia comune, consistente nella sistemazione e compattazione dei rifiuti in una determinata zona, di seguito ricoperta con uno strato di terreno.

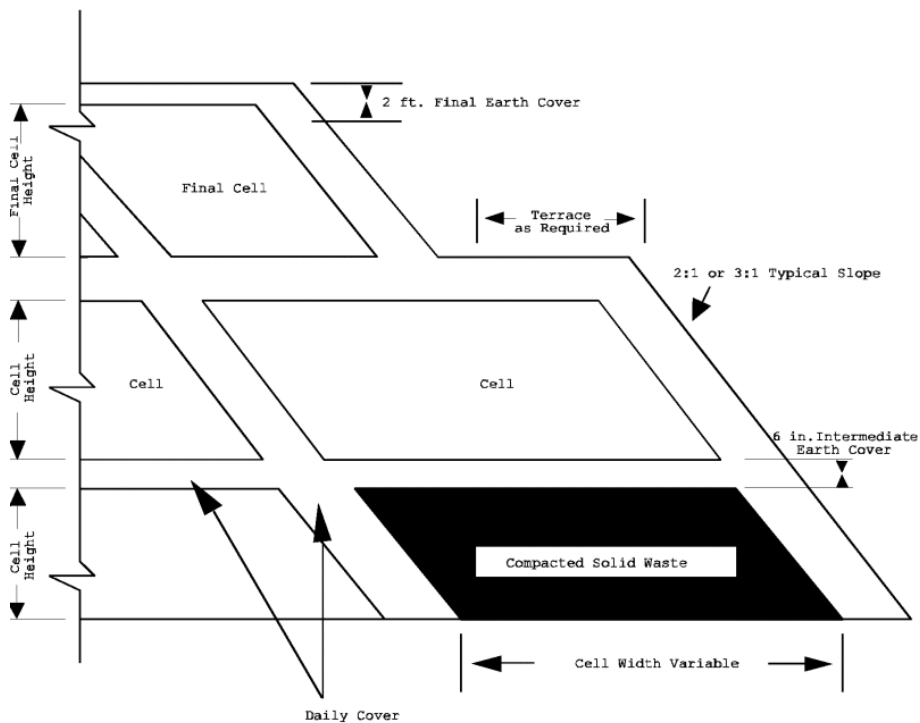


Fig. 3 - Coltivazione di una discarica tradizionale³

Il sistema più usato consiste nel sistemare uno strato di rifiuti su una

³ Adattato da: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation. Emission Factor Documentation for AP-42 Section 2.4 Municipal Solid Waste Landfills, revised. Research Triangle Park, North Carolina. Agosto 1997.

porzione dell'area della discarica, compattarlo con mezzi pesanti, ed aggiungervi allo stesso modo ulteriori strati. Ogni strato ha un'altezza non superiore ai 2 metri e mezzo. A fine giornata il cumulo viene ricoperto con uno strato di suolo o materiale inerte di almeno 15 centimetri. Il volume da considerare per le operazioni di ricoprimento giornaliero si può valutare all'incirca come pari al 10% del volume dei rifiuti smaltiti, a questo andrà poi aggiunto il volume del ricoprimento finale. La densità del rifiuto dopo la compattazione varia tra 650 kg/m^3 e 850 kg/m^3 , e raggiunge i $1000 - 1100 \text{ kg/m}^3$ quando il processo di degradazione è terminato. Uno schema di sistemazione dei rifiuti in discarica è fornito dalla Fig. 3 precedente.

Riguardo alla valutazione dell'impatto ambientale di questo sistema bisogna considerare diversi fattori, tra i quali: il basso costo di investimento iniziale e la rapidità di installazione dell'impianto, la economicità e facilità di gestione, la necessità di suoli con caratteristiche idonee e di grandi superfici, il deterioramento del paesaggio, gli eventuali rischi di inquinamento delle falde acquifere e problemi igienici di varia natura, il pericolo di incendio e di esplosioni dovuti al biogas generato, la perdita definitiva di materiali che potrebbero essere riciclati. Per la scelta dell'area da destinare a discarica sono indispensabili uno studio geologico ed idrologico approfondito di tutta l'area interessata e delle zone limitrofe, ed un attento esame dell'ubicazione rispetto ai centri abitati ed alle vie di comunicazione. La scelta definitiva del sito si fonda, generalmente, sui risultati di un'indagine dettagliata del luogo eseguita con metodi ingegneristici, su una valutazione dei costi e di impatto ambientale (VIA), e, ormai sempre più frequentemente, sull'accettazione da parte della popolazione residente nelle zone limitrofe. I criteri seguiti devono quindi tener conto dei vincoli politici e della legislazione vigente, dei vincoli ambientali,

nonché dei fattori tecnici ed economici. Si deve, inoltre, tener presente che la discarica necessita di una corretta gestione e di un attento monitoraggio, anche dopo la sua chiusura, e per un periodo di tempo considerevole, allo scopo, di controllare anche la perfetta funzionalità ed efficienza dei mezzi impermeabilizzanti. Infatti, le discariche moderne adottano diverse soluzioni tecniche per impedire, o comunque limitare, la migrazione del biogas e del percolato attraverso i confini dell'impianto. A tal fine, vengono sistemati sul fondo e sui lati della discarica strati di argilla e/o coperture in polietilene resistente. Gli strati di argilla possono ridurre la permeabilità tra i 7 e i 10 cm/s, mentre l'applicazione di coperture sintetiche tra i 10 e i 13 cm/s. Alcune discariche, inoltre, utilizzano bioreattori anaerobici per trattare il percolato ottenendo un incremento della produzione di metano che può poi essere raccolto ed utilizzato per il recupero energetico.

Per quanto riguarda la normativa vigente in Italia, il Decreto Legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, nel definire una nuova strategia di gestione dei rifiuti, introduce un ordine gerarchico secondo il quale la prevenzione dei rifiuti rappresenta l'assoluta priorità ed è seguita dal recupero ed infine, dallo smaltimento in condizioni di sicurezza. Lo smaltimento costituisce, quindi, una fase residuale della gestione dei rifiuti al quale andrebbero destinati solamente i rifiuti non valorizzabili. In questo contesto, la discarica controllata, che attualmente è la pratica di smaltimento dei rifiuti urbani più diffusa a livello nazionale ed europeo, non avendo alcuna funzione di valorizzazione delle risorse, deve costituire l'opzione ultima per i soli rifiuti non recuperabili o trattabili in nessun altro modo, tenuto conto delle condizioni tecniche ed economiche del momento; inoltre, lo smaltimento deve avvenire con modalità tali da ridurre al minimo le possibili conseguenze negative sull'ambiente. La discarica, infatti, comporta sempre un rischio per

l'ambiente, anche in considerazione dell'immissione in atmosfera di grandi quantità di composti metanigeni climalteranti.

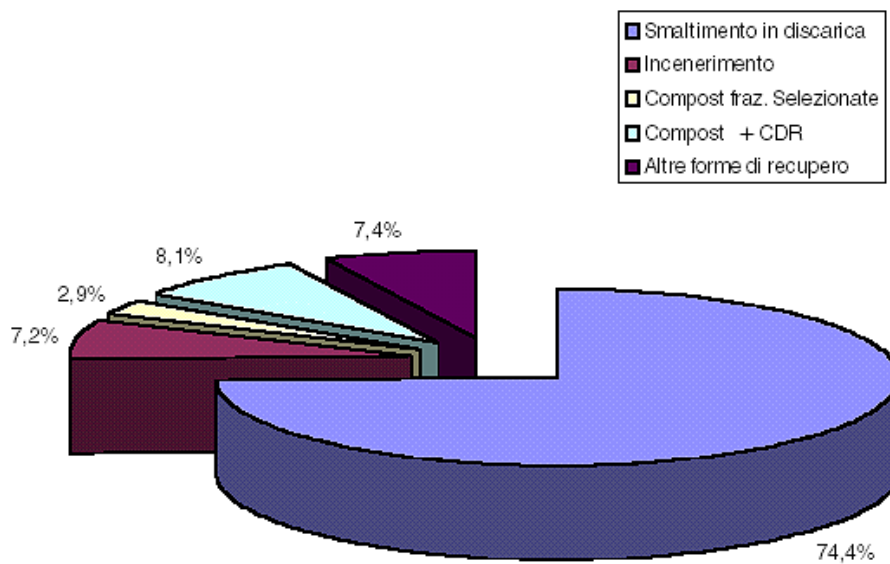


Fig. 4 - Destinazione dei rifiuti urbani (anno 1999)

Analizzando i dati italiani (Fig. 4) si può notare come nel 1999 circa il 74,4 % dei rifiuti sia stato conferito in discariche controllate, l'8,1 % è stato avviato ad impianti di selezione con produzione di compost/frazione secca/CDR e ad impianti di bioessiccazione, il 7,2 % ad impianti di incenerimento con e senza recupero di energia, il 2,9 % ad impianti di compostaggio di frazioni selezionate ed il restante 7,4 % ad altre forme di recupero.⁴

⁴ Fonte: ANPA, ONR, *Rapporto Rifiuti 2001*.

1.3. Tecnologie di controllo e trattamento del biogas

Per la captazione del biogas possono essere usati sistemi “attivi” o “passivi”. Con i sistemi attivi si fornisce artificialmente un gradiente di pressione mediante soffianti o compressor. Nei sistemi passivi si sfrutta, invece, il gradiente di pressione che si instaura naturalmente all’interno della discarica, a seguito dei processi di generazione di biogas. La tipologia dell’impianto di captazione da adottare, dipende principalmente dalle caratteristiche della discarica e dall’utilizzo che viene fatto del biogas raccolto. I sistemi a captazione “attiva” sono generalmente più efficienti di quelli “passivi”.⁵ I condotti di estrazione del biogas (Fig. 6) sono, normalmente, distribuiti uniformemente su tutta la superficie della discarica, in modo da evitare zone di ristagno per i gas; la loro spaziatura reciproca e la profondità di immersione dipendono dalle condizioni operative e di progetto della discarica.

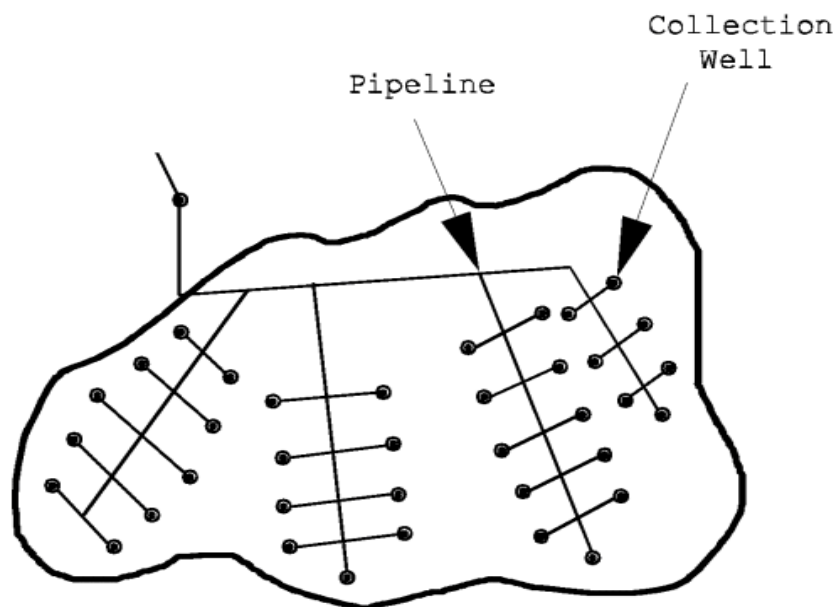


Fig. 5 - Schema tipico dei condotti di captazione del biogas.

⁵ Da: vedi nota 2 a pag. 12

Per la sicurezza dell'impianto, intorno al perimetro esterno ed al di sotto del fondo della discarica, vengono installati vari sensori capaci di monitorare l'effettivo funzionamento del sistema di captazione e l'efficienza dei sistemi di contenimento per il biogas ed il percolato.

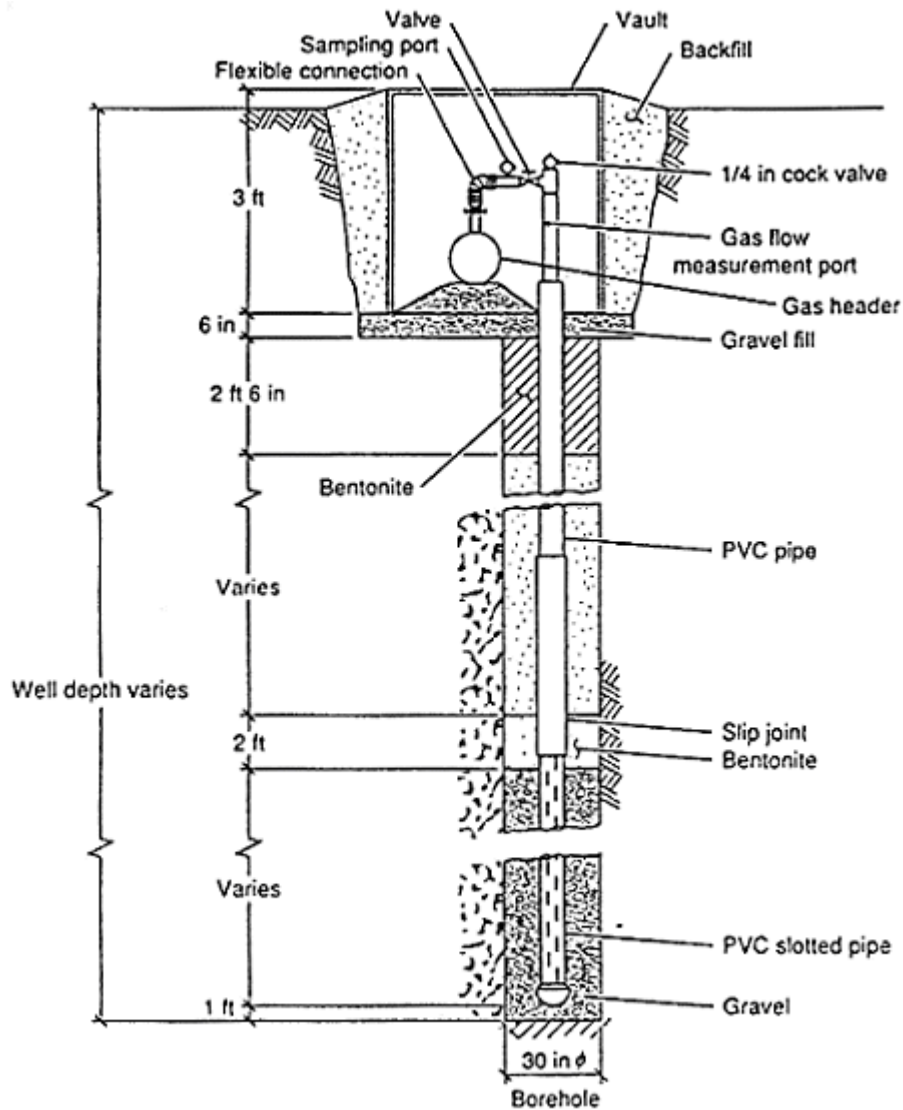


Fig. 6 - Particolare di un condotto per l'estrazione del biogas⁶

⁶ Da: California Integrated Waste Management Board

Le tecniche di controllo e trattamento applicabili ad una discarica comprendono:

- Combustione del biogas
- Purificazione del biogas

La distruzione dei composti organici attraverso la combustione può avvenire senza recupero di energia (ad esempio con l'impiego di torce), oppure con produzione di energia elettrica, utilizzando allo scopo turbine a gas o motori a combustione interna. Quest'ultimo sistema è quello comunemente adottato in Italia.

Il biogas può anche essere usato per fornire l'energia termica necessaria ad una caldaia per produrre vapore.

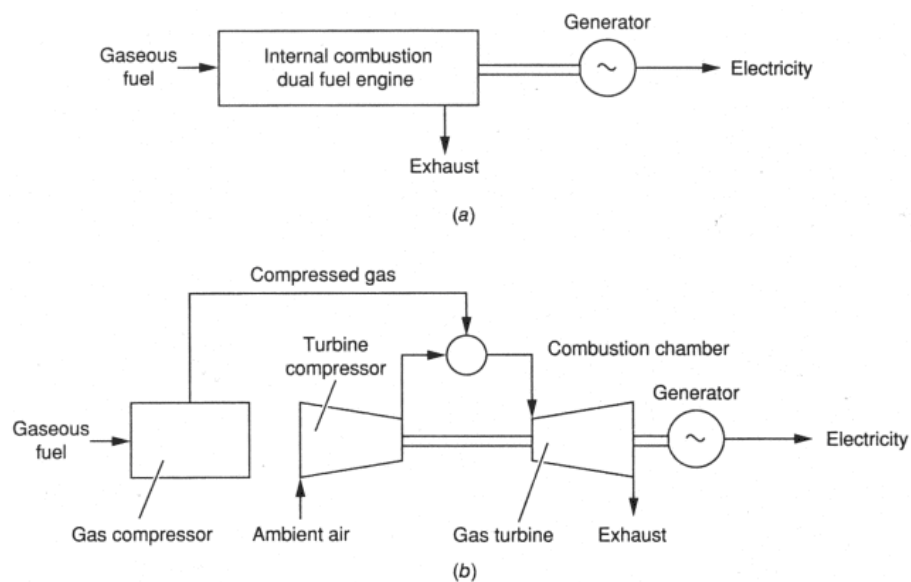


Fig. 7 – Schemi semplificati per il recupero di energia dal biogas⁷

⁷ Adattato da: Tchobanoglous G. et al. (1993), *Integrated solid waste management – Engineering principles and management issues* McGraw-Hill.

Le tecniche di purificazione hanno, invece, lo scopo di produrre gas naturale con caratteristiche tali da poter essere immesso direttamente in una rete di distribuzione. Per ottenere ciò, vengono adottati sistemi ad assorbimento, ad adsorbimento ed a membrane speciali, con i quali vengono rimossi il vapore acqueo, il diossido di carbonio (CO₂) ed i composti organici non metanici (NMOCs) presenti nel biogas captato.

Il recupero energetico, nell'ambito della gestione dei rifiuti, ricopre un ruolo di secondaria importanza rispetto alle più evidenti problematiche sociali ed ambientali.

Il decreto legislativo 22/97 sui rifiuti prevede, come già detto, il ricorso alla discarica solo per le sostanze e i materiali inerti o inertizzati, tuttavia lo sfruttamento del biogas prodotto dalle discariche attuali rappresenta un'ottima opportunità energetica ed ambientale. Nella situazione attuale, considerando, come dato medio, che il biogas viene prodotto nella misura teorica di 200 m³ per tonnellata di rifiuto e che il processo si compie in circa 20 anni, dapprima velocemente e poi più lentamente, la potenzialità teorica complessiva lorda di tutte le discariche italiane sfiorerebbe i 1000 MW.⁸ In realtà solo una frazione di questa, pari a circa il 30 %, potrebbe essere utilizzata per fini energetici a causa sia delle inevitabili dispersioni di biogas, sia della non convenienza nell'estrarre biogas per produrre energia nella fase finale del processo. La maggiore potenzialità è, inoltre, concentrata in discariche di medie e grandi dimensioni.

La captazione e l'utilizzo del biogas per recuperare energia dai rifiuti smaltiti in discarica, svolgono anche un'importante compito nei

⁸ Fonte dati ed elaborazioni: ENEA, (1999), *Libro bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili*.

confronti della riduzione delle emissioni di gas serra. Si può, infatti, valutare il vantaggio ambientale ottenibile considerando la maggior quantità di gas serra che verrebbe immessa nell'atmosfera se la stessa energia prodotta col biogas fosse prodotta con combustibili fossili. Queste quantità possono essere definite come emissioni evitate di CO₂ equivalenti, assimilando, in questo modo, tutti i diversi composti che costituiscono i gas serra alla CO₂. Come dato di riferimento per la produzione di gas serra da impianti per la produzione di elettricità, si può assumere il valore medio di circa 0,7 kg CO₂ per kWh prodotto, equivalente a 3,18 Mt di CO₂ per Mtep prodotto, mentre per la produzione di calore si può assumere un valore di 2,8 Mt di CO₂ per ogni Mtep prodotto (si usano infatti combustibili fossili più “leggeri”).⁹ I risultati di tali valutazioni sono riportati nella Tabella 1.

	Δ Mtep	Mt CO₂
Produzione energia elettrica	0,377	1,198
Produzione energia termica	0,330	0,924

Tabella 1 – Emissioni di CO₂ evitate con l'utilizzo di biogas e biomasse, stime per l'anno 2002 ¹⁰

⁹ Dati forniti da ENEL ed elaborazioni ENEA.

¹⁰ Fonte dati ed elaborazioni: ENEA, (1999), *Libro bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili*

2. METODI PER LE VALUTAZIONI QUANTITATIVE

2.1. I fattori che influenzano le previsioni sul biogas

I fenomeni che danno luogo alla produzione di biogas sono caratterizzati da una elevata complessità dovuta alle tantissime reazioni che avvengono simultaneamente e che sono tra loro variamente dipendenti.

Le emissioni gassose generate da una discarica sono governate da fenomeni di produzione e trasporto, oltre che dalla composizione merceologica del rifiuto e dalle sue condizioni.

I meccanismi di produzione riguardano la generazione di composti in fase gassosa, attraverso vaporizzazione, decomposizione biologica e reazioni fisico-chimiche. La vaporizzazione è influenzata dalle concentrazioni individuali delle varie sostanze, dalle proprietà fisiche di queste e dalle condizioni specifiche della discarica come la temperatura e la pressione di confinamento. La degradazione biologica di composti liquidi e solidi in altre specie chimiche è dipendente da: disponibilità di nutrienti per i microrganismi, composizione del rifiuto, età della discarica, contenuto di umidità, pH, temperatura, presenza di ossigeno e di rifiuti industriali che inibiscono le reazioni biologiche. Le reazioni fisico-chimiche sono dipendenti dalla composizione del rifiuto, dalla temperatura e dalla umidità all'interno della discarica. Quantificare l'impatto di ciascuno di questi fattori sulla produzione di biogas non è attualmente possibile.

I meccanismi di trasporto riguardano il passaggio di composti volatili, in fase gassosa, fino alla superficie libera attraverso il cumulo di rifiuti ed attraverso gli strati di contenimento laterali e di copertura. Nello studiare questo processo si deve tener conto di fenomeni di diffusione, di convezione e di dislocazione. La diffusione molecolare attraverso la copertura di terreno è influenzata: dalla porosità del suolo, dal gradiente di concentrazione presente, dalla diffusività dei costituenti il gas, dallo spessore dello strato da attraversare ed, in modo minore, da altri fattori. La convezione si ha a causa della differenza di pressione riscontrabile tra punti diversi del cumulo di rifiuti ed è influenzata: dalla disponibilità di nutrimento per i batteri, dalla composizione merceologica del rifiuto, dal contenuto di umidità, dall'età della discarica, dalla temperatura, dal pH, dalla disponibilità di ossigeno, dalla presenza di rifiuti tossici che inibiscono l'azione dei batteri, e dalla presenza di un sistema di raccolta dei gas prodotti.



Fig. 8 - Sistemazione dei rifiuti in discarica

La dislocazione conseguente alla compattazione subita dal rifiuto ed alla sua sistemazione in discarica dipende, infine, dal grado di compattazione, dalle tipologie di rifiuto presenti e dalla loro compatibilità, dal carico dovuto ai rifiuti ed al terreno sovrastanti. Dislocazioni si possono verificare anche a seguito di fluttuazioni della falda acquifera, di cospicue precipitazioni e di forti differenze tra le permeabilità orizzontale e verticale, nonché per altri fenomeni non prevedibili.

L'estrazione di biogas dipende poi, in maniera non trascurabile, dalla soluzione impiantistica realizzata: si possono avere sistemi attivi di raccolta che attuano l'estrazione attraverso l'aspirazione forzata dei gas con soffianti o compressori, e sistemi passivi che sfruttano il gradiente di pressione naturale che si instaura all'interno della massa di rifiuti a causa dell'aumento di pressione dovuto alla generazione dei gas di degradazione.

I rifiuti smaltiti in discarica controllata possono produrre biogas per un numero di anni che va dai venti ai trenta. Quando la produzione di gas raggiunge condizioni stazionarie, il biogas è composto approssimativamente per il 40% in volume da CO₂, per il 55% da CH₄, per il 5% da N₂ ed altri gas, e contiene quantitativi minori di composti organici non metanici, la maggior parte dei quali deriva dalla volatilizzazione di composti organici presenti nel rifiuto trattato.

Risulta chiaro da quanto esposto la necessità di adoperare modelli che studiano il fenomeno ricorrendo all'introduzione di semplificazioni nella descrizione dei molteplici fenomeni che si attuano all'interno della discarica. Uno studio comprensivo di tutte le reazioni che avvengono è, infatti, irrealizzabile allo stato presente delle conoscenze, e risulterebbe

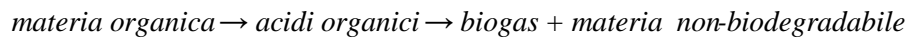
oltremodo dispendioso per gli scopi che ci si propone e per i benefici che se ne potrebbero trarre.

Le metodologie descritte qui di seguito in dettaglio mostrano tre diversi approcci alla soluzione del problema che hanno raccolto consenso in ambito internazionale ed i cui risultati trovano buon riscontro con i dati sperimentali.

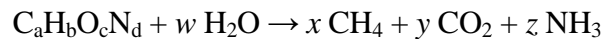
2.2. Il metodo della “reazione semplificata”.

Questo metodo matematico è stato concepito da G. Tchobanoglous ed altri¹¹, ed è basato su una semplificazione del complesso processo di formazione del biogas. Il modello è stato poi perfezionato da G. Pasquali, B. Bonori, M. Bergonzoni, che lo hanno applicato nell’ambito della realizzazione di uno Studio di Impatto Ambientale.¹²

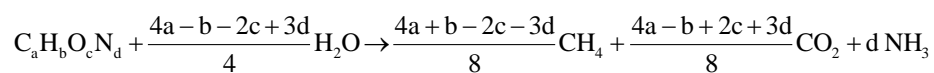
L’insieme delle reazioni chimiche che portano alla generazione del biogas può essere riassunto nell’espressione:



Esprimendo la composizione elementare della materia organica in base ai suoi componenti fondamentali (C,H,O,N) si può usare il seguente schema stechiometrico per la reazione globale:



Dai bilanci elementari si possono ottenere i coefficienti stechiometrici w , x , y e z in funzione di a , b , c e d ottenendo:



Questa relazione permette di valutare la quantità e la qualità del biogas teoricamente generabile nel caso che tutta la massa di rifiuti reagisse anaerobicamente e completamente. Analogamente sarebbe possibile calcolare le moli di acqua richieste dalla reazione.

¹¹ G.Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, (1993), *Integrated solid waste management – Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, Inc.

¹² B.Bonori, G.Pasquali, M.Bergonzoni, (2001), *Landfill gas production valued with a mathematical method*, in Sardinia 2001, CISA, Cagliari.

In totale le moli di biogas prodotte saranno:

$$x + y + z = \frac{4a + b - 2c - 3d}{8} + \frac{4a - b + 2c + 3d}{8} + d = a + d = \text{moli}_{\text{bio,s}}$$

Questa quantità è relativa al biogas secco, se si considera che il processo ha luogo in un ambiente saturo di vapore acqueo alla temperatura riscontrabile all'interno della discarica, si possono calcolare le moli di biogas umido prodotte.

Frazione merceologica	C	H	O	N	Inerti
Rifiuti di cibo	28,7	03,1	29,2	01,9	37,1
Carta	44,4	04,4	40,9	00,1	10,2
Cartone	44,0	05,9	44,6	00,3	05,2
Plastiche	60,0	07,2	22,8	00,0	10,0
Tessili	39,6	06,5	25,3	05,6	23,0
Gomma	78,0	10,0	00,0	02,0	10,0
Scarti di giardinaggio	45,5	08,7	20,1	01,8	23,9
Vetro	00,5	00,1	00,4	00,1	98,9
Metalli	04,5	00,6	04,3	00,1	90,5
Legno	49,5	06,0	42,7	00,2	01,6
Polveri ed altro	26,3	03,0	02,0	00,5	68,2

Tabella 2 – Composizioni elementari dei rifiuti (adattata da Rif.4)

Indicando con $p_{\text{H}_2\text{O}}^*(t_a)$ la tensione di vapore dell'acqua alla temperatura t_a e con p_{tot} la pressione atmosferica, la frazione di vapore acqueo nel gas sarà data da:

$$y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(t_a)}{p_{\text{tot}}} \text{ ed anche } y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{moli}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{moli}_{\text{bio,s}} + \text{moli}_{\text{H}_2\text{O}}}$$

da cui, esprimendo dapprima le moli di acqua in funzione della frazione di vapor acqueo e delle moli di biogas secco, si arriva a trovare la quantità di biogas umido come:

$$moli_{\text{bio,u}} = moli_{\text{bio,s}} + moli_{\text{H}_2\text{O}} = \left(1 + \frac{y_{\text{H}_2\text{O}}}{1 - y_{\text{H}_2\text{O}}}\right) \cdot moli_{\text{bio,s}} = \frac{1}{1 - y_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot moli_{\text{bio,s}}$$

Il calcolo necessita di dati specifici sulla composizione merceologica del rifiuto presente in discarica, sulle composizioni chimiche¹³ elementari (Tabella 2) e sulle percentuali di biodegradabilità¹⁴ delle varie frazioni merceologiche (Tabella 3).

Frazione merceologica	% Biodegradabilità (B_i)
Rifiuti di cibo	82 %
Carta	52 %
Cartone	47 %
Plastiche	0 %
Tessili	54 %
Gomma	0 %
Vestiario (fibre naturali)	82 %
Scarti di giardinaggio	60 %
Legno	72 %
Vetro	0 %
Metalli	0 %
Polveri ed altro	30 %

Tabella 3 – Percentuali di biodegradabilità delle frazioni merceologiche¹⁵

Poiché i rifiuti hanno differenti velocità di biodegradazione si può dividerli in due classi: rifiuti a degradazione veloce e rifiuti a degradazione lenta. (Tabella 4). In questo modo si dovranno considerare due masse di sostanza organica biodegradabile per ciascuna classe merceologica:

¹³ Negli inerti è stato incluso lo zolfo in quanto non considerato nelle reazioni del modello.

¹⁴ Per le percentuali di biodegradabilità e per le composizioni chimiche elementari, in mancanza di dati specifici sul rifiuto presente in discarica, possono essere usati dati di letteratura come quelli riportati nelle tabelle.

¹⁵ Adattata da: Bonori, Pasquali, Bergonzoni; (2001). *Landfill gas production valued with a mathematical method*. Rif. 4

$$w_{s,bd,j,V} = w_{s,j} \cdot \frac{B_j}{100} \cdot \frac{V_j}{100}$$

$$w_{s,bd,j,L} = w_{s,j} \cdot \frac{B_j}{100} \cdot \frac{L_j}{100}$$

dove $w_{s,j}$ sta ad indicare la percentuale di massa secca della frazione j -esima, $w_{s,bd,j}$ la percentuale di massa secca e biodegradabile di tale frazione mentre V_j ed L_j indicano rispettivamente le percentuali di velocità di biodegradazione veloce e lenta. Per ognuna di queste masse si devono calcolare i coefficienti a,b,c,d da inserire nello schema stechiometrico globale della reazione.

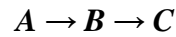
La degradazione dei rifiuti avviene in tempi differenti per i diversi tipi di rifiuto per cui la produzione media annuale di biogas si potrà ottenere sommando i contributi dovuti ai due termini di degradazione veloce e lenta. Si assume che la reazione veloce duri per 5-7 anni, mentre la reazione lenta prosegua fino a 15-20 anni dal deposito in discarica.

Categoria merceologica	Veloce (V_j)	Lenta (L_j)
Rifiuti di cibo	100%	
Carta	100%	
Cartone	100%	
Tessili		100%
Vestiario		100%
Scarti di giardinaggio	60%	40%
Legno		100%
Polveri ed altro		100%

Tabella 4 – Percentuali velocità di biodegradazione delle frazioni merceologiche¹⁶

¹⁶ Da Bonori, Pasquali, Bergonzoni. (2001). *Landfill gas production valued with a mathematical method*. Rif. 4.

Per valutare la produzione teorica di biogas nel tempo si può vedere il processo come risultato di una reazione consecutiva in un reattore discontinuo:



Si può quindi scrivere il seguente sistema:

$$\begin{aligned}\frac{dc_A}{dt} &= -k_1 c_A \\ \frac{dc_B}{dt} &= k_1 c_A - k_2 c_B \\ \frac{dc_C}{dt} &= k_2 c_B\end{aligned}$$

dove per $t = 0$ si ha $c_A = c_0$; $c_B = c_C = 0$.

Si ottiene quindi:

$$\begin{aligned}c_A(t) &= c_0 e^{-k_1 t} \\ c_B(t) &= \frac{c_0 k_1 (e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t})}{k_1 - k_2} \\ \frac{dc_c}{dt} &= \frac{c_0 k_1 k_2 (e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t})}{k_1 - k_2} = r_C\end{aligned}$$

dove r_C è la velocità di reazione di C che rappresenta la produzione per unità di volume e di tempo. Note le costanti cinetiche sarebbe possibile calcolare la produzione di C nel tempo.

L'andamento di r_C in funzione del tempo, e quindi la produzione di biogas, presenta un massimo dopo pochi anni dal deposito per poi diminuire più lentamente.

Questo schema è valido però solo qualitativamente poiché la presenza di diverse componenti organiche, ognuna caratterizzata dalle sue specifiche reazioni e costanti cinetiche, rende il problema troppo complesso per poter essere risolto analiticamente.

Si può comunque superare questo ostacolo con una schematizzazione del processo, ipotizzando che la reazione avvenga in un tempo finito prefissato, che la produzione di biogas sia nulla il primo anno e che vari linearmente da un valore nullo fino ad un massimo per poi decrescere ancora linearmente fino a zero. (Fig. 9).

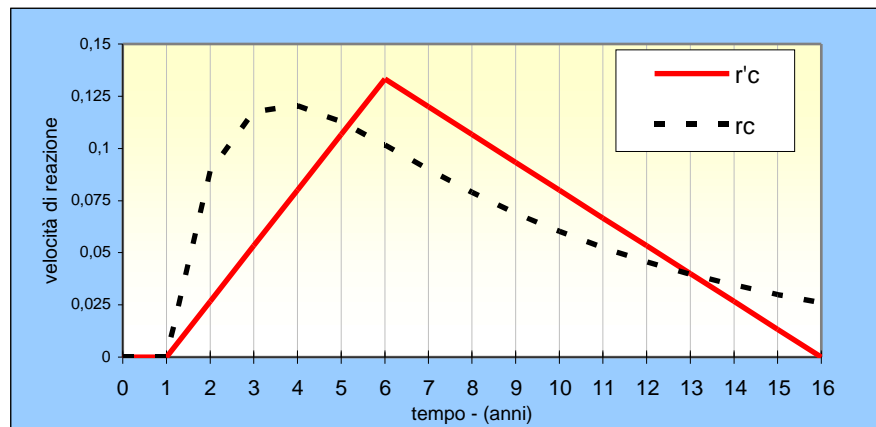


Fig. 9 - Andamento qualitativo della velocità di reazione reale r_c e ipotizzata r'_c ¹⁷

Ponendo t_0 il tempo in cui la reazione ha inizio, t_{max} il tempo in cui la reazione ha fine, t_M il tempo in cui si ha il massimo della velocità di reazione e $r'_{C,max}$ il valore massimo della stessa, si ottiene:

$$\text{al tempo } t \leq t_0 \text{ si ha } r'_c(t) = 0$$

$$\text{per } t_0 \leq t \leq t_M \text{ (fase crescente) si ha } r'_c(t) = r'_{C,max} \frac{t - t_0}{t_M - t_0}$$

¹⁷ Da: Bonori, Pasquali, Bergonzoni, (2001). *Landfill gas production valued with a mathematical method*. Rif. 4

per $t_M \leq t \leq t_{\max}$ (fase decrescente) si ha $r'_C(t) = r'_{C,\max} \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_M}$
per $t \geq t_{\max}$ si ha $r'_C(t) = 0$

La produzione teorica totale del biogas può quindi essere calcolata con lo schema di reazione che usa la formula bruta:

$$x \text{ CH}_4 + y \text{ CO}_2 + z \text{ NH}_3 = P_{t,bio} = \int_0^{\infty} r_C dt = \int_{t_0}^{t_{\max}} r'_C dt$$

che in accordo con l'andamento ipotizzato di r'_C si può riscrivere come:

$$x \text{ CH}_4 + y \text{ CO}_2 + z \text{ NH}_3 = P_{t,bio} = \int_{t_0}^{t_{\max}} r'_C dt = \frac{1}{2} r'_{C,\max} (t_{\max} - t_0)$$

da cui risulta: $r'_{C,\max} = \frac{2P_{t,bio}}{t_{\max} - t_0}$.

La generazione media in un periodo di tempo (che non contenga il massimo) si calcola come:

$$P_{media}(\Delta t) = \frac{r'_C(t) + r'_C(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t$$

Gli autori assumono per gli intervalli di tempo da considerare per reazione veloce e lenta i valori della tabella seguente (Tabella 5).

	Reazione veloce	Reazione lenta
t_0	1 anno	1 anno
$t_M - t_0$	1 anno	5 anni
$t_{\max} - t_0$	5 anni	15 anni

Tabella 5 – Intervalli di tempo caratteristici delle reazioni

La produzione annuale media teorica di biogas si ottiene quindi sommando i due termini ottenuti per il calcolo di reazione lenta e veloce.

I risultati vanno presi con una certa tolleranza poiché, certamente, non tutto il materiale biodegradabile smaltito in discarica reagisce anaerobicamente e/o nei tempi previsti, anzi se le condizioni non sono favorevoli ai microrganismi può capitare che gran parte della materia biodegradabile non venga decomposta. Inoltre si possono creare sacche di ristagno non si è fatto alcun riferimento alle condizioni di estrazione del biogas (possibilità di estrazione in depressione, etc.).

Ovviamente, la quantità di biogas *teoricamente captabile* dall'impianto d'estrazione sarà molto inferiore alla quantità teoricamente generabile dalla discarica, e la quantità realmente captata sarà ancora minore, non essendo realizzabili impianti con efficienza di captazione del 100%.

D'altro canto questo modello matematico, anche se semplificato, ha il pregio di produrre risultati di tutto rispetto nei confronti di modelli più complessi.

2.3. Il modello LandGEM della U.S. E.P.A.

L'Environmental Protection Agency degli Stati Uniti ha sviluppato un modello matematico chiamato "Landfill Gas Emission Model"¹⁸ che è disponibile anche in forma di applicativo per personal computer (con sistema operativo Windows®) e può fornire, oltre alla stima della generazione di metano e diossido di carbonio, anche quella di composti organici non metanici "NMOC". Il modello nasce infatti come strumento per il controllo ambientale delle emissioni inquinanti generate dalle discariche americane.

Le informazioni richieste dal modello sono combinazioni di parametri specifici del sito oggetto di studio:

- capacità della discarica,
- il numero di anni di attività della discarica,
- l'eventuale presenza di rifiuti pericolosi (codisposal),
- il tasso di generazione "k" del metano, [1/anno]
- la generazione potenziale "L₀" di metano per tonnellata¹⁹ di rifiuto. [m³/t]

Il software propone due set di dati di default per k e L_0 ; uno dei quali usato per la verifica degli standard minimi di legge degli Stati Uniti ed un altro che produce risultati più rappresentativi (sempre tarati sui dati

¹⁸ Il software del modello LandGEM può essere scaricato gratuitamente dal sito internet www.epa.gov/ttn/chieftn "Office of Air Quality Planning and Standards Technology Transfer Network Website, CHIEF technical area"

¹⁹ ndr: Nella simbologia usata negli USA le tonnellate sono indicate con la sigla "Me" (Megagrammi) per non creare confusione con le "ton" del sistema anglosassone. (vedi appendice A.1.)

delle discariche degli USA). E' sempre consigliato però, quando possibile, utilizzare per il calcolo di k dati specifici del caso in esame, e per L_0 i dati di letteratura più rispondenti alla realtà considerata (generalmente L_0 è una funzione della frazione organica del rifiuto e della sua umidità e varia tra 100 m³/t e 170 m³/t), soprattutto in considerazione della grande differenza tra la realtà americana e quella italiana. Il tasso di generazione del metano, k , dipende da vari fattori, in particolare da:

- quantità di acqua presente nel rifiuto,
- pH, temperatura ed altri parametri ambientali,
- condizioni operative della discarica e condizioni del rifiuto trattato.

Il software LandGEM contiene una utility per il calcolo di k in base a dati specifici del sito che automatizza la risoluzione iterativa della seguente equazione²⁰:

$$k e^{-k} A_{avg} - \frac{Q_f}{2L_0 M_r} = 0$$

dove:

- A_{avg} è l'età media del rifiuto [anni], e si può calcolare attraverso la formula: $A_{avg} = \sum_{i=1}^N f_i \cdot A_i$ dove f_i è la frazione di rifiuto contenuto nell' i -esima sezione ed A_i è la sua età;

²⁰ Il metodo utilizzato per il calcolo di k è denominato "EPA Method 2E" ed è ritrovabile in "Code of Federal Regulations, Title 40, Charter I, Part 60, Appendix A" o anche attraverso internet: http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/cfrhtml_00/Title_40/40cfr60a_00.html oppure <http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-02e.pdf>

- Q_f è la portata stabilizzata di biogas attraverso il condotto di estrazione [m^3/min];
- L'_0 è il potenziale di generazione di metano modificato per tener conto della frazione non biodegradabile del rifiuto ($L'_0 = f L_0$; dove f = frazione degradabile) [$\text{m}^3/\text{tonnellata}$] ed
- M_r è la quantità di rifiuto biodegradabile nel raggio d'azione del condotto di estrazione [tonnellate].

Un metodo di risoluzione consigliato è quello di selezionare un valore di tentativo per k , inserirlo nell'equazione e, se il risultato è diverso da zero, modificare il valore di k finché il risultato del termine di sinistra nell'equazione precedente è uguale a 0 ± 0.001 .

Il modello LandGEM è basato sulla equazione del primo ordine:

$$Q_{CH_4} = L_0 R (e^{kc} - e^{kt})$$

dove:

- Q_{CH_4} = generazione di metano al tempo t , [m^3/anno]
- L_0 = generazione potenziale di metano, [$\text{m}^3_{CH_4}/\text{tonn. di rifiuto}$]
- R = la quantità annuale media di rifiuti immessi in discarica [tonn./anno]
- k = tasso di generazione di metano [1/anno]
- c = il numero di anni trascorsi dalla chiusura della discarica ($c=0$ se la discarica è ancora attiva)

- t = anni trascorsi dal primo deposito di rifiuti in discarica

Viene considerato il biogas prodotto come formato per il 50% da metano e per l'altro 50% da CO₂; la generazione teorica totale di biogas può quindi essere calcolata stimando la produzione di metano e raddoppiandola.²¹ E' comunque possibile considerare altre proporzioni se si dispone di dati attendibili in tal senso.

The screenshot shows the 'Landfill Gas Emissions Model' software interface. At the top, the title bar reads 'Landfill Gas Emissions Model - [Operating Parameters: C:\DOCUMENT~1\TESILA~1\BIBL...'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Defaults', 'Parameters', 'Reports', 'Utilities', 'Window', and 'Help'. Below the menu bar, there are input fields for 'Year Opened' (1989), 'Current Year' (2003), and 'Capacity' (929107 Mg). There are also checkboxes for 'Refuse in Place (Mg)' and 'Acceptance Rate (Mg/Yr)'. The main part of the interface is a table with the following data:

Year	Acceptance Rate [Mg]	Refuse In Place [Mg]
1989	1.092900E+04	0.000000E+00
1990	1.732900E+04	1.092900E+04
1991	3.008900E+04	2.825800E+04
1992	5.439400E+04	5.834700E+04
1993	6.306700E+04	1.127410E+05
1994	6.308400E+04	1.758080E+05
1995	6.361000E+04	2.388920E+05
1996	6.372600E+04	3.025020E+05
1997	6.228700E+04	3.662280E+05
1998	6.510600E+04	4.285150E+05
1999	6.597600E+04	4.936210E+05
2000	5.945300E+04	5.595970E+05
2001	6.205700E+04	6.190500E+05
2002	6.200000E+04	6.811070E+05
2003	0.000000E+00	7.431070E+05

Fig. 10 - Schermata principale di LandGEM US-EPA

Il modello può essere utilizzato anche per valutare, una volta in possesso di analisi atte ad individuare la presenza di altri composti nel

²¹ Informazioni sulle assunzioni usate nel modello possono essere trovate in "Background information document (NTIS-PB91-197061) written to support the Standards of Performance for New Stationary Sources (40 CFR 60 Subpart WWW) and Emission Guidelines for Control of Existing Sources (40 CFR 60 Subpart Cc)" US-EPA.

biogas, per stimare le quantità teoriche generabili di NMOCs, di VOCs (Composti Organici Volatili) o di altri inquinanti.

Poiché il modello è stato realizzato essenzialmente per scopi di protezione della salute pubblica e dell'ambiente, i risultati prodotti rappresentano le quantità massime di inquinanti (compresi CH₄ e CO₂) che possono venire rilasciate in atmosfera. Per poter utilizzare gli stessi risultati a scopi di recupero energetico si deve tener conto sia del fatto che gran parte del biogas prodotto non è captabile e va disperso per altre vie, sia della efficienza di captazione dell'impianto.

2.4. Il metodo del “pressure rebound”

Il metodo del “pressure rebound”²² (letteralmente “rimbalzo di pressione”) è stato messo a punto da G. Thrupp, J.M. Lamborn e T.A. Delfino e si basa su semplici misure di pressione, da effettuarsi in determinate condizioni, sull’impianto di estrazione del biogas.

Questo metodo, a differenza di quelli esposti precedentemente, non fornisce immediatamente una stima della produzione di biogas nel lungo periodo o negli anni futuri, ma può comunque essere utile, sia per valutare l’adeguatezza di un determinato impianto di captazione, sia come base per la calibrazione di altri modelli matematici.

I fondamenti teorici di questo modello si basano sul fatto che quando l’estrazione del biogas viene bloccata, il conseguente aumento della pressione nell’impianto è una funzione del tasso di generazione del gas, del volume occupato dal gas, della temperatura e della velocità con la quale il gas esce dalla discarica. Quest’ultimo parametro dipende dalla differenza di pressione tra l’interno e l’esterno della discarica e dalla permeabilità del contorno (materiale di copertura, isolanti, etc...). Comunque, per condizioni di pressione prossime a quelle atmosferiche, il “rimbalzo” di pressione è relativamente indipendente dalle condizioni al contorno e perciò può essere usata la legge dei gas perfetti per stimare il tasso di generazione di biogas senza introdurre errori significativi:

$$PV = nRT \Rightarrow P = \frac{nRT}{V}$$

²² Sardinia 99, Rif.2, *Landfill gas generation rates estimated from pressure rebound in extraction systems*, pp. 449-456.

dove P è la pressione, V è il volume di gas (volume degli spazi vuoti all'interno della discarica), n è il numero di moli di gas, R è la costante universale dei gas perfetti ($0.082 \text{ m}^3 \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{Kmole}$), e T è la temperatura del biogas (K).

Assumendo costanti il volume e la temperatura, la variazione di pressione è una funzione della variazione del numero di moli di gas:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dn}{dt}$$

Misurando il “rimbalzo” di pressione, che ci dà dP/dt , si può risolvere l'equazione e trovare il valore di dn/dt che ci fornisce il tasso di generazione del biogas:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{V}{RT} \left. \frac{dP}{dt} \right|_{P=0}$$

In questo modo, convertendo il tasso di generazione da molare in volumetrico, si può ottenere una stima abbastanza accurata dei metri cubi di biogas prodotti nella discarica in un dato intervallo di tempo (non superiore ad un anno).

Bisogna, tuttavia, considerare che l'efficacia della captazione del biogas è molto dipendente dalle caratteristiche specifiche di ogni singolo impianto di estrazione e da quelle della discarica. Al riguardo sono riportati in letteratura parecchi valori differenti dell'efficienza di captazione del biogas in discarica, spesso basati su serie di dati limitate e per di più soggetti a molte assunzioni semplificative. La maggior parte degli Autori riportano efficienze medie del 50%, altri tra il 75% ed il 90% (Ham et al., 1979); Cernuschi e Giugliano (1996) suggeriscono

valori variabili tra il 20% ed il 90%; Bogner e Spokes (1993) tra il 40% ed il 90%.

Il monitoraggio del rimbalzo di pressione in discarica, quando viene disattivato l'impianto di estrazione, consente, in modo abbastanza semplice, di stimare il tasso di generazione del biogas caratteristico della discarica esaminata. In tal modo si potrebbero altresì ridurre i costi ed i tempi per la valutazione dell'adeguatezza di un dato impianto di captazione.

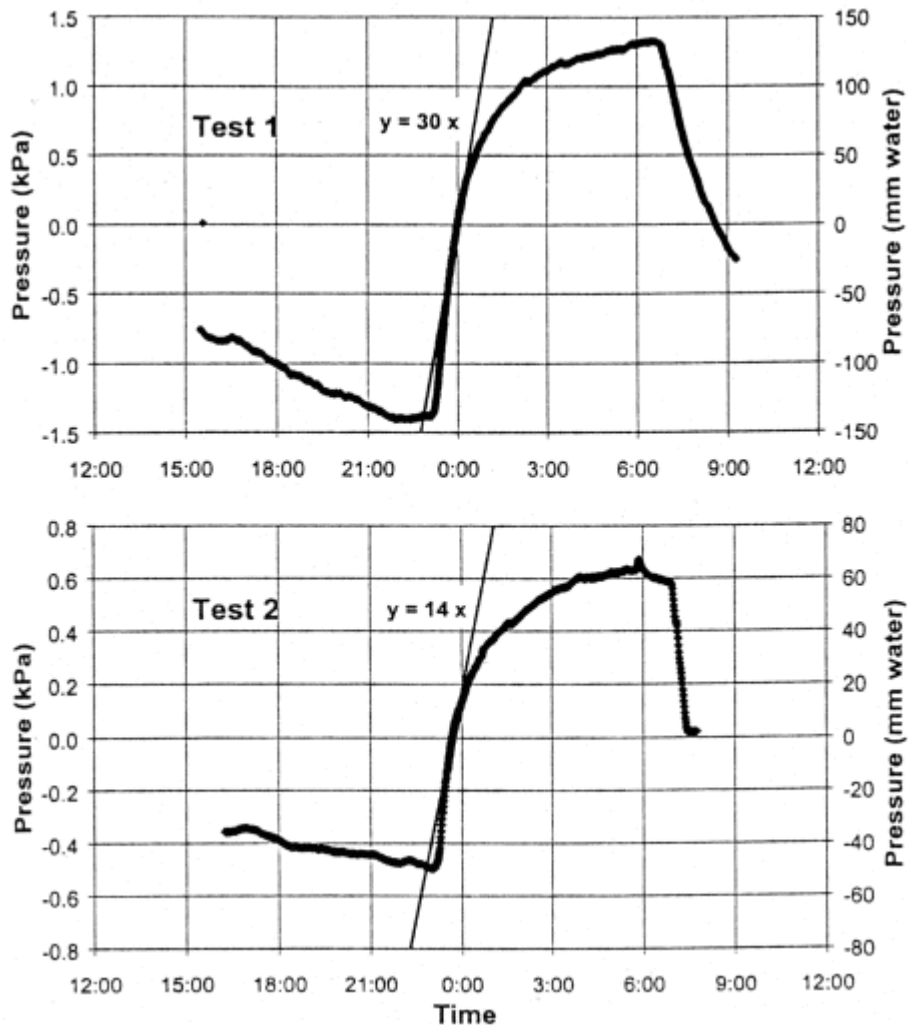


Fig. 11 - Test del "pressure rebound"

I test possono essere completati in alcune ore e l'equipaggiamento tecnico necessario per il monitoraggio dell'andamento della pressione è relativamente semplice.

Purtroppo questa tecnica è soggetta a due assunzioni significative: si ipotizza che la discarica si comporti e funzioni come un "unico blocco", e che la distribuzione dei valori della porosità sia uniforme dappertutto. Si potrebbero sicuramente migliorare i risultati ottenibili procedendo ad una analisi della discarica "per compartimenti", oppure monitorando contemporaneamente più condotti di aspirazione, opportunamente distribuiti nello spazio, e combinando matematicamente i valori ricavati.

Per quanto riguarda il valore della porosità da assegnare all'ammasso di rifiuti deposti in discarica, non esiste un valore universale e non c'è accordo tra i vari studi effettuati. Christensen et al. (1996) suggerisce un valore della porosità uguale a 0,1 mentre l'EPA degli Stati Uniti raccomanda un valore di 0,4. Le stime del tasso di generazione di biogas sono direttamente proporzionali al valore assunto per la porosità, e quindi, per ottenere risultati più accurati, è auspicabile un ricorso a dati ottenuti "in situ", dalle esame dello specifico caso di studio.

Il monitoraggio e l'analisi accurata delle pressioni di rimbalzo, se effettuati periodicamente ad intervalli regolari, possono fornire una valida base per poter calibrare e validare altri modelli matematici di generazione di biogas.

I test condotti nella discarica australiana di "Narre Warren"²³, i cui risultati sono più ampiamente discussi in "Sardinia 99", hanno portato a

²³ Narre Warren regional landfill in Victoria, Australia. In Sardinia 99 (Rif. 2), pp. 441 – 456.

risultati in ragionevole accordo sia con i dati reali registrati dal gestore dell'impianto, sia con le stime prodotte dal modello LandGEM²⁴ dell'US-EPA.

²⁴ Vedi paragrafo 2.3.

3. UN CASO DI STUDIO REALE

3.1. Caratterizzazione del territorio e del bacino d'utenza

Il caso di studio preso in considerazione è una discarica per rifiuti solidi urbani ed assimilabili situata nell'entroterra della Provincia di Ancona e più precisamente nel territorio del comune di Maiolati Spontini. In quest'impianto, nel 1999, è stato smaltito il 25,62% di tutta la produzione provinciale di rifiuti solidi urbani.²⁵



Fig. 12 - Ubicazione della discarica di Maiolati

La provincia di Ancona è caratterizzata da una scarsa e non uniforme densità abitativa, pari a 229 abitanti per chilometro quadrato (1999), indice tra i più bassi dell'intero Paese. Tale dato rispecchia la peculiarità del territorio marchigiano, con una maggiore densità nei comuni del

²⁵ Fonte: Piano Provinciale di Gestione Rifiuti della Provincia di Ancona (2001)

litorale rispetto a quelli dell'entroterra (solo 27 ab/km² per Genga, con altri 11 comuni al di sotto dei 100 ab/km²). Circa un quarto della popolazione della provincia è costituito dagli abitanti della città di Ancona e questo dato influenza in maniera determinante la produzione media di rifiuti dell'intera provincia, pari a 1,49 Kg/die a persona (1999). Negli ultimi anni la popolazione è aumentata, anche se non in maniera sensibile. Dal 1991 al 1999 si è avuto un incremento del +1,8% dovuto, soprattutto, ai flussi migratori.

Se si vuole valutare l'evoluzione del tenore di vita nella provincia, si può analizzare l'andamento di indici come il "prodotto interno lordo" (PIL). Quest'ultimo tra il 1991 ed il 1997 ha fatto registrare un aumento di circa il 33%.

Densità di popolazione e PIL sono indicatori significativi perché incidono sulla produzione dei rifiuti in modo non trascurabile; ad un maggior benessere corrisponde una maggior tendenza a disfarsi delle cose; una più intensa antropizzazione e concentrazione demografica determinano una composizione merceologica del rifiuto nettamente differente da quella delle aree rurali. E' sempre più evidente, in ogni caso, la tendenza verso l'arricchimento della frazione combustibile (imballaggi, plastiche etc.) e l'impoverimento di quella organica.

Per quanto riguarda il sistema integrato di gestione dei rifiuti attuato dalla provincia, la cui realizzazione integrale è prevista per il 2004, l'ambito territoriale ottimale (ATO) per lo smaltimento ed il recupero dei rifiuti è individuato nel territorio dell'intera Provincia. L'ATO, in base alle possibilità previste dal Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti, è stato suddiviso in due sub-bacini di smaltimento/recupero in modo da evitare la creazione di pochi grandi centri di trattamento, difficilmente

allocabili sul territorio e dall'ampio impatto, sia ambientale che sociale. Ogni bacino deve essere dotato di:

- un impianto di selezione della frazione secca
- un impianto di trattamento del rifiuto organico, finalizzato almeno alla riduzione delle caratteristiche di putrescibilità del rifiuto stesso ed, in prospettiva, alla produzione di compost di qualità
- almeno una discarica di supporto

Alla luce dei quantitativi ipotizzati è sufficiente un solo impianto provinciale per la produzione di compost di qualità che è stato individuato nel Comune di Maiolati Spontini (bacino n° 2). Nello stesso bacino sono previste, a regime, due discariche funzionanti.

Nel 1999 veniva smaltito nelle discariche della Provincia circa il 90% del totale dei rifiuti solidi urbani prodotti; il piano provinciale di gestione dei rifiuti della Provincia di Ancona si pone l'obiettivo di ridurre tale percentuale a circa il 50% entro l'anno 2004. Nel 1997, nella provincia di Ancona, sono state prodotte 220.474 tonnellate di rifiuti urbani, con una quota pro-capite di circa 499 Kg/anno. Per il calcolo di tale valore, tra i rifiuti urbani sono stati compresi anche quelli "assimilabili e assimilati" che provengono dall'artigianato, dal commercio, dall'agricoltura e dai servizi.

La composizione merceologica dei rifiuti solidi urbani prodotti nella Provincia non è mai stata studiata in modo approfondito e sistematico e non esistono studi significativi, ci sono solo alcuni studi realizzati autonomamente da diversi soggetti, in particolare da Anconambiente

(1997, autore Igienstudio di Monsano), dai quali emerge un rifiuto urbano caratterizzato, mediamente, per il 55-65% da rifiuti domestici e per il restante 35-45% da rifiuti provenienti da attività commerciali o produttive (assimilati agli urbani).

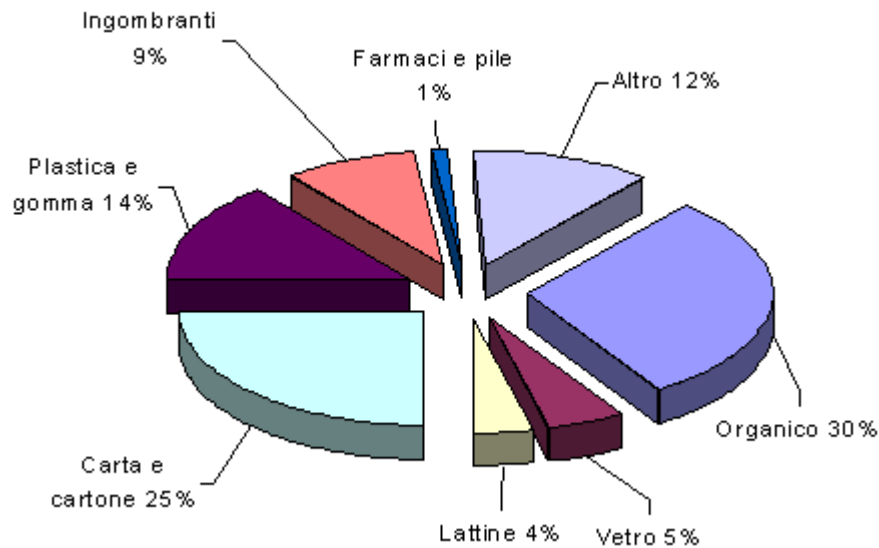


Fig. 13 - Composizione merceologica media italiana RSU²⁶

A livello nazionale esistono diversi studi che dimostrano che la composizione dei rifiuti urbani sta cambiando notevolmente negli ultimi anni con la crescita delle frazioni secche (carta, plastica, vetro, metalli) rispetto alla componente organica. Da un confronto tra diverse analisi, effettuate da soggetti distinti, sulla composizione in peso di rifiuti, si è potuto constatare che l'organico rappresenta circa il 30%, la plastica circa il 14-15%, la carta ed i cartoni più o meno il 27%, il vetro circa il 7% ed i metalli approssimativamente il 5% dei rifiuti urbani.

Sulla base di altre analisi condotte direttamente alla fase di raccolta (al cassonetto) si sono notate alcune differenze: la carta e i cartoni variano, sulla quantità totale dei rifiuti, dal 21% nei comuni con meno di 20.000

²⁶ Fonte dati: Federambiente, anno 1998.

abitanti, al 25% nei comuni con più di 100.000 abitanti; le plastiche oscillano tra il 10% e l'11%, i metalli tra il 2,8% ed il 3,3%, il vetro tra il 6,5% ed il 7,5%. Le altre componenti, come il sottovaglio, variano dal 12% al 13%, i tessili dal 4,9% al 5,5%, il cuoio e la gomma dal 3,1% al 3,4% ed i pannolini dal 1,8% al 2,8%.

Se dall'analisi in peso si passa a quella della volumetria la situazione cambia, infatti: la plastica rappresenta circa il 55% del volume totale di RSU e la carta più o meno il 18%. Carta e plastica rappresentano, quindi, il 70% del volume dei rifiuti alla raccolta. All'opposto, l'organico, che in peso è circa il 30% dei rifiuti solidi urbani, in volume occupa solo il 13%; il vetro, poi, solo 1,5% in volume.

Da quanto finora esposto, emerge chiaramente l'impossibilità di poter disporre di dati esatti riguardo alle caratteristiche specifiche dei rifiuti smaltiti in discarica; i vari dati presi in considerazione vanno analizzati nella loro complessività, con la consapevolezza che essi hanno origini diverse.

La struttura impiantistica della Provincia di Ancona risente di un sistema improntato, fino ad oggi, allo smaltimento in discarica. E' stata, in ogni caso, superata la concezione delle piccole discariche al servizio dei singoli Comuni e si sta giungendo ad una graduale riduzione del loro numero complessivo con la realizzazione di impianti di capacità maggiore in grado di garantire un miglior controllo ambientale mediante l'utilizzo di tecnologie più avanzate.

Prima del 1982 erano in funzione ben 29 discariche di prima categoria, nel 1990 erano undici e al 31 dicembre 1999 ne erano in esercizio solo 6. (Fig. 14).

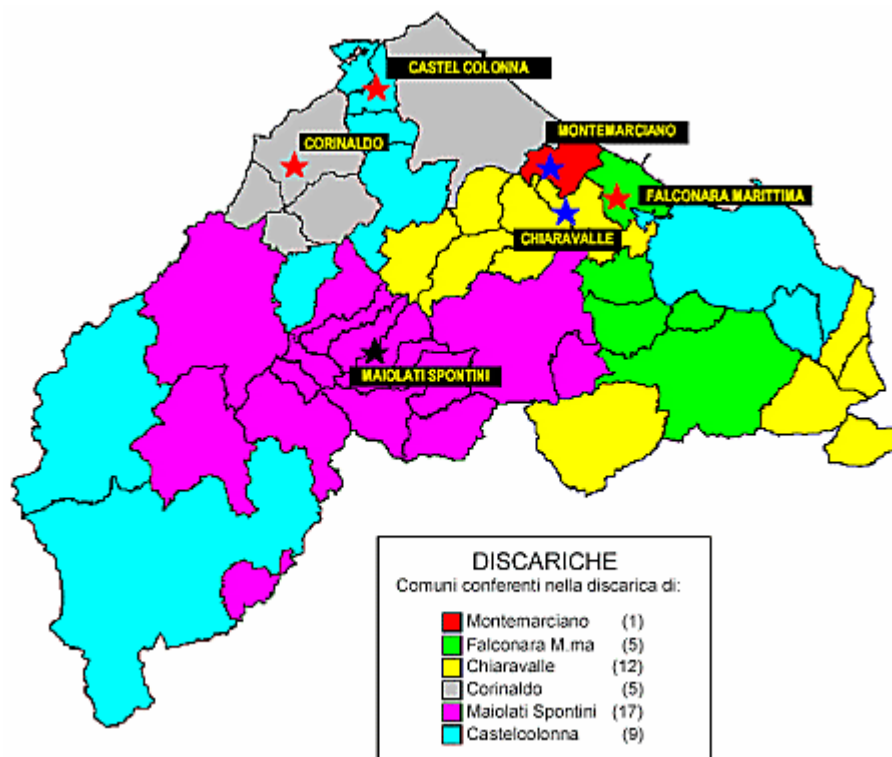


Fig. 14 - Discariche al servizio della Provincia di Ancona²⁷

Il bacino d'utenza servito dalla discarica di Maiolati Spontini è alquanto ampio e l'impianto è destinato a svolgere un ruolo ancora più rilevante in vista dell'attuazione completa del piano provinciale di gestione dei rifiuti di cui si è già parlato più sopra.

I comuni che smaltiscono i loro rifiuti nella discarica di Maiolati sono distribuiti su un territorio abbastanza esteso comprendente i paesi di Maiolati Spontini, Jesi, Castelbellino, Castelplanio, Rosora, Poggio S.Marcello, Mergo, Cupramontana, Montecarotto, Monte Roberto, S.Paolo di Jesi, Staffolo, Serra S.Quirico, Santa Maria Nuova, Cerreto d'Esi, Genga, Arcevia ed altri centri minori.

²⁷ Situazione al 31/12/1999. Tratto dal PPGR della Provincia di Ancona.

Per molti di questi comuni, l'azienda SO.GE.NU.S. S.p.A., che gestisce la discarica, si occupa anche del servizio di raccolta dei rifiuti solidi urbani (Fig. 15). I mezzi sono a carico laterale (sistema economicamente più conveniente per unità di rifiuto) e sono dotati di sistemi di pesatura elettronica a bordo; i cassonetti sono stati recentemente rinnovati in modo, tra l'altro, da limitare il più possibile l'ingresso indesiderato di acqua piovana che influirebbe negativamente sul processo di trattamento del percolato raccolto in discarica.

L'organizzazione della raccolta dipende dal sistema territoriale, dalla densità della popolazione e dalla tipologia dei rifiuti; sono questi i fattori che determinano la frequenza di svuotamento dei cassonetti (giornaliera per rifiuti domestici e rapidamente putrescibili, settimanale ed anche più per i rifiuti secchi).



Fig. 15 - Autocompattatore per la raccolta di RSU

Il quantitativo di rifiuti solidi urbani ed assimilabili raccolti e smaltiti in questa discarica ogni anno, si aggira mediamente intorno alle 60.000

tonnellate. Di questi, più o meno il 60% è costituito da RSU mentre il restante 40% da assimilabili ed assimilati, costituiti a loro volta per un 40% circa da fanghi di depurazione di impianti civili.²⁸

Dal 1996 gli scarti di giardinaggio, gli sfalci e le potature, alcuni fanghi ed altri materiali organici e cellulosici vengono preselezionati ed avviati all'impianto di compostaggio, situato in loco, in grado di trattare fino a 15.000 t/anno. In questo modo si evita che un quantitativo medio superiore alle 9.000 tonnellate annue di rifiuti, utilizzabili per produrre ammendante compostato per l'agricoltura, venga sprecato e vada a ridurre la vita utile della discarica. (Tabella 6)

	Quantità arrivata Aprile-Giugno 2002 (tonn/trim.)	Quantitativi totali arrivati nel 1°+2° trimestre 2002 (tonn)	Necessità annua per produrre 13.000 t/anno in ingresso
Materiali cellulosici	1.351	2.029	7.000 t/anno
Fanghi + organico	1.330	2.640	6.000 t/anno

Tabella 6 – Quantitativi di rifiuti avviati al compostaggio²⁹

A breve, così come previsto dal Piano Provinciale Gestione Rifiuti, è prevista l'attivazione della raccolta differenziata secco-umido e la gestione dell'impianto di selezione della frazione secca (con potenzialità fino a 70.000-80.000 t/anno) al fine di evitare ancor più che i rifiuti solidi urbani tal quali vengano abbancati in discarica.

²⁸ Fonte dati: Relazioni tecniche trimestrali dell'Azienda SO.GE.NU.S.

²⁹ Fonte dati: SO.GE.NU.S. – STUDIO MOSCA, (2002), Relazione 2° trimestre 2002.

3.2. La discarica di Maiolati Spontini (AN)

L'impianto per la gestione dei rifiuti preso in esame è condotto in concessione, dal 1989, dalla azienda SO.GE.NU.S. S.p.A. (certificata a norme ISO9002 e ISO14001) con sede a Moie di Maiolati Spontini. La discarica “nacque” nel 1972 ed è stata condotta a gestione privata fino al 1985. In seguito si sono susseguiti diversi interventi di adeguamento alle disposizioni di legge e di ampliamento della cubatura utile, ma è solo dal 1989 che la discarica ha cominciato a divenire pienamente operativa. Negli ultimi anni la discarica è stata ulteriormente ampliata ed è stato ridistribuito lo spazio disponibile tra i vari comparti.



Fig. 16 - Vista panoramica della discarica

La discarica comunale della “Cornacchia”, sita nel Comune di Maiolati Spontini, ha una estensione globale di circa 23 ettari. In questa area sono situati: l'impianto di abbancamento dei rifiuti solidi urbani e degli assimilabili agli urbani (1^a categoria), l'impianto di deposito dei rifiuti solidi industriali (2^a categoria tipo B), le strutture per lo stoccaggio

provvisorio dei rifiuti pericolosi, l'impianto per la produzione del compost di qualità, l'impianto per la produzione di energia elettrica dal biogas, le apparecchiature per il trattamento di pneumatici usati mediante triturazione e l'impianto di trattamento mediante inertizzazione dei rifiuti speciali pericolosi e non, principalmente fanghi di provenienza industriale. La porzione superiore dell'impianto è adibita a discarica di seconda categoria tipo B, mentre nella parte inferiore si trova la zona utilizzata per lo smaltimento dei rifiuti solidi urbani ed assimilabili. Quest'ultima ha una capacità di quasi un milione di metri cubi. Le due aree sono divise da un setto separatore a cuneo costituito prevalentemente di materiale argilloso rivestito con appositi teli impermeabili ad alta resistenza.

La discarica sfrutta, per buona parte, lo spazio di un vecchio calanco lungo il pendio di una collina con una componente di discesa media di circa 11°; nella zona più in alto è situato l'ingresso con gli uffici ed i sistemi di pesatura dei mezzi di trasporto dei rifiuti.

La stratigrafia del terreno è composta, prevalentemente, da argille marnose-pleioceniche di buona consistenza e basso coefficiente di permeabilità ($K < 10^{-9}$ cm/sec) che rispetta ampiamente la normativa tecnica regionale vigente in materia, la quale prevede un coefficiente $K < 10^{-6}$ cm/sec. Questi litotipi garantiscono l'impermeabilizzazione naturale del fondo della discarica per la captazione del percolato, che, nella parte più vecchia, viene intercettato per mezzo di una rete di trincee drenanti e convogliato ad una vasca di raccolta in cemento armato a valle del cumulo della capacità di 152 m³ e dotata di sistema di sollevamento automatico. Da qui il percolato viene pompato in un bacino di accumulo artificiale sito a monte del comparto di 2^a categoria ed avente una capacità di circa 3.500 m³ da dove viene quotidianamente

prelevato per essere avviato al trattamento chimico-fisico presso gli impianti di depurazione della zona. Nelle nuove aree destinate all'abbancamento dei rifiuti, il progettista ha comunque deciso una ulteriore impermeabilizzazione con teli in HDPE (polietilene ad alta densità). In questi settori, il percolato viene intercettato attraverso una rete drenante di tubazioni fessurate immerse in un letto di ghiaia avvolto con tessuto non tessuto e posta subito sopra il telo di HDPE. Queste tubazioni convogliano il percolato in un unico pozzetto per ogni gradone, da dove viene poi convogliato tramite tubazioni non fessurate nella rete drenante del gradone inferiore, procedendo così di seguito fino a raggiungere la tubazione di raccolta posta alla quota più bassa che porta il percolato raccolto alla vasca di accumulo e sollevamento posta a valle dell'impianto.

La piovosità media della zona è di circa 995 mm/anno. Il bacino imbrifero sotteso alla linea di compluvio della vallecchia ha una superficie di circa 18 ettari e le acque che lo interessano defluiscono verso un fosso ai suoi piedi che registra la presenza di acqua solo per brevi periodi dell'anno, essenzialmente in corrispondenza degli eventi meteorici di maggior rilievo. Le acque di scorrimento superficiale vengono intercettate da una rete di canalette in cemento armato e in terra e convogliate direttamente verso fossi situati all'esterno del perimetro dell'impianto.

Dalle indagini geologiche effettuate non è mai stata rilevata la presenza di falde acquifere in profondità; i corsi d'acqua più vicini, fatta eccezione per il fosso di cui sopra e nei limiti del terrazzo alluvionale del fiume Esino, scorrono ad oltre 1.800 metri lineari. Non ci sono né pozzi, né sorgenti a valle dell'impianto ed il punto più vicino per l'approvvigionamento di acqua potabile si trova a più di 3.500 metri di

distanza. In ogni caso, per garantire la massima sicurezza ambientale, sono presenti alcuni pozzi piezometrici, profondi circa 20 metri, per il monitoraggio dell'intero impianto.

Per tenere sotto controllo la stabilità dei versanti sono stati installati due inclinometri posizionati uno a monte e l'altro a valle degli abbancamenti. Si è deciso, inoltre, di installare tre capisaldi trigonometrici fissi da utilizzare come punti di riferimento per la verifica dello sviluppo degli abbancamenti.

I rifiuti destinati alla discarica di prima categoria, dopo esser stati pesati (Fig. 23, pag. 65), vengono distribuiti sulla superficie di abbancamento e progressivamente compattati con apposite macchine operatrici pesanti. Alla fine di ogni giornata lavorativa viene posto uno strato di copertura di materiale inerte. L'ultimo strato di copertura finale viene realizzato con la sistemazione di una guaina isolante, sopra la quale vengono posti da uno a tre metri di materiali limo-argillosi. Ciò permette, grazie anche alla progressiva aspersione di semine, il riattecchimento di essenze erbacee ed arbustive limitando il fenomeno dell'erosione del terreno e facilitando il reinserimento della discarica nel contesto ambientale limitrofo.

Nella zona riservata ai rifiuti solidi urbani ed assimilabili è presente un sistema di captazione del biogas, che viene intercettato tramite una rete di pozzi drenanti realizzati mediante trivellazioni "a secco" eseguite con aste elicoidali. Il gas recuperato viene in parte bruciato tramite una torcia ed in parte convogliato verso un impianto per la produzione di energia elettrica. Quest'ultimo ha una potenza di 400 KW ed è stato attivato alla fine del 1996.

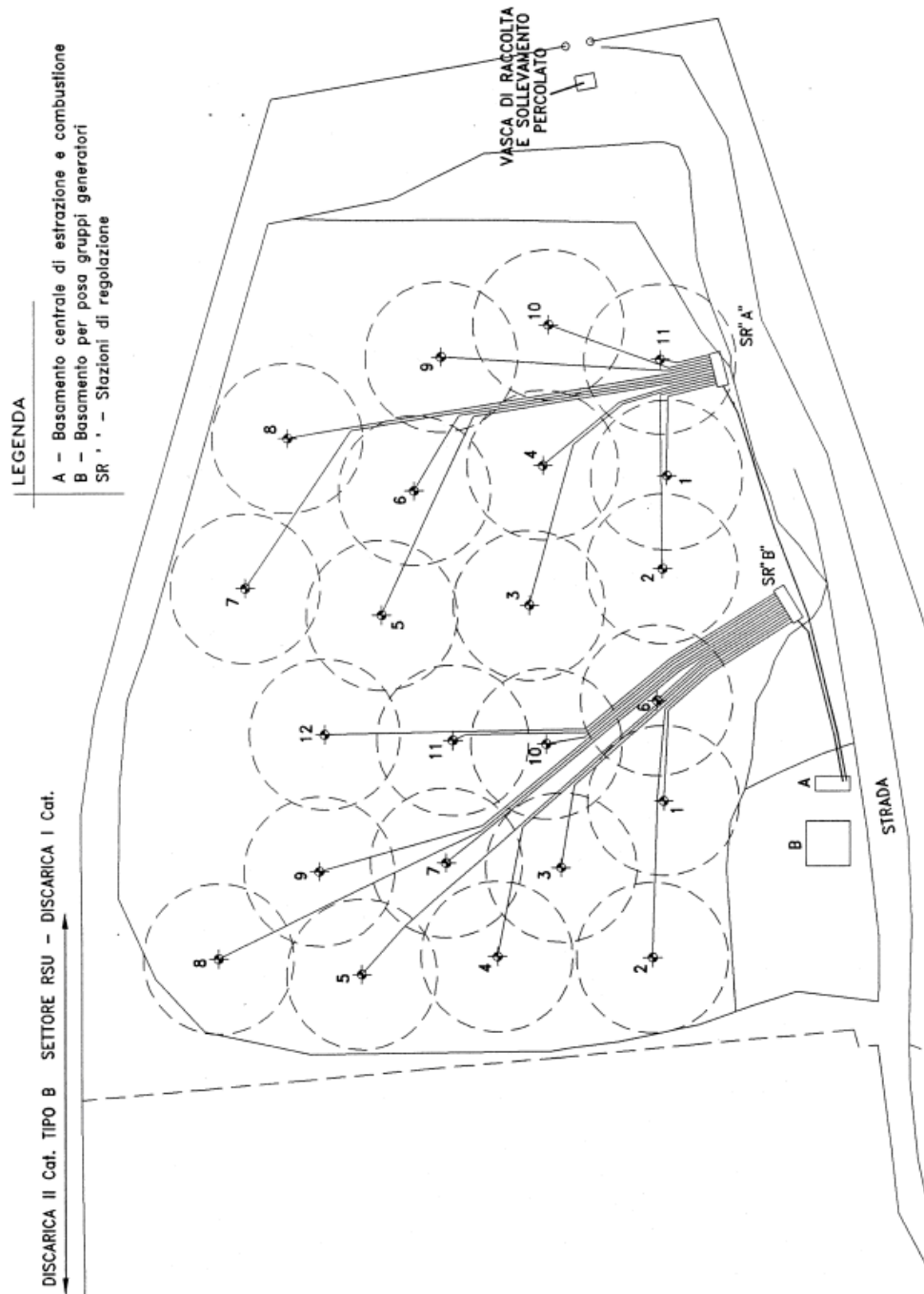


Fig. 17 - Planimetria del sistema di captazione del biogas³⁰

³⁰ Disegno riprodotto non in scala. Originale: Progetto Terra per SO.GE.NU.S s.p.a. (1995).

L'impianto viene gestito da ditte esterne che, collaborando col gestore della discarica, controllano il corretto funzionamento delle apparecchiature e l'andamento dei vari parametri fisico-chimici a distanza, tramite rete informatica.



Fig. 18 - Centrale per la generazione di energia elettrica dal biogas

L'impianto continua a produrre quantitativi di energia elettrica nella media dei 250.000 KWh mensili e, dall'entrata in funzione dell'impianto al mese di giugno 2002, è stato prodotto un quantitativo totale di energia elettrica pari a 18.302.229 KWh.

Dal punto di vista del funzionamento il biogas, captato dalla rete dei pozzi drenanti, viene convogliato in due sottostazioni di trattamento. Il biogas captato si trova in condizioni di saturazione di vapor acqueo alla temperatura di circa 40°C e prima di poter essere utilizzato c'è bisogno di rimuovere l'acqua in eccesso. Allo scopo viene utilizzato un impianto refrigerante per abbassare la temperatura e favorire la condensazione del vapore. Il gas viene poi fatto passare attraverso

appositi separatori. All'uscita il gas ha una temperatura tra 1°C e 3°C ed un contenuto assoluto di acqua molto basso.



Fig. 19 – Sottostazione di trattamento con separatori di vapore

La veicolazione del gas è garantita da un aspiratore che facilita la risalita naturale del biogas, applicando opportune depressioni ai singoli pozzi, e lo convoglia nella centrale di cogenerazione, ubicata a monte dell'impianto di 1^a categoria. Qui viene utilizzato per alimentare due motori a combustione interna di potenza differente collegati al generatore di energia elettrica. L'energia così prodotta viene poi immessa direttamente nella rete dell'ENEL.

I pozzi di estrazione hanno un diametro di 600 mm. All'interno è posto un tubo fessurato del diametro di 160 mm che ha lo scopo di raccogliere il gas. Tra il tubo fessurato ed il cumulo di rifiuti è posta della ghiaia con granulometria variabile tra i 3 cm ed i 5 cm. La ghiaia deve essere di tipo siliceo o basaltico ma in ogni caso non calcareo per non venire

alterata dal percolato, la cui influenza causerebbe la cementazione della ghiaia ed il blocco della funzionalità del pozzo.

I camini del biogas hanno produzioni diversificate in funzione della loro ubicazione, della "età" del manufatto, nonché delle caratteristiche dei rifiuti attigui. Ogni testa di pozzo, inoltre, permette di effettuare alcuni controlli funzionali grazie alla presenza di appositi sensori.

L'aspirazione del biogas dai vari condotti viene modulata automaticamente in modo da ottimizzare il rendimento dell'impianto e la composizione del biogas estratto. Infatti, per poter utilizzare il biogas nell'impianto per la produzione di energia elettrica è necessario che la percentuale di metano sia compresa tra il 46% ed il 52%. Perciò, non tutto il biogas viene utilizzato per la cogenerazione. Quando il quantitativo di metano scende fino al 35-36%, il biogas estratto va ad alimentare una torcia.



Fig. 20 - Torcia per il biogas

Tale torcia ha anche funzioni di sicurezza in quanto, in caso di guasto ai generatori, arresto per manutenzione, o di captazione di quantità eccedenti non avviabili al generatore, il gas viene automaticamente dirottato su di essa. All'interno del perimetro dell'impianto gestito dalla SO.GE.NU.S. oltre alla discarica di prima categoria ed al relativo impianto di trattamento del biogas, sono presenti, come già detto, una discarica di seconda categoria tipo B, un impianto per la triturazione di pneumatici ed un impianto per la produzione di compost di qualità.

Il comparto 2B è stato originariamente realizzato per una capacità complessiva di circa 600.000 m³. Successivamente si è deciso di destinare quasi 50.000 m³ di questo comparto per l'ampliamento della confinante discarica di prima categoria. L'invaso è impermeabilizzato naturalmente grazie alla formazione pliocenica argillosa-marnosa di cui si è già parlato ed anche qui il sistema di raccolta del percolato è costituito da trincee drenanti. Per lo stoccaggio dei rifiuti di seconda categoria tipo B vengono messe in atto procedure con trattamenti diversificati per materiali particolari e, prima dell'accettazione, vengono svolte accurate analisi per determinare la compatibilità del rifiuto con l'impianto. Agli attuali ritmi di conferimento si prevede il funzionamento di questo comparto per, più o meno, altri 20 anni.

L'impianto per la triturazione di pneumatici vecchi è in funzione dal 1993. La triturazione effettuata non ha lo scopo di riciclaggio, ma quello di ridurre la volumetria d'ingombro e di evitare i possibili problemi di stabilità che quantitativi rilevanti di pneumatici interi potrebbero generare sul cumulo di discarica. Dopo la triturazione, ciò che resta dei pneumatici viene abbancato nel cumulo di prima categoria ed in quello di categoria 2B. Dall'inizio della gestione SO.GE.NU.S. si stima che siano stati conferiti all'impianto circa 5.000 tonnellate di

vecchi pneumatici. Nell'ultimo periodo il conferimento medio annuo si è attestato intorno alle 400 tonnellate.

L'impianto per la produzione di compost di qualità è attivo dal marzo del 1996 ed occupa una superficie di circa 60.000 m², di cui 12.000 m² occupati dall'impianto di compostaggio vero e proprio. I mezzi utilizzati sono abbastanza semplici, in pratica si tratta di un trituratore, un rivoltatore, una pala gommata (Fig. 21) ed un vaglio. All'impianto confluiscono materiali preselezionati, in particolare sfalci e potature, rifiuti agro-alimentari e fanghi di depurazione con caratteristiche adeguate. Nell'anno 2001 sono state lavorate più di 9.500 tonnellate di materiali. Il compost di qualità prodotto viene commercializzato, mentre il sovrullo è reimmesso a cumulo con smaltimento finale in discarica.



Fig. 21 - Lavorazione del compost di qualità

Dal punto di vista paesaggistico e dell'impatto visivo, si rileva che l'ubicazione dell'impianto in una zona defilata dalle principali vie di

comunicazione e dai centri abitati (il più vicino si trova a più di 2Km di distanza), lo rende poco visibile e ciò, unito agli interventi di rinverdimento attuati dalla Società che gestisce l'impianto già in fase di coltivazione della discarica, fa sì che l'impatto visivo sia relativamente basso. Inoltre la morfologia dei luoghi, una volta raggiunti i profili finali della chiusura, consentirà, con opportune opere di ripiantumazione, il buon reinserimento dell'area nel contesto paesaggistico ed ambientale circostante.

Agli attuali ritmi di conferimento di RSU e RSA si prevede l'esaurimento del comparto di prima categoria per l'anno 2006.

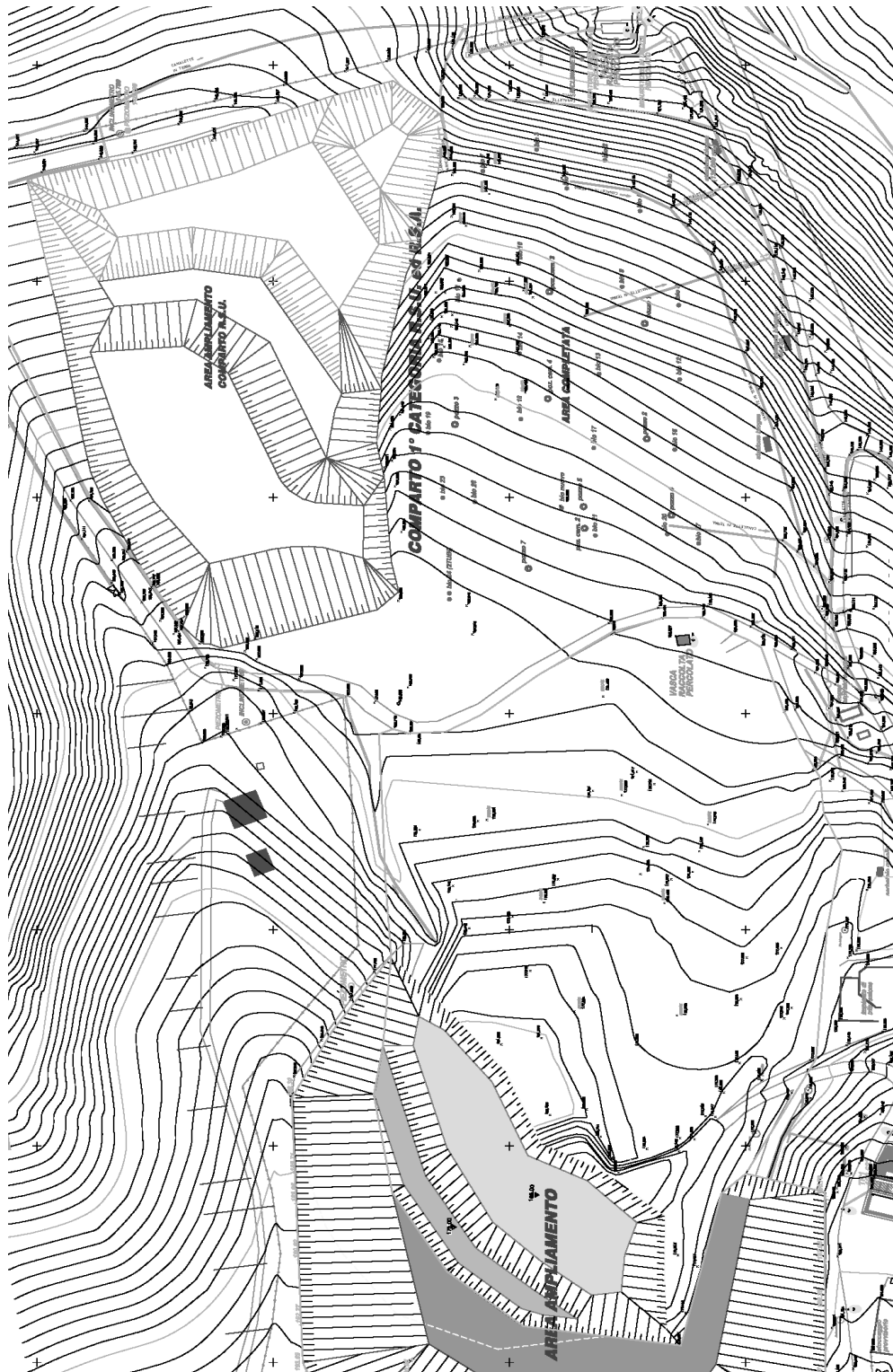


Fig. 22 - Planimetria della discarica di Maiolati Spontini

4. APPLICAZIONE DEI MODELLI AL CASO DI STUDIO

4.1. I dati a disposizione

I dati disponibili riguardano, innanzitutto, le quantità di rifiuti solidi urbani ed assimilabili agli urbani smaltite in discarica. Queste si possono facilmente ottenere dall'esame dei registri tenuti dalla azienda che gestisce l'impianto. Ogni carico di rifiuti viene, infatti, pesato all'ingresso della discarica prima di poter raggiungere l'area di abbancamento. (Fig. 23, pag. 65). Per la discarica di Maiolati Spontini, la SO.GE.NU.S. ha fornito i seguenti dati sull'afflusso dei rifiuti, riportati nella tabella seguente per comodità di lettura.

Anno	Tonnellate RSU+RSA	Anno	tonnellate RSU+RSA
1989	10.929	1996	63.726
1990	17.329	1997	62.287
1991	30.089	1998	65.106
1992	54.394	1999	65.976
1993	63.067	2000	59.453
1994	63.084	2001	62.057
1995	63.610		

Tabella 7 – Afflusso di RSU e RSA dal 1989 al 2001

Sempre in considerazione dei dati disponibili riguardo ai quantitativi smaltiti, è importante registrare come la presenza di un impianto per la produzione di compost modifichi in misura determinante la composizione dei rifiuti. E' da notare, appunto, che nel 2001 sono state lavorate a tal scopo più di 9.500 tonnellate di rifiuti organici che, altrimenti, sarebbero finite nella discarica di prima categoria.

Altri dati utili riguardano la capacità del comparto di discarica di prima categoria, di cui si è già discusso, pari a circa 1.000.000 di m³, e la densità media del rifiuto variabile tra 0,8-0,9 t/m³ per un rifiuto “giovane” e 1,2-1,3 t/m³ per i rifiuti ormai “invecchiati”.



Fig. 23 - Pesatura dei rifiuti portati in discarica

Per quanto riguarda la composizione merceologica del rifiuto smaltito, purtroppo, non esistono studi specifici effettuati sull'impianto, né nell'ambito territoriale in cui è situata la discarica. Allo scopo di poter applicare modelli che richiedono tali dati, si è usata la composizione merceologica media nazionale dei rifiuti prodotti in Italia (Tabella 9, pag. 72), adattandola poi per considerare il minor afflusso di “organico” in discarica dovuto alla lavorazione del compost qui presente. In ogni caso dovrà essere tenuta in conto la peculiarità del territorio servito dall'impianto, abbastanza vasto e senza la presenza di grandi centri urbani.

Per poter esaminare la rispondenza dei modelli teorici di generazione di biogas al caso di studio, e valutarne correttamente i risultati, è indispensabile disporre di dati quantitativi reali sul biogas captato dall'impianto di aspirazione. I dati forniti dal gestore sono relativi ai metri cubi misurati all'impianto di raccolta e sono quindi comprensivi della quota di biogas che viene bruciato in torcia. Tali dati sono riportati nella tabella seguente.

Anno	Biogas captato (Nm³)
1996	n.d.
1997	2.684.976
1998	2.415.652
1999	2.369.388
2000	2.369.160
2001	2.012.808
2002	2.496.000 ^{*31}

Tabella 8 – Quantitativi di biogas captati dall'impianto

Il biogas captato è costituito per il 50% circa da metano e per la restante parte da anidride carbonica più altri elementi in tracce. C'è da notare che, data la scala temporale del fenomeno e l'intervallo di tempo utilizzato per il computo dai vari modelli, i dati in possesso permettono comunque un confronto. Resterà, in ogni caso, un grado di indeterminazione non eliminabile, dovuto sia al corso degli eventi susseguitisi sullo specifico impianto, sia alle assunzioni alle quali si deve necessariamente ricorrere, e la cui influenza certamente non è quantificabile con esattezza.

Anche le caratteristiche tecniche ed i parametri funzionali dell'impianto di captazione sono importanti, soprattutto per la determinazione di parametri specifici riguardanti il sito in esame ed utilizzati dal modello

³¹ *Valore annuale stimato sul dato di 1.894.042 m³ totali relativo al 04/10/2002 fornito da SO.GE.NU.S. S.p.A.

LandGEM. In particolare, dall'osservazione del disegno di progetto dell'impianto di captazione del biogas, si è ricavato il raggio medio d'influenza di ogni camino, pari a circa 20 metri. La profondità media dei pozzi è più o meno di 15 metri e dipende dalla zona della discarica.



Fig. 24 - Camino di aspirazione del biogas

Sull'area della discarica sono già stati sistemati 30 camini di aspirazione, 10 dei quali, però, sono stati ultimamente scollegati per lavori di risistemazione della discarica oppure perché non erano più produttivi ai fini del recupero energetico.

Sempre riguardo all'impianto di aspirazione, altri dati, forniti dalle ditte che hanno progettato e gestiscono l'impianto di estrazione del biogas, sono relativi al flusso medio di gas per camino, pari a circa $0,1 \text{ m}^3/\text{min}$, e al rendimento dell'impianto di generazione di elettricità ($\eta_{\text{gen}} = 0,36$).

Per tutti gli altri dati necessari si è fatto ricorso, quando possibile, alla vasta letteratura tecnica di riferimento, cercando quelli più appropriati alla situazione in studio.

4.2. La scelta dei modelli applicabili

In base ai dati raccolti in letteratura e a quelli resi disponibili dal gestore dell'impianto di Maiolati Spontini si è valutata l'applicabilità dei modelli analizzati precedentemente al caso di studio.

La necessità di dover effettuare dei test appositi sull'impianto di aspirazione del biogas, per ottenere i parametri necessari, rende l'applicazione del metodo del "Pressure rebound" più difficoltosa. Alcuni dati richiesti, benché reperibili con apparecchiature non sofisticate, sono, infatti, ad esclusivo uso di questo modello ed è necessario il ricorso a manodopera specializzata e procedure apposite per ottenerli. Oltretutto, il modello avrebbe fornito solo un dato relativo al breve periodo, difficilmente analizzabile in ragione delle trasformazioni subite, nel tempo, dall'impianto e dalle caratteristiche dei rifiuti smaltiti.

L'applicazione del modello della "reazione semplificata", così come quella del modello LandGEM dell'Agenzia statunitense di protezione dell'ambiente (EPA), richiede la conoscenza di dati più facilmente ottenibili dall'esame di relazioni tecniche e di parametri di esercizio dell'impianto. I dati necessari riguardano le quantità di rifiuti introdotte in discarica nei vari anni di esercizio dell'impianto e, nel primo caso, le caratteristiche chimico fisiche degli stessi, il contenuto d'acqua, nonché la composizione merceologica del rifiuto e dati sulle percentuali di biodegradabilità delle varie classi. Nel secondo caso sono necessari, per ottenere risultati più attinenti alla situazione reale in esame, dati sulle caratteristiche costruttive e di esercizio del sistema di estrazione del biogas, dati sulla piovosità della zona, sulle caratteristiche di biodegradabilità e sul grado di compattazione raggiunto dal rifiuto.

Viste le precedenti considerazioni ed i dati a disposizione si è ritenuto utile procedere alla applicazione dei metodi della “reazione semplificata” e LandGEM dell’US-EPA ed alla analisi dei risultati forniti da questi.

Si deve comunque notare che i metodi indicati servono, in ogni caso, per effettuare previsioni di massima e fanno riferimento entrambi al biogas teoricamente generabile dalla massa di rifiuti. La quantità di quest’ultimo risulta sempre sensibilmente diversa da quella del biogas “captato” dall’impianto di aspirazione. Possono intervenire, infatti, fattori economici e tecnici sul funzionamento dell’impianto che portano alla dismissione dei camini di aspirazione prima che il flusso di biogas attraverso gli stessi sia effettivamente terminato. Inoltre, diversi andamenti delle reazioni biologiche, dovuti a fenomeni non modellabili, e l’eventuale presenza di agenti inibitori, possono influire in modo diverso sulle velocità di reazione e sulla quantità di biogas effettivamente generato.

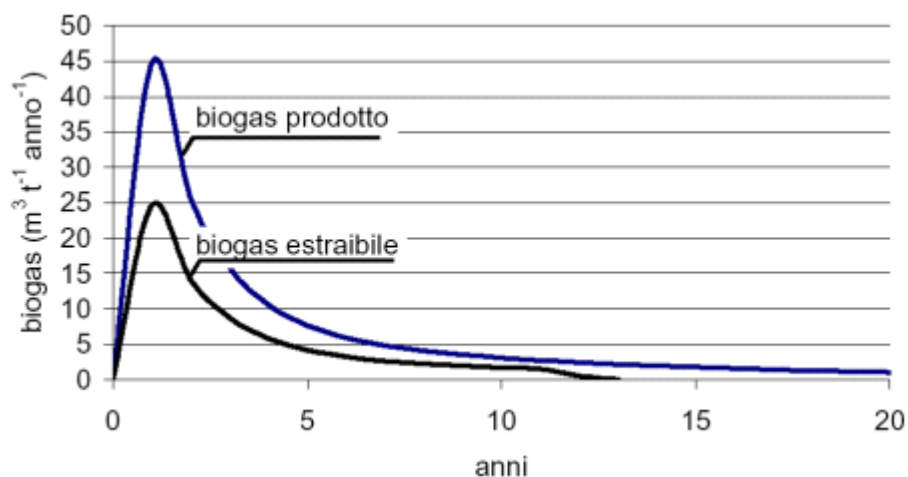


Fig. 25 - Rapporto tra biogas prodotto ed estraibile ³²

³² Da G. Lonati, *Appunti di Ingegneria Sanitaria Ambientale*.

Per di più, per quanto l'impianto possa essere stato ben progettato, realizzato e gestito, sono sempre presenti fenomeni di migrazione del biogas attraverso lo strato di copertura e le pareti laterali delle vasche di abbancamento a cui non si può ovviare, ed esistono sempre delle zone, all'interno del cumulo di rifiuti, nelle quali si ha ristagno di biogas con conseguenti mutamenti nelle reazioni chimiche.

A titolo esemplificativo, e sentiti i pareri di aziende produttrici di impianti di captazione di biogas, si può affermare che in condizioni di discarica chiusa, buon impianto, buona copertura finale, buona impermeabilizzazione, presenza di geomembrane e teli in HDPE, si può raggiungere circa il 65% di gas captato rispetto a quello che si è *realmente* generato in discarica (indicato nel seguito con il termine "teoricamente captabile").

4.3. L'applicazione del metodo della "reazione semplificata"

Per l'applicazione del metodo di calcolo proposto da Tchobanoglous et al. e riadattato da Pasquali, Bonori e Bergonzoni, è di fondamentale importanza la disponibilità di informazioni dettagliate e precise sul rifiuto smaltito in discarica.

Se per il reperimento dei dati riguardanti i quantitativi di rifiuti immessi anno per anno nell'impianto non si riscontrano, solitamente, particolari difficoltà, ben più difficile è riuscire a disporre di informazioni dettagliate sulla composizione merceologica e chimica degli RSU trattati. I risultati così ottenuti saranno, inevitabilmente, soggetti ad ulteriori incertezze, oltre a quelle non eliminabili e dovute alle innumerevoli reazioni inter dipendenti e non, che hanno luogo all'interno del cumulo di rifiuti.

Frazione merceologica	% in peso sul totale	
	parziale	complessivo
Materiali cellulosici		29,5
<i>Carta</i>	12,5	
<i>Cartone</i>	11,0	
<i>Altro</i>	6,0	
Tessili		3,0
Legno		3,0
Metalli		4,0
Materiali plastici		13,6
<i>Plastica varia</i>	13,1	
<i>Gomma</i>	0,5	
Vetro ed inerti		7,5
Materiale organico		28,3
<i>Domestico</i>	18,4	
<i>Sfalci e potature</i>	7,1	
<i>Grandi utenze</i>	2,8	
RUP (pile, farmaci scaduti) e varie		1,1
Sottovaglio		10,0

Tabella 9 – Composizione merceologica analitica dei RSU (dati medi italiani, 1997)

Per poter considerare l'influenza che l'entrata in funzione dell'impianto di produzione del compost di qualità ha avuto, e continua ad avere, sul processo di generazione del biogas, si è deciso di suddividere l'arco di vita della discarica in due intervalli di tempo. Per ognuno dei due periodi è stata poi considerata una diversa composizione merceologica media del rifiuto, in modo da tener conto del minor apporto percentuale di materiale organico negli ultimi anni.

Per il primo arco di tempo, dal 1989 al 1995, quando tutti i rifiuti urbani adottati alla discarica venivano abbancati e l'impianto di produzione di compost ancora non era attivo, si è deciso, in mancanza di studi attendibili riferiti a quegli anni, di utilizzare la composizione merceologica media italiana del rifiuto riportata in Tabella 9 e nel grafico seguente. (Fig. 26).

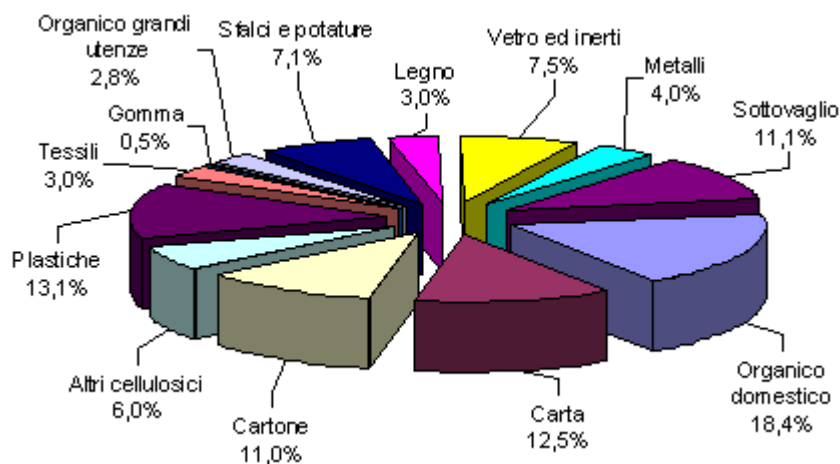


Fig. 26 - Composizione merceologica media RSU italiani

Per il periodo che va dal 1996 ad oggi, essendo attualmente il quantitativo di organico destinato alla produzione del compost di poco superiore al 14% in peso del totale dei rifiuti, con ulteriore prospettiva di crescita per gli anni futuri, si è considerata una composizione del

rifiuto in cui la frazione organica è stata ridotta, a vantaggio della parte inorganica.

Poiché il modello da applicare è fondato essenzialmente su una semplificazione delle reazioni chimiche che avvengono nella realtà, per poter effettuare dei calcoli è necessario conoscere sia la composizione chimica elementare delle differenti classi merceologiche, che l'umidità media presente nei rifiuti. Al tal scopo si è ricorsi ai dati di letteratura riportati nella Tabella 10.

Frazione merceologica	C	H	O	N	Inerti	H₂O
	%s.s.	%s.s.	%s.s.	%s.s.	%s.s.	%t.q.
Carta	44,4	04,4	40,9	00,1	10,2	15,00
Cartone	44,0	05,9	44,6	00,3	5,2	12,50
Altri celluloseici	44,2	5,15	42,75	0,2	7,7	20,00
Tessili	39,6	06,5	25,3	05,6	23,0	20,00
Legno	49,5	06,0	42,7	00,2	01,6	22,00
Plastica	60,0	07,2	22,8	00,0	10,0	6,00
Gomma	78,0	10,0	00,0	02,0	10,0	2,00
Vetro ed inerti	00,5	00,1	00,4	00,1	98,9	2,50
Metalli	04,5	00,6	04,3	00,1	90,5	4,00
Organico domestico	28,70	3,10	29,20	1,90	37,10	75,00
Sfalci e potature	45,5	08,7	20,1	01,8	23,9	50,00
Organico grandi utenze	28,70	3,10	29,20	1,90	37,10	75,00
Sottovaglio	26,3	03,0	02,0	00,5	68,2	40,00

Tabella 10 – Composizione chimica elementare media delle frazioni merceologiche³³

Non avendo a disposizione valori assodati, sempre attingendo a dati di letteratura, sono state fissate le percentuali di biodegradabilità delle varie classi merceologiche così come riportate nella Tabella 11. Riguardo a questo parametro non esistono molti studi sui rifiuti ai quali poter fare riferimento, e ciò, purtroppo, influisce in maniera determinante sulla precisione dei risultati del modello poiché da questo

³³ Adattata da Rif. 4

parametro dipende la quantità di materia che, reagendo, da origine al biogas. Per di più, così come già spiegato nella descrizione del modello (par. 2.2.), bisognerebbe conoscere le velocità di biodegradazione in modo da poter trattare separatamente le quantità di materia che reagiscono più velocemente e quelle che, al contrario, vengono degradate nel lungo periodo.

Frazione merceologica	% Biodegradabilità
Rifiuti di cibo	65 %
Carta	50 %
Cartone	45 %
Altri celluloseici	45%
Plastiche	0 %
Tessili	50 %
Gomma	0 %
Organico grandi utenze	65 %
Sfalci e potature	60 %
Legno	65 %
Vetro	0 %
Metalli	0 %
Sottovaglio	20 %

Tabella 11 – Percentuali di biodegradabilità usate nei calcoli

Per poter svolgere i calcoli in modo rapido e per poter variare facilmente i parametri del modello in modo da analizzare l'andamento dei risultati in funzione delle modifiche effettuate, è stato realizzato un apposito, ed alquanto articolato, foglio di calcolo con Microsoft Excel®.

Il foglio elettronico creato può essere adattato a diversi “scenari” e sono modificabili a piacimento tutti i parametri qualitativi e quantitativi del rifiuto, nonché gli intervalli di tempo caratteristici del modello. Vengono inoltre rappresentati e messi a confronto in più grafici gli andamenti nei vari anni della generazione teorica di biogas, delle

quantità teoricamente captabili e di quelle realmente captate dall'impianto.

Microsoft Excel - reazione_semplificata+2merceologie.xls

File Modifica Visualizza Inserisci Formato Strumenti Dati Finestra ?

Arial 10

K1 fx

Parametri del metodo della "reazione semplificata" per il 1° periodo

Metalli inerti è incluso lo zolfo

Categoria merceologica	% umidità L _{i,j}	% biodegr. B _{i,j}	Reaz. Veloce V _{i,j}	Reaz. Lenta L _{i,j}	C % s.s.	H % s.s.	O % s.s.	I % s.s.	Inerti % s.s.
Organico domestico	75,00%	65%	100%	0%	28,70%	3,10%	29,20%	1,90%	37,10%
Carta	15,00%	50%	100%	0%	44,40%	4,40%	40,90%	0,10%	10,20%
Cartone	12,50%	45%	100%	0%	44,00%	5,90%	44,60%	0,30%	5,20%
Altri cellullosici	20,00%	45%	100%	0%	44,20%	5,15%	42,75%	0,20%	7,70%
Plastiche	6,00%	0%	0%	0%	60,00%	7,20%	22,80%	0,00%	10,00%
Tessili	20,00%	50%	0%	100%	39,60%	6,50%	25,30%	5,60%	23,00%
Gomma	2,00%	0%	0%	0%	78,00%	10,00%	0,00%	2,00%	10,00%
Organico grandi utenze	70,00%	65%	100%	0%	28,70%	3,10%	29,20%	1,90%	37,10%
Sfaldi e potature	50,00%	60%	60%	40%	45,50%	6,70%	20,10%	1,80%	23,90%
Legno	22,00%	65%	0%	100%	49,50%	6,00%	42,70%	0,20%	1,60%
Vetro ed inerti	2,50%	0%	0%	0%	0,50%	0,40%	0,40%	0,15%	96,05%
Metalli	4,00%	0%	0%	0%	4,50%	0,60%	4,30%	0,10%	90,50%
Sottovaglio	40,00%	20%	0%	100%	26,30%	3,00%	2,00%	0,50%	68,20%

% s.s. = percentuale riferita alla sostanza secca

reg. automatico

Categoria merceologica	% in peso w _{i,j}	% secco w _{s,i,j}	% s.biod.veloce w _{s,bd,i,j,v}	% s.biod.lenta w _{s,bd,i,j,l}	quantità reazione VELOCE (% su tal quale)	C	H	O	I	Inerti	Qua C
Organico domestico	18,40%	4,60%	2,99%	0,00%	0,86%	0,09%	0,87%	0,06%	1,11%	0,00%	0,00%
Carta	12,50%	10,63%	5,31%	0,00%	2,36%	0,23%	2,17%	0,01%	0,54%	0,00%	0,00%
Cartone	11,00%	9,63%	4,33%	0,00%	1,91%	0,26%	1,93%	0,01%	0,23%	0,00%	0,00%
Altri cellullosici	6,00%	4,80%	2,16%	0,00%	0,95%	0,11%	0,92%	0,00%	0,17%	0,00%	0,00%
Plastiche	13,10%	12,31%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Tessili	3,00%	2,40%	0,00%	1,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,48%	0,00%
Gomma	0,50%	0,49%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Organico grandi utenze	2,80%	0,84%	0,55%	0,00%	0,16%	0,02%	0,16%	0,01%	0,20%	0,00%	0,00%
Sfaldi e potature	7,10%	3,55%	1,26%	0,85%	0,58%	0,11%	0,26%	0,02%	0,31%	0,39%	0,00%
Legno	3,00%	2,34%	0,00%	1,52%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,75%	0,00%
Vetro ed inerti	7,50%	7,31%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Metalli	4,00%	3,84%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Sottovaglio	11,10%	6,66%	0,00%	1,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,35%	0,00%
Totali	100,00%	69,40%	16,62%	4,91%	6,82%	0,82%	6,32%	0,11%	2,55%	1,97%	0,00%

Affl. RS 1° per. param. 1° per. Affl. RS 2° per. param. 2° per. Afflusso RS e prod. biogas 1+2 Grafici LandGE

Fig. 27 - Foglio elettronico realizzato per il modello della "reazione semplificata"

Se per di più è possibile prevedere l'andamento dell'afflusso in discarica dei rifiuti urbani per gli anni a venire, si possono facilmente ottenere dei dati quantitativi su cui poter effettuare valutazioni e scelte, sia tecniche che economiche.

Si potrebbero usare, per esempio, i risultati ottenuti per il dimensionamento di massima di un impianto di captazione e per valutare l'opportunità di installare un sistema di recupero energetico.

Il metodo utilizzato permette di calcolare la quantità di biogas teoricamente generabile dalla massa di rifiuti.

La quantità effettivamente generata, e quindi teoricamente captabile in condizioni ottimali (recupero del 100%), è in realtà molto inferiore. Molti Autori indicano che la quantità di biogas effettivamente generata si aggira intorno al 50% di quella che si otterrebbe nel caso che tutta la materia degradabile reagisse completamente e anaerobicamente. Infatti, non tutto il materiale degradabile deposto in discarica può decomporsi, anche perché talvolta manca l'acqua necessaria alle reazioni chimiche ed ai microrganismi. Inoltre, nel primo periodo che segue la sistemazione dei rifiuti in discarica prevalgono le reazioni aerobiche e non si ha produzione di metano. Ciò è chiaramente rappresentato dal grafico seguente (Fig. 28), ottenuto con i dati reali del caso di studio ed ipotizzando un afflusso costante di rifiuti pari a 62.000 t/anno fino al 2006, anno di prevista chiusura della discarica.

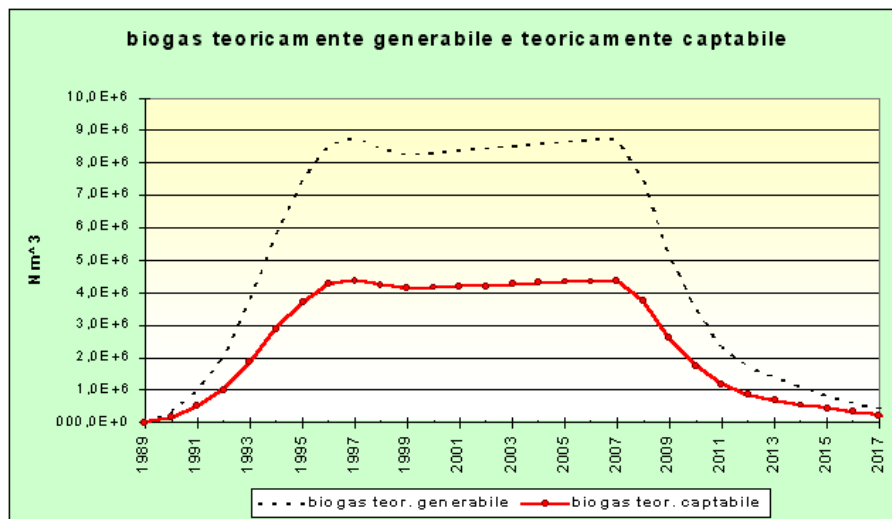


Fig. 28 - Biogas teoricamente generabile e teoricamente captabile

Per poter verificare la rispondenza del modello ai dati reali registrati dalle apparecchiature dell'impianto, si è esaminato più in dettaglio il periodo tra l'anno 1997 e l'anno 2002.

Dall'esame del grafico del biogas teoricamente captabile ed effettivamente captato dall'impianto (Fig. 29) si può notare una sostanziale corrispondenza tra le due curve.

L'andamento della curva del biogas teoricamente captabile calcolata dal modello ricalca quasi perfettamente quello della curva dei dati reali, ad eccezione dell'anno 2001, ma ciò è da imputare a fattori esterni. Nel 2001, infatti, sono stati effettuati interventi sull'impianto che hanno comportato la disattivazione temporanea di alcune linee di captazione del biogas.

La differenza numerica tra i valori rappresentati dalle due curve di Fig. 29 ricade ampiamente nella media dei risultati riportati nella realtà dalla maggior parte degli impianti attivi.

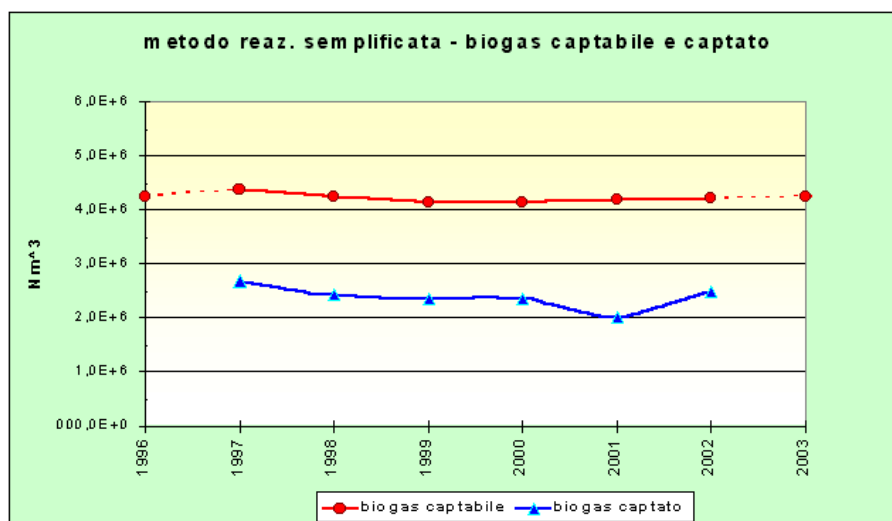


Fig. 29 - Biogas teoricamente captabile e biogas effettivamente captato

Il biogas effettivamente captato è infatti, più o meno, il 60% di quello teoricamente captabile ed effettivamente generato in discarica. Ciò è dovuto al fatto che l'impianto non è comunque in grado di captare tutto il biogas effettivamente generato, sia perché il raggio d'influenza dei camini di aspirazione viene adeguatamente limitato per poter ottenere biogas dalle caratteristiche idonee al recupero energetico, sia perché inevitabilmente parte del biogas va disperso in atmosfera attraversando lo strato di copertura finale o i confini laterali della discarica.

Anno	biogas teor. captabile (Nm³)	Biogas effett. captato (Nm³)
1997	4.387.814	2.684.976
1998	4.223.866	2.415.652
1999	4.129.271	2.369.388
2000	4.149.292	2.369.160
2001	4.181.820	2.012.808
2002	4.209.934	2.496.000

Tabella 12 - Biogas teoricamente captabile ed effettivamente captato

I risultati completi dell'elaborazione al computer del modello, ottenuti con il foglio elettronico creato, sono presentati nella Tabella 13 a pagina seguente.

Si può notare che l'impianto per il recupero energetico potrà produrre energia almeno fino all'anno 2012. Dopo tale anno il quantitativo di biogas captato potrebbe non essere più redditizio o sufficiente per il corretto funzionamento del gruppo elettrogeno.

Anno	Q.tà RS inserita (tonnellate)	biogas teor. generabile (Nm³)	biogas teor. captabile (Nm³)	Biogas captato (Nm³)
1989	10.929	0	0	
1990	17.329	287.593	143.797	
1991	30.089	966.250	483.125	
1992	54.394	1.981.175	990.588	
1993	63.067	3.689.678	1.844.839	
1994	63.084	5.763.954	2.881.977	
1995	63.610	7.431.066	3.715.533	
1996	63.726	8.523.555	4.261.777	
1997	62.287	8.775.629	4.387.814	2.684.976
1998	65.106	8.447.731	4.223.866	2.415.652
1999	65.976	8.258.541	4.129.271	2.369.388
2000	59.453	8.298.584	4.149.292	2.369.160
2001	62.057	8.363.641	4.181.820	2.012.808
2002	62.000	8.419.867	4.209.934	2.496.000
2003	62.000	8.513.520	4.256.760	
2004	62.000	8.585.821	4.292.910	
2005	62.000	8.656.281	4.328.141	
2006	62.000	8.705.848	4.352.924	
2007	0	8.723.130	4.361.565	
2008	0	7.460.637	3.730.318	
2009	0	5.200.878	2.600.439	
2010	0	3.487.913	1.743.956	
2011	0	2.321.879	1.160.939	
2012	0	1.704.203	852.102	
2013	0	1.378.441	689.220	
2014	0	1.087.626	543.813	
2015	0	832.772	416.386	
2016	0	612.327	306.163	
2017	0	425.216	212.608	
2018	0	272.138	136.069	
2019	0	153.078	76.539	
2020	0	68.035	34.017	
2021	0	17.009	8.504	
2022	0	0	0	
2023	0	0	0	

Tabella 13 - Risultati analitici del modello della "reazione semplificata"

4.4. L'applicazione del modello LandGEM

L'applicazione del modello LandGEM, che è disponibile direttamente come programma per personal computer ed è scaricabile gratuitamente dal sito internet della Environmental Protection Agency degli Stati Uniti, risulta a prima vista più semplice. Sarebbe sufficiente l'inserimento, nell'apposita tabella, dei quantitativi annuali di rifiuti depositi in discarica, e conoscere la capacità della stessa, per ottenere una stima delle emissioni di biogas ed anche dei singoli composti chimici, nonché la capacità di sfruttamento residua del sito.

Purtroppo non si può ignorare che, sia il software, sia i parametri con i quali vengono eseguiti i calcoli, sono stati calibrati sulla realtà americana che certamente può risultare anche molto differente da quella italiana. C'è da considerare che le discariche americane sono solitamente molto più estese di quelle nel nostro Paese, e che la composizione tipica del rifiuto può essere anche molto differente.

D'altro canto, i parametri utilizzati da questo modello sono il frutto di una rielaborazione statistica dei dati raccolti su moltissimi impianti distribuiti sul territorio degli USA³⁴, quindi possono senz'altro essere usati per valutazioni di massima e non è da escludere che si possano ottenere risultati ugualmente validi. E' indispensabile in questo caso il confronto con i dati reali ottenuti sull'impianto.

Per poter raggiungere risultati più attinenti alla realtà, il programma permette anche l'impostazione o il calcolo del valore dei parametri con informazioni specifiche sull'impianto inserite dall'utente. E' possibile così, inserendo il valore di parametri come: profondità dei camini e loro

³⁴ I dati raccolti sono stati usati per compilare il database dell'EPA *Compilation of Air Pollutant Emission Factors – AP-42*.

raggio d'influenza (rispettivamente 15 m e 18 m), flusso medio di biogas per camino ($0,1 \text{ m}^3/\text{min}$), densità del rifiuto e sua età media ($0,9 \text{ t/m}^3$ e 5,98 anni), frazione biodegradabile (0,3), calcolare il valore del coefficiente k dell'equazione di primo ordine utilizzata dal modello, che nel caso in studio è risultato pari a 0,040683.

Si è inoltre considerato il confronto con i risultati ottenibili con l'applicazione del set di dati denominato AP42 e basato su rilevazioni statistiche eseguite dall'EPA su discariche americane.

La previsione del modello è fornita nel grafico seguente (Fig. 30), dove la curva con i valori più elevati è quella ottenuta considerando il valore di k calcolato con i dati dell'impianto studiato.

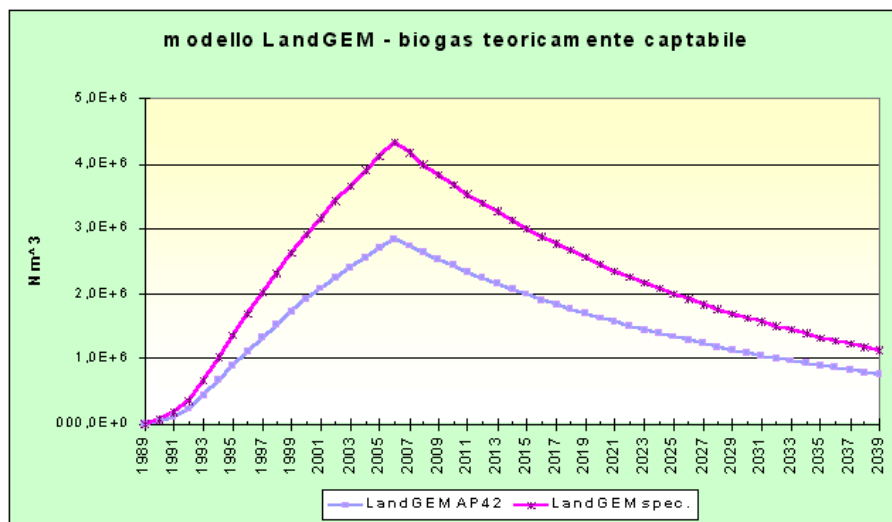


Fig. 30 - LandGEM: biogas teoricamente captabile

Si può già notare che le due curve prodotte dal modello hanno un andamento con valori della pendenza (in valore assoluto) molto bassi sia per la fase crescente che per quella decrescente. La curva del biogas teoricamente captabile va a zero in un lasso di tempo molto più ampio di quanto non si verifichi normalmente nella realtà italiana. Manca

inoltre una fase stazionaria con generazione di biogas pressoché costante.

Si è deciso anche qui di analizzare più in dettaglio la situazione tra gli anni 1997 e 2002, per la quale sono a disposizione dati reali su cui basare il confronto. Il risultato è mostrato in dettaglio nel grafico seguente (Fig. 31).

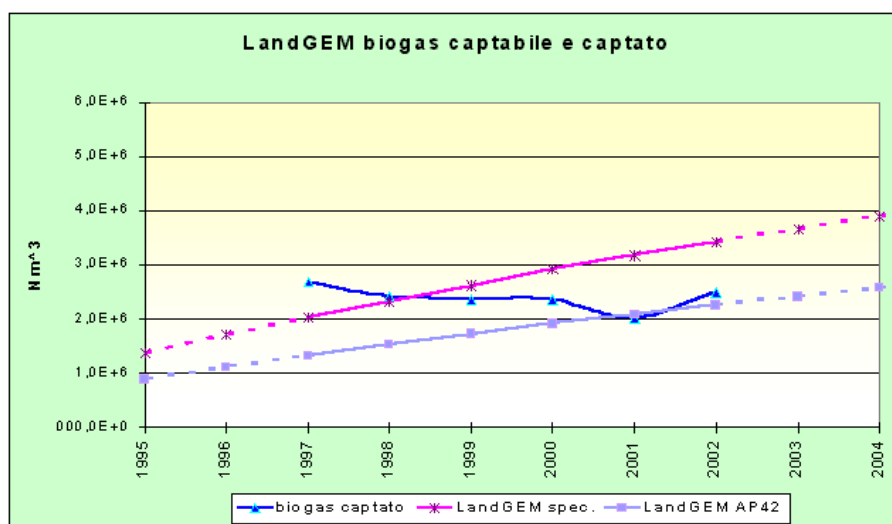


Fig. 31 - LandGEM: biogas teoricamente captabile e captato

Si può subito notare come l'andamento delle due curve rappresentate non sia il medesimo, benché lo scarto tra i valori previsti dal modello e quelli reali misurati sull'impianto sia molto limitato. Inoltre i dati reali lasciano intendere che il processo si trovi ora in una fase stazionaria mentre secondo il modello LandGEM si dovrebbe essere in fase crescente e tale fase dovrebbe perdurare ancora per diversi anni. Questo modello, quindi, non sembra rappresentare in modo idoneo l'andamento dei dati reali dell'impianto nel periodo preso in esame; sarebbe auspicabile un confronto con dati distribuiti su un intervallo di tempo più ampio, ma in ogni caso non sembra realistica, quantomeno per la

realtà italiana, una situazione come quella prevista dal modello LandGEM.

I risultati analitici dell'elaborazione sono riportati nella tabella seguente.

Anno	Q.tà RS inserita (tonnellate)	biogas captabile [AP42] (Nm³)	biogas captabile [site spec.] (Nm³)	Biogas captato (Nm³)
1989	10.929	0	0	
1990	17.329	43.720	66.690	
1991	30.089	111.300	169.800	
1992	54.394	227.300	346.600	
1993	63.067	436.000	664.700	
1994	63.084	671.100	1.023.000	
1995	63.610	897.200	1.367.000	
1996	63.726	1.116.000	1.701.000	n.d.
1997	62.287	1.328.000	2.022.000	2.684.976
1998	65.106	1.525.000	2.322.000	2.415.652
1999	65.976	1.725.000	2.626.000	2.369.388
2000	59.453	1.922.000	2.924.000	2.369.160
2001	62.057	2.084.000	3.170.000	2.012.808
2002	62.000	2.251.000	3.423.000	2.496.000
2003	62.000	2.410.000	3.665.000	
2004	62.000	2.564.000	3.897.000	
2005	62.000	2.711.000	4.120.000	
2006	62.000	2.853.000	4.334.000	
2007		2.741.000	4.161.000	
2008		2.634.000	3.995.000	
2009		2.530.000	3.836.000	
2010		2.431.000	3.683.000	
2011		2.336.000	3.536.000	
2012		2.244.000	3.395.000	
2013		2.156.000	3.260.000	
2014		2.072.000	3.130.000	
2015		1.990.000	3.005.000	
2016		1.912.000	2.885.000	
2017		1.837.000	2.770.000	
2018		1.765.000	2.660.000	(segue)

Anno	Q.tà RS inserita (tonnellate)	biogas captabile [AP42] (Nm³)	biogas captabile [site spec.] (Nm³)	Biogas captato (Nm³)
2019		1.696.000	2.554.000	
2020		1.630.000	2.452.000	
2021		1.566.000	2.354.000	
2022		1.504.000	2.260.000	
2023		1.445.000	2.170.000	
2024		1.389.000	2.084.000	
2025		1.334.000	2.001.000	
2026		1.282.000	1.921.000	
2027		1.232.000	1.844.000	
2028		1.183.000	1.771.000	
2029		1.137.000	1.700.000	
2030		1.092.000	1.632.000	
2031		1.050.000	1.567.000	
2032		1.008.000	1.505.000	
2033		968.800	1.445.000	
2034		930.900	1.387.000	
2035		894.400	1.332.000	
2036		859.300	1.279.000	
2037		825.600	1.228.000	
2038		793.200	1.179.000	
2039		762.100	1.132.000	

Tabella 14 - Risultati analitici del modello LandGEM

4.5. Il confronto tra i risultati dei due modelli esaminati

Per poter osservare le differenze tra i due modelli applicati si è provato a mettere a confronto i risultati ottenuti in ambedue i casi. Si deve comunque notare che i due modelli partono da considerazioni differenti ed affrontano il problema della previsione del biogas generato in modo diverso l'uno dall'altro. Nel modello LandGEM non è richiesta alcuna conoscenza della composizione del rifiuto: il ruolo fondamentale è ricoperto dalla determinazione esatta del parametro k dal quale dipende l'andamento della curva di generazione del biogas.

Mettendo graficamente a confronto le risposte prodotte dai due modelli si ottiene la situazione rappresentata in figura. (Fig. 32).

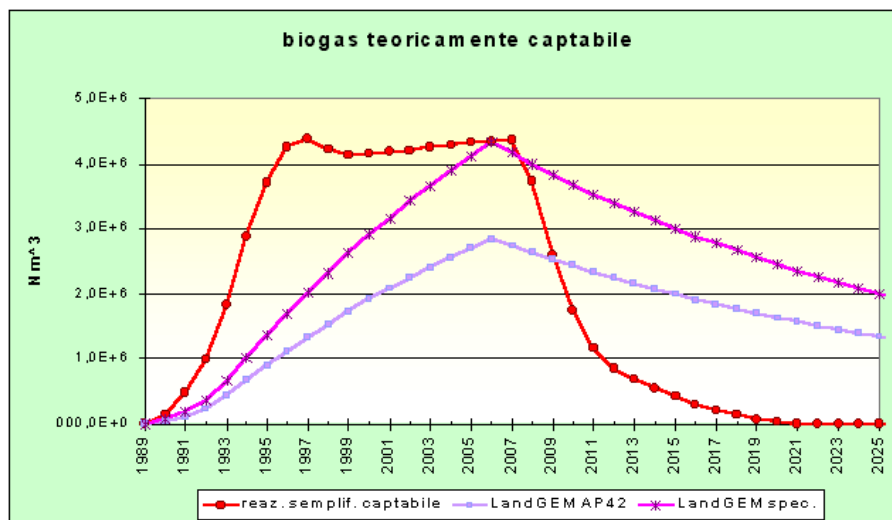


Fig. 32 - Confronto tra i modelli applicati al caso di studio

Si nota chiaramente come il modello della “reazione semplificata” segua un andamento più rispondente a situazioni riportate comunemente nella maggior parte degli impianti italiani, e caratterizzato da un primo periodo di rapido incremento nella

produzione di biogas seguito poi da una fase stazionaria e da un'altrettanto rapida fase calante.

La quantità di biogas teoricamente captabile prevista dal modello LandGEM, inoltre, si mantiene su livelli non trascurabili anche per gli anni dal 2025 in poi (v. Tabella 14 pag. 85), periodo in cui, secondo molti studiosi, la generazione di biogas dovrebbe attestarsi su livelli molto bassi e quasi sempre trascurabili.

Sul perché di un tale comportamento del modello LandGEM non si possono che avanzare solamente delle ipotesi, legate per lo più a differenze impiantistiche (le dimensioni delle discariche statunitensi sono generalmente considerevoli) e di composizione del rifiuto (probabilmente più ricco di frazioni lentamente biodegradabili e inerti).

In ogni caso l'applicazione al caso di studio non ha portato a risultati significativi.

5. CONCLUSIONI

Lo sfruttamento del biogas prodotto in discarica è sicuramente un ottimo metodo per poter recuperare energia da materiali che non possono più essere sfruttati in nessun altro modo.

L'investimento di capitale per poter realizzare le strutture impiantistiche necessarie non è eccessivo e si aggira intorno ai 500 - 600 Euro per KW installato. Inoltre, l'energia elettrica prodotta usando come combustibile il biogas, può essere venduta all'ENEL con un ricavo di circa 8,5 eurocent per KWh. In questo modo la spesa per la realizzazione dell'impianto viene recuperata in 24 - 30 mesi di funzionamento.

La realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica dal biogas è però conveniente solo se si dispone di una portata di biogas all'impianto superiore ai 200 m³/ora e per potenze installate a partire da 400 KW.

In quest'ottica, l'utilizzo di metodi per stimare la quantità di biogas producibile nel tempo può rappresentare un valido strumento a supporto dell'opera del progettista o di chi gestisce un impianto già attivo e voglia attuare delle migliorie.

L'uso di tali metodi è tanto più proficuo quante più informazioni si è in grado di fornire sulla quantità di rifiuti da smaltire e sulla composizione degli stessi.

Già in fase di progetto della discarica si potrebbe, infatti, stabilire la convenienza o meno dell'installazione di un impianto per il recupero

energetico ed eventualmente adottare delle soluzioni impiantistiche mirate ad ottenere il massimo rendimento di captazione.

Tra i modelli esaminati, quello della “reazione semplificata” è quello che ha fornito i risultati migliori, soprattutto nella forma adattata a considerare due diverse distribuzioni della composizione merceologica del rifiuto in due periodi distinti, la cui ampiezza può essere variata secondo necessità.

Le stime fornite rispecchiano con ottima approssimazione l’andamento dei dati reali relativi al caso specifico della discarica di Maiolati Spontini, ed è ipotizzabile una corrispondenza altrettanto buona con altre realtà, quantomeno italiane.

Per quanto riguarda il caso di studio, il quantitativo di gas captato corrisponde a circa il 60% di quanto si stimi possa essere la produzione reale di biogas in discarica (calcolata col modello della “reazione semplificata”). Tale risultato è perfettamente nella media dei casi riportati in letteratura.

Al contrario, l’utilizzo del modello LandGEM dell’US-EPA non ha portato, nella situazione esaminata, a risultati soddisfacenti, soprattutto per quanto riguarda la possibilità di prevedere la generazione di biogas per gli anni a venire. Ciò probabilmente è dovuto a differenti ipotesi sulle quali è stato basato il modello, legate ad una realtà, quella americana, dalle caratteristiche troppo dissimili da quelle italiane, sia per quanto riguarda la composizione del rifiuto (che in questo modello non viene presa in considerazione), che per le dimensioni tipiche degli impianti.

Il metodo della “reazione semplificata” è, quindi, da preferirsi, e per ottenere risultati ancora migliori, sarebbe vantaggioso eseguire indagini più accurate sulla composizione dei rifiuti abbancati in discarica e procedere ad una omogeneizzazione degli stessi.

Alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che il controllo della produzione di biogas, coadiuvato dall'utilizzo di un idoneo modello matematico previsionale, quale può essere quello della “reazione semplificata”, può svolgere un ruolo importante ai fini di una oculata gestione delle discariche, volta ad ottenere il minimo impatto ambientale ed il massimo recupero possibile di energia dai rifiuti.

APPENDICE

A.1. Equivalenze tra unità di misura

Si riporta la tabella di conversione per alcune delle unità anglosassoni presenti nel presente elaborato e nei modelli illustrati.

Sistema anglosassone	Sistema metrico decimale
1 in (1")	2.54 cm
1 ft	0.3048 m
1 yd	0.9144 m
1 ac	4047 m ²
1 lb	0.4536 kg
1 US t	907.2 kg
1 UK t	1016.1 kg
1 lb/yd ³	0.5933 kg/m ³
1 gal	4.546 l

A.2. Abbreviazioni

Si riporta la traduzione e/o il significato delle abbreviazioni usate.

Abbreviazione	Significato
LFG	Landfill gas; biogas
RSU	Rifiuti solidi urbani
RSA, RSAU	Rifiuti solidi assimilabili agli urbani
RUP	Rifiuti urbani pericolosi (pile esaurite, farmaci scaduti, etc.)
NMOCs	Non methanic organic compounds; Composti organici non metanici
VOCs	Volatile organic compounds; Composti organici volatili
HAPs	Hazardous air pollutants; Composti gassosi pericolosi
HDPE	Polietilene ad alta resistenza utilizzato per l'impermeabilizzazione delle discariche
VIA	Valutazione di impatto ambientale
CDR - RDF	Combustibile da rifiuti
ATO	Ambito Territoriale Ottimale
EPA, US-EPA	Environmental Protection Agency; Agenzia Statunitense per la protezione dell'ambiente

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, (2001). *Sardinia 2001 Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, LEACHATE AND LANDFILL GAS, Volume II*, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italia.
2. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, (1999). *Sardinia 99 Seventh Waste Management and Landfill Symposium, LEACHATE, GAS, OPERATION AND HEALTH EFFECTS IN LANDFILLS, Volume II*, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italia.
3. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, (1995). *Sardinia 95 Fifth International Landfill Symposium, CONCEPTS, PROCESSES, TECHNOLOGIES & OPERATION, Volume I*, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italia.
4. G. Pasquali, B. Bonori, M. Bergonzoni, (2001). *Landfill gas production valued with a mathematical method*, in *Sardinia 2001* (Rif.1), pp. 443 – 450.
5. Eastern Research Group, Inc, for the Committee of the *Emission Inventory Improvement Program* and US-EPA Air Pollution Prevention and Control Division, (2001). *VOL.III, C.15, LANDFILLS*. EPA, North Carolina, USA.
6. Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, US-EPA, (08/1997; 11/1998). *Emission factor documentation for AP-42 Section 2.4 Municipal solid waste landfills*, US-EPA, North Carolina 27711, USA.

7. S.A. Thorneloe et al., (1998). *User's Manual - Landfill Gas Emission Model Ver. 2.01*, US-EPA Air Pollution Prevention and Control Division, Research Triangle Park, North Carolina 27711, USA.
8. G. Thrupp, J.M. Lamborn, T.A. Delfino, (1999). *Landfill Gas generation rates estimated from pressure rebound in extraction systems*, in *Sardinia 99* (Rif. 2), pp. 449 – 456.
9. G. Tchobanoglous, H. Theisen, S.A. Vigil, (1993). *Integrated solid waste management – Engineering principles and management issues*, McGraw-Hill, Inc.
10. ANPA Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ONR Osservatorio Nazionale sui Rifiuti, (2001). *Rapporto Rifiuti 2001*, ANPA, Roma.
11. ANPA Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ONR Osservatorio Nazionale sui Rifiuti, (1999). *Secondo rapporto sui rifiuti urbani e sugli imballaggi e rifiuti di imballaggio*, ANPA, Roma.
12. Provincia di Ancona, (2001). *Piano Provinciale di Gestione Rifiuti della Provincia di Ancona*. Supplemento n° 23 al B.U.R. n° 91 del 09 Agosto 2001.
13. Regione Marche, (2000). *Piano Regionale per la Gestione dei Rifiuti*. B.U.R.M. n° 7 del 25/01/2000
14. U.S. Environmental Protection Agency (1999). *Municipal Solid Waste Landfills, Volume 1: Summary of the Requirements for the New Source Performance Standards and Emission Guidelines for Municipal Solid Waste Landfills*. US-EPA Office of Air Quality Planning and Standards, EPA-453/R-96-004. Research Triangle Park, North Carolina, USA.

15. SO.GE.NU.S. S.p.A. – Studio Mosca, (1996-2002), *Rapporti tecnici trimestrali sulla gestione dell'impianto di smaltimento RSU ed RSA, discarica "Cornacchia"*, Moie di Maiolati Spontini (AN).
16. P. Carrescia, G. Caldelaresi, Provincia di Ancona, *La produzione dei rifiuti solidi urbani nella Provincia di Ancona dal 1991 al 1994*. Provincia di Ancona.
17. G. Pasquali, (2000), *Dispense del corso di Ingegneria Chimica Ambientale*. Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Bologna.
18. Comitato Tecnico Discariche, (1997), *Linee guida per le discariche controllate di rifiuti solidi urbani*. Centro di Ingegneria Sanitaria Ambientale, Cagliari.
19. G. Lonati, *Appunti di Ingegneria Sanitaria Ambientale*. Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria. Cremona.
20. ENEA, (1999). *Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili*, ENEA, Roma.
21. Istituto di Ricerche Ambiente Italia, Legambiente, (2002). *Ambiente Italia 2002*, Edizioni Ambiente.
22. Sito internet dell'U.S. Environmental Protection Agency, *The Landfill Methane Outreach Program* – www.epa.gov/lmop/
23. Sito internet dell'U.S. Environmental Protection Agency, *The Office of Solid Waste (OSW)* – www.epa.gov/epaoswer/osw/index.htm
24. Sito internet dell'Enea, *Ente per le nuove tecnologie, l'energia e l'ambiente* – www.enea.it
25. Legambiente, *Centro di documentazione ambientale di Roma*, – www.legambiente.com

26. Sito internet dell'ANPA, *Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente* – www.sinanet.anpa.it
27. Sito internet del CTN-RIF ANPA Centro Tematico Nazionale Rifiuti – www.arpa.piemonte.it/ctnrifiuti/ctn_home_rif.htm
28. Sito internet del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – www.minambiente.it
29. Sito internet della Commissione Europea, *settore Ambiente* – http://europa.eu.int/comm/environment/index_it.htm
30. Sito internet dell'azienda SO.GE.NU.S. S.p.A. – *Raccolta, trasporto, smaltimento, deposito temporaneo rifiuti pericolosi, impianto di trattamento rifiuti speciali, impianto di compostaggio, gestione impianti di smaltimento RSU ed assimilabili, speciali industriali* – www.sogenus.com
31. Sito internet istituzionale della Provincia di Ancona, *Area Tutela dell'Ambiente* – www.provincia.ancona.it
32. Sito internet del DIAR Sezione Ambientale del Politecnico di Milano – www.amb.polimi.it
33. Sito internet dell'Ing. G. Ciciliani – www.ciciliani.isgreat.net
34. Sito internet di Federambiente, *Federazione Italiana Servizi Pubblici Igiene Ambientale* – www.federambiente.it

RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare per la fruttuosa collaborazione l'azienda SO.GE.NU.S. di Maiolati Spontini (AN) ed in particolare: il Direttore Generale, Dott. Mauro Ragaini, per la sua ampia disponibilità e serietà, per la sua cortesia e per il supporto fornitomi, ed il Dott. Massimo Mosca per la gentilezza dimostrata e per l'assistenza che mi è stata fornita. La loro tempestiva disponibilità mi ha permesso di superare precedenti inconvenienti occorsi con altre aziende del settore che mi avevano condotto solo a perdite di tempo e fatica.

Un grazie all'Ing. Cattaneo e a Progetto Terra per la disponibilità e le informazioni tecniche ricevute.

Desidero inoltre esprimere gratitudine al Prof. Maurizio Mancini per la grande pazienza e cordialità che ha sempre dimostrato nei nostri ripetuti incontri volti alla preparazione della presente tesi.

Un sentito ringraziamento va al Dott. Luigi Quarquioni e a Legambiente per la collaborazione e la documentazione fornita.

Tantissimi grazie a tutti gli amici che mi hanno sopportato e supportato, soprattutto in quest'ultimo periodo di "fatiche", e con i quali ho condiviso tanti momenti, belli o brutti che siano stati, in tutti questi anni...