

EMISSIONI ATMOSFERICHE DA DISCARICHE DI RIFIUTI IN LOMBARDIA: STATO ATTUALE E SCENARI TECNOLOGICI DI RIDUZIONE

C. Acaia*, R. Bruzzi**, S. Caserini***, S. Cernuschi***, M. Gandolla****, M. Negri*****

Sommario – Lo studio ha valutato le emissioni atmosferiche in Regione Lombardia dallo smaltimento di rifiuti solidi in discariche controllate nell'anno 2001, proiettandone i quantitativi attesi a medio e lungo termine sulla base degli scenari di evoluzione più attendibili per le caratteristiche qualitative dei rifiuti, le modalità di smaltimento e le tecnologie adottabili per il controllo delle emissioni stesse. La valutazione è stata condotta acquisendo i dati di base degli impianti attualmente presenti sul territorio lombardo per quanto riguarda i rifiuti smaltiti e le modalità di captazione e di combustione del biogas. Sono stati quindi definiti alcuni scenari alternativi ragionevolmente ipotizzabili nel medio e lungo periodo per lo smaltimento dei rifiuti, sulla base dell'evoluzione imposta dalla normativa nazionale e dagli strumenti della pianificazione regionale. L'individuazione delle migliori tecnologie applicabili per la captazione ed il trattamento del gas prodotto e per il controllo delle corrispondenti emissioni atmosferiche ha permesso di stimare l'evoluzione temporale, in corrispondenza dei diversi scenari, della produzione di gas e delle emissioni dei principali inquinanti di interesse. I risultati mostrano la possibilità di ottenere una consistente riduzione delle emissioni di metano, tale da comportare a scala regionale una corrispondente diminuzione del 2% delle emissioni complessive di CO₂ equivalente.

ATMOSPHERIC EMISSIONS FROM LANDFILL WASTE DISPOSAL IN LOMBARDY: PRESENT SITUATION AND MEANS OF FUTURE REDUCTION

Summary – This survey evaluates atmospheric emissions from solid waste landfilling in Lombardy in 2001. It also illustrates their medium and long term trends, arising from the future scenarios that are judged most probable in terms of waste characteristics, waste disposal alternatives and available control technologies. The evaluation was performed through an extensive collection of data from all the landfill sites actually present in the region, acquiring basic information about dumped waste, gas collection and gas treatment systems. Alternative scenarios for future waste disposal, reasonably expected within medium and long term

time horizons, were defined by considering both national regulations for solid waste management and regional intervention strategies planned for the near future. The identification of the best available technological options applicable to landfill gas collection and treatment allowed to calculate the temporal trend of biogas production and pollutant emission for every single disposal scenario: the same model was applied to the most relevant pollutants. The results of the study hint to the significant role of methane emission control: a decisive, and feasible, increase of methane oxydation in landfills may reduce nearly 2% of the total regional budget of equivalent CO₂.

1. INTRODUZIONE

Le emissioni atmosferiche associate al biogas prodotto nelle discariche controllate determinano, rispetto alle altre alternative di trattamento disponibili, effetti sulla qualità dell'aria del tutto particolari. Oltre alle problematiche di carattere locale derivanti dalle presenze di componenti in traccia maleodoranti o di natura potenzialmente tossica, il metano e l'anidride carbonica, costituenti principali del biogas stesso, presentano infatti importanti implicazioni nei fenomeni di alterazione alla scala globale. Se per la CO₂ il ruolo delle attività di combustione fissa e mobile appare largamente prevalente, l'emissione incontrollata di metano dalle discariche può rappresentare un contributo significativo ai fenomeni di cambiamento climatico, in virtù del notevole potenziale di riscaldamento globale che lo caratterizza, pari a 23 volte quello dell'anidride carbonica (IPCC, 1996).

Nel contesto territoriale lombardo l'avvio diretto dei rifiuti solidi urbani in discarica controllata rappresenta una soluzione di smaltimento che, seppur in costante diminuzione, è tuttora ampiamente diffusa. I dati più aggiornati dell'inventario regionale delle emissioni (Regione Lombardia, 2002) identificano così le discariche come la seconda fonte di immissione di metano in atmosfera, con un contributo pari a circa un terzo del complesso delle fonti identificate (agricoltura e zootecnia costituiscono le attività di maggior rilevanza, con un'incidenza pari a circa il 50%). Nonostante il corrispondente contributo alle emissioni di CO₂ risulti decisamente meno significativo (circa l'1% del totale) il ruolo complessivo delle emissioni da discarica, considerando il potenziale di riscaldamento globale che caratterizza il metano, risulta pari a circa il 4,8 % del totale, se valutato in termini di CO₂ equivalente. Si tratta di un'incidenza rilevante, pari a circa il doppio di quella stimata a livello nazionale che, secondo gli ultimi dati disponibili (APAT, 2003), rappresenta il 2,4% delle emissioni complessive di gas serra all'anno 2000. Il corrispondente contributo del metano a livello regio-

* Ing. Cinzia Acaia – Viale Restelli 9 – I-20124 Milano MI – tel./fax +39 02 6884909, e-mail: cinzia.acaia@fastwebnet.it

** Ing. Raffaella Bruzzi, Institut universitaire romand de Santé au Travail – Rue du Bugnon, 19 – 1005 Lausanne CH – tel.: +41.78.6172807, e-mail: bruzziraffaella@hotmail.com

*** Ing. Stefano Caserini, Prof. Stefano Cernuschi; Dipartimento di Ingegneria Idraulica e del Rilevamento, sez. ambientale, Politecnico di Milano – Piazza Leonardo da Vinci 32 – 20133 Milano – tel 02-23996430/02.2399.6400, fax 02-23996499, e-mail: stefano.caserini@polimi.it; stefano.cernuschi@polimi.it

**** Ing. Mauro Gandolla, ECONS SA – via Stazione, CH-6934 Bioggio, Svizzera – tel. +41 91 6045451, fax +41 91 6045452, e-mail: mgandolla@bluewin.ch; mauro.gandolla@ticino.com

***** Ing. Massimo Negri – Via Strabone, 49 – 26900, Lodi (LO) – e-mail: negri.max@tiscali.it; bugsneg@libero.it, cellulare: 338/2915831, tel./fax: 0371/411577

nale nell'ambito delle emissioni di gas serra attribuibili al solo settore del trattamento dei rifiuti (discariche + termidistruzione + altri sistemi) appare ancora più rilevante, con un'incidenza pari al 95% del totale, sempre in termini di CO₂ equivalente.

Come noto, l'emissione atmosferica di metano dalle discariche di rifiuti deriva dalla produzione di biogas associata alla degradazione anaerobica della componente organica del materiale smaltito e dalle difficoltà tecniche e gestionali nel garantirne efficienze ottimali di captazione e trattamento lungo tutto il periodo di produzione. Il lavoro riassume i principali risultati di una valutazione condotta per il contesto regionale lombardo e finalizzata all'identificazione delle potenzialità di controllo delle tecnologie adottabili a tale scopo nel settore. Lo studio ha quantificato, in particolare, l'evoluzione delle emissioni atmosferiche associate allo smaltimento di rifiuti in discarica, stimandone le quantità attese nel medio e lungo periodo sulla base degli scenari più attendibili che si prospettano per le quantità complessive e le caratteristiche qualitative dei rifiuti smaltiti e per le tecnologie di captazione e trattamento del gas prodotto.

2 RACCOLTA ED ELABORAZIONE DEI DATI

2.1 Produzione complessiva di rifiuti e caratteristiche qualitative

I dati relativi alle produzioni di rifiuti nelle diverse province della Regione Lombardia nel periodo 1995-2000 sono stati reperiti presso la Direzione Tutela Ambientale, Servizio Rifiuti e Residui Recuperabili dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia (ARPA, 2002) e presso la Unità Organizzativa Gestione Rifiuti della Regione Lombardia. I dati provengono dalle indagini degli Osservatori Rifiuti istituiti presso le Province Lombarde, che a loro volta elaborano i dati sulla raccolta e lo smaltimento dei rifiuti trasmessi dai singoli comuni.

La produzione complessiva di rifiuti solidi urbani sul territorio regionale è stata stimata, per l'anno 2000, in 4.447.977 t. Di queste, circa il 35% è separato alla fonte attraverso raccolte differenziate ed avviato a recupero. Il restante 65% è invece avviato a smaltimento: circa il 18% a discarica (28% del "resto" avviato a smaltimento), circa il 24% a termovalorizzazione (37% del resto), ed approssimativamente il 23% a recupero indiretto tramite impianti di selezione post-raccolta e biostabilizzazione della frazione organica (35% del resto). Quest'ultima, pur essendo successivamente in gran parte riavviata a discarica, presenta una minor rilevanza ai fini delle emissioni in atmosfera, in quanto caratterizzata di norma da una inferiore putrescibilità.

2.2 Censimento delle discariche

I dati sulle caratteristiche delle discariche controllate in Lombardia (caratteristiche dei siti, potenzialità, tipologie e quantitativi di rifiuti smaltiti, quantitativi e caratteristiche del

gas prodotto, caratteristiche dei sistemi di captazione e trattamento del gas stesso) sono stati ricavati dalle schede compilate dai gestori degli impianti sia attivi che chiusi ai conferimenti, nell'ambito del censimento delle sorgenti puntuali dell'inventario emissioni regionale.

Le informazioni richieste fanno essenzialmente riferimento alle caratteristiche generali del sito (localizzazione, capacità di smaltimento totale e residua, tipologia dei sistemi di captazione e trattamento del gas), alla quantità e tipologia di rifiuti smaltiti su base annua, alle produzioni di gas ed alle caratteristiche quantitative e qualitative (se disponibili) delle emissioni prodotte dai relativi sistemi di trattamento. Il censimento ha acquisito i dati relativi a 32 discariche, attive in un arco temporale che va dal 1973 al 2000. Le discariche esaurite risultano essere 19, mentre quelle ancora attive sono 13. Tutti i gestori hanno risposto al questionario, anche se con un livello di approfondimento delle informazioni molto diverso da caso a caso.

2.3 Stima dei dati mancanti

Le informazioni quantitative acquisite con il censimento sono state integrate, ove necessario, introducendo valori opportunamente stimati. Tale integrazione è stata condotta puntualmente per ogni singolo impianto, contestualmente alla correzione di alcuni dati palesemente errati, avvalendosi della collaborazione del personale tecnico addetto alla gestione dell'impianto stesso.

L'integrazione dei dati ha riguardato, in particolare, alcuni aspetti legati alle quantità di rifiuti già smaltiti e alle quantità e composizione del gas captato. Le carenze informative sui quantitativi di rifiuti smaltiti (totali e/o parziali), peraltro relative ad un limitato numero di casi, sono state integrate con valori ricavati dal rapporto tra il volume disponibile per lo smaltimento e la densità media dei rifiuti: alla massa totale dei rifiuti così ottenuta sono stati sottratti gli apporti noti. Il quantitativo di rifiuti ricavato è stato poi ripartito in modo uniforme negli anni mancanti. Per quanto riguarda le categorie di rifiuti, la massa è stata ripartita secondo la media delle percentuali di ripartizione degli anni noti oppure, in mancanza di questo dato, attribuita esclusivamente a rifiuti solidi urbani.

Per ciò che si riferisce alle quantità di biogas, i dati sono stati integrati sulla base di ipotesi relative al periodo di attivazione ed alle efficienze attese della rete di captazione, ricavate dalle informazioni acquisite dal censimento stesso: quest'ultime indicano valori medi dell'efficienza del sistema di captazione pari al 35% circa del volume prodotto di biogas; la captazione viene avviata mediamente quattro anni dopo l'apertura della discarica.

Tab. 2.1 – Valori medi delle concentrazioni di metano, anidride carbonica e ossigeno presenti nel biogas aspirato dalle discariche

	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
DISCARICHE NON ATTIVE	51,6	37,1	1,5
DISCARICHE ATTIVE	42,9	33,8	3,4

Le concentrazioni di inquinanti nel biogas aspirato sono state ipotizzate costanti nel tempo ed equivalenti alle medie delle concentrazioni dichiarate per il triennio 1998÷2000; nei casi in cui tali informazioni non sono risultate disponibili, i dati sono stati integrati con i valori medi rilevati dal censimento in impianti analoghi, riassunti in *Tabella 2.1*.

3. STIMA DELLA PRODUZIONE DI BIOGAS

3.1 Modello Inemar-IPCC e condizioni di applicazione

La stima dei quantitativi attesi di biogas prodotti dalle discariche lombarde è stata condotta applicando la metodologia prevista dal modello Inemar (Regione Lombardia, 2001), basata sull'algoritmo di dettaglio per la stima delle emissioni da discariche controllate proposta dall'IPCC (IPCC, 1996), combinata con quella messa a punto in passato in Italia da Andreottola e Cossu (Andreottola e Cossu, 1988).

L'approccio di base adottato dal modello si fonda, essenzialmente, su una stima dell'evoluzione temporale della produzione di biogas tramite una cinetica del 1° ordine, utilizzata per descrivere i processi di degradazione biologica del carbonio organico biodegradabile presente nei rifiuti. Il dato di partenza è il contenuto di carbonio organico biodegradabile gassificabile $C_{0,w}$ presente nella singola tipologia di rifiuto umido tal quale "w". L'espressione utilizzata è pertanto la seguente:

$$C_{(T,x)w} = k_w \cdot R_{x,w} \cdot C_{0,w} \cdot e^{-k_w(T-x)} \quad (3.1)$$

dove:

- $C_{(T,x)w}$ = carbonio prodotto nel generico anno T dal quantitativo di rifiuto di tipologia w depositato nell'anno x [t_c anno⁻¹];
- k_w = costante cinetica di degradazione del rifiuto di tipologia w [anno⁻¹];
- $R_{x,w}$ = ammontare di rifiuti di tipologia w smaltiti nell'anno x [t_w];
- $C_{0,w}$ = carbonio gassificabile per unità di massa di rifiuto di tipologia w depositato nell'anno x [$t_c t_w^{-1}$];
- T = anno generico per cui si stima la produzione di biogas [anno];

x = anno in cui i rifiuti vengono posti a discarica [anno].

Nota la composizione percentuale degli inquinanti presenti nel biogas, è possibile risalire alla produzione complessiva di biogas e delle sue componenti.

Il modello è stato applicato utilizzando come dati di base le quantità di rifiuti smaltite in ogni singola discarica ricavate dall'indagine condotta nell'ambito dello studio. Dal punto di vista della biodegradabilità, l'approccio di calcolo ha considerato tre distinte tipologie di materiale smaltito: rifiuti urbani, rifiuti assimilabili agli urbani e fanghi di depurazione civile. La prima categoria rappresenta la materia mediamente biodegradabile, come un rifiuto di origine urbana deposto direttamente in discarica senza aver subito alcun tipo di pretrattamento. I rifiuti assimilabili agli urbani sono i residui che, pur non prodotti direttamente da attività domestiche, possono considerarsi qualitativamente analoghi ad essi: a tale categoria sono stati anche assimilati i rifiuti urbani in senso stretto sottoposti a pretrattamenti di stabilizzazione parziale a monte del conferimento in discarica e, in quanto tali, caratterizzati da una minore biodegradabilità. Della terza categoria fanno parte i fanghi organici derivanti dalla depurazione delle acque reflue civili che, pur contenenti sostanza organica con biodegradabilità assai elevata, sono caratterizzati da un contenuto di umidità tale da ridurre considerevolmente la produzione specifica di biogas per unità di peso del materiale.

Per ognuna delle tre tipologie di rifiuto considerato la Tabella 3.1 sintetizza i parametri di definizione delle caratteristiche chimico-fisiche adottati nella valutazione.

Il carbonio biogassificabile per unità di massa di rifiuto è stato stimato sulla base della relazione:

$$C_0 = \frac{SOST_{org-secca}}{100} \cdot \frac{C_{org-secco}}{SOST_{org-secca}} \cdot \frac{(100-U)}{100} \cdot \frac{f_b}{100} \cdot \frac{DOC_f}{100} \quad (3.2)$$

Il valore di k è influenzato, oltre che dalla tipologia del rifiuto, anche da alcune condizioni del sito di smaltimento ed in particolare dall'umidità, potenzialmente influenzata dalla modalità di realizzazione della discarica, dalla meteorologia locale e dalla presenza di quantitativi più o meno rilevanti di residui a basso contenuto di secco quali i fanghi di depurazione. Alti valori di k fanno riferimento a un rifiuto facilmente

Tab. 3.1 – Caratteristiche delle tre categorie di rifiuti considerate (Gandolla et al., 2002; Andreottola e Cossu, 1988; IPCC, 1996; Decca, 1995)

CARATTERISTICHE DEL RIFIUTO	RU	RAU	FDC
Densità (t m ⁻³)	0,8	0,5	1
Sostanza organica secca SOST _{org-secca} (% SS)	60	70	40
Frazione Biodegradabile f _b (% fisso)	60	30	30
Frazione gassificabile DOC _f (% biodeg.)	97,5	95	98
C _{org-secco} /SOST _{org-secca} (-)	0,5	0,5	0,5
Carbonio biogassificabile per unità di massa di rifiuto C ₀ (kg _C t ⁻¹ _{rifiuto})	123	80	12
Costante cinetica di degradazione del rifiuto k (anni ⁻¹)	0,1	0,05	0,4

Tab 3.2 – Biogas prodotto (stime modello Inemar) e captato (al netto dell'aria di diluizione, in condizioni medie di alimentazione; $T = 20^\circ\text{C}$ e $U = 1,5\%$) nelle discariche lombarde nel 2000. Produzione specifica di biogas ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$) attesa per le discariche lombarde durante l'intero periodo di attività biologica

DISCARICHE	Anno 2000				PRODUZIONE SPECIFICA ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$)
	BIOGAS PRODOTTO (m^3)	BIOGAS CAPTATO (m^3)	BIOGAS EMESSO (m^3)	EFFICIENZA DI CAPTAZIONE (%)	
1	41.011.646	14.005.071	27.006.575	34	220
2	37.620.978	7.247.573	30.373.405	19	217
3	35.386.936	9.605.895	25.781.041	27	218
4	31.155.397	23.049.371	8.106.026	74	210
5	29.828.398	9.619.420	20.208.978	32	196
6	27.441.903	19.595.892	7.846.011	71	220
7	25.210.032	7.607.749	17.602.283	30	143
8	22.100.886	451.776	21.649.110	2	199
9	20.101.293	9.059.900	11.041.393	45	205
10	16.911.018	7.000.000	9.911.018	41	221
11	16.684.214	7.824.315	8.859.899	47	221
12	16.627.551	1.467.004	15.160.547	9	220
13	12.320.107	2.566.899	9.753.208	21	204
14	12.194.526	4.553.571	7.640.955	37	220
15	11.249.868	3.082.019	8.167.849	27	158
16	9.165.509	3.955.921	5.209.588	43	154
17	8.496.286	2.098.298	6.397.988	25	208
18	8.181.823	2.717.392	5.464.431	33	202
19	7.221.636	3.762.619	3.459.017	52	210
20	5.132.354	1.106.931	4.025.423	22	133
21	5.122.139	2.326.295	2.795.844	45	136
22	4.931.769	2.000.000	2.931.769	41	220
23	4.559.777	2.000.000	2.559.777	44	180
24	4.044.633	901.117	3.143.516	22	215
25	4.005.760	1.986.505	2.019.255	50	217
26	3.425.372	579.188	2.846.184	17	144
27	2.105.304	700.000	1.405.304	33	220
28	1.983.517	0	1.983.517	0	136
29	1.453.902	701.741	752.161	48	130
30	980.578	650.000	330.578	66	139
31	544.265	0	544.265	0	78
32	317.671	0	317.671	0	135
TOTALE	427.517.048	152.222.463	275.294.585		

biodegradabile e a un'elevata umidità nel corpo della discarica; quest'ultimo parametro, insieme a temperatura e pH, rappresenta un fattore chiave che influenza l'intero processo fermentativo alla base della trasformazione della frazione organica dei rifiuti in biogas.

3.2 Risultati ottenuti e coefficienti di produzione di biogas

Nell'anno 2000, assunto come riferimento nel presente lavoro, il biogas da discarica prodotto in Lombardia risulta esse-

re pari a circa $427 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Tabella 3.2). Il valore calcolato si confronta con una portata di biogas complessivamente captata, rilevata dall'indagine condotta sulle singole discariche, di circa $152 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, con un'efficienza media di captazione che si attesta quindi intorno al 35%. I dati relativi ad ogni singola discarica indicano che solo in tre casi (discariche numero 4, 6 e 30) le efficienze di captazione risultano superiori al 60%, mentre nelle discariche numero 32 e 31, attive dal 1999, e 38, attiva dal 1996, la captazione risulta nulla, in quanto la rete di aspirazione del biogas non è stata tuttora attivata.

Dal dato di base relativo al quantitativo di rifiuti complessivamente smaltito in ogni impianto è possibile valutare anche le produzioni specifiche globali di biogas attese lungo tutto il periodo di produzione stessa. Quest'ultimo dipende, essenzialmente, dalla tipologia e dalla massa di materiale depositato, con una durata media indicativa che, per gli impianti lombardi, è di qualche decennio. I valori di produzione specifica di biogas, riassunti in *Tabella 3.2*, si differenziano essenzialmente per la tipologia dei rifiuti smaltiti in ogni impianto, e sono compresi negli intervalli $130 \div 160 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}_{\text{rifiuto}}$ e $160 \div 220 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}_{\text{rifiuto}}$ per situazioni di smaltimento in cui prevalgono, rispettivamente, i rifiuti poco biodegradabili ed i rifiuti tal quali. In tale contesto, un caso particolare è costituito dalla discarica numero 31, dove lo smaltimento di consistenti quantitativi di fanghi di depurazione civili stabilizzati, contestualmente ad uno scarso apporto di rifiuti solidi urbani tal quali, determina una produzione specifica relativamente più contenuta, e pari a circa $80 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}_{\text{rifiuto}}$, peraltro in linea con i presupposti di base dell'approccio modellistico utilizzato per le stime.

4 EMISSIONI DI INQUINANTI IN ATMOSFERA

4.1 Emissioni associate al biogas non captato

Le emissioni in atmosfera associate al biogas prodotto dalla discarica e non intercettato dai sistemi captazione sono state valutate utilizzando le concentrazioni degli inquinanti nel biogas stesso, riportate nelle *Tabelle 4.1* e *4.2*. Per metano e biossido di carbonio i dati derivano generalmente da misure effettuate presso gli impianti; in assenza dell'informazione è stato utilizzato il valor medio di quelli resi disponibili dall'indagine stessa. In modo analogo si è proceduto per H_2S , Cl_{tot} e F_{tot} , per i quali i dati utilizzati si riferiscono ai rilievi disponibili in pochi siti. Per gli altri inquinanti presi in considerazione, ed in particolare per quelli tossici in traccia (PCDD/F), i dati reperiti si limitano al massimo ad un unico rilevamento e sono stati pertanto integrati con informazioni disponibili in letteratura o ricavate da indagini sperimentali condotte su siti analoghi (DIIAR, 2001; Tsilyiannis, 1999; Eduljee, 1996). Le stime delle corrispondenti emissioni di PCDD/F sono pertanto da considerarsi indicative, in quanto derivanti da una base di dati molto più limitata e potenzialmente eterogenea. Le emissioni risultanti per ogni inquinante e impianto sono riportate in *Tabella 4.3*.

4.2 Emissioni dai sistemi di trattamento del biogas

Nell'anno 2000 il biogas complessivamente captato in Lombardia è risultato pari a circa $152 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, di cui il 53% ($80,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) è stato smaltito in torce ed il 47% ($71,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) in motori. Le corrispondenti emissioni sono state valutate, in modo del tutto analogo a quelle derivanti dal biogas non captato, utilizzando i valori disponibili delle concentrazioni degli inquinanti presenti nei gas combustibili delle due tipologie di apparati: l'unica eccezione al proposito è relativa alla CO_2 , le cui emissioni sono state calcolate teoricamente utilizzando come dato di base il contenuto di metano nel biogas prodotto in ogni sito e rilevato dall'indagine. Per tutti gli altri inquinan-

Tab. 4.1 – Concentrazioni di metano e di biossido di carbonio nel biogas tal quale, al netto dell'aria di diluizione, in condizioni medie di alimentazione ai dispositivi di smaltimento ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 1,5\%$)

		CH_4 (%)	CO_2 (%)
Discariche non attive	Num. dati	12	12
	Valore medio	58	41
	Deviazione standard	2.4	2.3
Discariche attive	Num. dati	13	13
	Valore medio	56	43
	Deviazione standard	1.5	1.5

Tab. 4.2 – Concentrazioni di componenti in traccia nel biogas tal quale, al netto dell'aria di diluizione in condizioni medie di alimentazione ai dispositivi di smaltimento ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 1,5\%$)

Componente	Concentrazione	Fonte
H_2S	30 mg m^{-3}	Media di 6 discariche censite
Cl_{tot}	10 mg m^{-3}	Media di 4 discariche censite
F_{tot}	1 mg m^{-3}	Media di 4 discariche censite
COV	38 mg m^{-3}	1 discarica censita + DIIAR 2001
PCDD/F	$117 \text{ pgI-TEQ m}^{-3}$	DIIAR, 2001; Tsilyiannis, 1999; Eduljee, 1996

ti di interesse la stima delle emissioni ha utilizzato le concentrazioni nei gas combustibili reperite nell'indagine e sintetizzate in *Tabella 4.4* per gli inquinanti convenzionali ed in *tabella 4.5* per quelli in traccia. I dati disponibili per le torce si riferiscono a dispositivi ad alta temperatura, che costituiscono la tecnologia largamente più diffusa nell'ambito lombardo (73% circa del totale di biogas smaltito in torcia). La scarsa adozione di installazioni a bassa temperatura e l'esiguità dei dati rilevati (1 solo caso su 15 apparati censiti) ha determinato la necessità di integrare i valori reperiti attraverso opportune stime. Per gli inquinanti direttamente influenzati dalle condizioni di combustione si sono così adottati valori di concentrazione che, rispetto a quelli medi rilevati per le configurazioni ad alta temperatura, sono superiori di un ordine di grandezza per CO, COV e polveri e pari alla metà per gli NO_x . Per SO_2 , HCl ed HF, sostanzialmente dipendenti dalle caratteristiche del combustibile, l'integrazione del dato non rilevato ha invece utilizzato lo stesso valor medio ricavato per le installazioni ad alta temperatura. Come in precedenza, i pochi dati disponibili di concentrazioni di IPA e di PCDD/F sono stati integrati con le limitate acquisizioni disponibili da indagini su analoghe installazioni o reperibili in letteratura (*Tabella 4.5*). Le emissioni così risultanti per ogni inquinante e impianto sono riportate in *Tabella 4.6* (torce) ed in *Tabella 4.7* (motori a gas). A titolo riassuntivo, la *Tabella 4.8* riporta infine, per l'anno di riferimento 2000, il quadro complessivo delle emissioni in Lombardia, associate tanto al biogas non captato che alla combustione di quello smaltito nelle torce e nei motori.

Tab. 4.3 – Quadro riassuntivo degli inquinanti emessi con il biogas non captato nel 2000

DISCARICHE	BIOGAS NON CAPTATO (m ³)	CH ₄ (t)	CO ₂ (t)	H ₂ S (kg)	Cl tot (kg)	F tot (kg)	COV (kg)	PCDD/F (µg _{L-TEQ})
<i>DISCARICHE NON ATTIVE</i>								
1	27.006.576	11.173	21.545	820	270	27	1.026	3.160
3	25.781.040	10.573	20.820	783	258	26	980	3.016
8	21.649.110	8.956	17.269	657	216	22	823	2.533
12	15.160.547	6.369	11.825	460	152	15	576	1.774
9	11.041.393	4.663	8.549	335	110	11	420	1.292
10	9.911.018	4.100	7.907	301	99	10	377	1.160
13	9.753.208	3.958	7.991	296	98	10	371	1.141
11	8.859.899	3.906	6.407	269	89	9	337	1.037
15	8.167.849	3.379	6.516	248	82	8	310	956
4	8.106.025	3.315	6.582	246	81	8	308	948
6	7.846.012	2.967	7.033	238	78	8	298	918
14	7.640.954	3.041	6.426	232	76	8	290	894
18	5.464.432	2.233	4.435	166	55	5	208	639
16	5.209.587	2.234	3.941	158	52	5	198	610
22	2.931.769	1.213	2.339	89	29	3	111	343
23	2.559.777	1.012	2.173	78	26	3	97	299
25	2.019.254	853	1.563	61	20	2	77	236
27	1.405.304	581	1.121	43	14	1	53	164
30	330.578	137	264	10	3	0,3	13	39
<i>DISCARICHE ATTIVE</i>								
2	30.373.405	12.457	24.528	922	304	30	1.154	3.554
5	20.208.978	8.404	16.003	613	202	20	768	2.364
7	17.602.283	7.056	14.665	534	176	18	669	2.059
17	6.397.988	2.638	5.129	194	64	6	243	749
20	4.025.423	1.570	3.472	122	40	4	153	471
19	3.459.018	1.379	2.903	105	35	3	131	405
24	3.143.516	1.296	2.520	95	31	3	119	368
26	2.846.184	1.074	2.556	86	28	3	108	333
21	2.795.844	1.111	2.357	85	28	3	106	327
28	1.983.517	791	1.664	60	20	2	75	232
29	752.161	292	652	23	8	1	29	88
31	544.265	217	457	17	5	1	21	64
32	317.671	127	267	10	3	0,3	12	37
TOTALE	275.294.585	113.074	221.878	8.357	2.753	275	10.461	32.209

5 INTERVENTI DI CONTROLLO DELLE EMISSIONI

5.1 Miglioramento dell'efficienza di captazione

L'elaborazione dei dati reperiti dall'indagine mostra che, nelle discariche presenti in Lombardia, il biogas attualmente captato ed avviato a combustione, in torce o in motori finalizzati al recupero di energia, costituisce il 35% circa

del quantitativo complessivamente prodotto. Il restante 65% viene dunque emesso in atmosfera, direttamente o dopo la migrazione attraverso i terreni adiacenti alle discariche stesse.

Se la captazione della totalità del biogas appare un obiettivo irrealizzabile, per via della difficoltà oggettiva di coprire effettivamente tutto il volume di deposito che è normalmente caratterizzato da una consistente disomogeneità, la pratica operativa lascia ampi spazi per il miglioramento della captazione.

Tab. 4.4 – Concentrazioni dei principali inquinanti nelle emissioni dalla combustione del biogas in torcia e nei motori. Valori espressi in mg m⁻³ riferiti ai fumi secchi in condizioni normali, al 6 % di O₂ per le torce e al 5 % per i motori

			SO ₂	NO _x	COV	PTS	HCl	HF	CO
Discariche non attive	Torce ad alta temperatura	Num. dati	5	5	5	5	5	5	5
		Valore medio	29.3	40	4.5	3.4	7.4	0.4	58
		Dev. st.	57.1	12	3.4	0.9	9.7	0.4	113
Discariche attive	Torce ad alta temperatura	Num. dati	11	11	11	11	11	11	11
		Valore medio	8.4	71	4.9	2.9	1.6	0.1	16
		Dev. st.	15.3	103	3.4	0.4	2.0	0.1	11
Discariche non attive	Torce a bassa temperatura	Num. dati	1	1	1	1	1	1	1
		Valore medio	0.5	30	0.5	5.0	0.5	0.5	10
		Dev. st.							
Discariche non attive	Motori	Num. dati	2	2	2	2	2	2	2
		Valore medio	2.3	272	32.5	2.0	2.5	0.3	394
		Dev. st.	2.5	110	45.9	–	3.5	0.4	97
Discariche attive	Motori	Num. dati	19	19	19	19	19	19	19
		Valore medio	3.6	299	52.7	1.8	5.4	0.6	307
		Dev. st.	3.4	84	54.8	1.6	6.1	0.5	230

5.1.1 Predisposizione ed avvio della captazione del biogas

Nelle discariche lombarde attualmente la captazione del biogas è generalmente avviata dopo il completamento dei conferimenti di rifiuti (nell'intera discarica o in un lotto funzionale): i pozzi di captazione vengono trivellati a posteriori sulla superficie della discarica o dei lotti già colmati. Mediamente la captazione del biogas ha dunque inizio tra i 3 e 4 anni dopo l'apertura della discarica.

Considerando come riferimento una curva tipo di produzione di biogas (Fig. 5.1), si può stimare che nella *fase di avvio* (durante i primi 3 o 4 anni dall'inizio delle attività di smaltimento) la quantità di biogas prodotta risulti pari a circa il 6-8% di quella attesa complessivamente. Tale quantità viene di norma emessa in atmosfera senza alcun trattamento.

Gli interventi prospettabili per anticipare la captazione del biogas, consentendo di eliminare tali perdite, comprendono:

- progettazione dei sistemi di captazione e smaltimento del biogas e della copertura finale della discarica integrata in quella dell'impianto nel suo complesso;
- realizzazione dei sistemi di captazione del biogas in modo che essi possano essere utilizzati sin dall'avvio del conferimento dei rifiuti;
- predisposizione degli impianti di captazione, trasporto e combustione prima dell'apertura della discarica ai conferimenti.

La presenza di un efficiente sistema di captazione e combustione già durante i conferimenti di RSU consentirebbe altresì di mantenere la discarica in lieve depressione, con effetti positivi anche in termini di riduzione delle emissioni incontrollate di sostanze maleodoranti.

L'aggravio di costi conseguente all'applicazione degli interventi di cui sopra è relativo: si tratta non tanto di introdurre nuove voci di costo, ma piuttosto di anticipare alcuni investi-

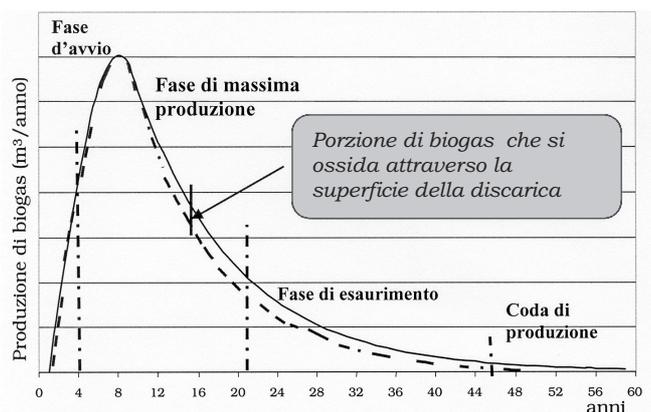


Fig. 5.1 – Andamento tipico della curva di produzione di biogas da discarica di rifiuti solidi urbani

Tab. 4.5 – Concentrazioni degli inquinanti in traccia nelle emissioni dalla combustione del biogas in torcia. Valori riferiti a fumi secchi in condizioni normali ed al 6 % di O₂

Inquinante	Concentrazione	Fonte dell'informazione
IPA	205 ng m ⁻³	2 discariche censite + DIIAR, 2001
PCDD/F	80 pg _{I-TEQ} m ⁻³	1 discarica censita + DIIAR, 2001; Caponi, 1998; UNEP Chemicals, 2001; Bremmer et al., 1994 in EPA, 1998; Umweltbundesamt, 1996 in EPA, 1998; Lahl, 1991

Tab. 4.6 – Quadro riassuntivo degli inquinanti emessi dalla combustione di biogas in torcia nel 2000

DISCARICHE	BIOGAS ALLE TORCE (m ³)	TIPO DI TORCIA (*)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	COV (kg)	PTS (kg)	HCl (kg)	HF (kg)	CO (kg)	CO ₂ (t)	IPA (mg)	PCDD/F (µg _{I-TEQ})
<i>DISCARICHE NON ATTIVE</i>												
1	10.734.556	AT/BT	525	1.213	2.284	1.370	105	11	6.847	20.769	10.816	4.221
4	9.547.492	AT	456	1.824	228	137	91	9	684	18.473	9.347	3.648
10	7.000.000	BT	357	714	1.786	1.071	71	7	5.357	13.544	7.321	2.857
16	3.955.921	AT	12	691	12	115	12	12	230	7.654	4.723	1.843
3	4.122.139	AT	512	1.279	107	128	947	9	11.089	7.976	8.743	3.412
9	4.016.244	AT	192	768	96	58	38	4	288	7.771	3.935	1.536
22	2.000.000	BT	112	223	558	335	22	2	1.674	3.870	2.288	893
23	2.000.000	AT	1.403	429	103	32	133	11	197	3.870	2.196	857
18	1.343.065	AT	67	266	33	20	13	1	100	2.599	1.365	533
27	700.000	BT	36	71	179	107	7	1	536	1.354	732	286
15	674.108	AT	13	296	25	15	1	0,3	15	1.304	1.028	401
30	650.000	AT	33	134	17	10	7	1	50	1.258	686	268
12	604.061	BT	31	62	156	94	6	1	469	1.169	641	250
8	451.776	BT	22	45	112	67	4	0	335	874	458	179
13	30.274	BT	1	3	7	4,0	0,3	0,03	20	59	27	11
<i>DISCARICHE ATTIVE</i>												
5	9.619.420	AT	680	14.186	296	153	100	2	680	18.612	13.932	5.437
7	7.607.749	AT	2	828	7	110	13	7	1.159	14.720	7.544	2.944
2	4.831.716	AT	1	151	116	70	5	0,1	487	9.349	4.759	1.857
19	3.762.619	AT	137	1.547	74	113	11	8	96	7.280	7.696	3.003
21	2.326.295	AT	1	1.484	235	51	1	0,2	108	4.501	3.468	1.353
17	1.414.822	AT	65	161	35	24	17	2	122	2.737	1.669	651
20	1.106.931	BT	64	127	318	191	13	1	953	2.142	1.303	508
24	901.117	AT	426	551	40	24	54	4	40	1.743	1.653	645
29	701.741	BT	40	80	201	121	8	1	603	1.358	824	321
26	579.188	AT	0,3	117	14	8	9	0,6	89	1.121	534	208
TOTALE	80.681.233		5.187	27.250	7.037	4.427	1.689	92	32.227	156.104	97.686	38.121

(*) AT = alta temperatura; BT = bassa temperatura

menti che vengono altrimenti affrontati in un periodo successivo.

Il biogas captato nella fase iniziale della sua produzione è di qualità piuttosto modesta, e garantirne un'adeguata combustione potrebbe risultare problematico. Se la discarica contiene rifiuti biodegradabili in quantità sufficiente ed è ben compattata, la produzione di metano si avvia tuttavia rapidamente. In caso contrario, o quando la discarica smaltisse prevalentemente rifiuti poco biodegradabili quali, ad esempio, il materiale secco proveniente da operazioni di selezione, si potrebbe valutare la possibilità di adottare per il trattamento un'unità di biofiltrazione su supporti naturali. Questa tecnologia si presta all'ossidazione di flussi gassosi poveri di metano e ricchi di ossigeno, condizioni che in una discarica per RSU tal quali si riscontrano sia nella fase di avvio, sia in quella di esaurimento della produzione. La creazione di un biofiltro

comporta costi di investimento aggiuntivi (IPCC, 2001), e la necessità di reperire uno spazio adeguato.

5.1.2 Efficienza dei sistemi di captazione e trasporto

I risultati del censimento condotto mostrano come nelle discariche lombarde la captazione del biogas si mantenga su livelli complessivamente buoni al momento dell'installazione dei relativi sistemi e negli anni immediatamente successivi. Tuttavia, dopo qualche anno (3-5) dall'avvio del sistema, l'efficienza di captazione si riduce spesso a valori molto bassi (inferiori al 40%).

Diversi sono i fattori che influenzano la funzionalità della captazione e del trasporto del biogas, come illustrato in seguito. Per quanto riguarda la *captazione*, l'inconveniente più comune è la tendenza all'intasamento dei pozzi di estrazione del

Tab. 4.7 - Quadro riassuntivo degli inquinanti emessi dalla combustione di biogas nei motori nel 2000

DISCARICHE	BIOGAS AI MOTORI (m ³)	ENERGIA PRODOTTA (10 ³ MJ)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	COV (kg)	PTS (kg)	HCl (kg)	HF (kg)	CO (kg)	CO ₂ (t)	IPA (mg)	PCDD/F (µg _{I-TEQ})
<i>DISCARICHE NON ATTIVE</i>												
6	19.595.892	76.663	404	19.564	1.301	179	479	49	39.617	37.915	20.053	7.826
4	13.501.880	85.822	408	23.620	14.265	189	510	56	17.706	26.124	20.925	8.166
11	7.824.315	49.194	177	17.539	1.292	43	221	24	5.688	15.139	9.067	3.538
3	5.483.756	39.600	152	11.006	2.467	76	190	21	12.334	10.610	7.780	3.036
9	5.043.656	38.880	142	9.204	535	18	177	19	3.005	9.759	7.266	2.836
14	4.553.571	13.713	84	3.156	43	57	22	17	1.946	8.810	2.740	1.069
1 (*)	3.270.515	n.d.	10	1.463	1.358	73	104	11	6.792	6.328	4.284	1.672
13	2.536.625	16.348	20	7.060	10	42	246	6	11.048	4.908	4.349	1.697
15	2.407.911	23.324	43	5.014	1.124	35	39	7	10.048	4.659	3.544	1.383
25	1.986.505	10.169	303	4.261	191	81	188	44	1.124	3.844	4.600	1.795
18	1.374.327	9.157	2	4.148	1.462	14	5	0,1	5.391	2.659	2.290	894
12	862.944	6.480	23	1.693	380	12	29	3	1.898	1.670	1.197	467
<i>DISCARICHE ATTIVE</i>												
2	2.415.858	16.848	6	2.443	0,3	25	0,4	0,4	5.819	4.674	2.582	1.008
17	683.476	13.392	18	1.463	290	9	22	2	1.451	1.322	915	357
TOTALE	71.541.230	399.625	1.793	111.635	24.717	853	22.235	262	123.866	138.420	91.592	35.743

(*) Centrale termica

biogas. Questi si riempiono rapidamente di percolato o di limo (in particolare ove si smaltiscano rilevanti quantità di fanghi), e diventano così indisponibili per l'aspirazione del biogas. I pozzi verticali risentono inoltre in modo notevole dei cedimenti del corpo della discarica: i consistenti abbassamenti che la massa dei rifiuti subisce (fino al 40% dell'altezza della colonna di rifiuti), spesso disomogenei, causano lo schiacciamento o la curvatura dei pozzi, rendendoli in tal modo meno efficienti.

Il problema più comune nel trasporto del biogas dai punti di captazione alle stazioni di aspirazione e smaltimento è costituito dai ristagni delle condense e dal disassamento delle linee, anche questi generalmente imputabili ai cedimenti della superficie.

I principali accorgimenti da adottare per questi inconvenienti sono:

- i punti di captazione del biogas devono essere concepiti in modo che ne sia garantito costantemente il *drenaggio*. La captazione del biogas deve dunque "crescere" con la discarica ed essere connessa ai sistemi di allontanamento del percolato per lo scarico della fase liquida;
- in discariche dotate di pozzi trivellati a posteriori, la situazione può essere parzialmente migliorata installando una pompa di *sollevamento* del liquame in ogni pozzo di captazione del biogas. Questa soluzione viene attualmente impiegata in alcune grandi discariche lombarde; essa può dare buoni frutti a patto che il sollevamento del percolato non subisca interruzioni, ma comporta comunque una notevole complicazione ed un importante aggravio di costi sia in fase di impianto che in fase di gestione;

- la corretta ed efficiente gestione della discarica, durante il conferimento e dopo la chiusura, diventa di importanza fondamentale per ottenere una captazione adeguata. I cedimenti della superficie, che sono spesso all'origine della perdita di efficienza del sistema di smaltimento del biogas, sono di difficile previsione nel loro sviluppo: solo un attento controllo e tempestivi *interventi di riparazione*, consentono di prevenire tali problemi. Questo vale sia per i pozzi captazione, sia per le linee di trasporto;
- i punti di captazione e le reti di trasporto devono essere concepiti in modo da distribuire la depressione applicata dal sistema di aspirazione nel modo più omogeneo possibile, ed i dispositivi di aspirazione devono essere dimensionati sulla *punta massima* di produzione di biogas;
- nei casi in cui si preveda l'utilizzo del biogas a scopo energetico, non si deve ridurre la captazione allo scopo di aspirare solo biogas di ottima qualità. I sistemi di captazione e di smaltimento devono essere progettati in modo da consentire il *funzionamento contemporaneo* dei motori per la produzione di energia (che impiegano il biogas di qualità migliore) e delle torce (che devono continuare a smaltire il resto del biogas captabile, anche se di cattiva qualità).

Gli interventi delineati consentono di mantenere l'efficienza di captazione su valori elevati per un tempo più lungo: indicativamente, durante gli anni di *produzione più intensa* (in linea di massima tra il quinto ed il ventesimo anno, come mostrato in Figura 5.1, periodo durante il quale si produce circa il 70% del biogas complessivamente atteso) si può assumere come obiettivo la captazione in media dell'80% del biogas prodotto.

Tab. 4.8 – Quadro riassuntivo delle emissioni da discariche nel 2000 in Lombardia

INQUINANTI	BIOGAS PRODOTTO	BIOGAS NON CAPTATO	COMBUSTIONE DEL BIOGAS CAPTATO			EMISSIONE TOTALE IN ATMOSFERA
			TORCE	MOTORI	TOTALE	
CH ₄ (kt)	174	113	-	-	-	113
CO ₂ (kt)	348	222	156	138	295	516
CO ₂ eq. (kt)	4.350	2.823	156	138	295	3.117
SO ₂ (t)	-	-	5,1	1,8	7,0	7,0
NO _x (t)	-	-	27	112	139	139
COV (t)	16	10	7,0	25	32	42
CO (t)	-	-	32	124	156	156
PTS (kg)	-	-	4.397	853	5.250	5.250
HCl (kg)	-	-	1.665	2.235	3.900	3.900
HF (kg)	-	-	90	262	352	352
H ₂ S (t)	13	8,4	-	-	-	8,4
Cl _{tot} (kg)	4.275	2.753	-	-	-	2.753
F _{tot} (kg)	428	275	-	-	-	275
IPA (g)	-	-	98	92	190	190
PCDD/F (mg _{I-TEQ})	50	32	38	36	74	106

Tab. 5.1 – Risultati attesi dall'applicazione degli interventi suggeriti per il miglioramento dell'efficienza di captazione del biogas

INTERVENTO	DURATA INDICATIVA DEL PERIODO CONSIDERATO (%)	PERCENTUALE DI BIOGAS OSSIDATO SUL TOTALE PRODOTTO (%)
Situazione attuale	complessivamente	35
Con interventi di miglioramento della captazione:	complessivamente	75
Avvio anticipato della captazione	8	+ 5
Miglioramento della captazione in fase di massima produzione	25	+ 15
Captazione in fase di esaurimento	25	+ 15
Ossidazione della coda di produzione attraverso le coperture	42	+ 5

5.2 Possibilità di incremento dell'efficienza di trattamento del biogas

5.2.1 Estensione del periodo di attività dei sistemi di captazione e trattamento

In gran parte delle discariche lombarde la captazione del biogas cessa ben prima del ventesimo anno di vita dall'apertura dell'impianto. In molte discariche, tuttavia, anche dopo tale periodo la produzione di biogas è ancora sensibile, pur divenendo la sua combustione progressivamente più difficile ed il suo recupero energetico impraticabile. I problemi connessi alla captazione diventano inoltre sempre più difficili da prevenire, gli impianti installati invecchiano, i servizi di manutenzione si diradano, e risulta sempre più complicato reperire i fondi per gli interventi di ripristino, in un periodo sempre più lontano dal termine dei conferimenti di rifiuti e dai flussi di cassa ad essi associati.

Ciononostante si può stimare che dal periodo di cui sopra e fino alla fine della produzione di biogas, cioè per alcune decine di anni, venga prodotto nel complesso ancora un 20-22% circa del biogas complessivamente atteso dalla degradazione dei rifiuti. Se si somma a questo il 5-8% prodotto negli anni che attualmente precedono il normale avvio della captazione, si ottiene un 25-30% di biogas che generalmente, durante la vita della discarica, sfugge del tutto al controllo. In un'ottica di riduzione delle emissioni di gas-serra in atmosfera è pertanto importante trovare il modo di limitare tali perdite.

L'estensione del periodo di emissione controllata (dopo ossidazione) del biogas prodotto dalle discariche nella fase di esaurimento (Figura 5.1) si ottiene, in primo luogo, migliorando l'efficienza di captazione secondo quanto illustrato nel Paragrafo 5.1. Il prolungamento della vita dei dispositivi di captazione si traduce infatti in un corrispondente allungamento del periodo di funzionamento delle torce

installate negli impianti. Nei periodi successivi, in cui il biogas estratto dalla discarica è troppo povero di componenti combustibili per poter essere adeguatamente trattato, l'ossidazione biologica può sostituire almeno in parte la combustione. Impiegando insieme combustione ed ossidazione biologica, rispettivamente per il biogas di migliore e di peggiore qualità in termini di contenuto di componenti combustibili, si stima di poter estendere il trattamento e quindi l'emissione controllata di biogas per un 15% circa sul totale prodotto.

L'ossidazione del biogas ottenuta spontaneamente, con l'emissione attraverso le coperture finali delle discariche, potrebbe coprire la *codice di produzione* (Figura 5.1), quantificabile in un 5% circa del totale. Questa soluzione richiede che le coperture vengano ben progettate, realizzate e mantenute: a parte gli interventi di manutenzione dedicati alla cura della vegetazione ed eventualmente al periodico ripristino della continuità degli strati di terreno, si tratta di misure passive, che richiedono uno sforzo di natura economica molto limitato. Questo aspetto è particolarmente importante, perché l'emissione di biogas così intercettata ed ossidata è debole, ma si protrae per lunghi anni dopo la fine dei conferimenti di rifiuti, anni durante i quali la disponibilità a pagare dei gestori degli impianti si riduce progressivamente.

Nella *Tabella 5.1* vengono riepilogati i miglioramenti attesi con l'applicazione degli interventi descritti, in termini di percentuale di biogas captato ed ossidato sul totale del biogas prodotto. I dati indicano come gli interventi prospettabili per migliorare la captazione potrebbero incrementare la percentuale del biogas captato ed ossidato, sul totale del biogas prodotto durante l'intera vita della discarica, dall'attuale 35% fino al 75%.

L'insieme degli interventi configurati in *Tabella 5.1* costituisce la base su cui sono stati formulati gli scenari presi in considerazione per la stima dell'evoluzione delle emissioni, sviluppata in seguito.

5.2.2 Miglioramento della combustione in torcia

Le torce ad alta temperatura costituiscono, allo stato attuale, la migliore tecnologia disponibile per la combustione del biogas, in termini di valori di emissione in atmosfera. Queste torce sono già molto diffuse nelle discariche lombarde: l'intervento migliorativo che qui viene proposto è semplicemente quello di estendere tale tecnologia a tutte le discariche nuove, ed eventualmente a quelle più importanti (in termini di attuale produzione di biogas) tra le esistenti che non ne fossero ancora dotate.

5.2.3 Miglioramento della combustione a fini di recupero energetico

Le emissioni in atmosfera associate ai gas di scarico dei motori per la produzione di energia elettrica dal biogas sono relativamente più consistenti di quelle relative alle torce. La combustione nei motori è infatti meno efficiente. Ciò nonostante, il recupero energetico ha comunque una forte valenza positiva in campo ambientale, che giustifica ugualmente l'installazione di tali dispositivi. Sono attualmente allo stu-

dio, ed in qualche caso già in commercio, sistemi per il controllo delle emissioni, in particolare di CO ed incombusti. Il loro utilizzo è tuttavia ancora poco diffuso ed il loro costo piuttosto elevato. Negli scenari di evoluzione delle emissioni formulati in seguito nello studio non si è quindi prevista una loro possibilità di adozione in nessuno dei casi di recupero energetico da biogas.

In ogni caso, il miglioramento che un loro impiego più esteso comporterebbe a livello di emissioni globali è relativo rispetto ai grandi vantaggi ottenuti con il drastico incremento della captazione e la conseguente estensione dell'ossidazione del biogas. Si è preferito dunque concentrare gli sforzi in quest'ultima direzione.

6 SCENARI DI EVOLUZIONE DELLE EMISSIONI

La stima delle emissioni in atmosfera attese nel medio e lungo periodo richiede la formulazione di ipotesi sull'evoluzione temporale dei fattori che determinano le emissioni stesse: caratteristiche quantitative e qualitative dei materiali avviati a smaltimento e modalità di captazione e trattamento del gas prodotto; nei paragrafi successivi vengono sintetizzate le assunzioni di base ed i possibili scenari di valutazione da esse derivanti.

6.1 Evoluzione temporale della produzione e smaltimento dei rifiuti

L'evoluzione temporale della produzione complessiva di rifiuti attualmente prospettata dalla pianificazione regionale in materia prevede, per il prossimo decennio, una crescita della produzione compresa tra il 3 ed il 5% annui. In linea con la tendenza in atto negli ultimi anni, una quota progressivamente crescente dovrebbe essere avviata al recupero di materiali, sino a raggiungere l'obiettivo regionale di raccolta differenziata per il 2010, fissato al 50% (*Figura 6.1*).

Nell'ipotesi di una crescita del 3%, la massa dei rifiuti da avviare a smaltimento indifferenziato si manterrebbe sostan-

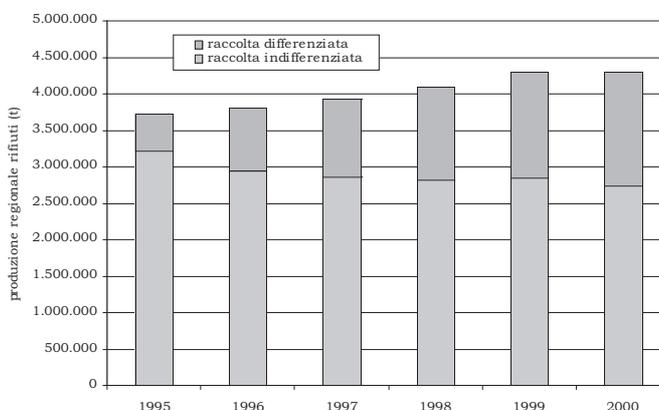


Fig. 6.1 – Andamento della produzione di rifiuti e della raccolta differenziata in Regione Lombardia dal 1995 al 2000

zionalmente costante durante tutto il periodo considerato dallo studio (2000÷2010); nel caso in cui la produzione aumentasse del 5% annuo si avrebbe, invece, un incremento anche dei rifiuti avviati a smaltimento indifferenziato, pari a circa il 2% annuo.

Dati il grado di incertezza delle previsioni e l'esiguità delle percentuali in gioco, si è assunta costante nel tempo la quantità dei rifiuti complessivamente avviati a smaltimento. In altre parole, l'incremento della frazione recuperata, nei prossimi dieci anni, compenserebbe la crescita nella produzione complessiva.

Quanto al destino finale dei materiali smaltiti, sono stati individuati 4 scenari di smaltimento dei rifiuti, sintetizzati in *Tabella 6.1*.

Per quanto riguarda la produzione di biogas, gli scenari definiti considerano le seguenti ipotesi:

- i rifiuti solidi urbani tal quali avviati a discarica direttamente continuano a produrre biogas secondo gli stessi tassi utilizzati in precedenza;
- dei rifiuti solidi urbani sottoposti a stabilizzazione aerobica, circa il 70% della massa raggiunge le discariche per lo smaltimento finale (si può ipotizzare che il restante 30% sia trasformato in sottoprodotti gassosi o, in misura ridotta, recuperato); i residui avviati a smaltimento sono caratterizzati inoltre da una minore gassificabilità, pari al 65% rispetto a quella del rifiuto tal quale;
- della massa dei rifiuti solidi urbani avviati a termovalorizzazione, circa il 30% in peso viene avviato a discarica sotto forma di scorie del processo (il restante 70% viene emesso in atmosfera), con un corrispondente contributo alla produzione di biogas che si può ritenere del tutto trascurabile.

6.2 Evoluzione temporale della produzione di biogas

Combinando le modalità di smaltimento previste da ognuno degli scenari formulati in *Tabella 6.1* con le ipotesi di cui

Tab. 6.1 – Scenari relativi alle soluzioni di smaltimento dei rifiuti urbani indifferenziati

	Scenario	Discarica diretto	Stabilizzazione	Termovalorizzazione
1	Situazione attuale (dati ARPA Lombardia 2000)	30%	35%	35%
2	Stabilizzazione spinta	0%	60%	40%
3	Situazione media realistica	20%	30%	50%
4	Termovalorizzazione spinta	15%	15%	70%

sopra, l'evoluzione temporale della produzione di biogas attesa per gli scenari stessi è stata valutata applicando il modello descritto al capitolo 3.1. I risultati, in termini di produzioni annue di biogas stimate, sono illustrati graficamente in *Figura 6.2*, che riporta i valori ottenuti nella ragionevole ipotesi che lo smaltimento dei rifiuti prospettato da ogni scenario si modifichi linearmente nel transitorio tra il 2000 ed il 2010, fino a raggiungere e mantenere negli anni successivi le corrispondenti situazioni di regime. Tali situazioni sono riassunte, a titolo di confronto, in *Tabella 6.2* che riporta le produzioni annue di biogas attese per ogni scenario all'anno 2010.

Dal confronto tra i valori ottenuti per i diversi scenari si nota, in primo luogo, l'inerzia del "sistema discarica": gli effetti di decisioni programmatiche sullo smaltimento dei rifiuti assunte nell'anno 2000 (essenzialmente, la progressiva diminuzione della frazione gassificabile dei rifiuti avviati a discarica), e tradotte in pratica nell'arco di un decennio, mostrano effetti nella produzione di biogas che divengono apprezzabili solo a partire dagli ultimi anni del decennio considerato. La produ-

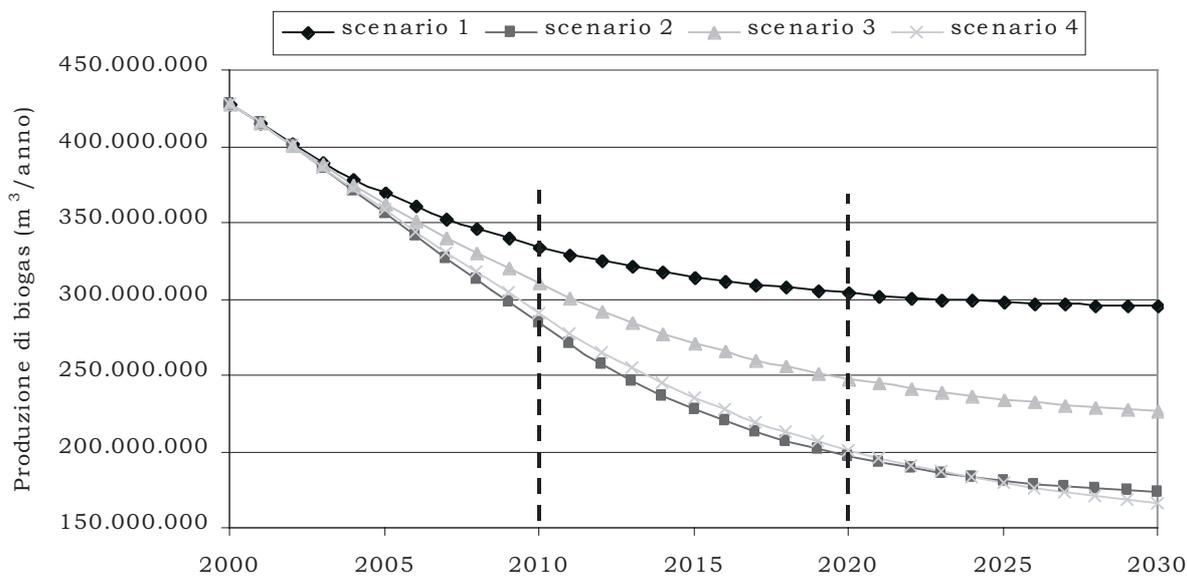


Fig. 6.2 – Andamento temporale della produzione di biogas nei diversi scenari

Tab. 6.2 – Previsioni di produzione di biogas nel 2010 per gli scenari ipotizzati

	Scenario	Produzione di biogas (m ³ anno ⁻¹)
1	Situazione attuale	334.422.000
2	Stabilizzazione spinta	284.459.000
3	Situazione media realistica	310.091.000
4	Termovalorizzazione spinta	290.729.000

zione di biogas avviene infatti con sensibile ritardo rispetto allo smaltimento: pertanto, durante i primi anni essa si mantiene ancora elevata a causa delle grandi quantità di rifiuti solidi urbani tal quali o, più di recente, selezionati, avviati a discarica nel passato.

Ad esempio nello Scenario 1, che non ipotizza alcun cambiamento nella destinazione finale dei rifiuti, la produzione di biogas a conclusione del decennio considerato diminuisce di circa 93 milioni di m³, corrispondenti al 22% circa, solo per effetto dei cambiamenti avvenuti negli anni precedenti. In tale ultimo periodo (1995÷2000), infatti, lo smaltimento in discarica delle frazioni responsabili della produzione di biogas ha già subito, in Lombardia, una consistente riduzione: i rifiuti solidi urbani avviati direttamente a discarica o ad impianti di stabilizzazione si sono rapidamente ridotti (di circa il 35%, pari al 25% in meno sul totale dei rifiuti avviati a smaltimento), mentre sono progressivamente aumentati i rifiuti avviati a recupero ed a termodistruzione.

Da questo punto di vista, lo scenario più estremo tra quelli ipotizzati (Scenario 4: termovalorizzazione spinta) prevede che lo smaltimento in discarica (direttamente o attraverso la stabilizzazione) diminuisca ulteriormente nei prossimi dieci anni di circa il 50%, pari al 33% in meno sul totale dei rifiuti avviati a smaltimento. Si tratta di una prospettiva difficilmente superabile nell'arco di tempo considerato, attraverso politiche effettivamente praticabili. Ciò nonostante, un'evoluzione di questo tipo porterebbe ad una produzione di biogas stimata per il 2010 solamente del 13% inferiore a quella prevista per lo Scenario 1, come evidenziato in *Figura 6.2*.

Riduzioni più consistenti si avrebbero solo negli anni successivi.

Nello Scenario 2, che prevede lo smaltimento in discarica solo di rifiuti stabilizzati, la massa dei rifiuti avviati a stabilizzazione è circa il doppio di quella prevista (tra smaltimento diretto in discarica e attraverso stabilizzazione) nello scenario citato in precedenza; data la minore gassificabilità dei rifiuti stabilizzati il risultato raggiunto, ai fini della produzione di biogas, è molto simile nell'ambito del periodo considerato: la riduzione rispetto allo Scenario 1, al 2010, risulta pari al 15% circa, come evidenziato in *Figura 6.2*.

Vale la pena di sottolineare che i due scenari precedenti, definibili come "estremi", sono i soli che soddisfano i contenuti delle norme già approvate a scala nazionale (D.Lgs. 22/1997 e D.Lgs. 336/2003) che intendono limitare fortemente lo smaltimento di rifiuti biodegradabili in discarica.

Lo Scenario 3, che è stato definito "situazione media realistica", può essere considerato come un obiettivo intermedio (da raggiungere, per esempio, nell'anno 2005), propedeutico alla realizzazione degli scenari estremi.

Se i due scenari estremi, raggiunti per ipotesi nel 2010, venissero mantenuti costanti nel decennio successivo, nel 2020 si raggiungerebbero produzioni di biogas complessive stimate rispettivamente in 201·10⁶ m³ anno⁻¹ per la soluzione prospettata dallo Scenario 4 e 197·10⁶ m³ anno⁻¹ per quella relativa allo Scenario 2. La produzione di biogas si ridurrebbe quindi del 35% rispetto a quella relativa allo Scenario 1, come evidenziato in *Figura 6.2*.

Gli effetti delle politiche adottate a partire dall'anno 2000 si noteranno quindi in un futuro più lontano di quello assunto come orizzonte temporale in questa sede: in sintesi, dati i lunghi tempi di risposta del sistema discarica, le iniziative orientate alla riduzione delle emissioni in atmosfera da queste fonti devono essere anticipate il più possibile.

6.3 Evoluzione temporale delle emissioni in atmosfera

A fronte dell'evoluzione temporale della produzione di biogas stimata al paragrafo precedente, lo studio ha valutato il corrispondente andamento delle emissioni di inquinanti. A tale scopo, ognuno degli scenari di smaltimento dei rifiuti prospettati per il futuro è stato combinato con alcuni scenari di captazione e trattamento del biogas prodotto, ragionevolmente

Tab. 6.3 – Evoluzione temporale delle portate di biogas captato e non captato per i diversi scenari di smaltimento e di emissione formulati

SCENARI DI PRODUZIONE E CAPTAZIONE DEL BIOGAS					
SCENARIO	SENZA INTERVENTI (A)		CON GLI INTERVENTI PROPOSTI (B)		
	BIOGAS NON CAPTATO (10 ⁶ m ³ anno ⁻¹)	BIOGAS CAPTATO (10 ⁶ m ³ anno ⁻¹)	BIOGAS NON CAPTATO (10 ⁶ m ³ anno ⁻¹)	BIOGAS CAPTATO (10 ⁶ m ³ anno ⁻¹)	
1	Situazione attuale	217	117	83	251
2	Stabilizzazione spinta	185	99	71	213
3	Situazione media realistica	202	109	78	233
4	Termovalorizzazione spinta	189	102	73	218

ipotizzabili sulla base della situazione attualmente esistente e delle tecnologie applicabili e disponibili alla scala commerciale, già illustrate precedentemente. In particolare, la formulazione degli scenari emissivi ha considerato innanzitutto le possibilità di incrementare l'efficienza media di captazione del biogas, stimata in circa il 35% (Tabella 3.5) per l'anno di riferimento 2000.

La situazione attuale evidenzia come gran parte delle torce adottate negli impianti (73% del biogas trattato) siano già in linea con la migliore tecnologia disponibile nel settore, costituita da installazioni ad alta temperatura con camera di combustione chiusa e coibentata, e con la presenza di torce a bassa temperatura o a fiamma libera limitata agli impianti più vecchi.

Nei casi in cui viene attuato il recupero energetico la soluzione utilizzata, costituita esclusivamente dall'adozione di motori a gas, non è stata ritenuta suscettibile di ulteriori miglioramenti in termini di emissioni: le tecnologie disponibili al riguardo, essenzialmente costituite dalla combinazione della combustione magra con dispositivi di conversione termica applicati ai gas di scarico, non dispongono ancora di sufficienti applicazioni per poterne valutare con certezza l'applicabilità ed i corrispondenti effetti, in termini di efficienza di controllo, nel settore degli impianti a biogas.

Tenendo presente tale situazione, gli scenari tecnologici prospettati per l'evoluzione futura delle emissioni sono stati così formulati:

- Scenario A – tecnologia attuale. Lo scenario ipotizza un'efficienza di captazione del biogas costante e pari al valor medio riscontrato (35%): l'evoluzione delle emissioni atmosferiche è in tal modo determinata esclusivamente dalle strategie di smaltimento dei rifiuti ipotizzate per ognuno dei corrispondenti scenari;
- Scenario B – applicazione di tecnologie semplici e non eccessivamente costose (BAT, Best Available Technology "realistica"). Costituito da un'insieme di interventi finalizzati innanzitutto all'incremento dell'efficienza di captazione del biogas: per le discariche nuove o di realizzazione più recente, l'obiettivo è quello di ottenere valori pari ad almeno il 75% del quantitativo complessivamente prodotto durante l'esercizio dell'impianto e dopo la chiusura dello stesso. Tecnologie semplici a tale scopo possono essere adottate anche nelle discariche già esistenti, al fine di ottimizzare la captazione del biogas durante le fasi di esaurimento della produzione. Per le installazioni di trattamento del biogas captato, lo scenario prevede una ripartizione tra combustione senza recupero e con recupero energetico costante e pari a quella osservata nell'anno di riferimento (53% in torce ad alta temperatura, 47% in motori).

Combinando i due scenari emissivi così formulati con quelli prospettati per lo smaltimento dei rifiuti si ottengono le portate complessive di biogas captato ed emesso direttamente in atmosfera: i valori stimati per l'anno 2010, corrispondente al raggiungimento delle situazioni di regime degli scenari di smaltimento, sono riassunti in Tabella 6.3.

Le emissioni dei diversi inquinanti considerati sono state ricavate combinando le portate calcolate di biogas con le concentrazioni e i fattori di emissione medi da torce e motori

Tab. 6.4 – Concentrazioni medie degli inquinanti presenti nel biogas utilizzati nella valutazione degli scenari emissivi. Valori al netto dell'aria di diluizione e riferiti alle condizioni medie del biogas aspirato ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 1,5\%$)

Inquinante	Concentrazione nel Biogas Prodotto	
CH ₄	407	g m ⁻³
CO ₂	815	g m ⁻³
H ₂ S	30	mg m ⁻³
Cl _{tot}	10	mg m ⁻³
F _{tot}	1	mg m ⁻³
COV	38	mg m ⁻³
PCDD/F	117	pg _{L-TEQ} m ⁻³

Tab. 6.5 – Fattori di emissione medi degli inquinanti dalla combustione del biogas in torce e motori utilizzati nella valutazione degli scenari emissivi. Valori riferiti al biogas in ingresso, al netto dell'aria di diluizione ed in condizioni medie di alimentazione ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 1,5\%$)

FATTORI DI EMISSIONE			
INQUINANTE		TORCE	MOTORI
SO ₂	mg m ⁻³	85	30
NO _x	mg m ⁻³	285	1.800
COV	mg m ⁻³	30	520
PTS	mg m ⁻³	20	16
HCl	mg m ⁻³	20	42
HF	mg m ⁻³	1,3	4
CO	mg m ⁻³	70	2.500
CO ₂	kg m ⁻³	1,9	1,9
IPA	ng m ⁻³	1.280	1.280
PCDD/F	pg _{L-TEQ} m ⁻³	500	500

(calcolati sulla base delle emissioni stimate per lo scenario attuale), riferiti all'unità di volume del gas alimentato in torcia e al netto dell'aria di diluizione (Tabelle 6.4 e 6.5). I risultati sono riassunti nelle Tabelle 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 per i quattro scenari di smaltimento precedentemente definiti e per le due alternative tecnologiche (A- tecnologia attuale; B- BAT realistica).

Ogni tabella riporta, rispettivamente, la quantità di inquinanti presente nel complesso del gas prodotto, le emissioni di inquinanti connesse al biogas non captato (nell'ipotesi conservativa che esso non subisca alcun processo di ossidazione biologica prima dell'emissione), le emissioni di inquinanti associate alla combustione del gas in torcia e nei motori ed il totale delle emissioni attese in atmosfera (gas non captato e prodotti di combustione del gas captato). Ai fini dell'identificazione del ruolo sugli effetti a scala globale prospettato dal settore considerato nello studio, le tabelle riportano anche le emissioni di CO₂ equivalente, calcolate considerando per il

Tab. 6.6 – Quadro riassuntivo delle emissioni (anno 2010) in atmosfera per lo scenario di smaltimento 1 (situazione attuale), secondo gli scenari tecnologici A (tecnologia attuale) e B (tecnologia realistica BAT)

INQUINANTI	BIOGAS PRODOTTO	BIOGAS NON CAPTATO		COMBUSTIONE DEL BIOGAS CAPTATO						EMISSIONE TOTALE IN ATMOSFERA	
				TORCE		MOTORI		TOTALE			
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
CH ₄ (kt)	136	88	34	–	–	–	–	–	–	88	34
CO ₂ (kt)	273	177	68	118	253	105	224	222	477	400	545
CO ₂ eq. (kt)	3.403	2.212	851	118	253	105	224	222	477	2.434	1.327
SO ₂ (t)	–	–	–	5,3	11	1,7	3,5	6,9	15	6,9	15
NO _x (t)	–	–	–	18	38	99	212	117	250	117	250
COV (t)	13	8,3	3,2	1,9	4,0	29	61	30	65	38	68
CO (t)	–	–	–	4,3	9,3	138	295	142	304	142	304
PTS (kg)	–	–	–	1.241	2.659	880	1.886	2.121	4.545	2.121	4.545
HCl (kg)	–	–	–	1.241	2.659	2.311	4.951	3.551	7.610	3.551	7.610
HF (kg)	–	–	–	81	173	220	472	301	644	301	644
H ₂ S (t)	10	6,5	2,5	–	–	–	–	–	–	6,5	2,5
Cl _{tot} (kg)	3.344	2.174	836	–	–	–	–	–	–	2.174	836
F _{tot} (kg)	334	217	84	–	–	–	–	–	–	217	84
IPA (g)	–	–	–	79	170	70	151	149	321	149	321
PCDD/F (mg _{l-TEQ})	39	25	9,8	31	66	28	59	59	125	84	135

metano un coefficiente di potenzialità relativa rispetto alla CO₂ pari a 23 (IPCC, 1996).

Per i principali inquinanti di interesse, costituiti da CH₄, CO₂ e CO₂eq., il confronto complessivo (Fig. 6.3) tra i risultati ottenuti conferma la sostanziale similitudine anche in termini di emissioni tra gli scenari di smaltimento 2 (stabilizzazione spinta) e 4 (termovalorizzazione spinta), già osservata per la produzione di gas. Rispetto allo scenario di riferimento (scenario 1, corrispondente al mantenimento della situazione attuale di smaltimento), anche senza interventi migliorativi nella captazione del gas (scenario emissivo A) gli scenari 2 e 4 comportano le maggiori riduzioni di tali inquinanti, pari a circa il 13,6%, 14,1% e 14% rispettivamente. Per lo scenario di smaltimento 3 (situazione media realistica), le stime ottenute indicano riduzioni leggermente più contenute (circa 7%, 7,5% e 7,3% rispettivamente) anche se ancora relativamente apprezzabili.

Il miglioramento della captazione del gas prospettato nello scenario emissivo B determina, per tutti gli scenari di smaltimento considerati, riduzioni molto consistenti nelle emissioni di CH₄ (circa 61%) ed incrementi più contenuti in quelle di CO₂ (36% circa) che si traducono, nel complesso, in una significativa diminuzione delle emissioni di CO₂ equivalente, pari a circa il 45% rispetto allo scenario emissivo A. Sempre per gli stessi inquinanti, anche nel caso dello scenario emissivo B, gli scenari di smaltimento 2 e 4 si confermano confrontabili tra loro.

È opportuno rilevare che le valutazioni effettuate non comprendono le emissioni di inquinanti derivanti dalle attività di smaltimento alternative o complementari considerate nella formulazione degli scenari (stabilizzazione biologica, termodistruzione) e sono, come tali, da considerarsi valide per ciò

che si riferisce alla sola produzione dalle discariche e non in termini assoluti per il complesso delle soluzioni di smaltimento considerate in ogni scenario.

Considerazioni sostanzialmente analoghe emergono dalle stime delle emissioni degli altri inquinanti tipici dell'attività. Gli scenari 2 e 4 confermano riduzioni relativamente più significative, rispetto allo scenario 1 di riferimento, di quelle attese dallo scenario 3, tanto in assenza di interventi migliorativi della captazione che in presenza di essi. Per ciò che si riferisce alle variazioni attese dall'introduzione dello scenario B l'incremento del gas avviato a combustio-

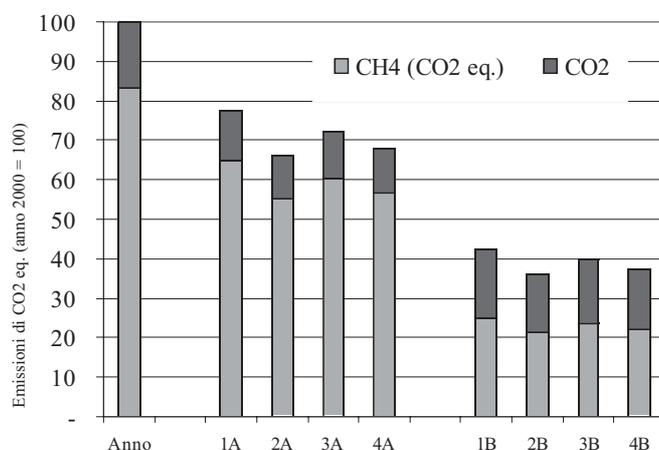


Fig. 6.3 – Emissioni di gas serra nell'anno 2010 negli scenari considerati, in relazione alle emissioni stimate per l'anno 2000

Tab. 6.7 – Quadro riassuntivo delle emissioni (anno 2010) in atmosfera per lo scenario di smaltimento 2 (stabilizzazione spinta), secondo gli scenari tecnologici A (tecnologia attuale) e B (tecnologia realistica BAT)

INQUINANTI	BIOGAS PRODOTTO	BIOGAS NON CAPTATO		COMBUSTIONE DEL BIOGAS CAPTATO						EMISSIONE TOTALE IN ATMOSFERA	
		A	B	TORCE		MOTORI		TOTALE		A	B
				A	B	A	B	A	B	A	B
CH ₄ (kt)	116	75	29	–	–	–	–	–	–	75	29
CO ₂ (kt)	232	151	58	100	215	89	191	222	405	340	463
CO ₂ eq. (kt)	2.895	1.882	724	100	215	89	191	222	405	2.071	1.129
SO ₂ (t)	–	–	–	4,5	10	1,4	3,0	6,9	13	5,9	13
NO _x (t)	–	–	–	15	32	84	180	117	213	99	213
COV (t)	11	7,0	2,7	1,6	3,4	24	52	30	56	33	59
CO (t)	–	–	–	3,7	7,9	117	251	142	259	121	259
PTS (kg)	–	–	–	1.055	2.261	749	1.604	2.121	3.866	1.804	3.866
HCl (kg)	–	–	–	1.055	2.261	1.965	4.211	3.551	6.473	3.021	6.473
HF (kg)	–	–	–	69	147	187	401	301	548	256	548
H ₂ S (t)	8,5	5,5	2,1	–	–	–	–	–	–	5,5	2,1
Cl _{tot} (kg)	2.845	1.849	711	–	–	–	–	–	–	1.849	711
F _{tot} (kg)	284	185	71	–	–	–	–	–	–	185	71
IPA (g)	–	–	–	68	145	60	128	149	273	128	273
PCDD/F (mg _{L-TEQ})	33	22	8,3	26	57	23	50	59	107	71	115

ne determina, com'era del tutto logico attendersi, aumenti talvolta significativi delle emissioni di tutti gli inquinanti ed i microinquinanti tipici della combustione stessa, con valori che nel complesso prospettano tuttavia contributi di scarso significato rispetto alle emissioni totali su scala regionale.

Per quanto riguarda lo scenario emissivo B va infine evidenziato come i risultati ottenuti siano da attribuirsi, oltre che agli interventi prospettati per il trattamento del gas complessivamente captato, anche all'effetto dell'ossidazione biologica attraverso lo strato di copertura superficiale, al cui ruolo può imputarsi una degradazione di circa il 10% del gas prodotto. Mentre per quanto riguarda l'ossidazione del metano l'effetto della biodegradazione è del tutto analogo a quello della combustione, per altri elementi (in particolare zolfo, cloro, fluoro) le trasformazioni biologiche risultano viceversa in prodotti finali diversi, in parte fissati al supporto solido e quindi smaltiti con esso e di cui non si è tenuto conto nella valutazione delle corrispondenti emissioni che, pertanto, risultano leggermente sovrastimate. Una sovrastima di analoga entità è inoltre presente nel caso delle polveri: normalmente prodotte dalla combustione, si può infatti ritenere che nel caso dell'ossidazione biologica la loro emissione sia nulla.

Il ruolo delle emissioni di gas serra prospettate dagli scenari formulati nello studio nel contesto complessivo regionale è ricavabile dai dati dell'inventario emissioni della Regione Lombardia (Regione Lombardia, 2002). Confrontando le emissioni per gli scenari considerati attese al 2010 con quelle della totalità del settore rifiuti (discarica + incenerimento) del 2000, si può osservare come le

emissioni di CO₂ equivalente siano, per tutti gli scenari, sempre in diminuzione, soprattutto nelle situazioni che prevedono interventi migliorativi della captazione: le riduzioni stimate in tali casi si attestano nell'intervallo compreso tra il 44% (scenario con termovalorizzazione spinta) ed il 55% (scenario con stabilizzazione spinta), con valori interessanti e pari al 49% anche per la situazione ipotizzata come quella più realistica (scenario 3). Pur tenendo presente che il bilancio non comprende le emissioni associate ai trattamenti di stabilizzazione previsti negli scenari formulati, le riduzioni stimate per gli scenari "B" (con interventi tecnologici), pari mediamente a 1900 t CO₂eq, appaiono comunque di una certa consistenza nel quadro complessivo regionale, corrispondendo a poco più del 2% di quelle complessive di gas serra del 1997 in Lombardia (circa 82000 kt CO₂eq). Si tratta quindi di un contributo non trascurabile, in particolare se considerato nell'ambito degli interventi di riduzione previsti per l'Italia dal protocollo di Kyoto, che impongono al 2010 una riduzione a livello nazionale delle emissioni di CO₂ equivalente del 6,5% rispetto ai livelli del 1990.

7 CONCLUSIONI

Per quanto riguarda la situazione emissiva attuale, le conclusioni generali dello studio hanno evidenziato, in sintesi, i seguenti aspetti.

- Il biogas complessivamente prodotto dalle discariche lombarde su base annua nel 2000 è pari a circa 427 milioni di m³, di cui circa 152 milioni di m³ vengono captati, con

Tab. 6.8 – Quadro riassuntivo delle emissioni (anno 2010) in atmosfera per lo scenario di smaltimento 3 (situazione media realistica), secondo gli scenari tecnologici A (tecnologia attuale) e B (tecnologia realistica BAT)

INQUINANTI	BIOGAS PRODOTTO	BIOGAS NON CAPTATO		COMBUSTIONE DEL BIOGAS CAPTATO						EMISSIONE TOTALE IN ATMOSFERA	
		A	B	TORCE		MOTORI		TOTALE		A	B
CH ₄ (kt)	126	82	32	–	–	–	–	–	–	82	32
CO ₂ (kt)	253	164	63	109	234	97	208	206	442	370	505
CO ₂ eq. (kt)	3.155	2.051	789	109	234	97	208	206	442	2.257	1.231
SO ₂ (t)	–	–	–	4,9	10	1,5	3,3	6,4	14	6,4	14
NO _x (t)	–	–	–	16	35	92	197	108	232	108	232
COV (t)	12	7,7	2,9	1,7	3,7	27	57	28	61	36	64
CO (t)	–	–	–	4,0	8,6	128	273	132	282	132	282
PTS (kg)	–	–	–	1.150	2.465	816	1.749	1.967	4.214	1.967	4.214
HCl (kg)	–	–	–	1.150	2.465	2.142	4.591	3.293	7.056	3.293	7.056
HF (kg)	–	–	–	75	160	204	437	279	597	279	597
H ₂ S (t)	9,3	6,0	2,3	–	–	–	–	–	–	6,0	2,3
Cl _{tot} (kg)	3.101	2.016	775	–	–	–	–	–	–	2.016	775
F _{tot} (kg)	310	202	78	–	–	–	–	–	–	202	78
IPA (g)	–	–	–	74	158	65	140	139	298	139	298
PCDD/F (mg _{L-TEQ})	36	24	9	29	62	25	55	54	117	78	126

un'efficienza media di captazione che si attesta su valori relativamente modesti, pari al 35%.

- Il biogas captato viene smaltito per il 53% in dispositivi senza recupero energetico e per il 47% in installazioni con recupero energetico. Quest'ultime sono costituite da motori a combustione interna per la produzione di elettricità mentre, in assenza di recupero, le torce ad alta temperatura con camera di combustione refrattariata costituiscono il dispositivo largamente più diffuso, in cui viene smaltito il 73% del volume di biogas complessivamente ossidato nelle torce.
- Le caratteristiche del biogas prodotto e le basse efficienze di captazione che caratterizzano la situazione lombarda determinano, quali emissioni di maggior consistenza, quelle di CH₄ e CO₂, stimate rispettivamente in circa 113.000 t anno⁻¹ e 516.000 t anno⁻¹.
- Tenendo conto di un valore del potenziale di riscaldamento globale del CH₄ rispetto alla CO₂ pari a 23, le emissioni complessive in termini di CO₂ equivalente, pari ad un quantitativo di circa 3.117.000 t anno⁻¹, rappresentano circa il 5% di tali emissioni nel contesto complessivo regionale.
- Per gli altri inquinanti considerati le emissioni appaiono di modesta entità, tanto in termini assoluti che se confrontate con quelle derivanti globalmente da tutte le attività considerate.

I risultati ottenuti con riferimento al medio periodo (anno 2010) consentono di trarre le seguenti considerazioni conclusive.

- Le produzioni attese di biogas su base annua appaiono in diminuzione rispetto ai quantitativi attuali, con le riduzio-

ni più rilevanti per gli scenari 2 e 4 (circa il 32% in meno) ma con margini relativamente consistenti anche per lo scenario 3, ritenuto più realistico (27% di riduzione).

- In modo analogo, le emissioni di CH₄, CO₂ e CO₂ equivalente presentano evoluzioni simili per gli scenari 2 e 4, con riduzioni, in assenza di interventi migliorativi della captazione, del 14% circa rispetto allo scenario 1 (Tabella 6.10). Per lo scenario 3 le analoghe diminuzioni appaiono più ridotte (7% circa). Gli interventi di miglioramento nella captazione del gas determinano per tutti gli scenari riduzioni molto consistenti nelle emissioni di CH₄ (circa 61%) ed incrementi più contenuti in quelle di CO₂ (36% circa) che si traducono, nel complesso, in una significativa diminuzione delle emissioni di CO₂ equivalente, pari al 45%. Anche in quest'ultimo caso gli scenari 2 e 4 confermano le maggiori riduzioni rispetto allo scenario 1. È tuttavia opportuno ricordare che le considerazioni di cui sopra non valutano le emissioni derivanti dagli eventuali pretrattamenti di stabilizzazione previsti negli scenari formulati, che potrebbero modificare l'entità delle variazioni descritte.
- Nelle situazioni che prevedono interventi migliorativi della captazione, le emissioni di gas serra per gli scenari considerati attese al 2010 presentano riduzioni particolarmente interessanti rispetto a quelle della totalità del settore rifiuti (discarica + incenerimento) stimate per il 2000. Tali riduzioni si attestano tra il 44% (scenario 4) ed il 55% (scenario 2), con valori particolarmente interessanti (49%) per lo scenario 3 ritenuto più realistico. Pur tenendo presente che il bilancio non comprende le emissioni derivanti dagli eventuali pretrattamenti di stabilizzazione

Tab. 6.9 – Quadro riassuntivo delle emissioni (anno 2010) in atmosfera per lo scenario di smaltimento 4 (termovalorizzazione spinta), secondo gli scenari tecnologici A (tecnologia attuale) e B (tecnologia realistica BAT)

INQUINANTI	BIOGAS PRODOTTO	BIOGAS NON CAPTATO		COMBUSTIONE DEL BIOGAS CAPTATO						EMISSIONE TOTALE IN ATMOSFERA	
				TORCE		MOTORI		TOTALE			
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
CH ₄ (kt)	118	77	30	–	–	–	–	–	–	77	30
CO ₂ (kt)	237	154	59	102	220	91	195	193	414	347	474
CO ₂ eq. (kt)	2.958	1.923	740	102	220	91	195	193	414	2.116	1.154
SO ₂ (t)	–	–	–	4,6	10	1,4	3,1	6,0	13	6,0	13
NO _x (t)	–	–	–	15	33	86	184	101	217	101	217
COV (t)	11	7,2	2,8	1,6	3,5	25	53	26	57	33	60
CO (t)	–	–	–	3,8	8,1	120	256	123	264	123	264
PTS (kg)	–	–	–	1.079	2.311	765	1.640	1.844	3.951	1.844	3.951
HCl (kg)	–	–	–	1.079	2.311	2.009	4.304	3.087	6.616	3.087	6.616
HF (kg)	–	–	–	70	150	191	410	261	560	261	560
H ₂ S (t)	8,7	5,7	2,2	–	–	–	–	–	–	5,7	2,2
Cl _{tot} (kg)	2.907	1.890	727	–	–	–	–	–	–	1.890	727
F _{tot} (kg)	291	189	73	–	–	–	–	–	–	189	73
IPA (g)	–	–	–	69	148	61	131	130	279	130	279
PCDD/F (mg _{I-TEQ})	34	22	8,5	27	58	24	51	51	109	73	117

Tab. 6.10 – Confronto riassuntivo delle emissioni in atmosfera tra l'anno 2000 e 2010 secondo gli scenari tecnologici A (tecnologia attuale) e B (tecnologia realistica BAT) per ogni scenario di smaltimento (1 - situazione attuale; 2 - stabilizzazione spinta; 3 - medio realistico; 4 - termovalorizzazione spinta)

	2000	2010							
		Scenario tecnologico A				Scenario tecnologico B			
		Scenari di smaltimento				Scenari di smaltimento			
		1	2	3	4	1	2	3	4
CO (t)	156	142	121	132	123	304	259	282	264
NO _x (t)	139	117	99	108	101	250	213	232	217
COV (t)	42	38	33	36	33	68	59	64	60
SO ₂ (t)	7	6,9	5,9	6,4	6	15	13	14	13
PTS (kg)	5.250	2.121	1.804	1.967	1.844	4.545	3.866	4.214	3.951
HCl (kg)	3.900	3.551	3.021	3.293	3.087	7.610	6.473	7.056	6.616
HF (kg)	352	301	256	279	261	644	548	597	560
IPA (g)	190	149	128	139	130	321	273	298	279
PCDD/F (mg _{I-TEQ})	106	84	71	78	73	135	115	126	117

previsti negli scenari formulati, le riduzioni stimate appaiono comunque di una certa consistenza nel quadro complessivo regionale, corrispondendo a circa il 2% di quelle globali di gas serra valutate nell'ultimo censimento disponibile (1997).

- Tutti gli scenari di smaltimento determinano, per gli altri inquinanti esaminati, emissioni complessive molto contenute e di scarso significato nel contesto regionale. Le variazioni attese dall'introduzione degli interventi migliorativi della captazione determinano, com'era del tutto logico, aumenti relativamente significativi degli

inquinanti tipici della combustione che, tuttavia, non ne modificano il ruolo molto modesto nel complesso emissivo regionale.

BIBLIOGRAFIA

ARPA (2002) Osservatorio sulla produzione, il recupero e lo smaltimento rifiuti: Relazione sulla produzione e sullo smaltimento dei rifiuti solidi urbani ed assimilabili e sul-

l'andamento delle raccolte differenziate in Regione Lombardia nel 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000. Regione Lombardia. Servizio Rifiuti e Residui Recuperabili dell'ARPA Lombardia.

APAT (2003) *Tablette dei gas serra comunicate ufficialmente alla Convenzione sui cambiamenti climatici (UNFCCC), relative agli anni 1990-2000* <http://www.sinanet.anpa.it/aree/atmosfera/emissioni/emissioni.asp>.

Andreottola G., Cossu R. (1988): *Modello matematico di produzione di biogas in uno scarico controllato.* RS – Rifiuti Solidi, Vol. 2, No. 6, pag. 473÷482.

Bruzzi R., Negri M. (2001-2002): *“Emissioni di biogas dalle discariche di rifiuti in Lombardia: stato attuale e scenari tecnologici di riduzione”.* Tesi di laurea, DIIAR, Politecnico di Milano.

Caponi F. (1998): *Dioxin and furan emissions from landfill gas-fire combustion units.* Ed. Wheelless & David Freudiani.

Damiani L., Gandolla M. (1992): *Gestione del biogas da discariche controllate.* Istituto per l'Ambiente, Collana monografie, IS 120-9577.

Decka I. (1995): *Dynamique du tassement dans une décharge de déchets solides urbains.* Recherche présentée pour l'obtention du Master Européen en ingénierie et management de l'environnement. Ecole Polytechnique Federale De Lausanne.

DIIAR (2000): *I riferimenti per la miglior tecnologia disponibile nell'incenerimento dei rifiuti solidi urbani.* Rapporto interno, Politecnico di Milano.

DIIAR (2001): *Caratterizzazione delle presenze di inquinanti organici in traccia nelle emissioni atmosferiche della discarica di rifiuti in località Ischia Frizzi (BZ).* Rapporto interno, Politecnico di Milano.

Eduljee G. (1996): *PCDD/PCDF releases from various waste management strategies.* Warmwer Bulletin, Vol. 177, pag. 303÷321.

EPA (1998): *The inventory of sources of dioxin in the United States* (stato di avanzamento).

Gandolla M., Acaia C., Decka I. (1996): *Prediction of settlement at MSW disposal sites.* Proceedings of ISWA 96 Congress, Yokohama, Japan.

IPCC (1996): 1996 Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPPC (2001): *Integrated Pollution Prevention and Control. Draft reference document on best available control technologies in common wastewater and waste gas treatment/management systems in the chemical sector.* European IPCC Bureau, Institute for Prospective Technological Studies, Siviglia (Spagna).

Lahl U. (1991): *PCDD/PCDF of different municipal waste management methods.* Chemosphere, Vol. 23, No. 8÷10, pag. 1481÷1489.

Patricola L., Riganti V. (2003): *Emissioni si gas serra e gestione dei rifiuti solidi urbani. Studio con metodologia LCA.* Rivista Ambiente 2/2003, pag. 151÷160.

Regione Lombardia (2001): *Database Inemar: algoritmo di calcolo del modulo discariche in Regione Lombardia.*

Regione Lombardia (2002): *Inemar, inventario emissioni in atmosfera per il 1997.*

Tsiliyannis C. (1999): *Report: Comparison of environmental impacts from solid waste treatment and disposal facilities.* Waste Management & Research, Vol. 17, pag. 231÷241.

UNEP Chemicals (2001): *Dioxin and furan toolkit.*

CURRICULA

Cinzia Acaia – Nel 1988 ha conseguito la laurea in Ingegneria Civile per la Difesa del Suolo e la Pianificazione Territoriale presso il Politecnico di Milano, con indirizzo ambientale. Nel 1993 ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Sanitaria presso il Politecnico di Milano. Dal 1992 al 2002 ha lavorato presso ECONS SA di Bioggio, Svizzera, una società di ingegneria che opera nel campo dell'ingegneria ambientale, offrendo consulenza e progettazione di impianti, con la funzione di Vicedirettore. Dal 1994 al 1999 è stata assistente del Prof. Gandolla per il corso sulle discariche controllate nell'ambito del “Master Europeo di Ingegneria Ambientale”, presso il Politecnico di Losanna. Dal 1996 al 2000 è stata membro del “International Solid Wastes Association Working Group on Sanitary Landfill”. Dal 1999 è professore a contratto di “Sistemi integrati per il trattamento di reflui civili e di rifiuti solidi urbani”, presso l'Università degli Studi di Milano Bicocca, nell'ambito del corso di laurea in Scienze Ambientali. Dal 2002 è docente e membro del Comitato di Coordinamento del “Master Universitario in Gestione sostenibile dell'ambiente a scala locale”, presso l'Università degli Studi di Milano Bicocca. Dal 2003 è consulente e progettista nel campo dell'ingegneria ambientale, come libera professionista.

Raffaella Bruzzi – Laureata in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio nel 2002 presso il Politecnico di Milano, con una tesi dal titolo “Emissioni di biogas da discariche di rifiuti in Lombardia: stato attuale e scenari tecnologici di riduzione”, relatore Prof. Stefano Cernuschi. Nel 1999-2000 ha partecipato al programma di scambio Erasmus presso l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne presso i dipartimenti di Genie Civile e Genie Rural. Tra il 2001 e 2002 ha trascorso presso il Politecnico di Losanna un periodo di studio in cui ha approfondito, affiancata dal Prof. M. Gandolla gli argomenti oggetto della sua tesi di laurea: studio di un modello di previsione di emissioni di biogas da discariche e sua taratura con dati di emissione empirici della discarica Teuftal di Berna. Tra gennaio e aprile 2003 ha partecipato a un corso di specializzazione in Gestione aziendale e Sistemi Informativi presso la società di consulenza Altea S.r.l. Tra giugno e ottobre 2003 è stata impegnata in uno stage presso Foster Wheeler Environmental, nel campo della bonifica e messa in sicurezza di siti contaminati. Dopo una breve esperienza presso la società Enelpower S.p.a. come buyer nelle gare d'appalto, attualmente si trova impiegata in un dottorato di ricerca presso l'Institut universitaire romand de Santé au Travail, in collaborazione con il Politecnico di Losanna.

Stefano Caserini – Laureatosi in Ingegneria Civile per la Difesa del Suolo e la Pianificazione Territoriale, ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Sanitaria presso la sezione ambientale del D.I.I.A.R del Politecnico di Milano occupandosi delle metodologie per la valutazione dei rischi per la salute umana connessi con le atti-

vità di combustione dei rifiuti e delle stime delle deposizioni atmosferiche di microinquinanti. Ha successivamente proseguito l'attività di ricerca scientifica occupandosi della stima delle emissioni da attività di combustione, dell'impatto della termodistruzione dei rifiuti e di indagini sull'evoluzione della composizione dei rifiuti solidi urbani, svolgendo attività di docenza nei seminari di aggiornamento in Ingegneria Sanitaria-Ambientale del Politecnico di Milano e nei corsi di formazione professionale della Regione Lombardia e del Fondo Sociale Europeo. Abilitato all'esercizio della professione di ingegnere dal 1992, svolge attività di consulenza in materia di inquinamento atmosferico e di gestione dei rifiuti. Su incarico della Fondazione Lombardia per l'Ambiente e successivamente dell'ARPA Lombardia è dal 1998 coordinatore dei lavori dell'"Inventario delle Emissioni in Atmosfera" della Regione Lombardia. Correlatore di diverse tesi di laurea svolte presso il DIAR del Politecnico di Milano, e autore di più di 40 pubblicazioni nel settore dell'ingegneria sanitaria ambientale. È titolare dall'A.A. 1999-00 del corso di Ingegneria Sanitaria Ambientale per il corso di Laurea in Edilizia presso la Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano – sede di Lecco, e dall'A.A. 2001-2002 del corso di Reti di Monitoraggio Ambientale per il corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio presso il Politecnico di Milano, sede di Cremona.

Stefano Cernuschi – Professore associato di "Ingegneria Sanitaria-Ambientale" della I Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano, è laureato in Ingegneria Chimica presso la stessa Facoltà e Dottore di Ricerca in Ingegneria Sanitaria. Ha svolto la sua attività scientifica presso la Sezione Ambientale del Dip. di Ing. Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del medesimo Politecnico, sviluppando ricerche su tematiche inerenti la caratterizzazione, le metodologie di valutazione ed i trattamenti delle emissioni atmosferiche, l'analisi e la descrizione della qualità dell'aria e le implicazioni ambientali delle tecnologie di smaltimento di rifiuti solidi. Su tali argomenti è autore di oltre 100 pubblicazioni nazionali ed internazionali.

Mauro Gandolla – Ingegnere meccanico, diplomato alla Scuola Politecnica Federale di Zurigo. Dal 1972 è attivo nel campo dello

smaltimento dei rifiuti, e in particolare dal 1976 al 1992 è stato direttore del CER/ESR (Ente Smaltimento Rifiuti del Luganese). Dal 1982 al 1992 è stato membro della Commissione Federale Svizzera dei Rifiuti. Dal 1987 al 1990 è stato professore a contratto presso il Politecnico di Milano. Dal 1989 al 1996 è stato membro della Commissione Svizzera per l'UNESCO e dal 1990 al 1997 membro dell'ISWA Professional Meetings Committee. Dal 1993 è incaricato di un corso sulle discariche controllate nell'ambito del "Master Europeo di Ingegneria Ambientale", presso il Politecnico di Losanna. Dal 1994 collabora con il Prof. Aragno, presso l'Università di Neuchâtel, nell'ambito della formazione post-laurea. Ha collaborato e collabora con diversi istituti svizzeri ed esteri nel campo del trattamento dei rifiuti e della ricerca applicata. Attualmente ricopre la funzione di Direttore presso la ECONS SA di Bioggio, Svizzera (società operante nel campo dell'ingegneria ambientale con consulenze e progettazioni di impianti a livello internazionale) ed è docente per lo smaltimento dei rifiuti solidi ed il risanamento dei siti contaminati, presso il Politecnico Federale di Losanna (EPFL).

Massimo Negri – Laureato nel 2002 a pieni voti in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio presso il Politecnico di Milano, con una tesi dal titolo "Emissioni di biogas dalle discariche in Lombardia: stato attuale e scenari tecnologici di riduzione", relatore Prof. S. Cernuschi. Nel 2002 ha conseguito l'abilitazione all'esercizio della professione presso il Politecnico di Milano. Da Ottobre 2002 è dipendente della ditta INALCA S.p.A. di Ospedaletto Lodigiano (Gruppo Cremonini), operante nel settore della macellazione e lavorazione delle carni bovine, certificata ISO 9000 VISION e ISO 14000. All'interno dell'azienda riveste il ruolo di addetto ambiente e sicurezza, occupandosi dei servizi ambientali e del servizio di prevenzione e protezione, curando la gestione dell'impianto di depurazione e dell'intero ciclo delle acque di processo, nonché delle problematiche inerenti l'impianto di termodistruzione aziendale. Nel 2002 ha seguito il corso per "Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza" (ECAP SCArL Emilia Romagna - 32 ore). Nel 2003 ha partecipato ai corsi "Redigere le procedure per il manuale della sicurezza" (Cegos - 16 ore) e "L'utilizzo in azienda di un Sistema di Gestione Ambientale" (Certiquality & FSE - 40 ore).