

# **POLITECNICO DI TORINO**



**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il  
Territorio**

**Tesi di Laurea Magistrale**

**FLUSSI DI GAS CLIMA ALTERANTI EMESSI DA  
DISCARICA DI RIFIUTI SOLIDI URBANI**

**Relatore:**

**Candidato:**

**Rajandrea Sethi**

**Luigi Delle Vergini s233316**

**Marzo 2019**

## INDICE

INTRODUZIONE .....	1
1 FORMAZIONE DI BIOGAS NELLE DISCARICHE DI RIFIUTI SOLIDI URBANI ....	3
1.1 Fase aerobica .....	4
1.2 Fase anaerobica.....	4
1.2.1 Idrolisi e acidificazione .....	5
1.2.2 Acetogenesi.....	6
1.2.3 Metanogenesi .....	7
1.3 Osservazioni sul fenomeno produttivo .....	7
1.4 Fattori che influenzano il fenomeno produttivo .....	8
1.5 Le caratteristiche del biogas .....	9
1.5.1 Infiammabilità.....	10
1.5.2 Densità .....	13
1.5.3 Temperatura .....	13
1.5.4 Pressione .....	13
1.5.5 Umidità .....	13
1.5.6 Solubilità.....	14
1.5.7 Odore .....	14
1.5.8 Potere calorifico .....	14
1.6 Le problematiche derivanti dal biogas .....	14
1.6.1 Rischio incendi.....	14
1.6.2 Rischio asfissia.....	15
1.6.3 Inquinamento odorigeno .....	16
1.6.4 Rischio di intossicazione .....	16
1.6.5 Emissione in atmosfera di GHG .....	17
1.6.6 Riepilogo.....	17
2 IMPIANTO PER LA GESTIONE DEL BIOGAS PRODOTTO IN DISCARICA .....	18
2.1 Captazione del biogas .....	18
2.2 Rete di estrazione forzata .....	24
2.3 Impianti di combustione.....	25
3 L'IMPOVERIMENTO DEL BIOGAS DA DISCARICA .....	26
3.1 Previsioni produttive di biogas in discarica .....	26
3.2 Risoluzione gestionale della discarica “basse di stura” .....	29
4 MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI DIFFUSE .....	35
4.1 Inquadramento normativo .....	35

4.2	Monitoraggio delle emissioni di vapori .....	36
4.3	Parametri che influenzano le emissioni .....	38
4.4	Monitoraggio delle emissioni laterali di biogas .....	39
4.5	Monitoraggio delle emissioni superficiali di biogas .....	40
4.5.1	Monitoraggio indiretto con termografia aerea .....	42
4.5.2	Monitoraggio diretto con camera di flusso .....	42
5	CASO STUDIO .....	46
5.1	<i>Desk study</i> .....	46
5.1.1	AREA 1 .....	47
5.1.2	AREA 2 .....	49
5.2	<i>Walkover survey</i> .....	50
5.2.1	<i>Walkover survey</i> AREA 1.....	52
5.2.2	<i>Walkover survey</i> AREA 2.....	53
5.3	<i>Flux box survey</i> .....	55
5.3.1	<i>Flux box survey</i> AREA 1 .....	56
5.3.2	<i>Flux box survey</i> AREA 2.....	59
5.4	Analisi risultati .....	62
	CONCLUSIONI.....	66
	Bibliografia .....	68



# INTRODUZIONE

Il protocollo di Kyoto, firmato nel 1997 ed entrato in vigore nel 2005, rappresenta il primo importante momento di consapevolezza da parte delle maggiori potenze economiche mondiali in merito al fenomeno dei cambiamenti climatici.

Tra le principali azioni intraprese per fronteggiare il problema vi è il monitoraggio delle emissioni di gas serra. La stima diretta dei flussi in atmosfera di attività antropiche diventa negli ultimi vent'anni un onere di fondamentale importanza per il gestore delle stesse.

Uno dei maggiori gas serra emessi dall'uomo risulta essere il metano, che rappresenta il 10% dei gas serra presenti in atmosfera. Il metano è ampiamente presente nelle discariche di rifiuti solidi urbani, sottoforma di biogas.

La presenza di questo gas in discarica è da attribuire alla stabilizzazione dei rifiuti ivi stoccati, la quale è caratterizzata da fenomeni di fermentazione, cioè dall'insieme di reazioni esotermiche atte a biodegradare aerobicamente ed anaerobicamente il rifiuto.

La miscela di gas prodotta causa una leggera sovrappressione all'interno della discarica stessa, tendendo a fuoriuscire dalla copertura (*capping*) sommitale, con relativi sversamenti in atmosfera non controllati.

Il biogas prodotto in discarica, come il percolato, viene gestito come rifiuto con tutti gli oneri che questo comporta al gestore della discarica stessa.

È compito degli enti competenti (ARPA) controllare la regolare gestione del biogas e far sì che quest'ultimo non sia sversato in ambiente, terreni limitrofi o atmosfera.

Dall'esigenza di monitorare le emissioni in atmosfera di biogas, da parte del gestore della discarica, trova la sua finalità il presente lavoro: studio delle emissioni diffuse e puntuali di due porzioni di due lotti della discarica di *Basse di Stura* situata a Torino gestita dall'Azienda Multiservizi Igiene Ambientale Torino S.p.A..

Il lavoro di tesi ha, dunque, seguito la seguente logica di trattazione dell'argomento.

Una prima parte di introduzione al fenomeno produttivo del biogas in discarica, in cui sono presentate le varie reazioni e i vari fattori che influenzano la fermentazione. Collegate alla produzione vi sono le caratteristiche chimico/fisiche del biogas e le pericolosità che esse comportano alla salute umana.

Dai rischi che il biogas comporta, uno fra tutti quello esplosivo, ne deriva la necessità (nonché obbligo del gestore della discarica) di intraprendere una gestione del biogas prodotto, come presentato nel capitolo 2.

I possibili utilizzi del gas prodotto cambiano in base al variare delle sue caratteristiche, una su tutte l'inflammabilità: al di sotto di certi range di metano il biogas non forma più una reazione di combustione. Questo costringe a vagliare e poi ad adottare soluzioni alternative di gestione, il quale obiettivo comune deve comunque essere la minimizzazione di biogas sversato in atmosfera.

La discarica oggetto di studio ha intrapreso una soluzione alternativa per lo smaltimento del gas prodotto ed attraverso questo studio vuole verificare che la scelta gestionale applicata non stia avendo ripercussioni sulle emissioni atmosferiche del corpo discarica.

Luigi Delle Vergini – Flussi di gas clima alteranti emessi da discarica di rifiuti solidi urbani.

Nell'ultima parte del lavoro di tesi, si è dunque inquadrato il problema al livello normativo, al livello dei principi chimico/fisici che lo regolano, facendo riferimento alle scelte tecniche prese per affrontare lo studio.

La misura dei flussi è stata eseguita attraverso l'utilizzo di camere di flusso, con modalità operative fedeli alle linee guida inglesi pubblicate nel 2010.

La metodologia di monitoraggio si articola in quattro diversi punti.

Una prima analisi preliminare delle caratteristiche costruttive della discarica e della modalità operative della rete di captazione di biogas, per rilevare eventuali criticità su particolari comportamenti in campo.

Una “*walkover survey*”, con il fine di valutare qualitativamente le emissioni a piano campagna. Una campagna di misura dei flussi di metano tramite l'utilizzo di camera di flusso progettata in base alle considerazioni tratte dal punto precedente, seguita dall'elaborazione dei risultati finali con relativa analisi dedicata.

Si sono presentati, infine, i risultati dell'unica campagna di monitoraggio effettuata finora con i relativi confronti di studi simili trovati in letteratura.

# 1 FORMAZIONE DI BIOGAS NELLE DISCARICHE DI RIFIUTI SOLIDI URBANI

Lo stoccaggio di un rifiuto nella discarica segue un periodo di durata variabile di decomposizione dello stesso.

Nel seguente capitolo, in primo luogo si affrontano le tematiche di produzione di biogas in discarica; successivamente si trattano le varie caratteristiche chimico/fisiche del gas in questione, correlate alla pericolosità alla salute umana che esse comportano.

Vi sono varie tipologie di processi che agiscono contemporaneamente sul rifiuto e concorrono per la sua degradazione della componente organica:

- Degradazione fisica, con cui si vuole intendere la compattazione volumetrica e la precipitazione di sostanze, e comporta gli abbassamenti di livello della parte sommitale di una discarica nel tempo.
- Degradazione chimica, le reazioni che avvengono nel corpo discarica innescate dalla temperatura, pH, potenziale redox che si innescano nell'ambiente e che esse stesse vanno ad influenzare.
- Degradazione biologica, che consta di tutte le reazioni che avvengono per opera di batteri ivi presenti.

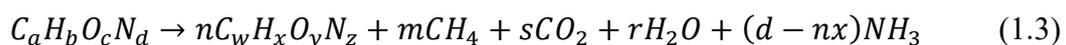
Prodotti della seguente tipologia di decomposizione sono percolato e biogas, che in quanto tali vanno monitorati e gestiti come rifiuto.

La digestione del rifiuto per via biologica interessa varie famiglie microbiche: batteri idrolitici, acidificanti e metanigeni protagonisti della produzione di metano e diossido di carbonio. La formazione di metano avviene solo nell'ultima fase della reazione che porta alla produzione di biogas, inoltre la presenza di metano, data la sua poca solubilità in acqua, è interamente concentrata in fase gassosa.

Una reazione esemplificativa di digestione anaerobica è quella del glucosio, che viene in una prima fase convertito in acido acetico per poi essere fermentato in metano e biossido di carbonio:



Qualora si considerino dei substrati più complessi aumentano i prodotti derivanti il processo di degradazione anaerobica, tra cui è presente l'ammoniaca derivante dalla digestione delle proteine:



Con:  $s = a - nw - m$

$r = c - ny - 2s$

L'attività biologica che interessa la digestione lavora a temperature molto differenti:

- psicrofili (temperature minori dei 20°C);
- mesofili (temperature comprese tra i 20°C ed i 40°C);

- termofili (temperature superiori ai 45°C).

## 1.1 Fase aerobica

La degradazione aerobica avviene immediatamente dopo il conferimento del rifiuto in discarica; la sostanza, completamente a contatto con l'aria, viene digerita dai batteri a seguito dell'utilizzo dell'ossigeno libero presente tra i rifiuti e dell'ossigeno disciolto nell'acqua meteorica infiltratasi prima della copertura del *capping*.

La presenza di aria all'interno del rifiuto non è una condizione riscontrabile solo prima della chiusura del *capping*, l'aria può penetrare anche dopo la chiusura, ad esempio dopo un periodo di eccessivo prelievo di biogas da parte del sistema di captazione.

Il processo analizzato è fortemente esotermico (il calore prodotto durante questa fase può portare il corpo discarica a temperature di 70 °C).

I principali prodotti derivati sono anidride carbonica, acqua e sostanze organiche parzialmente digerite.

## 1.2 Fase anaerobica

La seconda fase di digestione avviene mediante una catena trofica anaerobica.

Questa seconda fase, molto più lenta e lunga della prima degradazione analizzata, può essere divisa a sua volta in due decomposizioni distinte ed è svolta da almeno tre gruppi distinti di microrganismi, che si differenziano sia per i substrati che per i prodotti digeriti.

Il processo di digestione della materia organica è articolato dalle seguenti fasi:

- In un primo momento vi è l'idrolisi di substrati complessi seguita da acidificazione con connessa produzione di acidi grassi volatili, chetoni ed alcoli;
- Una successiva fase acetogenica, dove, partendo dagli acidi grassi, si produce acido acetico, acido formico, biossido di carbonio ed idrogeno molecolare;
- Un'ultima fase in cui, partendo dai prodotti della fase acetogenica, si osserva la metanizzazione, cioè la produzione di metano a partire dall'acido acetico oppure prodotto dalla riduzione dell'anidride carbonica utilizzando l'idrogeno come co-substrato. Una minima parte di metano si forma a partire dall'acido formico.

Nelle figure che seguono si schematizzano i processi della digestione; la **Figura 1.1** mostra i vari prodotti intermedi del processo con le generiche percentuali di reazione intermedie, sulle varie fasi e i macroprodotti di ognuna di esse; mentre la **Figura 1.2** è un diagramma delle diverse reazioni che avvengono nella digestione con i connessi prodotti intermedi.

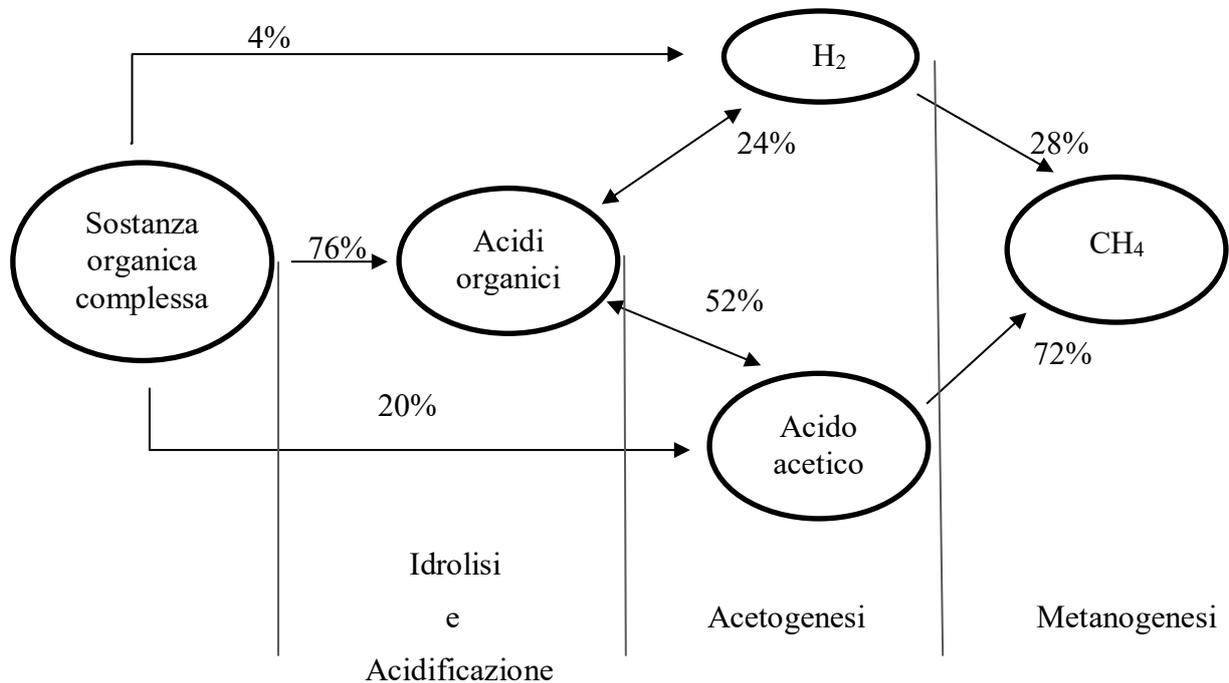


Figura 1.1 Schema di flusso con le incidenze delle varie reazioni di digestione (Metcalf e Eddy, 1991)

### 1.2.1 Idrolisi e acidificazione

In un primo momento l'intervento di diversi gruppi batterici, digerisce substrati organici complessi, solubili o particolati, quali proteine, carboidrati e grassi, formando composti semplici, quali aminoacidi, monosaccaridi e acidi grassi in forma solubile (**Figura 1.2**).

I microrganismi idrolizzanti colonizzano il materiale particolato e lo degradano (Vavilin et al., 1996), oppure producono enzimi extracellulari capaci di scindere le molecole organiche complesse (Sanders et al., 1999) in monomeri ed oligomeri, trasportate all'interno delle cellule di microrganismi acidogenici subiscono una fermentazione.

Questi microrganismi generalmente ossidano substrati organici semplici a piruvato che produce a sua volta acidi grassi volatili, chetoni e alcoli punto di partenza per la successiva fase acetogenica.

Il processo idrolitico può subire inibizioni dovute all'accumulo di zuccheri ed aminoacidi (Sanders et al., 1999) in quanto questi interferiscono con la produzione e l'attività degli enzimi idrolitici.

L'idrolisi del materiale organico complesso, particolato o solubile, avviene contemporaneamente con il processo fermentativo acidogenico, in cui batteri fermentativi degradano oligomeri e monomeri organici in zuccheri, aminoacidi ed acidi grassi producendo acidi grassi volatili, principalmente a catena corta, quali il propionato ed il butirato.

La fermentazione degli aminoacidi produce a sua volta ammonio. Il processo idrolitico non comporta obbligatoriamente la crescita di microrganismi (Sanders et al., 1999).

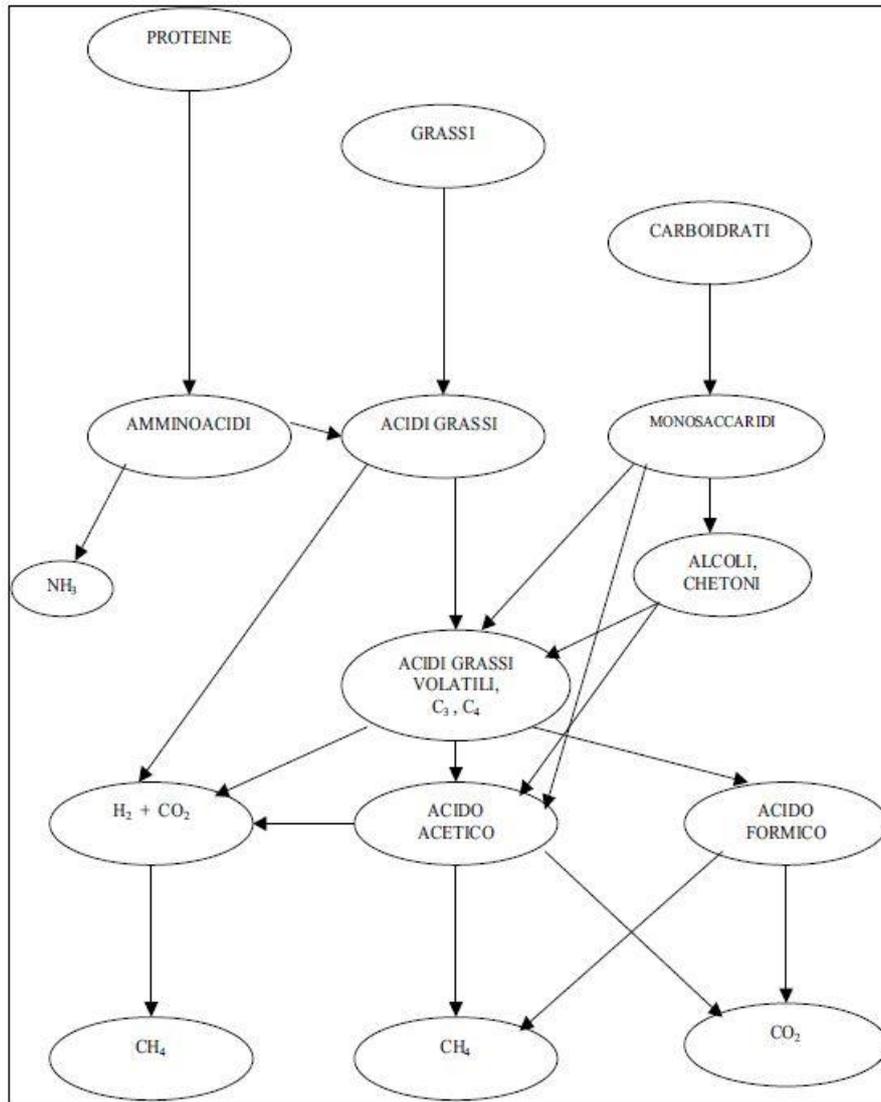


Figura 1.2 diagramma di flusso delle diverse fasi di digestione (Gujer e Zehnder, 1983 modificato)

### 1.2.2 Acetogenesi

Nella seconda macrofase i batteri acetogeni, a partire dai substrati formati nelle fasi di idrolisi ed acidificazione (acidi volatili, principalmente propionato e butirato, ma anche alcoli) producono acido acetico, acido formico, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

Vanno considerati due differenti meccanismi, secondo Angelidaki et al. (1999), a seconda che la decomposizione avvenga a partire da acidi grassi a catena lunga (LCFA, long chain fatty acids) o a catena corta (SCFA, short chain fatty acids, o VFA, volatile fatty acids).

Si definiscono, in generale, acidi grassi a catena lunga quelli aventi più di 5 atomi di carbonio.

La presenza di idrogeno molecolare, durante la produzione di acido acetico può determinare l'inibizione di questa fase, basse concentrazioni di idrogeno, possibile grazie all'attività dei batteri metanigeni H<sub>2</sub> ossidanti (idrogenotrofi), tende a favorire una degradazione degli acidi grassi ad H<sub>2</sub> ad opera dei batteri acetogeni, nonostante la formazione di H<sub>2</sub> sia sfavorevole energeticamente.

### 1.2.3 Metanogenesi

La fase finale della catena trofica anaerobica è rappresentata dalla produzione di  $\text{CH}_4$ .

Il metano è l'unico composto non reattivo dell'intero processo di digestione e può, dunque, essere considerato il prodotto finale del processo. La produzione del metano può avvenire essenzialmente attraverso reazioni differenti:

- la prima prevede la metanogenesi dettata da batteri idrogenotrofi, che, dunque, ossidano in maniera anaerobica l'idrogeno;
- la seconda via, denominata acetoclastica, prevede la formazione di metano e biossido di carbonio attraverso la dismutazione anaerobica dell'acido acetico (**Figura 1.2**).

La gran parte di metano viene prodotta attraverso questo secondo meccanismo. In **Figura 1.1** si quantificano percentualmente i diversi cammini metabolici coinvolti.

Due ceppi di batteri metanigeni con la loro attività svolgono due importanti funzioni:

- degradano l'acido formico e quello acetico a  $\text{CH}_4$  eliminando gli acidi dal mezzo ed impedendo con la loro digestione l'inibizione, per eccesso di acidità, della degradazione di substrati organici;
- limitano la concentrazione di  $\text{H}_2$  consentendo la conversione degli alcoli e degli acidi grassi a catena lunga ad acetato ed  $\text{H}_2$ .

Se la via idrogenotrofa è rallentata si osserva un accumulo di  $\text{H}_2$  che inibisce la formazione del metano, la via acetoclastica subisce fenomeni di inibizione in presenza di concentrazioni elevate di acido acetico.

Il principale fattore che catalizza l'utilizzo dell'acetato da parte di batteri metanigeni è rappresentato dalla forma chimica del substrato presente nel mezzo; se presente in forma indissociata ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), l'acido acetico è in grado di attraversare la membrana batterica e risultare, dunque, utilizzabile (il fenomeno è possibile in un intervallo di pH generalmente compreso tra 6 ed 8). A pH nel mezzo più tendente al basico, l'acido acetico si presenta per lo più sotto forma di ione ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ): ne deriva che la concentrazione in forma molecolare nel mezzo non consente un gradiente di concentrazione tale da permettere il trasporto transmembrana del metabolita.

In ambienti caratterizzati da pH più acidi (inferiori a 5), si ha una elevata concentrazione di acido in forma molecolare che attraversa la membrana cellulare, la concentrazione dell'acido acetico potrebbe risultare superiore alle capacità di metabolizzazione cellulare che comporterebbe una inibizione da eccesso di substrato.

## 1.3 Osservazioni sul fenomeno produttivo

La fermentazione dei rifiuti in discarica non segue precisamente la degradazione sopra spiegata; le condizioni di esercizio (es. captazione forzata paragrafo **2.1**) fanno sì che il processo di degradazione si trasformi in un ciclo, di periodo (tempo di spurgo/ricarica) variabile in funzione delle caratteristiche del rifiuto e di gestione della discarica. Non è insolito, nel corpo discarica, nonostante la copertura impermeabile superiore, l'intrusione di  $\text{O}_2$  atmosferico, che comporta una ambiente aerobico con le conseguenze affrontate nel paragrafo **1.1**.

L'insieme di processi di digestione possono essere schematizzati nel tempo con il grafico rappresentato in **Figura 1.3**.

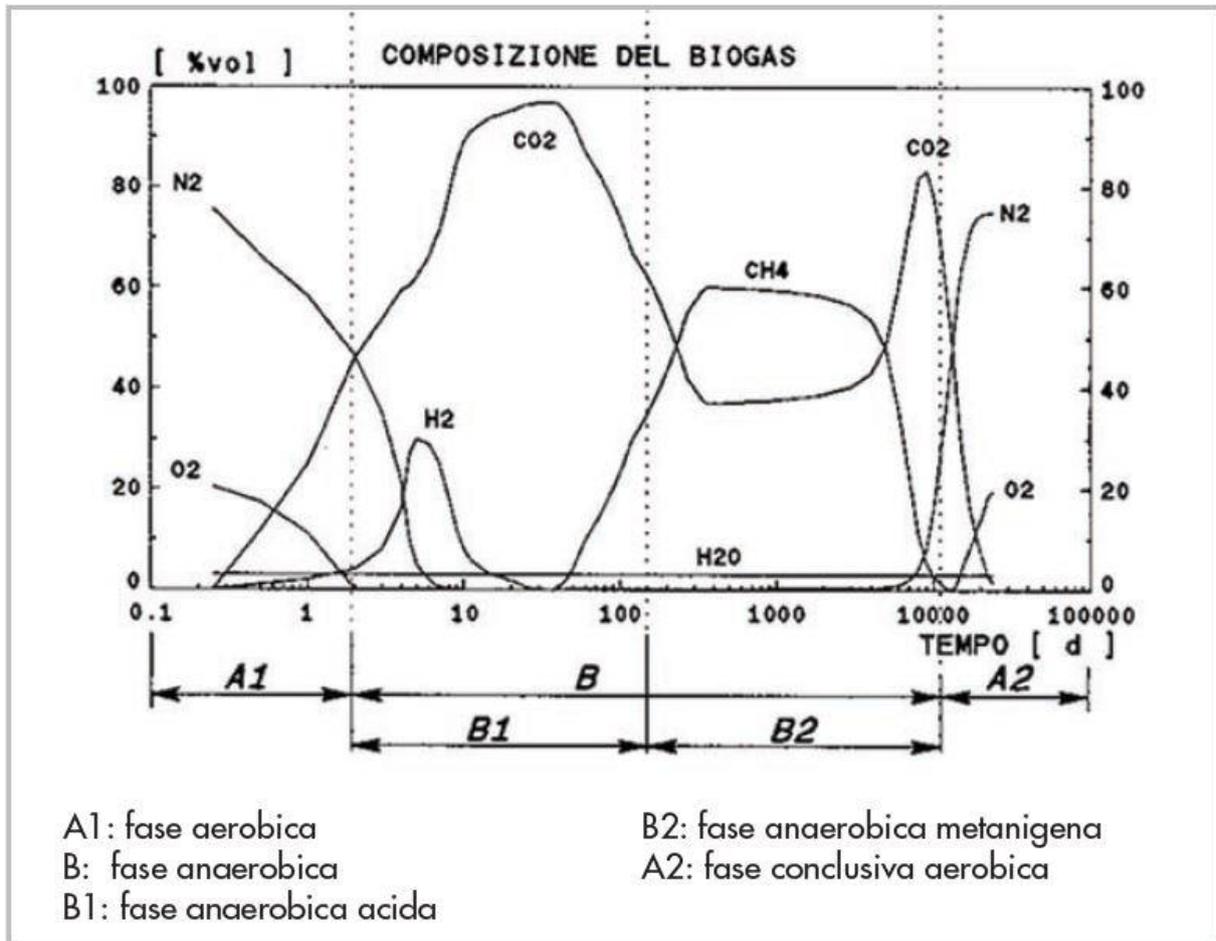


Figura 1.3 digestione del rifiuto (Damiani e Gandolla, 1992)

In una discarica “reale” vi sono, inoltre, vari fattori che possono far discostare la fermentazione della sostanza organica da quella analizzata nei paragrafi precedenti. Diversamente da un digestore anaerobico in discarica molti parametri, quali la temperatura, la pressione, l’umidità, la variegata pezzatura e tipologia di rifiuti ivi staccati, non vengono monitorati e controllati; in questo modo la produzione di biogas subisce delle variazioni temporali e qualitative da quelle che si attenderebbero teoricamente.

Risulta pressoché impossibile, quindi, determinare con precisione la prevalenza di un fenomeno degradativo rispetto ad un altro.

#### 1.4 Fattori che influenzano il fenomeno produttivo

Nel paragrafo che segue vengono illustrati i vari fattori che influenzano la produzione di biogas:

1. Caratteristiche dei rifiuti smaltiti: in generale i rifiuti sono molto eterogenei ed è difficile avere una caratterizzazione della tipologia. Discariche moderne, con la raccolta differenziata, sono agevolate nel definire le caratteristiche tipologiche e merceologiche rispetto a discariche più datate.

Tra le caratteristiche principali si hanno:

- a. Composizione, che determina la presenza di sostanze biogassificabili (ripreso nel paragrafo 3.1);

- b. Pezzatura, in quanto le dimensioni della particella ha un duplice effetto sulla metanogenesi: in una parte l'aumento di pezzatura funge da inibitore della popolazione metanigena, in quanto aumentando la superficie esposta al processo di idrolisi si può avere una rapida formazione di acidi grassi volatili, che tendono a acidificare il pH; d'altro canto se si aumenta la superficie esposta l'idrolisi avviene più facilmente e con essa la sostanza degradabile con le seguenti fasi. Una diminuzione della pezzatura comporta, inoltre un aumento della densità con conseguenze esposte di seguito;
  - c. Densità, in quanto sia alte ( $>1.5 \text{ t/m}^3$ ) sia basse ( $<0.5 \text{ t/m}^3$ ) tendono ad inibire il processo di formazione di biogas: nel primo caso perché diminuisce la superficie reattiva e con lei la velocità di idrolisi (specialmente in rifiuti umidi); nel secondo caso rifiuti troppo compatti comporta una facilità maggiore di saturazione da parte del percolato e funge da ostacolo alla trasmissività, la compattazione limita la captazione forzata del gas;
2. Umidità (interna al rifiuto o dovuta alle condizioni climatiche), che ha una funzione triplice sulla metanogenesi:
    - a. Permette l'attività dei batteri;
    - b. Crea una interfaccia solido-liquido;
    - c. Migliora una diffusione ottimale di batteri e nutrienti;

L'aumento di umidità, inizialmente, favorisce la produzione di biogas, e allo stesso modo una volta stabilizzatasi l'interfaccia solido-liquido e la diffusione l'umidità aggiuntiva non ha effetti sulla produzione di metano.

Con la chiusura del *capping* ed il pompaggio del percolato, l'umidità diventa un fattore fortemente limitante della metanogenesi.

In definitiva, bassa umidità ( $<30-40\%$ ) e saturazione comportano una importante inibizione della produzione di biogas;

3. Temperatura, che gioca un ruolo fondamentale per quanto concerne la vita biologica, quella ottimale risulta essere intorno i  $40^\circ\text{C}$  all'interno della discarica, in quanto i batteri mesofili sono i più presenti nel processo di digestione anaerobica. La temperatura ambientale oltre i dieci metri di profondità non condiziona ulteriormente l'ambiente interno della discarica;
4. Caratteristiche ambientali, come la temperatura ambientale, umidità dell'aria, insolazione (evapotraspirazione), precipitazioni, ventosità, tendono ad influenzare la produzione di biogas come descritto in precedenza. La loro incidenza sulla produzione dipende dalla morfologia della discarica; discariche molto spesse o con volumetrie importanti risentono minormente delle influenze ambientali.

## 1.5 Le caratteristiche del biogas

Come visto in precedenza, il biogas è la risultante di varie reazioni di degradazione in serie, ne consegue una miscela con percentuali variabili di gas.

Le proporzioni di gas presenti variano in base al tempo e alle caratteristiche del rifiuto digerito.

I due componenti principali che costituiscono il biogas sono metano  $\text{CH}_4$  e anidride carbonica  $\text{CO}_2$ .

Oltre ai due macrocomponenti sopracitati all'interno della miscela gassosa, specialmente in quella estratta da un corpo discarica vi è la presenza di altri gas con proporzioni variabili:

Luigi Delle Vergini – Flussi di gas clima alteranti emessi da discarica di rifiuti solidi urbani.

- Ossigeno  $O_2$  ed azoto  $N_2$  dipendenti dall'intrusione di aria atmosferica dovuta alla captazione forzata oppure dall'incidenza della fase aerobica;
- Idrogeno  $H_2$  come prodotto della fase di digestione acetogenica, dipendente dunque principalmente dal tempo;
- Acqua  $H_2O$  vista sotto forma di umidità;
- Acido solfidrico  $H_2S$  ed ammoniaca  $NH_3$  dovuto alla fermentazione di "impurezze" come azoto e zolfo presenti comunemente nei rifiuti;
- Monossido di carbonio  $CO$  la cui presenza è scaturita da fenomeni di combustione incompleti all'interno del corpo discarica.

In tabella presentata di seguito (**Tabella 1.1**) è stata presa da manuale di progettazione "Biogas da discarica" di Enrico Magnano si riassumono le componenti standard del biogas.

**Tabella 1.1 Incidenze standard dei componenti del biogas**

<b>Componenti gassosi</b>	<b>Incidenza standard</b>
Metano	0 – 60 %
Anidride carbonica	0 – 70 %
Ossigeno	0 – 21%
Azoto	0 – 79%
Idrogeno	0 – 1%
Acqua	0 – 5%
Idrogeno solforato	0 – 2%
Ammoniaca	0 – 1%
Monossido di carbonio	0 – 0.1%

La presenza di altri componenti all'interno della miscela è molto importante, in quanto dalla loro incidenza dipendono la maggior parte delle caratteristiche del biogas.

### **1.5.1 Infiammabilità**

L'infiammabilità del biogas è una sua caratteristica basilare ed in maniera indiretta essa è la ragione principe che ha scaturito questo studio. La combustione è un fattore di pericolosità (rischio esplosioni ed incendi), ma allo stesso tempo dà al biogas la possibilità di essere valorizzato energeticamente (attraverso caldaie e motori endotermici).

Per far sì che una combustione avvenga vi è il bisogno di:

- Combustibile in concentrazioni adeguate;
- Comburente in concentrazioni adeguate;
- Un innesco energeticamente adeguato.

I combustibili presenti all'interno del biogas usualmente sono metano, idrogeno, acido solfidrico, ammoniaca e monossido di carbonio. Tutti i componenti elencati, eccezion fatta per il metano, solitamente hanno una concentrazione insufficiente per partecipare alla reazione di combustione.

Il comburente più diffuso e facilmente reperibile è l'ossigeno.

Per far sì che la combustione avvenga ci vuole, come detto precedentemente, che la concentrazione di combustibile dev'essere adeguata; questo indica il bisogno di avere una sua concentrazione all'interno di un range: campo di infiammabilità.

Il metano, combustibile principale della miscela e perno su cui ruota questo studio, ha campo di infiammabilità, in condizioni standard, compreso tra il 5 ed il 15% in aria.

Il limite superiore di infiammabilità, UEL (upper explosive limit), per un'emissione in atmosfera è meno significativo dell'inferiore, LEL (lower explosive limit), in quanto un gas in aria risente di una zona di diluizione che lo porta "naturalmente" a rientrare nei limiti di infiammabilità; per questo motivo la normativa vieta qualsiasi tipo di emissione in atmosfera di metano con concentrazione al di sopra del 5%.

Lo stesso ragionamento viene fatto qualora sia l'aria ad infiltrarsi all'interno di un volume di controllo con all'interno metano (o biogas).

Come visto in precedenza, questo fenomeno è usuale in una discarica che abbia una captazione forzata di biogas, quindi un corpo discarica "costantemente" in depressione.

Assumendo una concentrazione di metano pari all'UEL in condizioni standard, e che l'aria all'interno della discarica può al massimo raggiungere una percentuale dell'85% del volume, considerando la percentuale solita di ossigeno in atmosfera, si definisce che la concentrazione minima di ossigeno che comporta la possibilità di combustione all'interno di una discarica è del 17.85%.

I limiti sopracitati indicano solo la condizione di possibilità di combustione, in quanto terza condizione essenziale è la presenza di un impulso energeticamente sufficiente che funge da innesco (si assume inoltre che la temperatura di autoignizione, 600°C, sia difficilmente raggiungibile in discarica).

Il campo di infiammabilità descritto è riferito ad un componente puro (il metano), il range di infiammabilità varia in funzione dei seguenti parametri:

- Si estende all'aumentare di temperatura e pressione;
- L'UEL si abbassa con la presenza di gas inerti.

M. G. Zabetakis nel 1965 (US Bureau of Mines) nel suo libro propone un vasto studio del campo di infiammabilità del metano e su come esso varia in funzione delle variabili descritte precedentemente.

Si vuole mostrare l'effetto della temperatura di combustione sul campo di infiammabilità (**Figura 1.4**), e come il limite inferiore diminuisca all'aumentare della temperatura

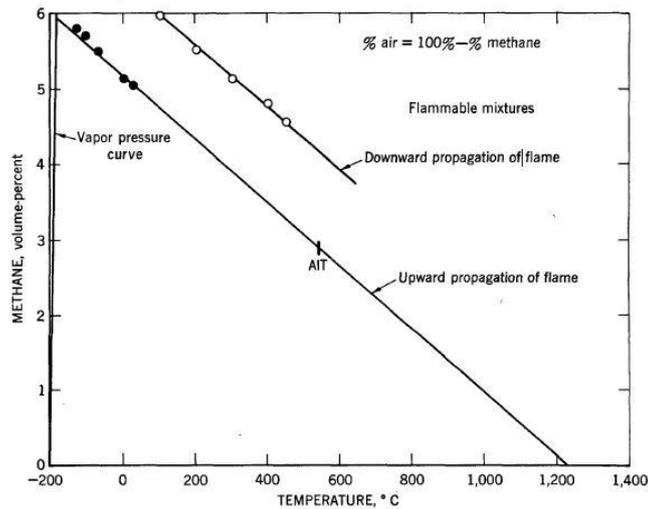


Figura 1.4 effetto della temperatura sul LEL in aria e a pressione atmosferica (Zabetakis, 1965)

Per quanto concerne il biogas, esso tende a comportarsi come una miscela di metano e di gas inerti (azoto ed anidride carbonica), in condizioni standard la variazione del campo di infiammabilità segue il diagramma presentato in **Figura 1.5**.

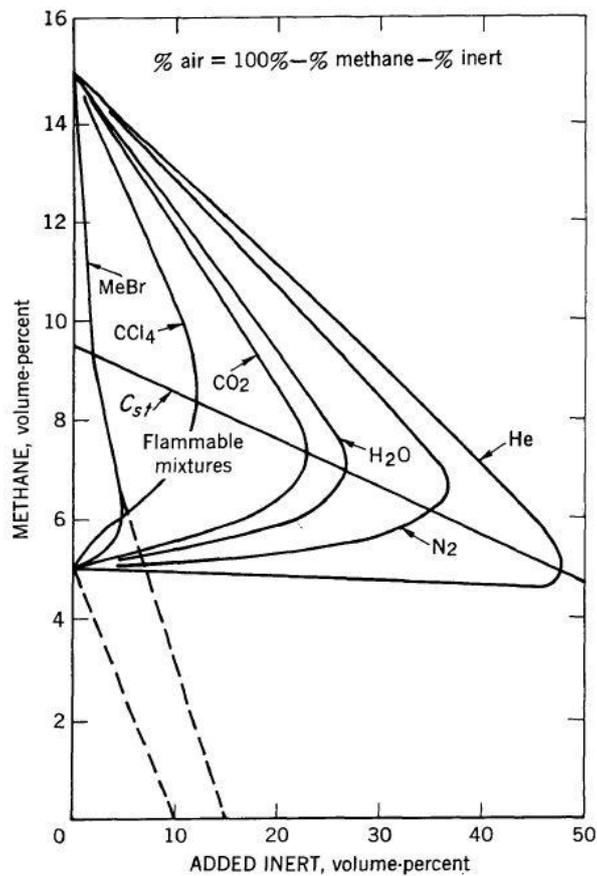


Figura 1.5 Campo di infiammabilità del metano al variare della percentuale di inerti in condizioni normali (Zabetakis, 1965)

Una particolare caratteristica dei combustibili è la capacità di questi ultimi di esplodere; questa è l'effetto di una improvvisa e rapida reazione di combustione, causante un'espansione istantanea della miscela gassosa prodotta in tutto il volume di controllo, da cui deriva un rilascio istantaneo di energia meccanica, che comporta un'onda d'urto.

Per quanto concerne una discarica il pericolo esplosivo di biogas è il confinamento di quest'ultimo all'interno di un volume; la diluizione di quest'ultimo in atmosfera limita fortemente il rischio potenziale.

### **1.5.2 Densità**

La densità del biogas equivale alla sommatoria delle relative incidenze dei vari componenti, in quanto tale è variabile a seconda della composizione.

La densità del biogas è molto prossima a quella dell'aria, ed in generale tende a diminuire con l'aumentare della porzione di metano. Avendo densità prossima a quella dell'aria, i flussi che si vanno a generare sono principalmente dovuti ad un gradiente di pressione e di concentrazione.

### **1.5.3 Temperatura**

La temperatura del biogas può essere stimata in prima approssimazione come la temperatura media che vi è nel processo di fermentazione anaerobica e quindi pari a 40°C, ed è fortemente influenzato dall'ambiente circostante.

Un'analisi della temperatura del biogas non è fondamentale nello studio di emissioni di questo al di fuori del *capping*, esso rientra più propriamente in un discorso di dimensionamento dell'impianto di captazione, in quanto un incremento della temperatura andrebbe a causare una espansione del gas, aumentando le perdite di carico, mentre un abbassamento andrebbe a causare un fenomeno di condensazione del gas stesso.

### **1.5.4 Pressione**

Il volume di gas prodotto durante la fermentazione tende a comportare delle sovrappressioni all'interno della discarica. Il biogas prodotto da una tonnellata di rifiuto solido urbano può arrivare a 200 Nm<sup>3</sup> lungo tutto l'arco di vita di decomposizione.

La sovrappressione di esalazione ivi creata è omnidirezionale e tenderà a trovare sfogo, prima della messa in depressione del cumulo, o tramite migrazioni in terreni limitrofi o più probabilmente in emissioni di biogas in atmosfera.

### **1.5.5 Umidità**

Il biogas emesso da discarica è visto generalmente come una miscela satura, questa tesi è giustificata dalla condensazione dello stesso, ad esempio lungo la rete di trasporto, qualora subisce raffreddamenti.

Luigi Delle Vergini – Flussi di gas clima alteranti emessi da discarica di rifiuti solidi urbani.

### **1.5.6 Solubilità**

La solubilità del biogas non è unica ma varia in base alle componenti, questi hanno solubilità molto differenti tra loro; se si parla delle componenti più importanti, il metano ha una solubilità bassa (0.024 g/l in condizioni normali), l'anidride carbonica e l'acido solfidrico hanno solubilità più alte (rispettivamente 3,85 g/l e 1.69 g/l in condizioni standard).

Questa differente capacità di solubilizzarsi in acqua delle varie componenti è molto importante, in quanto sfruttata nei processi di “upgrading” del biogas, quali l'idrogeno solforato.

### **1.5.7 Odore**

Tutte le macrocomponenti del biogas sono inodore, l'unico “tracciante olfattivo” molto spesso presente è l'idruro di zolfo, che come evidenziato nel paragrafo precedente **1.5.6** risulta essere molto solubile, la mancanza dunque di odore non implica forzatamente l'assenza di biogas.

### **1.5.8 Potere calorifico**

Il potere calorifico del biogas equivale a quello del metano pesato.

Il potere calorifico inferiore del metano si può considerare pari a 8250 kcal/m<sup>3</sup>, se si considera una percentuale di metano nel biogas del 50% il potere calorifico risulta essere di 4125 kcal/m<sup>3</sup>.

## **1.6 Le problematiche derivanti dal biogas**

La rassegna delle caratteristiche elencate nel sottoparagrafo **1.5** sottolinea come il biogas possa comportare notevoli pericoli all'uomo e impatti dell'ambiente circostante.

Di seguito si evidenziano le problematiche che le emissioni non controllate di biogas provocano internamente ed esternamente alla discarica, che “obbligano” il gestore di attuare nel più breve tempo possibile un sistema di gestione, basato sulla captazione forzata del biogas.

### **1.6.1 Rischio incendi**

Si è visto, nel sottoparagrafo **1.5.1**, come l'infiammabilità sia la caratteristica principe del biogas, fondamentale positivamente (valorizzazione energetica della miscela gassosa), ma allo stesso tempo lo rende un fattore di pericolo molto importante, da analizzare nella valutazione di rischio di una discarica.

La presenza di biogas in ambiente lavorativo, va monitorata, analizzata, valutata e gestita come una fonte di pericolo mortale; all'infiammabilità del prodotto è legata, come visto precedentemente, l'esplosività.

Di seguito si riassumono le fonti di pericolo derivanti dall'infiammabilità del gas:

- Presenza di sostanze infiammabili al suo interno, metano, e raramente anche idrogeno;
- Con adeguate concentrazioni di comburente, ha la capacità di essere ossidato in condizioni standard, con la sola condizione limitante dell'innesco;

- Se confinato in volumi di controllo c'è la possibilità che dalla sua combustione si sviluppi un'esplosione.

Nella valutazione del rischio bisogna focalizzare la propria attenzione su tre parametri:

1. La fonte di rischio viene prodotta da una reazione completamente naturale e spontaneamente;
2. Il vettore, definito come la matrice entro la quale il biogas migra per entrare in contatto con il bersaglio. C'è il rischio, infatti, che l'innescò sopraggiunga in un luogo esterno alla discarica stessa, acquiferi, (atmosfera), dreni, pozzi, sono dei vettori data la loro elevata permeabilità;
3. Il bersaglio, il luogo in cui potenzialmente può accadere un incidente, che come detto precedentemente può essere esterno alla discarica (es. cantina).

È possibile, inoltre, che delle esplosioni interne al corpo discarica causino delle frani dei pendii della discarica, esempi di questo tipo di rischio sono quelli di Sarajevo del 1985 e Bogotà del 1997. I meccanismi scatenanti sono i seguenti: il rifiuto un volta stoccato è protagonista di assestamenti periodici, che variano la sua volumetria e indice di compattazione, gli assestamenti si descritti, se repentini, possono causare delle fratture nel *capping*, facilitando in questo modo una miscela aria-biogas, che funge da “esplosivo latente”, in quanto orfano del solo innescò; se vi è il verificarsi di quest'ultima condizione, l'onda d'urto conseguente produce una spinta alla parete che può determinare un distacco di una parte del rifiuto.

La migrazione di biogas è, invece, dovuta alla sovrappressione che si genera all'interno del corpo discarica. Monitorare le pressioni all'interno della discarica è una metodologia di prevenzione di rischio efficace, soprattutto se affiancata ad un sistema di captazione forzata, che evita sovrappressioni interne.

### 1.6.2 Rischio asfissia

Come evidenziato nel sottoparagrafo 1.5.2 la densità del biogas è simile a quella dell'aria (diminuisce all'aumentare del tenore di metano).

Un tenore di CH<sub>4</sub> basso comporta una densità del gas superiore a quella dell'aria, ciò causerebbe una saturazione di uno spazio confinato. In qualsiasi ambiente confinato, se il tenore di ossigeno scende al di sotto del 18%, il soggetto (lavoratore) esposto può avere delle ripercussioni momentanee sulla propria salute, poca prontezza di riflessi, vertigini ecc... tali sintomi sono aggravati dal fatto che non sempre il biogas è riconosciuto dal soggetto per il suo odore, come spiegato in precedenza, e quindi per questo motivo il malessere non viene ricondotto alla causa.

Inoltre, se la concentrazione di ossigeno diminuisce al di sotto del 6% per il soggetto esposto vi è la perdita immediata di conoscenza.

Va sottolineato come in discarica sia difficile che vi sia la presenza di lavoratori in un luogo confinato dove vi è un'immissione di biogas; come per il rischio di incendio così per quello di asfissia c'è la possibilità che dei vettori trasportino quest'ultimo all'esterno della discarica, aumentando i possibili bersagli.

Anche in questo caso come negli altri esaminati, si palesa l'importanza di un sistema di captazione forzata di biogas.

### 1.6.3 Inquinamento odorigeno

Si è evidenziato nel paragrafo 1.5.7 come certe componenti presenti nel biogas possano generare cattivo odore, come ad esempio l'idruro di zolfo.

L'esalazione di sostanze poco gradevoli all'olfatto è una fonte di inquinamento sfiorato solamente dal Testo Unico Ambientale, trattandosi di emissioni atmosferiche, che non specifica alcun limite normativo all'emissioni di sostanze odorogene.

La molestia olfattiva è parallelamente punita come reato sulla base della parte seconda dell'articolo 674 del codice penale, "getto pericoloso di cose".

Come sottolineato nel paragrafo 1.2 la produzione di H<sub>2</sub>S (il più importante tracciante olfattivo) è particolarmente confinata nella fase transitoria e acetogenica e nella fase metanogenica.

### 1.6.4 Rischio di intossicazione

In **Tabella 1.1** sono stati elencati i principali componenti che fanno parte della miscela analizzata, alcuni di questi sono contraddistinti da un effetto tossico sulla salute umana.

I gas tossici presenti solitamente sono: anidride carbonica, idrogeno solforato, monossido di carbonio ed ammoniaca.

Si definisce:

- TLV-TWA (time-weighted average): la concentrazione limite alla quale il lavoratore può essere esposto in maniera continuativa (8h/d per 40h/week), senza che egli abbia effetti sulla propria salute, calcolata come media settimanale.
- TLV-STEL (short-term exposure limit) il valore di concentrazione consentito per brevi esposizioni (massimo 15 minuti), non più di 4 volte al giorno, con esposizioni intervallate di almeno un ora le une dalle altre.

Per i gas sopra elencati, in **Tabella 1.2** si vanno a riportare i limiti indicati:

**Tabella 1.2 Limiti TWA e STEL dei prodotti tossici presenti generalmente nel biogas**

	<b>TWA</b>	<b>STEL</b>
<b>Anidride Carbonica</b>	5000 ppm	30000 ppm
<b>Idrogeno Solforato</b>	10 ppm	15 ppm
<b>Monossido di Carbonio</b>	35 ppm	50 ppm
<b>Ammoniaca</b>	25 ppm	50 ppm

È fortemente improbabile che le emissioni che si generano siano tali da generare concentrazioni così elevate, soprattutto in condizioni di normale gestione della discarica (*capping* definitivo, ed assenza di cantieri su di essa).

Qualora, infatti, ci si trovi in condizioni particolari (es. trivellazione di un pozzo di captazione di biogas) vi è l'obbligo di utilizzare DPI adeguati.

### **1.6.5 Emissione in atmosfera di GHG**

L'ultima pericolosità analizzata, non rappresenta un rischio diretto sulla salute umana, ma è determinata da una politica, intrapresa dalla maggior parte delle più importanti nazioni, è l'emissione in atmosfera di gas serra.

L'anidride carbonica è uno dei principali gas serra del pianeta data la sua concentrazione in atmosfera ( $405.5 \pm 0.1$  ppm è la concentrazione media del 2017 preso dal WMO Greenhouse Gas Bulletin), il metano ha una concentrazione di molto inferiore ( $1859 \pm 2$  ppb è la concentrazione media del 2017 preso dal WMO Greenhouse Gas Bulletin), ma un GWP (Global Warming Potential) 21 volte superiore alla CO<sub>2</sub>.

Il metano è responsabile del 10% dell'incremento dell'effetto serra, ed ha come principali fonti di emissione in atmosfera:

- Estrazione da combustibili fossili;
- Processo digestivo animali;
- Riscaldamento;
- Paludi;
- Risaie;
- Fermentazione di RSU da discarica

Il riuscire, dunque, a captare e bruciare il biogas è un passaggio essenziale nella gestione di una discarica, in cui si va a ridurre il gas serra emesso in atmosfera alla sola anidride carbonica con effetti 21 volte minori sull'aumento di temperatura in atmosfera.

### **1.6.6 Riepilogo**

Per i pericoli analizzati nel paragrafo risulta necessario intraprendere una gestione qualitativa del biogas che si produce in una discarica di RSU.

Il metodo utilizzato oggi è la captazione forzata del biogas, con possibilità di valorizzazione energetica di quest'ultimo come vedremo nei capitoli che seguono e come si è riscontrato nel caso studio che si presenterà.

È buona norma, nonché obbligo secondo il D.Lgs 36/03, monitorare che il sistema di captazione sia efficace, e quindi monitorare le dispersioni di biogas superficiali e laterali.

## **2 IMPIANTO PER LA GESTIONE DEL BIOGAS PRODOTTO IN DISCARICA**

“Le discariche che accettano rifiuti biodegradabili devono essere dotati di impianti per l'estrazione dei gas che garantiscano la massima efficienza di captazione e il conseguente utilizzo energetico.” D.Lgs 36/03, Allegato 1, punto 2.5

Nel seguente capitolo si presenta il funzionamento generico di un impianto.

La trattazione e gli esempi costruttivi delle varie componenti sono stati presi dal fascicolo tecnico “SF2a\_biogas\_2018\_V12” della discarica BdS gestita da AMIAT.

La Nuova Discarica di “Basse di Stura” si trova nella parte Nord dell'impianto ed è situata nella parte settentrionale della città di Torino, con sede in Via Germagnano 50.

Tale discarica è delimitata a nord dalla Tangenziale Nord di Torino a est dal Raccordo Autostradale Torino-Caselle e a sud-ovest dal fiume Stura di Lanzo.

Si tratta di una discarica in fase post operativa, la cui coltivazione complessiva ha interessato gli anni compresi tra il 1984 e il 2009 per una quantità di rifiuto totale stoccato di 17,151,355 tonnellate.

La tipologia di rifiuto è eterogenea ed è formata per il 75% di rifiuti solidi urbani, il 12% di rifiuti speciali assimilati e il restante 13% di fanghi di supero.

Un impianto per la gestione del biogas prodotto in discarica è costituito dalle seguenti strutture:

1. Rete di captazione;
2. Rete di estrazione forzata:
  - i. Rete di trasporto
  - ii. Stazione di aspirazioni
  - iii. Stazioni di analisi
3. Impianti di combustione;
4. Impianti di vettoriamento ed utilizzo dell'energia recuperata.

È inoltre fondamentale la presenza di reti ausiliari per l'alimentazione e il controllo del sistema:

- Rete elettrica di alimentazione;
- Rete pneumatica di azionamento;
- Rete di telecontrollo;
- Rete di scarico condense;
- Rete di alimentazione integrativa con metano di rete.

### **2.1 Captazione del biogas**

La captazione del biogas avviene per captazione forzata, questa prevede un'applicazione di una depressione all'interno del corpo della discarica che tende a richiamare all'interno di un pozzo il gas prodotto.

L'efficienza del pozzo è proporzionale a:

- La superficie di contatto con il biogas, che coincide con il dreno di captazione. Per superficie a contatto con il biogas si intende quella non satura di percolato, in quanto non utilizzabile per la captazione.
- Il grado di isolamento che vi è a monte del dreno, che separa quest'ultimo dall'atmosfera, utile sia per non disperdere biogas in atmosfera, sia per non richiamare aria atmosferica all'interno del pozzo.

La fase di massima efficienza di captazione vi è dopo la chiusura del *capping* definitivo del biogas; è importante comunque, per ridurre il più possibile le esalazioni, estrarre già in fase di coltivazione, nonostante tutte le complicità che questo comporta.

In seguito in **Tabella 2.1** si riportano le varie fasi di gestione della captazione e del monitoraggio del biogas (la tabella è presa dal manuale di progettazione "Biogas da discarica" di Enrico Magnano).

Tabella 2.1 Cronologia delle fasi gestionali della captazione e monitoraggio del biogas (Magnano, 2010)

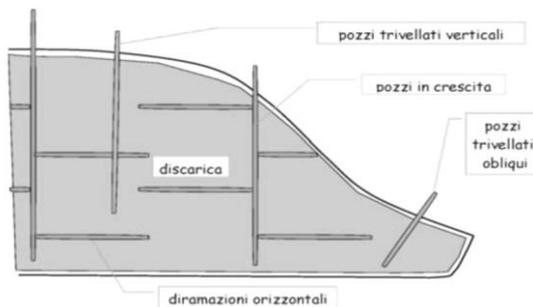
<b>Fase di vita della discarica</b>	<b>Periodo di gestione</b>	<b>Produzione di biogas</b>	<b>Operazioni per la gestione del biogas</b>	<b>Operazioni per il monitoraggio del biogas</b>
<b>Costruzione</b>	Durante la costruzione della discarica, prima dei conferimenti	Nulla	Predisposizione delle opere idonee alla ottimale captazione	Predisposizione delle dotazioni di monitoraggio esterno
<b>Coltivazione iniziale</b>	Durante la prima fase dei conferimenti di rifiuti	Limitata, di tipo prevalentemente aerobico (alta presenza di CO <sub>2</sub> )	Predisposizione della rete di captazione, del sistema di trasporto, regolazione ed aspirazione	Attivazione delle operazioni di monitoraggio esterno
<b>Coltivazione avanzata</b>	Durante le fasi avanzate di conferimento, in presenza di spessori significativi di rifiuti	Discreta, di tipo misto aerobico e anaerobico	Attivazione della rete di captazione, del sistema di trasporto, regolazione, aspirazione e combustione. Predisposizione di ulteriori elementi integrativi negli strati interessati	Mantenimento delle operazioni di monitoraggio esterno. Controllo delle emissioni diffuse
<b>Chiusura</b>	Al termine della coltivazione della discarica	Massima, maggiori rischi di migrazione non controllate specie in concomitanza con la posa del <i>capping</i> definitivo	Mantenimento della captazione, integrazione con ulteriori elementi. Massima prestazione dell'impianto di recupero	Massima attenzione al monitoraggio esterno a causa del maggior rischio di migrazione
<b>Post chiusura iniziale</b>	Nei primi anni successivi alla coltivazione della discarica	In progressiva diminuzione	Verifica delle funzionalità del sistema di captazione a causa dei rifiuti. Prestazione del recupero in calo	Massima attenzione al monitoraggio esterno
<b>Post chiusura avanzata</b>	Dopo circa 8÷10 anni dalla chiusura della discarica	In decisa diminuzione, ma comunque latente	Mantenimento del sistema di captazione con attenzione ai problemi di vetustà	Mantenimento del sistema di monitoraggio

La rete di captazione dell'impianto preso in esame, può essere composta da uno o più delle tipologie e sistemi presentati in **Tabella 2.2**:

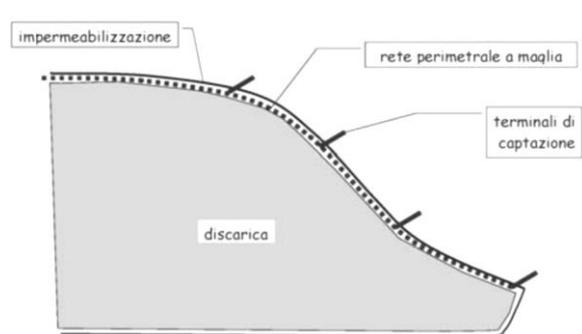
**Tabella 2.2** Tipologie e sistemi di captazione (SF2a\_ biogas\_2018\_V12)

Tipologie	Sistemi
Rete interna	Pozzi verticali in crescita e/o con diramazioni integrative orizzontali e/o in aspirazione dalla base Pozzi trivellati (verticali o obliqui) Trincee drenanti sub-orizzontali
Rete superficiale	Rete perimetrale Rete sommitale
Altri punti di captazione non dedicati	Pozzi duali Ulteriori punti di captazione

Nelle figure sottostanti ci sono degli schemi sulle reti di captazioni presenti in discarica (**Figura 2.1** e **Figura 2.2**, SF2a\_ biogas\_2018\_V12)



**Figura 2.1** Schematizzazione della rete di captazione interna



**Figura 2.2** Schematizzazione della rete di captazione esterne

Le aree interessate allo studio sono costituite dalle seguenti tipologie di pozzi/dreni:

1. Pozzi di estrazione verticali, realizzati durante la coltivazione della discarica, che hanno dunque seguito l'evoluzione in altezza della discarica.  
Lo schema di funzionamento è riportato in **Figura 2.3**.

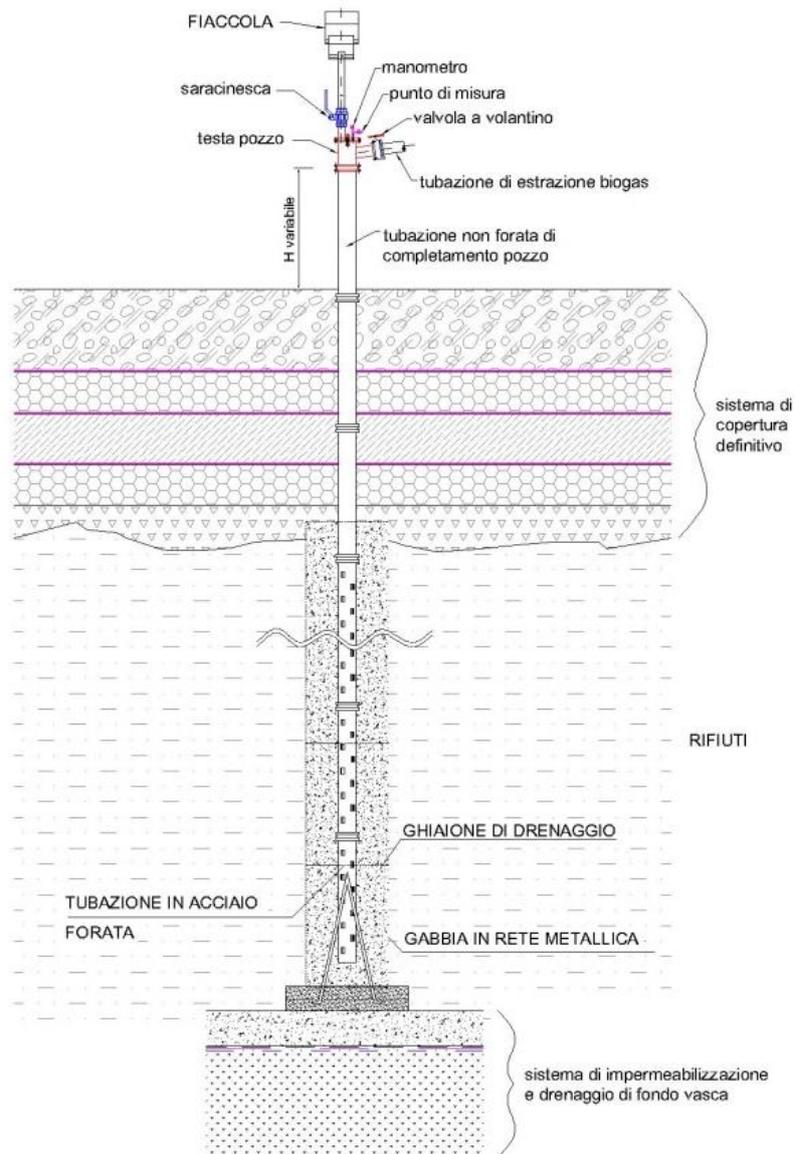


Figura 2.3 Schematizzazione pozzo verticale in crescita (SF2a\_ biogas\_2018\_V12)

Per incrementare l'efficienza di captazione si realizza una rete, in serie con la prima, di captazione integrativa installando delle tubazioni fessurate orizzontali, il loro posizionamento seguiva cronologicamente la coltivazione delle varie celle di scarico, come si evince in **Figura 2.4**.

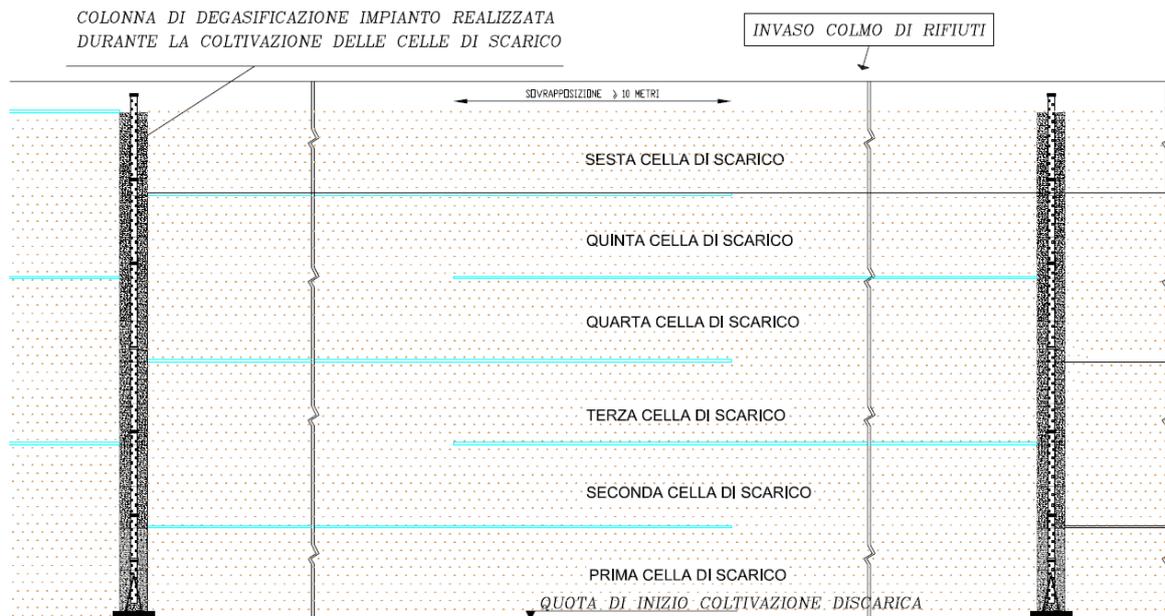


Figura 2.4 Schematizzazione tubazioni integrative orizzontali (SF2a\_biogas\_2018\_V12)

2. Pozzi trivellati verticali, sono pozzi realizzati dopo la fine della coltivazione, necessari per sostituire pozzi in via di esaurimento o infittire la rete di captazione (Figura 2.5, SF2a\_biogas\_2018\_V12)
3. Pozzi duali, per l'estrazione simultanea di percolato e biogas (Figura 2.6, SF2a\_biogas\_2018\_V12)

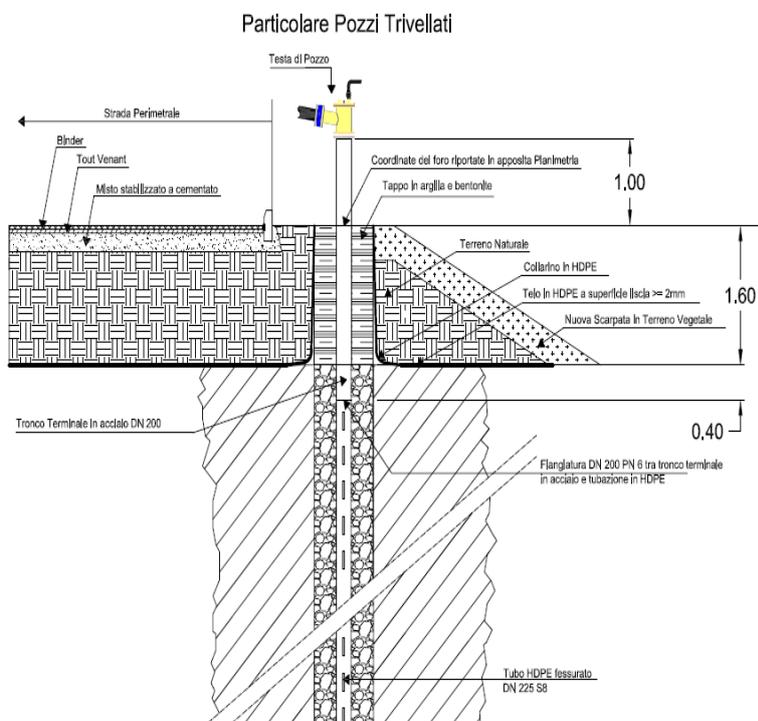


Figura 2.5 Schema pozzo trivellato

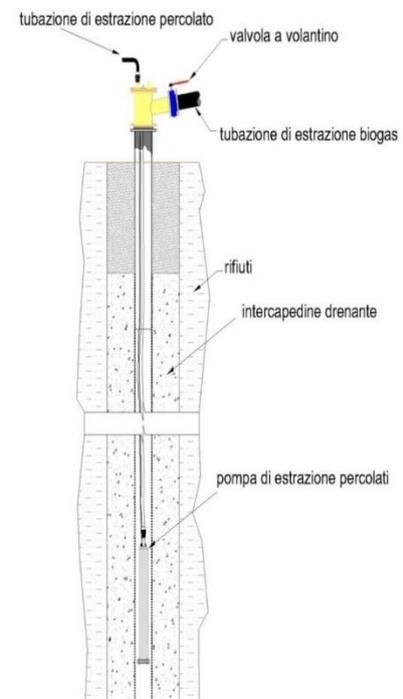


Figura 2.6 Schema pozzo duale

## 2.2 Rete di estrazione forzata

Il biogas captato, qualora non venga bruciato sul posto, viene trasportato all'impianto di trattamento.

La rete è costituita da una rete di trasporto, delle stazioni di analisi e controllo e delle stazioni di aspirazione.

Tra le forze motrici del biogas vi è anche quella di esalazione intrinseca, discussa nel sottoparagrafo 1.5.4, questa è trascurabile rispetto a quella delle soffianti, ma gioca un ruolo importante qualora il sistema di aspirazione fosse in pausa, come vedremo successivamente.

Nel progettare il sistema di adduzione è importante tener conto che il biogas è un gas infiammabile, umido e caldo.

Di seguito sono descritte le varie parti che costituiscono una rete di estrazione forzata:

- **Rete di trasporto**

È l'insieme di condotte che convogliano il biogas da ciascuno dei singoli pozzi della rete di captazione fino agli impianti di combustione.

Si divide in:

- i. collettori secondari: dai singoli pozzi alle pedane di raccolta;
- ii. pedane di raccolta: punti di confluenza di diversi collettori secondari ove il gas estratto viene immesso in tubazioni di trasporto di maggior diametro (collettori primari);
- iii. collettori primari: dalle pedane di raccolta in poi.

In relazione alle condizioni di esercizio si può suddividere in due parti:

- i. in aspirazione: dai singoli pozzi fino alle stazioni di aspirazione;
- ii. in pressione: dalle stazioni di aspirazione in poi.

- **Stazioni di aspirazione (soffianti)**

Presso le stazioni di aspirazione sono installate le soffianti che hanno il compito di fornire l'azione motrice necessaria per assicurare l'estrazione forzata del biogas, mantenendo in aspirazione la rete di captazione e i collettori a monte delle soffianti e pompando il gas nei collettori in pressione che dalle soffianti trasportano il gas agli impianti di combustione.

- **Stazioni di analisi e controllo (presso le pedane di raccolta)**

Presso le pedane di raccolta sono presenti le stazioni di analisi e controllo che, per ragioni di sicurezza e gestionali, provvedono a controllare la percentuale di O<sub>2</sub> e di CH<sub>4</sub> in arrivo su ciascuna linea secondaria, prima dell'immissione del gas nel collettore primario e la sua miscelazione con il flusso estratto dagli altri pozzi.

## 2.3 Impianti di combustione

La combustione del biogas captato può avvenire mediante torce senza recupero energetico, oppure mediante impianti di recupero energetico, motori endotermici.

I motori endotermici sono composti dai seguenti sistemi:

1. Gruppo di pretrattamento gas;
2. Soffianti di alimentazione;
3. Motore;
4. Impianto di raffreddamento;
5. Sistema di trattamento fumi;
6. Camino;
7. Generatore elettrico;
8. Cabina di trasformazione;
9. Sistema di recupero calore.

È stato aggiunto infine un sistema di alimentazione integrativa con metano di rete (al momento non attiva). Questo al fine di garantire la continuità di funzionamento dell'impianto in caso in cui il tenore di metano scendesse sotto i limiti di funzionamento dei motori.

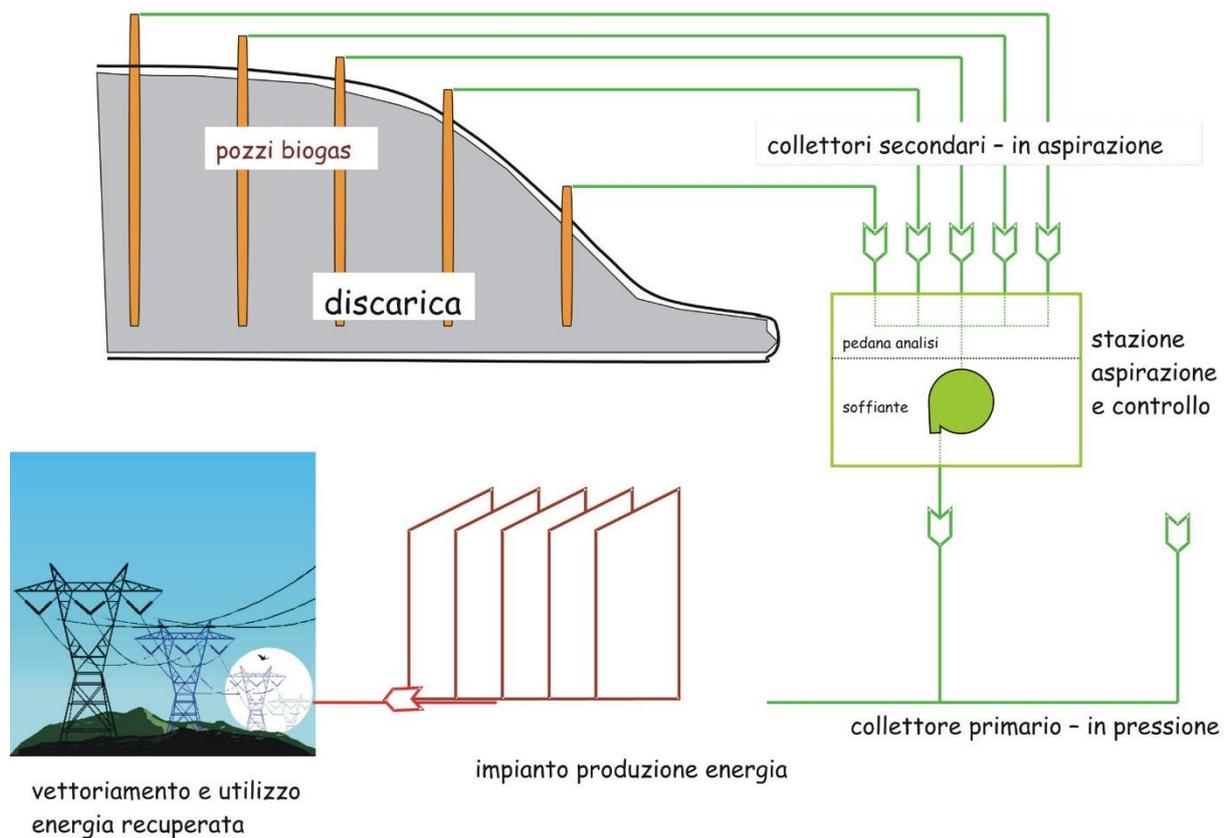


Figura 2.7 Schema generale dell'impianto Basse di Stura (SF2a\_biogas\_2018\_V12)

### 3 L'IMPOVERIMENTO DEL BIOGAS DA DISCARICA

Un limite fondamentale che si presenta in una discarica nel tempo è l'impoverimento del tenore di metano presente nel biogas.

Si è visto come il biogas sia il prodotto della digestione anaerobica della sostanza organica presente nel rifiuto conferito in discarica, in quanto tale, man mano che la sostanza organica viene digerita la quantità di biogas, nel tempo diminuisce.

Come si è evidenziato in **Tabella 2.1** il biogas prodotto segue una curva che vede come massima la produzione di biogas appena dopo la definizione del *capping* finale.

Per gestire questa problematica vi sono varie metodologie e software elaborati per prevedere la produzione di biogas di una discarica e la sua evoluzione nel tempo.

#### 3.1 Previsioni produttive di biogas in discarica

Prevedere la produzione che si avrà nel tempo di biogas in discarica non è un compito facile.

La prima limitazione che inasprisce la stima è la caratterizzazione del rifiuto. Il rifiuto conferito in discarica ha caratteristiche fortemente non omogenee; un rifiuto proveniente da una raccolta non differenziata (come quello conferito nella discarica Basse di Stura) può variare a seconda dei luoghi, abitudini sociali, stagioni ed inoltre può variare anche lo storico della composizione del rifiuto, in quanto la coltivazione è duratura e continua nel tempo.

Uno degli approcci più utilizzati per la stima della produzione nel tempo di biogas è l'approccio modellistico. Questo, previa opportuna taratura, permette di simulare i processi biodegradanti che avvengono all'interno di una discarica. Vi sono modelli più complessi, come quello ecologico, che consentono una descrizione dettagliata del fenomeno di putrefazione, che hanno in sé dei limiti operativi sulla difficoltà di una opportuna taratura iniziale, data la difficoltà di reperimento dei dati da immettere in input.

In letteratura sono disponibili molti modelli, essi possono essere schematizzati (come riportato da Damiani e Gandolla, 1992) in:

- Modelli empirici;
- Modelli stechiometrici;
- Modelli biochimici;
- Modelli ecologici.

In generale la stima di produzione di biogas nel tempo può essere divisa in una prima parte stechiometrica (sottomodello statico), una biochimica (sottomodello dinamico) ed un'ultima parte che riguarda la sovrapposizione degli effetti (sottomodello matematico).

Dal primo sottomodello stechiometricamente si passa dalla composizione merceologica del rifiuto coltivato alla quantità di carbonio biodegradabile, da cui è possibile calcolare la quantità massima di biogas prodotta per unità di massa.

Da letteratura (Andreottola e Cossu, 1988), in generale, il volume massimo di biogas producibile per unità di massa di carbonio biogassificabile è:

$$1.868(Nm^3)/(kgC_{disponibile}) \quad (3.1)$$

Nel sottomodello biochimico si studiano le cinetiche di reazione di biodegradabilità del carbonio disponibile al variare di densità dei rifiuti, umidità e temperatura.

Il sottomodello, infine, di sovrapposizione degli effetti studia il variare delle curve di produzione delle singole unità di massa, date le interazioni con altri rifiuti conferiti in lassi temporali differenti.

Di seguito viene riportato il modello teorico di calcolo proposto da Andreottola e Cossu nel 1988.

Si semplifica la discarica come un reattore batch biologico.

In generale si considera che il 50-70% dei rifiuti secchi rappresenta la sostanza organica, e che a sua volta il 50% di essa costituisce il carbonio organico.

Una bassa percentuale di carbonio organico biodegradabile è riconducibile all'incidenza di materiali lignocellulosici all'interno del rifiuto.

Il carbonio organico biodegradabile funge da substrato per la digestione dei batteri ed è il dato di input del sottomodello stechiometrico.

$$C_{obi} = C_i F_b (1 - U_i) P_i \quad (3.2)$$

Con:

- $C_{obi}$  = carbonio organico biodegradabile della frazione i-esima di rifiuto [kg di carbonio/kg di rifiuto];
- $C_i$  = carbonio organico della frazione i-esima di rifiuto secco [kg di carbonio/kg di frazione i-esima];
- $F_b$  = la frazione di  $C_i$  biodegradabile [%];
- $U_i$  = grado di umidità della frazione i-esima;
- $P_i$  = peso umido della componente i-esima [kg frazione i-esima/kg rifiuto].

Il carbonio organico di una massa unitaria di rifiuto generico è uguale alla sommatoria della (3.2) per ogni componente i-esima.

Per calcolare, dunque, la frazione di carbonio organico biodegradabile si fa riferimento alle varie incidenze merceologiche del rifiuto, con le relative caratteristiche (**Tabella 3.1**)

**Tabella 3.1** Caratteristiche indicative delle frazioni merceologiche dei rifiuti (Magnano 2010)

COMPONENTI	$U_i$ (%)	$C_i$ (%)	$F_{bi}$ (%)
Residui alimentari	60	48	80
Residui da giardini	50	48	70
Carta e cartone	8	44	50
Plastica e gomma	2	7	0
Tessili e cuoio	1	55	20
Legno	2	5	50
Vetri	3	0	0
Metalli	3	0	0

Il sottomodello successivo, quello biochimico, ha come fine quello di calcolare la quantità di carbonio biogassificabile dei rifiuti.

La biogassificazione si può descrivere con una cinetica di primo ordine  $i$ , come segue:

$$d(C_{ogi} / (C_{oei} - C_{ogi})) = k_i dt \quad (3.3)$$

Con:

- $C_{ogi}$  = carbonio organico della frazione  $i$ -esima gassificata in  $dt$  [kg carbonio/kg RSU umido];
- $C_{oei}$  = carbonio organico biogassificabile della frazione  $i$ -esima gassificata in  $t=0$  [kg carbonio/kg RSU umido];
- $k_i$  = coefficiente di biodegradazione della frazione  $i$ -esima.

È da sottolineare che la parte di carbonio organico biogassificabile è diversa da quella biodegradabile in quanto parte del carbonio organico è utilizzato dai microrganismi per la loro sintesi cellulare. I due fattori sono correlati tra loro, ma in funzione della temperatura. In un ambiente mesofilo, molto vicino al reale ambiente del corpo discarica, il rapporto carbonio organico gassificabile e degradabile varia linearmente con la temperatura, e segue la seguente:

$$C_{oei} = C_{obi} (0.014T + 0.28) \quad (3.4)$$

Con  $T$  la temperatura di reazione.

La temperatura è una variabile principale per cui varia il coefficiente di biodegradazione  $k_i$ .

Al livello operativo, infine, sono stati aggiunti tre parametri, per distinguere le velocità di degradazione delle varie tipologie di RSU:

- Frazione rapidamente biodegradabile RVP;
- Frazione mediamente biodegradabile RMP;
- Frazione lentamente biodegradabile RLP.

Ad ognuno di essi si riconosce un coefficiente legato al tempo di emittasformazione:

$$k_j = \ln(2 / t_{1/2}) \quad (3.5)$$

Secondo “Gestione del biogas di discariche controllate” (di Damiani e Gandolla del 1992) per:

- |                                    |                   |                   |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|
| • rifiuti velocemente putrescibili | $t_{1/2}=1$ anno  | $k_j=0.693$ /anni |
| • rifiuti mediamente putrescibili  | $t_{1/2}=5$ anni  | $k_j=0.139$ /anni |
| • rifiuti lentamente putrescibili  | $t_{1/2}=10$ anni | $k_j=0.046$ /anni |

La risoluzione dell'equazione (3.3) per il fattore di conversione espresso nella (3.1), la produzione di biogas specifica ( $m^3/t$  anno):

$$g = \sum 1.868 C_{oei} k_i e^{k_j t} \quad (3.6)$$

Si ritiene, infine, solo teoricamente, che l'orizzonte temporale di produzione di biogas è di 40 anni.

Una volta calcolata la produzione specifica di biogas annuale è sufficiente moltiplicarla per i rifiuti conferiti in discarica nell'anno stesso.

Definito dunque “i” il contatore degli anni,  $x_i$  la quantità di rifiuti conferita nell’anno i-esimo e  $L_i$  la produzione specifica all’anno n-esimo:

$$\sum_{i=0}^n x_{(i-(i-1))} L_{(n-(i-1))} \quad (3.7)$$

Il sì definito modello è di difficile implementazione nella realtà, come già accennato in precedenza, per i seguenti motivi:

- difficoltà nell’acquisire la caratterizzazione merceologica del rifiuto;
- difficoltà nel conoscere il carbonio organico di ogni porzione del rifiuto;
- difficoltà nel conoscere l’umidità intrinseca di ogni porzione del rifiuto;
- difficoltà nel conoscere la frazione biodegradabile di ogni porzione del rifiuto;
- difficoltà nel conoscere la temperatura di fermentazione.

Inoltre, l’ipotesi iniziale di reattore batch, non esemplifica al meglio il corpo discarica.

Con la (3.7), comunque valida nel corpo discarica, si vogliono evidenziare le seguenti osservazioni:

- picco massimo di produzione complessiva di biogas in discarica nell’anno in cui si definisce la coltivazione di quest’ultima, con conseguente importanza nel definire tempestivamente un *capping* permanente su di essa;
- un lento, ma progressivo e inesorabile impoverimento del biogas col tempo, che inizia con la definizione del *capping* permanente.

### 3.2 Risoluzione gestionale della discarica “basse di stura”

L’impoverimento del biogas nel tempo non è un problema trascurabile nella gestione di una discarica. Si è visto nel paragrafo 1.5.1 come la infiammabilità del metano sia possibile solo all’interno del campo stesso, che equivale in condizioni standard al range compreso tra il 5 ed il 15% (per condizioni standard si intende 0°C, 1 atm e in questo caso 21% di comburente). Si è sottolineato, inoltre, come il campo di infiammabilità vari all’aumentare dell’incidenza di gas inerti miscelati con il metano, e come il biogas sia un classico esempio della miscela descritta.

Al livello operativo il 30-35% risulta il limite inferiore del tenore di metano al di sotto del quale non è possibile che avvenga l’innescio in camera di combustione.

Questo limite operativamente restringe gli utilizzi di biogas, in quanto al di sotto di esso non è possibile né una rivalorizzazione energetica del gas, né una combustione in torcia.

L’AMIAT ha arginato questa esigenza con l’utilizzo di un biofiltro, (tecnica ancora in fase di collaudo), che comunque non riesce a chiudere completamente il gap di utilizzo del biogas.

Di seguito si sono schematizzati i range di concentrazione con i rispettivi utilizzi di biogas (Tabella 3.2)

Tabella 3.2 Utilizzi di biogas in funzione della concentrazione di CH<sub>4</sub> nell’impianto oggetto di studio (SF2a\_biogas\_2018\_V12)

Intervalli di concentrazione CH <sub>4</sub>	Utilizzo operativo
0 ÷ 5 %	Possibile emissione atmosferica*

<b>Intervalli di concentrazione CH<sub>4</sub></b>	<b>Utilizzo operativo</b>
5 ÷ 15 %	Biofiltro**
15 ÷ 30 %	/
30 ÷ 100 %	Bruciatore

\*si vuole ricordare come il 5% rappresenti il limite inferiore di infiammabilità in atmosfera del metano.

\*\*il biofiltro, è una tecnica in via di sviluppo nell'impianto studiato, il suo utilizzo è dunque limitato ad alcuni settori e ha piccole portate in ingresso; all'uscita del biofiltro si hanno comunque delle concentrazioni di metano che teoricamente si aggirano al di sotto del 5%.

La sperimentazione della biofiltrazione del gas è condotta utilizzando un biofiltro posto in un cassone scarrabile coperto al quale saranno collegati, attraverso una soffiante, alcuni pozzi con caratteristiche idonee.

Fatte queste premesse, la scelta fondamentale trovata da AMIAT per la gestione della problematica dovuta all'impovertimento di metano è l'aspirazione intermittente di determinati pozzi nei quali si riscontra una concentrazione di metano non adeguata alla combustione.

All'interno dello stabilimento si trovano i pozzi schematizzati per tipologia all'interno della **Tabella 3.3**.

**Tabella 3.3 Numero e tipologia di pozzi di captazione del gas di discarica (SF2a\_ biogas\_2018\_V12)**

<b>Tipo Rete</b>	<b>Tipologia Pozzo</b>	<b>Quantità</b>
Rete Interna	Verticale in crescita	247
	Verticale in crescita con diramazioni integrative orizzontali	
	Verticale in crescita con diramazioni integrative orizzontali e in aspirazione dalla base	
	Trivellati verticali	56
	Trivellati Inclinati	49
	Dreni Verticali	28
	Dreni Scarpata	10
	Duali	6
Rete superficiale	Inclinati perimetrali	108
	Capping Perimetrale	1
	Capping superficiale	9
Altri punti di captazione	Sottotelo	15
	Terminali pozzi verticali aspirazione dalla base	1
	<b>Totale</b>	<b>530</b>

La nuova gestione di captazione intrapresa è stata avviata nel gennaio 2017.

Il lavoro ha la sua base di partenza nell'analisi della serie storica ed attuale dei dati relativi alla condizione dei singoli pozzi provenienti dall'attività di monitoraggio e raccolti sul data-base del software GIS TopStation – SMAD.

La classificazione dei vari pozzi è stata caratterizzata dal seguente studio:

- Analisi della condizione di ogni singolo pozzo nell'arco temporale degli ultimi due anni;
- Classificazione dei pozzi secondo le diverse condizioni;
- Individuazione delle modalità gestionali/operative per le diverse condizioni;
- Monitoraggio specifico per le varie classi di pozzi con misure supplementari per talune classi rispetto alla periodicità indicata in autorizzazione;
- Costruzione della curva caratteristica dei singoli pozzi.

A partire dal 3 aprile 2017 sono state messe in atto nuove modalità gestionali ed operative che fanno riferimento alla seguente classificazione dei pozzi per stato di esercizio:

1. pozzi collegati al sistema di aspirazione “**in continuo**” **pozzi standard**, sono quei pozzi che rispettano contemporaneamente le condizioni di depressione (DP)<1mbar, O<sub>2</sub><5%, CO<100ppm, T<55°C;
2. pozzi collegati “**ad intermittenza**” al sistema di aspirazione i quali, per le loro particolari condizioni di impoverimento, possono risultare sia in depressione sia in pressione:
  - **pozzi set point**, nei quali l'avvio e l'interruzione dell'azione aspirante sono gestiti manualmente in seguito alla verifica della concentrazione di O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> ed in funzione della curva caratteristica del pozzo. Attraverso tale curva saranno definiti i tempi caratteristici di spurgo e di ricarica e di conseguenza il numero e la durata delle azioni aspiranti da effettuare nel corso di un mese.
  - **pozzi in linea rossa**: tale denominazione sarà esclusivamente riferita ai pozzi posti nell'area sud dell'impianto collegati a linee con azione aspirante del gas specificamente realizzate per la gestione ad intermittenza e collegabili al sistema di termodistruzione per combustione in torcia. L'azione aspirante sarà gestita manualmente in modo analogo ai pozzi a **set point**;
3. **pozzi End of Life (EoL)** a fine vita operativa: questa denominazione sarà attribuita a pozzi, attualmente collegati ad intermittenza, nei quali la concentrazione di metano nel gas, su un arco temporale, mostra una situazione di elevato impoverimento del gas con concentrazioni di CH<sub>4</sub> ≤ 5%. In tali pozzi non sarà attivata l'azione aspirante e le valvole di testa pozzo saranno mantenute in posizione “chiuso” aprendole solo per lo spurgo in occasione dei monitoraggi periodici. Dopo un periodo di monitoraggio di un anno con cui viene definitivamente accertato l'impoverimento, si propone la chiusura del pozzo.

La nuova proposta di gestione “ad intermittenza” specifica per i singoli pozzi si è resa necessaria poiché risultano idonee a sfruttare nel modo ottimale l'effetto “ricarica” dei volumi di gas nell'area di cattura di tali pozzi e quindi l'utilizzo produttivo del gas residuo garantendo contemporaneamente la continuità del processo di inertizzazione per combustione del gas stesso.

La nuova gestione prevede monitoraggi specifici per le due principali classi di pozzi:

Luigi Delle Vergini – Flussi di gas clima alteranti emessi da discarica di rifiuti solidi urbani.

- I pozzi “standard” collegati alla rete di aspirazione “in continuo”;
- I pozzi con gestione “ad intermittenza” rappresentati dai pozzi classificati “set point” e “linea rossa”.

Su quest’ultima classe, il monitoraggio prevede l’esecuzione di misurazioni specifica, riportata nel diagramma di flusso sottostante (**Figura 3.1**).

Tale procedura consente di determinare il “tempo di spurgo”, ossia in quanto tempo diminuisce la qualità di gas e aumenta la percentuale di ossigeno; la fine del periodo di spurgo è determinata con la chiusura della valvola del pozzo quando l’ossigeno supera il 5% o il metano risulta essere al di sotto del 5%.

Analizzando le serie storiche dei tempi di spurgo e di ricarica si realizzano le curve caratteristiche del pozzo, che mostrano in forma grafica i cicli completi di ricarica-spurgo, rilevati attraverso il monitoraggio specifico.

Come evidenziato nel diagramma tra le misure statiche vi sono il monitoraggio della temperatura del monossido di carbonio dell’ossigeno e della pressione.

Per quanto riguarda i primi tre fattori la verifica viene attuata per accertarsi che l’ambiente sia in condizioni di sicurezza.

Le condizioni di rischio sono generate da i seguenti parametri:

- $O_2 > 5\%$ ;
- $CO > 100\text{ppm}$ ;
- $T > 55^\circ\text{C}$ .

Passando al monitoraggio della pressione si vuole verificare la pressione che il biogas esercita a bocca pozzo, in modo da controllare che le pressioni di esalazione non superino certi range che comporterebbe delle emissioni diffuse.

A tal proposito si effettuano delle frequenze di monitoraggio differenziate di spurgo, in **Tabella 3.4** si riportano gli intervalli di pressione con le relative frequenze di spurgo.

**Tabella 3.4 Frequenza di monitoraggio in funzione della pressione iniziale (SF2a\_ biogas\_2018\_V12)**

<b>Pressione inizio spurgo</b>	<b>Frequenza esecuzione spurgo</b>
$\Delta P_0 \leq 1$	Mensile
$1 < \Delta P_0 \leq 10$	Quindicinale
$\Delta P_0 \geq 10$	Da sottoporre a manutenzione

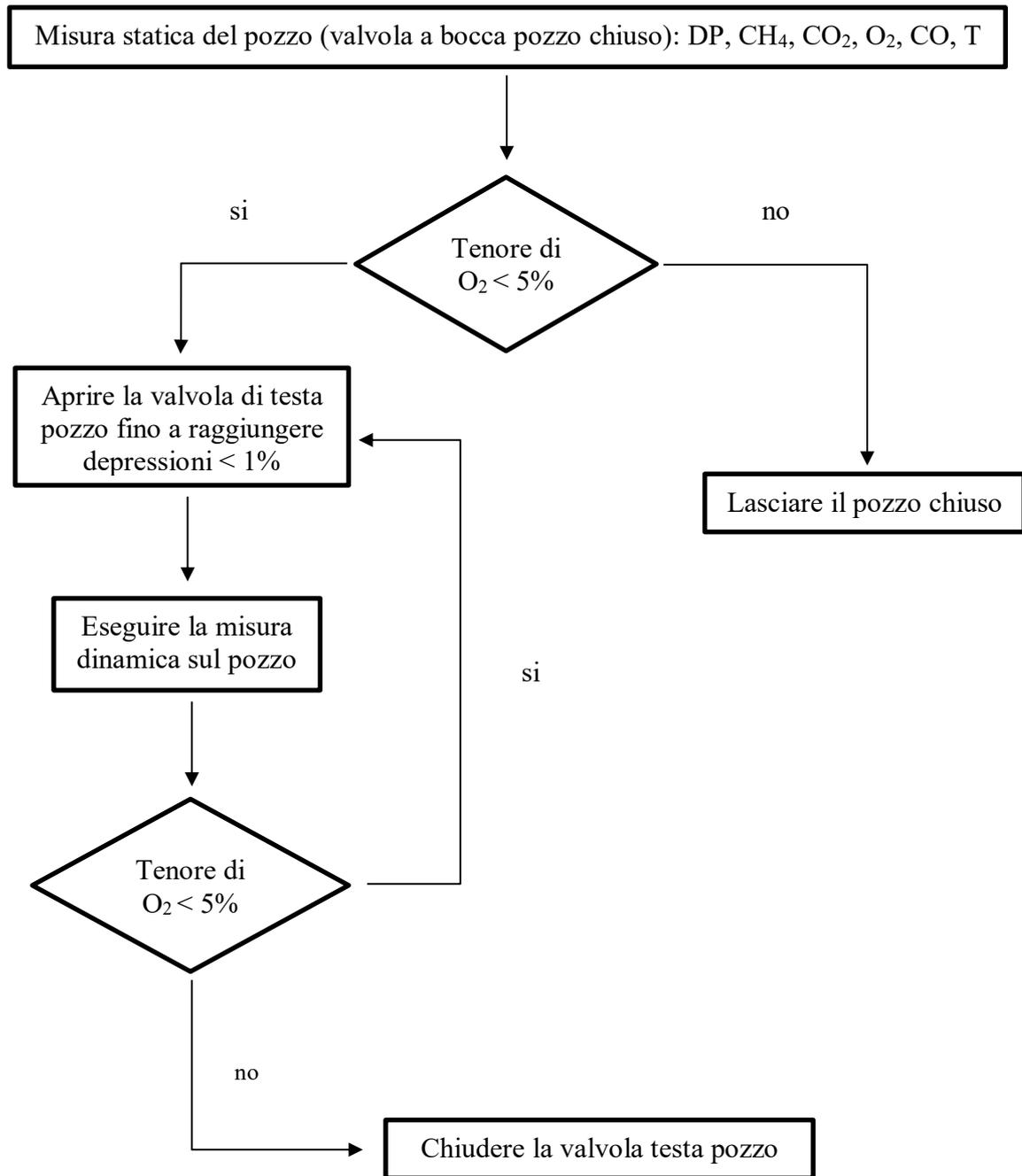


Figura 3.1 Gestione pozzi di estrazione di biogas (SF2a\_biogas\_2018\_V12)

I pozzi che durante l'anno solare precedente hanno rilevato per il 70% delle misure di concentrazione di metano inferiori al 5%, allora sono gestiti come pozzi "End of Life".

Viene, dunque, effettuata una misura al mese per verificare che il tenore di metano sia costantemente inferiore al 5%.

Se il tenore di metano nell'anno di verifica dovesse superare il 5% il pozzo tornerà ad essere gestito ad intermittenza.

Un pozzo classificato "End of Life", rimane con la valvola di aspirazione chiusa, con presa di campionamento per il monitoraggio con frequenza semestrale.

Luigi Delle Vergini – Flussi di gas clima alteranti emessi da discarica di rifiuti solidi urbani.

Questa gestione alternativa dei pozzi impoveriti, ad intermittenza o chiusi per quanto riguarda gli “End of Life”, comporta una maggiore attenzione da parte del gestore alle possibili migrazioni preferenziali.

Il corpo discarica non va più a trovarsi in costante, seppur leggera depressione, ma ritorna ad esercitare una pressione che se non ben arginata scaturisce in flussi migratori di biogas.

## 4 MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI DIFFUSE

La totalità di biogas captata e convogliata alle torce o al bruciatore per il recupero energetico vengono definite emissioni convogliate.

Obiettivo del gestore della discarica è far sì che questa parte di emissioni sia prossima al 100% del biogas prodotto. Operativamente questo è impossibile, basti pensare al biogas che viene disperso in atmosfera durante la coltivazione della discarica.

La sommatoria delle emissioni non convogliate prende il nome di emissioni diffuse, queste, come già detto precedentemente possono essere atmosferiche se riguardano il flusso che fuoriesce dal *capping* superficiale o laterali nel terreno, se si parla di migrazioni attraverso l'impermeabilizzazione perimetrale della discarica.

Un'emissione non controllata di biogas può comportare i rischi e le problematiche affrontate nel paragrafo 1.6.

In generale si può definire il seguente bilancio di massa di biogas in discarica:

$$LFG_{prod} = C_{int} + C_{est} + Em_{sup} + Em_{lat} - Ox \quad (4.1)$$

Con:

- $LFG_{prod}$  = produzione di biogas prodotto in discarica;
- $C_{int}$  = captazione interna alla discarica;
- $C_{est}$  = captazione esterna alla discarica (rete di bonifica);
- $Em_{sup}$  = emissioni diffuse in atmosfera;
- $Em_{lat}$  = emissioni diffuse laterali;
- $Ox$  = biogas ossidato nella parte superficiale della discarica.

Il bilancio descritto è teoricamente giusto, la maggior parte dei componenti, però, non è facile da calcolare in maniera operativa (come si è visto nel paragrafo 3.1 per il calcolo del biogas totale prodotto).

Le uniche componenti realmente calcolabili sono la somma tra  $C_{int}$  e  $C_{est}$  che equivale alla quota parte di biogas captato.

Per quanto riguarda la stima delle emissioni diffuse vanno stabilite delle metodologie di campionamento e misurazione ad hoc, come si vedrà nei paragrafi successivi.

### 4.1 Inquadramento normativo

Nel paragrafo 1.6 si sono evidenziate le problematiche ed i rischi che la produzione di biogas comporta. Onde evitare i rischi descritti sono state legiferate delle prescrizioni normative inerenti al monitoraggio sulle emissioni da discarica, contenute nell'allegato 2, punto 5.4, del D.Lgs n°36 del 2003.

Il punto sopracitato prescrive che “deve essere previsto un monitoraggio delle emissioni gassose, convogliate e diffuse della discarica stessa, in grado di individuare anche eventuali fughe di gas esterno al corpo della stessa discarica”.

Nel capitolo stesso relativo ai Piani di Sorveglianza e Controllo si definiscono “...i livelli di guardia relativamente alla presenza del biogas all'esterno dalla discarica ... un piano di intervento da realizzare ed attivare in caso di superamento degli stessi (livelli di guardia)”.

In tabella si prevedono delle misurazioni delle composizioni di biogas con cadenza mensile durante il periodo operativo della discarica e semestrale nel periodo post-operativo, salvo prescrizioni dell'Autorità competente (ARPA).

Il monitoraggio di gas quali CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> non causando alcun pericolo chimico/biologico, è finalizzato puramente alla sicurezza, ed i livelli di guardia servono a perseguire questo fine.

Per quanto riguarda metano ed idrogeno (infiammabili), per calcolare il livello di sicurezza si considera il LEL, descritto in precedenza, che in condizioni normali equivale rispettivamente al 5% e al 4%.

In letteratura (pubblicazione RECONnet, 2016) il limite soglia consigliato da assumere è del 10% del LEL, e corrisponde dunque a 5000 per il metano e 4000 ppm idrogeno.

L'U.K. EA, e l'U.S. EA assumono come limite di guardia per il CH<sub>4</sub> misurato a valle del pozzo di captazione il 20% del LEL, 10000ppm.

Per la CO<sub>2</sub> il problema di sicurezza è principalmente dovuto all'asfissia data la sua densità maggiore di quella dell'aria, (si è visto nel sottocapitolo **1.5.1**, inoltre, come la presenza di biossido di carbonio tenda a ridurre l'infiammabilità del metano, agendo in qual caso in maniera conservativa).

Sia l'U.K. EA, e l'U.S. EA assumono come limite di guardia il 20% del limite di esposizione professionale (OEL) pari a 6000ppm, risultando pari a 1500 ppm.

Come si è potuto constatare, le due agenzie più all'avanguardia in materia di emissioni in atmosfera sono quella europea e quella inglese. Di particolare importanza è la pubblicazione del l'U.K. EA del 2010 di un manuale, che funge da linea guida generale per quanto riguarda le tecniche di monitoraggio di gas emessi da discarica: “Guidance on monitoring landfill gas surface emissions”.

La linea guida citata è stata poi ripresa nella maggior parte degli stati membri dell'Unione Europea tra cui l'Italia, con delle linee guida di enti pubblici come ARPA e ISPRA.

## **4.2 Monitoraggio delle emissioni di vapori**

Di tecniche per il campionamento di sostanze aeriformi nei siti contaminati ve ne sono diverse, e variano sia per risultati ottenuti che per tipologia di misurazione. Nella tabella che segue sono schematizzate i risultati ottenuti in funzione della tipologia di monitoraggio (**Tabella 4.1**):

Tabella 4.1 oggetto di misura delle diverse tipologie di monitoraggio

Tipologia di monitoraggio	Risultato del monitoraggio
Monitoraggio dei gas interstiziali	Concentrazione nei gas interstiziali
Misure di flusso	Flusso di massa emesso dal suolo
Misure in aria	Concentrazione in aria ambiente

In base allo studio che si vuole effettuare può essere consigliata una tipologia anziché l'altra.

Il monitoraggio di gas interstiziali permette di misurare la concentrazione di sostanze volatili nel mezzo poroso; è una tecnologia ampiamente studiata ed utilizzata nell'ambito delle bonifiche. Presenta, tuttavia, vari limiti applicativi:

- Perturbazione del terreno in fase di perforazione, che tende ad alterare gli equilibri instauratisi;
- Difficoltà nel campionare terreni di bassa profondità (*capping* discarica);
- Non consente di calcolare direttamente i flussi messi in gioco.

L'unica tecnica capace di calcolare direttamente il flusso emesso dal terreno è quella della camera a flusso. Nonostante l'utilità, questa tecnica presenta ancora molti limiti:

- È una tecnica poco sviluppata, e alcune tipologie e metodologie di utilizzo di camere a flusso non sono ancora ben sviluppate;
- L'output di monitoraggio è puntuale, non riesce dunque a mostrare le variazioni di flusso in maniera continua in funzione allo spazio, presenta un output per aree di competenza;
- Non distingue le matrici di contaminazione presenti nel sottosuolo;

La trattazione del monitoraggio con la camera a flusso, che verrà presentata nello specifico in seguito.

Il monitoraggio dell'aria ambiente, invece, presenta meno difficoltà, ma allo stesso tempo ha molti limiti operativi, quali:

- Non consente la distinzione della matrice inquinante, qualora ce ne fosse più di una;
- Risente facilmente di disturbi esterni, soprattutto quelli atmosferici;
- Sono difficili da ricondurre a interventi di bonifica specifici e mirati.

Il *soil gas survey* è la tecnica, come sopra citato più utilizzata nel campo delle bonifiche.

Essa consiste nel campionamento attivo del vapore presente nel mezzo non saturo mediante sonde infisse nel terreno.

Per avere una misura significativa del composto è importante che l'umidità del terreno sia inferiore all'80%.

Vi sono due modalità di campionamento del gas interstiziale:

1. Campionamento attivo, che consiste nell'immissione di piezometri temporanei e/o permanenti nel terreno, e la successiva estrazione di gas attraverso l'utilizzo di pompe. Molto utilizzato, dati i vantaggi di profondità, è il sistema *direct push* per l'infissione del campionatore. L'analisi del gas estratto, una volta effettuata l'operazione di spurgo, può avvenire tramite vari rilevatori portatili come indicato in **Figura 4.1** a seconda del gas che si vuole campionare e della sua concentrazione. È possibile effettuare anche un'analisi in laboratorio del gas estratto.

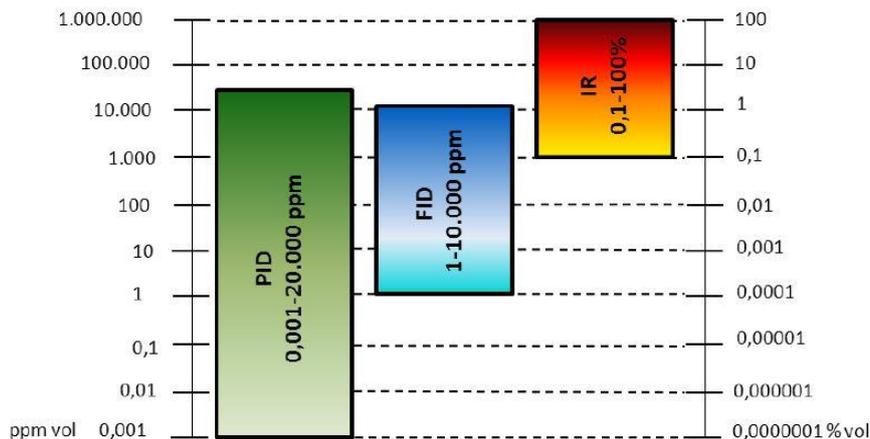


Figura 4.1 Range di rilevabilità della strumentazione portatile

- Il campionamento passivo sfrutta le caratteristiche di materiali adsorbenti (carbone attivo) e la loro capacità di catturare il vapore. Sono passivi in quanto non esercitano una forza catturante, ma la cattura del vapore segue il flusso di adsorbimento naturale con le sue tempistiche. Le analisi delle concentrazioni vengono fatte successivamente in laboratorio.

### 4.3 Parametri che influenzano le emissioni

La presenza di vapori di contaminanti all'interno del mezzo non saturo dipende fondamentalmente dalla volatilità dell'elemento.

Ogni sostanza nel terreno ripartisce la sua massa totale in base alle sue caratteristiche intrinseche in 4 fasi:

- Fase libera, caratteristica di molti inquinanti organici è di essere poco solubile in acqua e di formare una fase stabile ed in equilibrio con le altre che si presenta fisicamente al *top* o al *bottom* dell'acquifero in funzione della sua densità;
- Fase disciolta in acqua, funzione della solubilità del contaminante;
- Fase solida o adsorbita;
- Fase vaporea.

Le quattro fasi sono in equilibrio tra loro, equilibrio perturbabile dalle condizioni a contorno (temperatura, umidità, pressione ecc...).

In particolare la concentrazione in fase vaporea di una sostanza è determinata dalla sua costante di Henry  $H$  [ $\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{mol}$ ], caratteristica intrinseca dell'elemento, che equivale al rapporto di ripartizione della sostanza tra la fase vaporea e quella liquida

$$H^* = C_a / C_w \quad (4.2)$$

$$H^* = H / RT \quad (4.3)$$

Con:

- $C_a$  concentrazione gassosa [ $\text{mol} / \text{m}^3$ ];
- $C_w$  concentrazione liquida [ $\text{mol} / \text{m}^3$ ];
- $H^*$  costante di Henry adimensionale;

- $R$  costante universale dei gas perfetti  $8.2E-5 \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$ ;
- $T$  temperatura assoluta [K].

La ripartizione detta è influenzata da vari parametri ambientali, la quale analisi è fondamentale per una giusta lettura delle misure monitorate.

- **Temperatura**

La temperatura entra direttamente nell'espressione per il calcolo della costante di Henry:

$$H = \exp\left(A - \frac{B}{C - T}\right) \quad (4.4)$$

Si può vedere nell'equazione come la temperatura sia direttamente proporzionale alla costante e quindi allo stesso modo direttamente proporzionale alla ripartizione gassosa dell'elemento.

L'aumentare della temperatura tende a ridurre inoltre l'umidità del terreno aumentando la quota parte di sostanza in fase gassosa, l'emissione di gas viene favorita dalle alte temperature.

- **Pressione**

Dalla pressione sono direttamente correlate le condizioni meteorologiche; ad un'alta pressione corrisponde un'aria calda-umida, meno densa e viceversa.

In condizioni di alta pressione l'aria funge da "inibitore" di flusso riducendo il richiamo advettivo in atmosfera; è di buona norma non effettuare monitoraggi in condizioni di alta pressione.

È opportuno, inoltre, monitorare l'andamento delle pressioni durante le misure, in quanto una rapida variazione porterebbe una falsificazione dell'analisi.

- **Umidità**

Ogni gas ha come sua caratteristica la solubilità, questa per quanto bassa, per gas molto volatili come il metano, comporta un equilibrio tra la fase liquida e quella vapore, con conseguenza una sottostima del flusso di gas.

L'inibizione del flusso è da ricondurre anche ad una limitazione fisica, dovuta alla presenza di acqua nei pori del mezzo non saturo.

Legate all'umidità del terreno vi sono le precipitazioni, si tende, dunque, di eseguire le misure in condizioni di terreno secco, almeno 36 ore dopo l'ultima precipitazione.

- **Vento**

Il vento tende a influenzare le emissioni, poiché riduce la resistenza alla diffusione del gas.

#### 4.4 Monitoraggio delle emissioni laterali di biogas

Il seguente monitoraggio è altresì prescritto dall'articolo 8, comma 1 lettera "i" del D.Lgs 36/03 e finalizzato a misurare le concentrazioni di biogas che migrano lateralmente al corpo di discarica.

Per le soglie di guardia del metano percepito lateralmente al corpo di discarica si vuole far riferimento alle linee guida statunitensi del 2005:

- Nell'area della discarica pari al 25% del LEL (12500 ppm);
- All'esterno della discarica pari al LEL (50000 ppm).

Per determinare le migrazioni di biogas all'interno dell'impianto (esternamente al corpo discarica) si predispose un monitoraggio *soil gas*, con una rete di piezometri dedicata, a cui si associa uno strumento di misurazione portatile, generalmente ad infrarossi (**Figura 4.1**).

#### 4.5 Monitoraggio delle emissioni superficiali di biogas

La copertura superficiale di biogas ha il fine principale di isolare la discarica dall'ambiente atmosferico.

L'isolamento ha un duplice scopo di minimizzare qualunque scambio di massa con l'esterno; oltre a trattenere il biogas all'interno della discarica ha il compito limitare al minimo l'intrusione di masse esterne, fondamentalmente aria ed acqua.

Per quanto riguarda la prima, sono state già discusse i rischi che una miscela metano-aria (in determinate percentuali) comporta.

L'intrusione di acqua nel corpo di discarica è da evitare, in quanto comporterebbe un aumento del battente di percolato nel corpo discarica; le criticità che questo comporta non sono pertinenti allo studio effettuato, ma il percolato rappresenta comunque il problema gestionale di primaria importanza in discarica.

La costruzione di una copertura superficiale finale deve inoltre minimizzare i fenomeni di erosione e resistere ai cedimenti e assestamenti dovuti alla compattazione del rifiuto.

Per i motivi sopra espressi la progettazione del *capping* è stata normata nel D.Lgs 36/03, Allegato 1, nel punto 2.4.3 sono riportati gli spessori e le caratteristiche minime di cui deve essere composto ogni suo strato.

La copertura finale prescritta per legge è costituita da un sistema multistrato così definito (dall'alto verso il basso):

1. Una copertura superficiale di almeno 1 metro di spessore che permetta lo sviluppo di specie vegetali, che hanno il compito di limitare il più possibile l'impatto ambientale e di proteggere dall'erosione e dall'escursione termica la discarica;
2. Uno strato drenante di spessore almeno 0.5 metri che impedisca la formazione di un battente idraulico sulla parte impermeabile sottostante;
3. Uno strato minerale compattato di spessore almeno 0.5 metri e di conducibilità idraulica di inferiore a  $10^{-8}$  m/s, con obbligo di integro di un rivestimento impermeabile solo per le discariche di rifiuti percolosi;
4. Uno strato di drenaggio biogas con spessore minimo di 0.5 metri;
5. Uno strato di regolazione che permetta la corretta disposizione degli strati sovrastanti.

La fuoriuscita di biogas da discarica è implicabile ai seguenti fattori:

- Pressione intrinseca del biogas formatosi nel corpo di discarica;
- Un'interruzione della captazione forzata;
- Delle falle presenti nel *capping*, che fungono da via di fuga preferenziale.

Le condizioni a contorno del fenomeno sono:

- Una forza advettiva;
- Una forza diffusiva.

La prima è governata dalla differenza di pressione che vi è da corpo della discarica e la pressione atmosferica; motivo per cui in condizioni di bassa pressione il “richiamo” atmosferico di biogas è fortemente accentuato.

La forza advettiva può essere espressa dalla legge di Darcy:

$$q_{adv} = \sum \frac{K \frac{\Delta P}{L_i}}{n_{e,i}} C \quad (4.5)$$

Con:

- $q_{adv}$  = flusso advettivo totale passante attraverso il *capping* [kg/s\*m<sup>2</sup>];
- $K$  =conducibilità idraulica dello strato i-esimo[m/s], proporzionale alla permeabilità del solido;
- $\Delta P$  =differenza di pressione presente tra l’interno e l’esterno dello strato i-esimo;
- $L_i$  =lo spessore dello strato di *capping*;
- $n_{e,i}$  =porosità effettiva dello strato di *capping*;
- $C$  =concentrazione trasportata;

La seconda ha come forza spingente la differenza di concentrazione, governata dalla legge di fick:

$$q_{diff} = \sum -D \frac{\Delta C}{L_i} \quad (4.6)$$

Con:

- $q_{diff}$  =flusso diffusivo totale passante attraverso il *capping* [kg/s\*m<sup>2</sup>];
- $D_i$  =coefficiente di diffusione [m<sup>2</sup>/s], dipendente dalle proprietà fisiche del gas e dalla viscosità del mezzo;
- $\Delta C_i$  =la differenza di concentrazione.

Valutare l’entità delle emissioni diffuse ha un duplice fine:

- Localizzare i punti di discontinuità presenti sulla copertura superficiale;
- Quantificare le emissioni totali.

Per il monitoraggio delle emissioni superficiali del corpo discarica le procedure sono diverse; la parte di mezzo non saturo del *capping* di rado supera il metro ed una perforazione potrebbe danneggiare l’impermeabilizzazione. Non è inoltre necessario stratificare il campionamento lungo la verticale del terreno, è dunque superfluo adoperare la tecnica del *soil gas*. Per le emissioni in atmosfera, data l’estensione superficiale di una discarica, risulta difficile un monitoraggio continuo.

Si possono adoperare per le misurazioni metodi diretti ed indiretti; una buona prassi è quella di combinare le due metodologie, cosicché l’una possa validare l’altra.

#### **4.5.1 Monitoraggio indiretto con termografia aerea**

Nel capitolo 1 si è sottolineato come la fermentazione del rifiuto in discarica sia un processo esotermico.

Il calore prodotto insieme al biogas se mal captato o se vi sono presenti delle falle sulla copertura finale rappresenta una “impronta termica” sul terreno

L’analisi termografica è metodo di misura finalizzato a determinare le alterazioni termiche presenti sulla superficie della discarica.

L’emissione di biogas, dunque, viene ricondotta ad emissioni termiche dovute al processo fermentativo.

Tale metodologia consente:

- Una valutazione in tempi brevi delle dissipazioni termiche della discarica, che in quanto pressoché istantanea non condizionata da oscillazioni barometriche;
- Di definire le superfici isoterme;
- Di ricondurre l’energia termica dissipata in flussi di biogas emesso.

Il limite di tale tecnologia è quello di valutare indirettamente il flusso di gas emesso dalla discarica: la “impronta termica” rilevata non implica propriamente l’assenza di flusso; il biogas può aver ceduto calore nell’intrusione nel mezzo poroso.

#### **4.5.2 Monitoraggio diretto con camera di flusso**

La tecnologia più utilizzata per il monitoraggio risulta essere la camera di flusso; essa è utilizzata come volume di controllo nel quale avviene il campionamento.

Si vuole isolare il volume adiacente al terreno dell’area selezionata, per risentire in maniera minimale delle perturbazioni atmosferiche.

Il flusso via via emesso viene accumulato in camera, sì da permettere il campionamento; l’evoluzione delle concentrazioni catturate viene successivamente analizzata e ricondotta ad un flusso di vapore emesso dal terreno.

La tecnica è stata sviluppata negli anni ’50 ed è ampiamente utilizzata nell’ambito agrario ed a partire dagli anni ’80 l’USEPA (United States Environmental Protection Agency) l’ha utilizzata per le emissioni di emissioni pericolose nel campo della bonifica.

La metodologia non è ancora diffusa in Europa, è stata, infatti, recepita nel vecchio continente dall’UK Environmental Agency nel 2010 nell’ambito di siti contaminati, ma non è stata ancora regolamentata univocamente.

La linea guida inglese, sopra citata, è stata recepita solo pochi anni fa dagli Enti di controllo italiani di molte regioni, ARPA Piemonte, ARPA Reggio-Emilia, ISPRA.

Le camere di flusso hanno le geometrie più disparate, il loro funzionamento è relativamente semplice e hanno il compito di isolare il volume di controllo; tra gli accorgimenti produttivi di una camera, presi per adempiere nel miglior modo possibile al suo compito si annovera:

1. Un volume interno non troppo elevato, così da evitare volumi morti all’interno di essa (per questo fine è possibile anche installare una ventola al suo interno con le implicazioni che verranno discusse successivamente);
2. Un ancoraggio stabile che non consenta una fuoriuscita di contaminante;

3. L'utilizzo di materiali per la fabbricazione inerti, impermeabili e non reattivi con il contaminante che si vuole analizzare;
4. Che contenga le adeguate prese di campionamento.

Le modalità di utilizzo della camera di flusso sono varie, e dipendono dallo studio che si vuole effettuare.

Le camere, innanzitutto, possono essere utilizzate in regime stazionario o non stazionario (transitorio), in base a cosa si vuole calcolare la concentrazione asintotica a cui tende l'emissione o la variazione di concentrazione interna.

Una ulteriore classificazione è tra camere dinamiche e statiche, le prime presentano un gas inerte convogliato all'interno di esse, con il fine di creare un flusso verso il punto di campionamento, l'assenza del detto gas inerte rappresenta la seconda configurazione.

È possibile, infine, definire camere aperte e chiuse, in funzione dell'apertura o della chiusura di un *vent*, che permette una comunicazione con l'ambiente esterno; l'apertura del *vent* consente di evitare variazioni di pressione tra l'interno e l'esterno (ambiente) della camera, e, dunque che vi siano delle depressioni o sovrappressioni dovute al sistema di campionamento.

Il discorso, fatto per il *soil gas* sul campionamento attivo o passivo persiste anche nella camera di flusso. È dunque possibile un campionamento in situ, ex situ.

Il primo prevedono l'utilizzo di una strumentazione portatile che permette in tempo reale di avere i risultati dell'indagine.

La seconda richiede una captazione in loco e un'asportazione in laboratorio; in funzione della tecnica di prelievo si passa da un campionamento attivo ad uno passivo: il primo prevede un prelievo di tramite una depressione istantanea del contaminante (es. siringa) il secondo prevede l'utilizzo di un materiale adsorbente (carboni attivi).

In configurazioni statiche non stazionarie la concentrazione in camera aumenta un primo momento in maniera lineare e tenderà ad un asintoto dopo un tempo tale da saturare il volume della camera; si è detto come la forza spingente principale sia quella diffusiva, diminuendo col tempo il gradiente di concentrazione tende a diminuire il flusso emesso.

Le misurazioni delle concentrazioni in camera in situ possono avvenire in continuo od in discontinuo a seconda della strumentazione che si utilizza.

A seguire sono presentate le due configurazioni che più adatte al monitoraggio dei flussi (entrambe le configurazioni sono da considerarsi aperte):

1. L'utilizzo di un rilevatore non distruttivo come infrarossi e/o PID (fotoionizzatore) il monitoraggio avviene con la reimmissione del gas prelevato per il campionamento.

Lo schema della configurazione scelta è mostrato in **Figura 4.2**.

Le misure in questo caso si effettuano in continuo, in quanto non si fa reagire il contaminante, ed il bilancio di massa delle suddette configurazioni risulta essere:

$$V \left( \frac{dc}{dt} \right) = \Phi A \quad (4.7)$$

Con:

- $V$  il volume della camera [ $\text{m}^3$ ];
- $\frac{dc}{dt}$  la differenza di concentrazione dovuta all'accumulo [ $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ ];

- $\Phi$  il flusso emesso [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ];
- $A$  superficie di base della camera (inserita nel terreno) [ $\text{m}^2$ ].

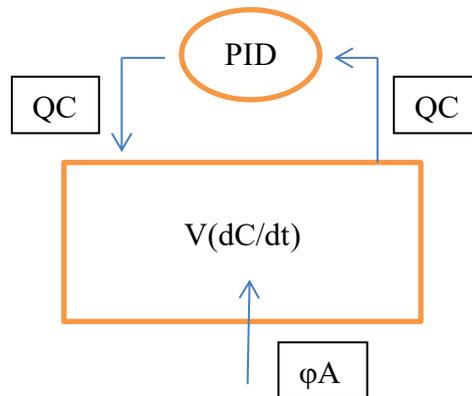


Figura 4.2 Schema camera di accumulo

Il flusso risulta direttamente proporzionale alla variazione della concentrazione nel tempo e ad un fattore geometrico, l'altezza della camera.

La variazione di concentrazione nel tempo si ricava al livello grafico con l'interpolazione da parte di una curva.

Come visto in precedenza l'aumento di concentrazione segue una legge lineare in un primo momento per poi stabilizzarsi in un asintoto; una variazione si definita è interpolabile:

- Linearmente;
- Esponenzialmente;
- Tramite l'utilizzo di metodi numerici.

Nell'articolo pubblicato da Levy et al. del 2011 è stato effettuato uno studio sull'incertezza che i vari metodi comportano.

Tra le interpolazioni presenti in letteratura quelle di principale interesse si sono rivelate quella lineare, la HM (Hutchinson & Mosier, 1981), rappresentata da un'esponenziale negativo, e l'NDFE (*Non-steady-state diffusive flux estimator model*, Livingston et al., 2006).

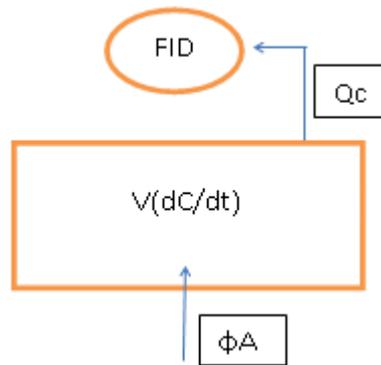
Dalla comparazione dei modelli quello con le percentuali di interpolazione migliori è risultato il lineare, soprattutto per flussi modesti e pochi punti di campionamento (come nel caso studio).

Le altre due metodologie, nonostante rappresentino meglio l'andamento delle variazioni delle concentrazioni dovute ad un flusso diffusivo hanno riportato percentuali minori in quanto meno flessibili all'adattamento di rumore e un numero limitato di campioni (HM) e della possibile presenza di flussi diffusivi orizzontali (NDFE).

2. L'utilizzo di un rilevatore distruttivo (FID) comporta, se si effettua un campionamento in continuo un impoverimento del tenore di contaminante all'interno della camera; la seguente riflessione provocherebbe inevitabilmente una sovrastima del flusso emissivo reale.

È comunque possibile utilizzare questa tipologia di rilevatore in maniera discontinua, prelevando campioni ogni intervallo di tempo prestabilito.

Lo schema della configurazione è riportato in **Figura 4.3**.



**Figura 4.3** Schema camera statica non stazionaria aperta

Il bilancio di massa risultante coincide con quello espresso precedentemente (4.7); medesime sono le considerazioni sull'interpolazione effettuate successivamente.

Per la risoluzione della (4.7) si è partiti dall'ipotesi di reattore perfettamente miscelato; per concretizzare tale ipotesi si inserisce una ventola all'interno della camera che permetta di rendere omogenea la concentrazione nel volume di controllo. I flussi in gioco in discarica, diversamente da quelli presi nell'ambito agrario, sono molto modesti, l'uso di una ventola può inibirli; si può ovviare, alternativamente, alla stratificazione di concentrazione attraverso l'utilizzo di un campionamento lungo l'altezza della camera.

## 5 CASO STUDIO

Il lavoro di valutazione delle emissioni di metano superficiali in discarica è stato effettuato presso la discarica “Basse di Stura” gestita da AMIAT.

Lo studio è stato effettuato su due porzioni di due differenti lotti:

- Lotto 1B (AREA 1);
- Lotto Sommitale (AREA 2).

Il lavoro di valutazione è stato eseguito secondo le indicazioni raccolte nella Linea guida inglese sopracitata ed è stato sviluppato nei seguenti punti:

1. *Desk study*: uno studio preliminare delle caratteristiche costruttive e delle modalità operativa della rete di captazione di biogas, finalizzata ad orientare le analisi delle misure campionate;
2. *Walkover survey*: una campagna di campionamento delle concentrazioni a piano campagna qualitativa, importante per le rilevazioni di eventuali discontinuità da cui partire per il sistema di misurazione successivo;
3. *Flux box survey*: una campagna di campionamento quantitativo dei flussi emessi dal corpo di discarica superficialmente;
4. Elaborazione finale delle misure campionate con relative riflessioni basate dai risultati dei punti precedenti.

### 5.1 Desk study

L’osservazione preliminare delle caratteristiche costruttive e gestionali dell’impianto è un passaggio fondamentale per la valutazione dei flussi misurati.

Le aree interessate al monitoraggio sono evidenziate in **Figura 5.1** e sono interessate allo studio preliminare di *desk study*.

Le aree prese in esame sono state volutamente scelte con periodi di coltivazione differente; ciò comporta caratteristiche costruttive diverse data l’evoluzione della tecnologia e delle normative a riguardo.

La Norma EA suddivide le aree dotate di copertura superficiale differente in “zone” e le “anomalie emissive” presenti nell’area come “feature”.

Essendo lo studio riferito ai soli due lotti rappresentati in **Figura 5.1** ed essendo entrambi i lotti caratterizzati interamente da una sola “zona” lo studio valuterà principalmente la presenza di “anomalie emissive”.



Figura 5.1 Inquadramento del sito

### 5.1.1 AREA 1

Il lotto 1B è situato nell'estremo est della discarica ed è stato coltivato nell'intervallo di tempo compreso tra il 03/07/1995 e il 29/11/2001.

Il rifiuto stoccato nel lotto comprende il 69% di RSU, il 23% di fanghi ed il restante 8% di RSA, in **Tabella 5.1** è riportato lo storico dei quantitativi di rifiuti stoccati all'interno del lotto.

Il *capping* permanente è stato definito il 31/01/2004, ma nonostante la data di costruzione successiva al D.Lgs 36/03 la sua progettazione è precedente dunque non rispetta i vincoli mostrati nel paragrafo 4.5.

La progettazione della copertura sommitale è stata eseguita in assenza di una norma specifica seguendo le "linee guida per le discariche controllate di RSU" pubblicato da CISAA nel 1997.

Il *capping* risultante, mostrato in **Figura 5.2**, non contiene telo in HDPE (non previsto tuttora dalla normativa aggiornata di riferimento).

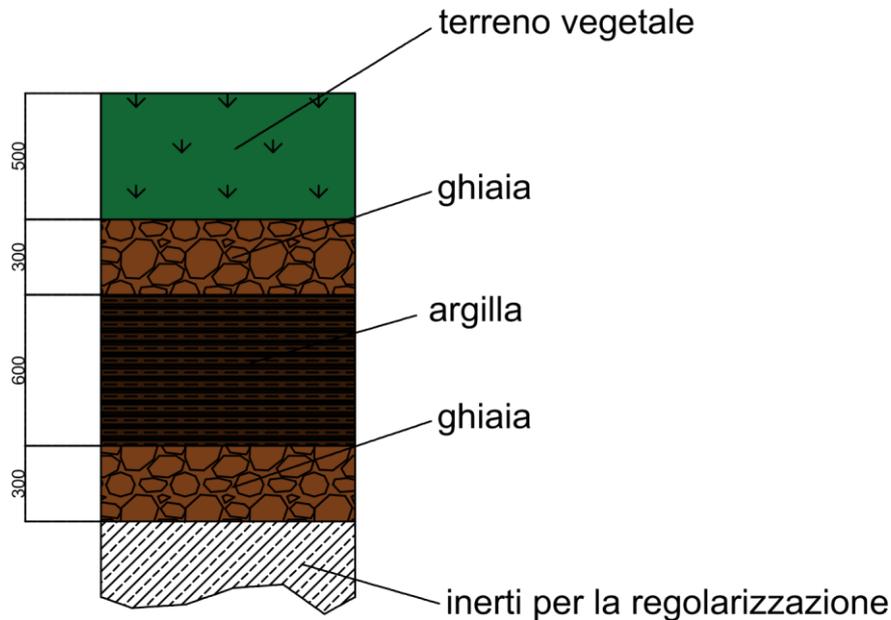


Figura 5.2 Capping lotto 1B

Tabella 5.1 Quantitativo di rifiuto stoccato all'interno del lotto 1B

Anno	RSU [t]	RSA [t]	FANGHI [t]	Totale
1996	245234	31239	49661	326134
1997	551199	48681	211966	811847
1998	157077	23947	76400	257424
1999	8548	1323	2009	11880
2000	63337	10558	13060	86955
2001	135521	21388	29615	186525
<b>Totale Lotto 1B [t]</b>	<b>1160916</b>	<b>137137</b>	<b>382712</b>	<b>1680765</b>
<b>% rispetto al tot</b>	<b>0.69</b>	<b>0.08</b>	<b>0.23</b>	<b>1</b>

Nell'area presa in esame sono presenti inoltre 8 pozzi verticali, sviluppati parallelamente con lo stoccaggio del rifiuto, 6 pozzi trivellati una volta conclusa la coltivazione del lotto e 1 pozzo duale per l'estrazione simultanea di percolato e biogas.

La modalità di captazione, paragrafo 3.2, è eterogeneo e sono vi è la presenza di 4 pozzi standard e 11 pozzi Set Point (Tabella 5.2).

Tabella 5.2 Descrizione dei pozzi interni all'AREA 1

ID pozzo	Tipologia	Captazione
1402	Verticale	Standard
1408	Verticale	Set Point
1409	Verticale	Standard
1410	Verticale	Set Point

<b>1412</b>	Verticale	Set Point
<b>1407</b>	Verticale	Set Point
<b>1413</b>	Verticale	Standard
<b>1411</b>	Verticale	Set Point
<b>TR1</b>	Trivellato verticale	Set Point
<b>TR3</b>	Trivellato verticale	Set Point
<b>TR2</b>	Trivellato verticale	Standard
<b>TR4</b>	Trivellato verticale	Set Point
<b>TR5</b>	Trivellato verticale	Set Point
<b>TR8</b>	Trivellato verticale	Set Point
<b>PD8</b>	Duale	Set Point

### 5.1.2 AREA 2

L'area 2 rientra completamente nel Rimodellamento del Lotto Sommitale, l'ultimo lotto coltivato della discarica.

La coltivazione di questo lotto è stata circoscritta in circa sei mesi dal 13/07/2009 al 31/12/2009, e le incidenze dei vari rifiuti sono del 69% per gli RSU, 0.29% per gli RSA e 0.10% per i fanghi di supero. In **Tabella 5.3** è rappresentata la totalità di rifiuti conferiti nel lotto sommitale e nel rimodellamento del 2009.

**Tabella 5.3 Quantitativo di rifiuto stoccato nell'intero Lotto Sommitale**

<b>Anno</b>	<b>RSU [t]</b>	<b>RSA [t]</b>	<b>FANGHI [t]</b>	<b>Totale</b>
<b>2009</b>	371388	174339	60955	606682
<b>% rispetto al tot</b>	0.69	0.29	0.10	1

La copertura superficiale finale è stata conclusa il 06/10/2013 e rispetta le prescrizioni del D.Lgs 36/03 con l'aggiunta di un telo in HDPE al di sopra dello strato d'argilla, per migliorare le caratteristiche di impermeabilità del *capping*, come evidenziato in **Figura 5.3**.

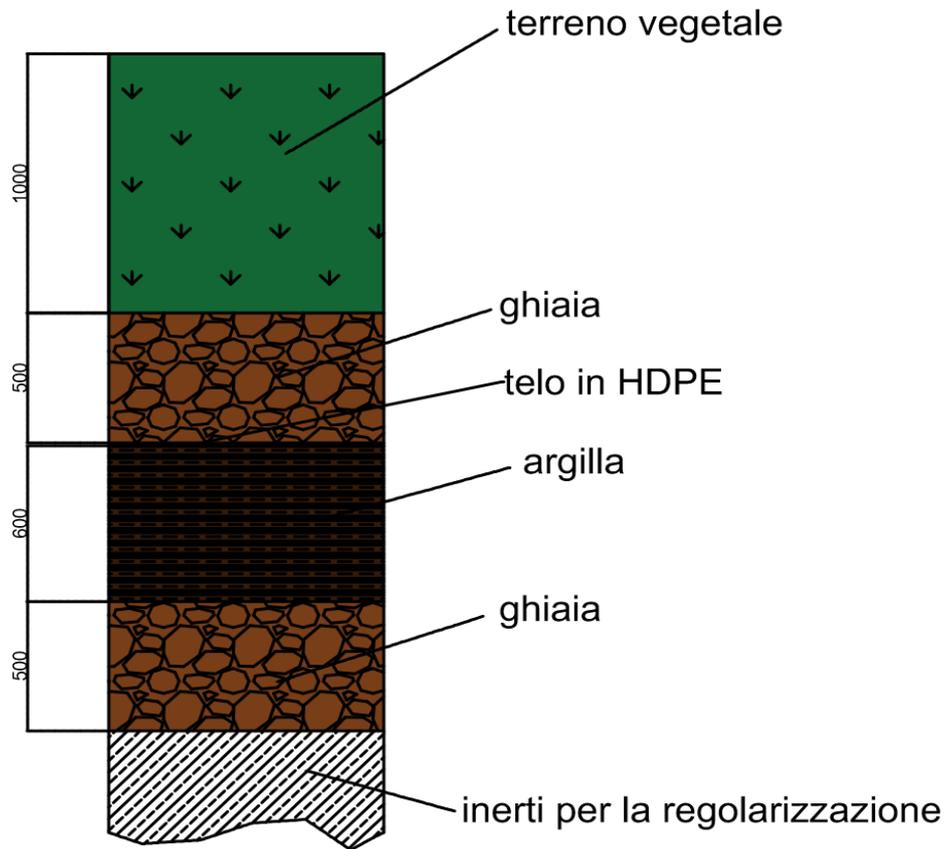


Figura 5.3 Capping lotto Sommitale

Nell'area ci sono 10 pozzi verticali con modalità di captazione disparata, che comprende, 4 Standard, 4 Set Point e 2 End of Life (**Tabella 5.4**).

Tabella 5.4 Descrizione dei pozzi interni all'AREA 2

ID pozzo	Tipologia	Captazione
767	Verticale	Set Point
772	Verticale	Standard
768	Verticale	Set Point
773	Verticale	End of Life
774	Verticale	Set Point
778	Verticale	Standard
712	Verticale	Set Point
769	Verticale	Standard
775	Verticale	Standard
779	Verticale	End of Life

## 5.2 Walkover survey

Durante la *Walkover Survey* si effettua una prima valutazione qualitativa dello stato del *capping* tramite il campionamento delle concentrazioni sul piano campagna.

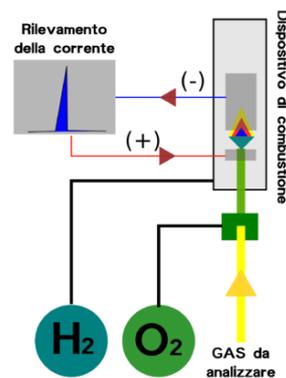
Le misurazioni, dunque, hanno lo scopo di localizzare eventuali e potenziali hot-spot di esalazione di biogas.

La strumentazione utilizzata per la rilevazione di concentrazione è un FID (*flame ionization detector*) portatile.

Il rivelatore a ionizzazione di fiamma è un gascromatografo utilizzato per il rilevamento di composti organici. Questo è un tipo di detector distruttivo, che utilizza una fiamma ad idrogeno/aria per ossidare il composto organico volatile da campionare.

I composti organici pirolizzati ad alte temperature liberano ioni, che causano una differenza di potenziale tra l'ugello del bruciatore e l'elettrodo posto a valle della fiamma.

Il segnale elettrico prodotto che ha come output la concentrazione di composti organici volatili (VOC) totali come ppm di metano. Il funzionamento è stato schematizzato in **Figura 5.4**.



**Figura 5.4** Schema di funzionamento di un FID

Il FID portatile utilizzato per il campionamento in campo permette di misurare un range concentrazione che va dagli 0 ai 10000 ppm, con una frequenza di 1 Hz, e contiene un GPS integrato.

Al fine di garantire una ricerca puntuale di possibili vie preferenziali e di fuoriuscita del biogas non captato, è stato deciso un interesse tra le linee di misura di 2 m ed una velocità di spostamento dell'operatore di circa 1 m/s. La frequenza di campionamento di 1 Hz dello strumento unite ai parametri sopracitati garantisce l'acquisizione di un dato rappresentativo di un'area di circa 2 m<sup>2</sup> (1 misura ogni 1 m di avanzamento e 2 metri laterali). Al fine di minimizzare l'interferenza del vento nell'acquisizione del dato la sonda di campionamento viene mantenuta ad un'altezza dal piano campagna compresa tra 0 e 5 cm.

Per entrambe le aree verranno riportate le condizioni meteorologiche, registrate nella stazione interna allo stabilimento AMIAT, con frequenza di campionamento 10 minuti, in quanto le concentrazioni registrate, per quanto non riconducibili a dei flussi di biogas, sono funzione di queste ultime.

Tra i parametri climatici monitorati quello di maggiore importanza è il vento, in particolare la sua direzione, in quanto è il vettore principale del *plume* di metano in atmosfera, e nonostante il monitoraggio è stato fatto nella distanza raccomandata dalle linee guida è sempre possibile che ci siano delle interferenze.

### 5.2.1 Walkover survey AREA 1

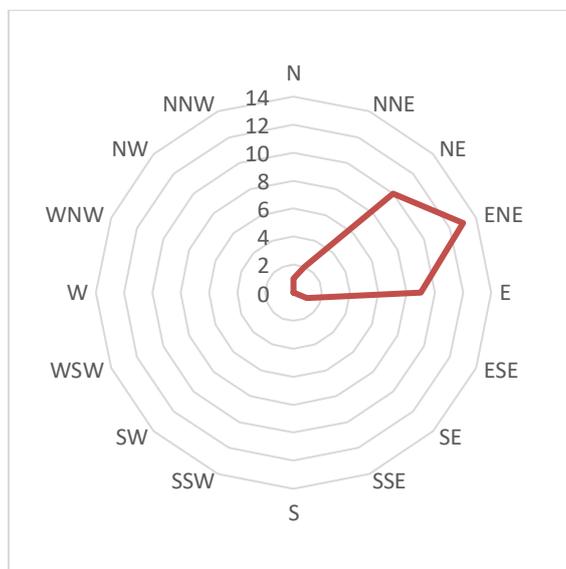
In data 26/10/2018 è stata effettuata la *walkover survey* sull'AREA 1.

Come riportato sulle linee guida inglesi si sono monitorate le condizioni metereologiche durante la campagna di acquisizione (**Tabella 5.5**), non si sono percepite forti variazioni di pressione durante la misurazione.

**Tabella 5.5** Condizioni meteo medie registrate durante il walkover survey del giorno 26/10/2018

Data	Temperatura (°C)	Pressione (hPa)	Umidità (%)	Velocità del vento (m/s)	Direzione del vento
26/10/2018	17	982	77	0.95	ENE

Insieme ai valori sopra riportati, la stazione monitora la direzione del vento, che è risultato proveniente da NE/ENE, come riportato in **Figura 5.5**



**Figura 5.5** Direzione risultante del vento nelle ore di monitoraggio nel 26/10/2018

In **Figura 5.6** è rappresentata la dispersione spaziale delle concentrazioni monitorate durante la campagna.

La mappa evidenzia due principali zone di emissione: la prima più concentrata nell'intorno del pozzo **TR4**; la seconda più che si sviluppa nella zona sud-ovest del pozzo **1410**.

Per quanto concerne la prima zona ha un picco in prossimità del pozzo **TR4** con concentrazioni che superano i 100 ppm, le concentrazioni decrescono gradualmente spostandosi in direzione sud ovest e si azzerano ad una distanza dell'ordine del metro.

La seconda zona si sviluppa nell'intorno del pozzo **1410** e spostandosi in direzione sud/sud-ovest da questo; in particolare in corrispondenza del pozzo si sono riscontrate misure che superano i 300 ppm, in direzione ovest le concentrazioni sono scese sui 100 ppm per poi azzerarsi, mentre spostandosi in direzione sud si sono riscontrati valori compresi tra 1 ppm e 50 ppm.

Si può notare come in entrambe le aree il picco nell'intorno del pozzo si sia diluito in direzione sud-ovest, la direzione opposta di quella di provenienza ventosa; è possibile, dunque, che le misure abbiano risentito seppur in minima parte dell'influenza del vento (per quanto questo soffi con un'intensità minore del metro al secondo). Le concentrazioni riscontrate sono comunque state considerate integralmente per la stesura della griglia della camera di flusso.

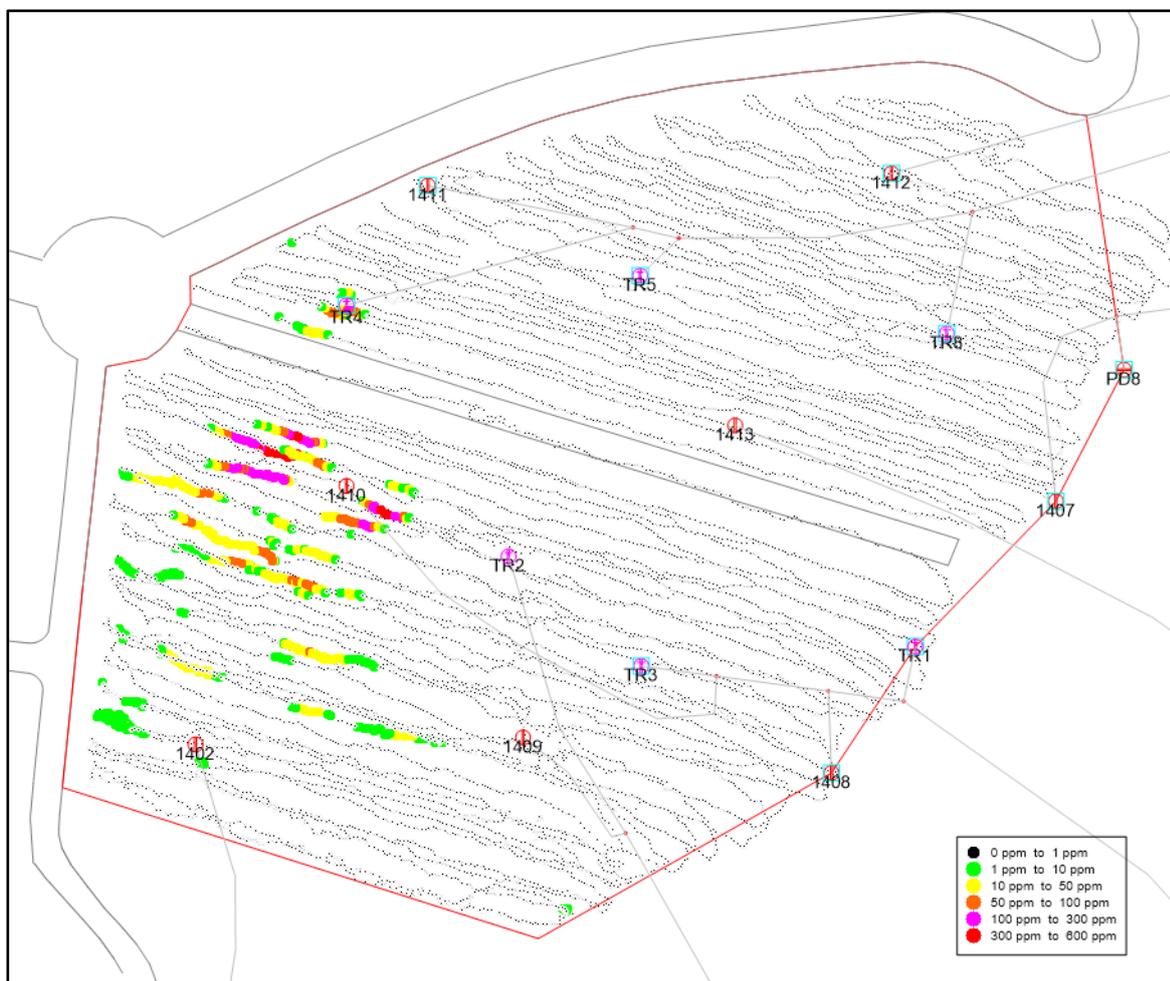


Figura 5.6 Walkover survey AREA 1

### 5.2.2 Walkover survey AREA 2

In data 29/01/2019 è stata effettuata la *walkover survey* sull'area 2.

Come per l'area, si sono monitorate le condizioni meteorologiche (Tabella 5.6), con particolare attenzione della direzione ventosa, la cui media risulta proveniente da SW/SSW (Figura 5.7)

Tabella 5.6 Condizioni meteo medie registrate durante il walkover survey del giorno 29/01/2019

Data	Temperatura (°C)	Pressione (hPa)	Umidità (%)	Velocità del vento (m/s)	Direzione del vento
29/01/2019	5	976	40	0.93	SSW

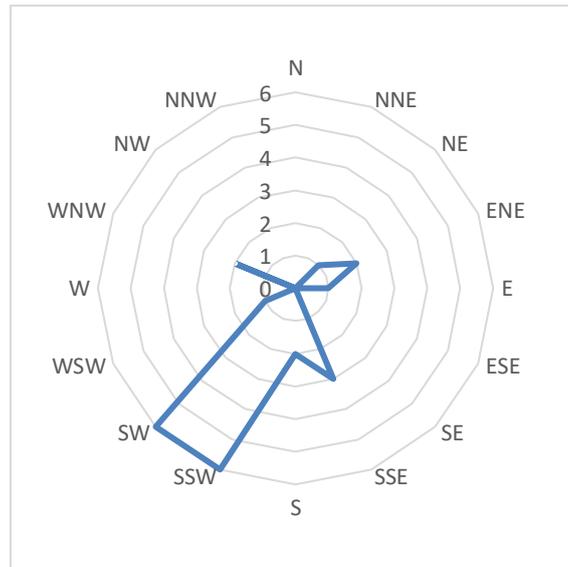


Figura 5.7 Direzione risultante del vento nelle ore di monitoraggio del 29/01/2019

In **Figura 5.8** è rappresentata la dispersione spaziale delle concentrazioni monitorate durante la campagna.

Non vi sono concentrazioni rilevate significative, i due punti che hanno rilevato concentrazione diversa da 0 (pari ad 1 ppm) sono stati comunque presi in considerazione per la messa a punto della *Flux Box Survey*, con l'aggiunta di un ventisettesimo punto di campionamento dedicato (come si potrà vedere nel paragrafo successivo).



Figura 5.8 Walkover survey AREA 2

### 5.3 Flux box survey

L'impiego di un volume di controllo, nel quale accumulare la concentrazione del composto di interesse per il calcolo del suo flusso è possibile solo dopo una discretizzazione preliminare dell'area di interesse.

Seguendo le linee guida inglesi e italiane (UK Environmental Agency, 2010 e ISPRA, 2018), si è definito il numero di punti di campionamento necessari per ogni area investigata.

Le aree analizzate hanno superficie superiore ai 5000 m<sup>2</sup> e il numero di punti minimi da monitorare è stato calcolato dalla seguente espressione:

$$n = 6 + 0.15\sqrt{Z} \quad (5.1)$$

Con  $Z$  che rappresenta la superficie dell'area oggetto di studio.

La discretizzazione dell'area nelle sottozone risultanti è stata effettuata utilizzando i *Diagramma di Voronoi*.

I *poligoni di Thiessen*, risultanti dal sopracitato diagramma, sono il luogo di punti che, dato un numero di punti fissato  $P$ , per ogni  $p$  appartenente a  $P$  risultino essere i più vicini al punto  $p$  più che ad ogni altro punto presente in  $P$ .

Il funzionamento della suddetta metodologia e le varie configurazioni sono state trattate nel sottoparagrafo 4.5.2.

Per lo specifico caso studio e in seguito ad un confronto con la letteratura presente in riferimento al monitoraggio delle emissioni diffuse nelle discariche (Witkamp, 1969; Kucera and Kirkham, 1971; Kanemasu et al., 1974; Luo e Zhou, 2006 e Virgili et al., 2008), è stata scelta la camera **Statica Non Stazionaria Aperta**.

In viene riportato lo schema di funzionamento considerando un flusso emissivo costante durante l'intervallo di tempo necessario ad effettuare le misure.

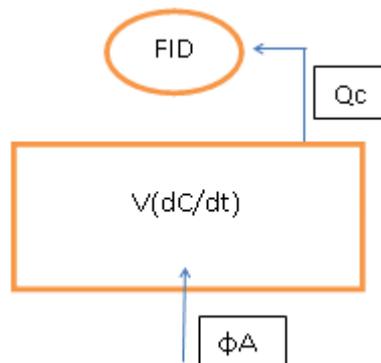


Figura 5.9 Schema funzionamento Camera Statica Non Stazionaria

L'applicazione di questa configurazione comporta l'equazione di bilancio di massa presentata nell'equazione (4.7), in cui  $V$  corrisponde al volume della camera,  $C$  indica la concentrazione misurata tramite il FID,  $\Phi$  è il flusso e  $A$  è l'area di suolo isolata dalla camera.

Il flusso risulta essere direttamente proporzionale alla variazione della concentrazione nel tempo e ad un fattore geometrico determinato dal rapporto tra il volume della camera e la superficie di suolo isolata dalla stessa.

Le misure di concentrazione all'interno della camera sono state prese in maniera discontinua per 10 secondi ogni 10 minuti per 30 minuti, per un totale di 4 misure per ogni punto.

L'evoluzione temporale della concentrazione si è ottenuta è stata interpolata linearmente, in quanto studi di letteratura è stato dimostrato come questa sia l'interpolazione più robusta dati anche i flussi modesti attesi (Bertora et al. 2018 e Levy et al. 2011) per calcolare la derivata della concentrazione nel tempo espressa nell'equazione 4.7.

Le condizioni meteorologiche hanno una forte influenza sulle misure effettuate con la camera di flusso, è opportuno dunque isolare nel miglior possibile il volume delle camere durante la costruzione della camera; un secondo accorgimento preso è stato mantenere la camera in ombra per non variare la temperatura all'interno durante il campionamento.

Si è evidenziato nel paragrafo 4.5 come il processo di emissione abbia come forze motrici la differenza di pressione e quella di concentrazione.

Per quanto riguarda la prima si è monitorato che le variazioni di pressione durante la misura siano minime. La pressione media riscontrata è di poco inferiore a quella calcolata analiticamente il 15 e il 16 novembre giorno della campagna sull'AREA 1 e leggermente superiore al quella calcolata il 30 gennaio sull'AREA 2.

L'apertura della valvola del *vent* durante la prova e il campionamento discontinuo del gas hanno ovviato al rischio di incorrere in leggere depressioni all'interno della camera.

Per quanto riguarda la conducibilità advettiva e la diffusività, entrambe le costanti sono fortemente influenzate dai seguenti fattori:

- Umidità del suolo, pioggia e gelo: il contenuto di acqua nel mezzo causa un'occlusione dei pori ed una relativa diminuzione di flusso che lo attraversa. In caso di precipitazione atmosferica si preferisce campionare almeno 2 giorni dopo in modo da avere un terreno possibilmente secco. In caso di umidità del suolo e temperatura al di sotto dello zero c'è il rischio di incorrere nel terreno gelato che andrebbe a minimizzare se non azzerare i flussi, oltre l'impedimento fisico con il contenuto di acqua nel suolo aumenta anche la quota parte di gas che tende a solubilizzarsi (anche se il metano è poco solubile);
- Vento: nei giorni fortemente ventosi si riduce la resistenza alla diffusione esercitata, in quanto la concentrazione viene velocemente trasportata altrove, è necessario dunque effettuare le misure con intensità di vento minori dei 3 m/s;
- Temperatura: la temperatura è il fattore che più influenza il flusso emissivo, tanto da renderlo stagionale.

I fattori di influenza ambientale vanno ad identificare un'elevata variabilità stagionale dei flussi emessi, e dunque la necessità di ripetere la misurazione almeno 2 volte in stagioni opposte durante l'anno.

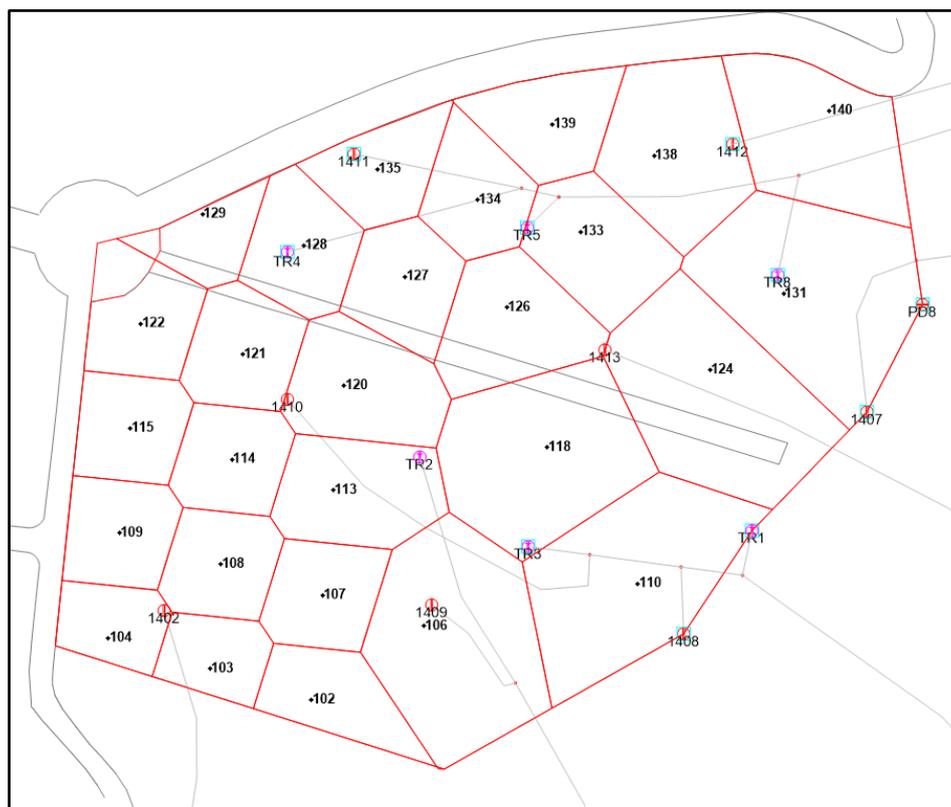
### 5.3.1 Flux box survey AREA 1

In data 15 e il 16 novembre 2018 è stata eseguita la campagna con la *Flux Box* sull'AREA 1.

Come indicato dalle linee guida inglesi è stata applicata l'equazione (5.1) per il calcolo del numero di punti di campionamento, ponendo  $Z$  pari a circa 1,8 ettari, che è risultato essere pari a 27.

La distribuzione delle 27 aree all'interno del lotto interessato è stato eseguito basandosi sui risultati della *walkover survey* (Figura 5.6); la loro discretizzazione è stata effettuata utilizzando *poligoni di Thiessen*, come specificato in precedenza.

In **Figura 5.10** viene riportata la discretizzazione dell'AREA 1.



**Figura 5.10** Discretizzazione AREA 1

La campagna di misurazione sull'AREA 1, è stata realizzata con l'impiego di una *Flux chamber*, che ha permesso di calcolare il flusso di biogas emesso dalla superficie per ogni sottozona considerata. Le condizioni operative e stagionali (autunno) rappresentano i flussi contenuti di biogas in quanto l'influenza della temperatura e dell'umidità del suolo sono fattori che limitano la fuoriuscita. Date le influenze sottolineate sono stati monitorati i valori climatici come fatto per la *walkover survey*.

**Tabella 5.7** Condizioni meteo medie registrate durante la *Flux box survey* del giorno 15/11/2018

Data	Temperatura (°C)	Pressione (hPa)	Umidità (%)	Velocità del vento (m/s)	Direzione del vento
15/11/2018	9	994	95	0.50	N

**Tabella 5.8** Condizioni meteo medie registrate durante la *Flux box survey* del giorno 16/11/2018

Data	Temperatura (°C)	Pressione (hPa)	Umidità (%)	Velocità del vento (m/s)	Direzione del vento
16/11/2018	9	995	97	1.39	NE

La **Tabella 5.7** e **Tabella 5.8** mostrano condizioni climatiche analoghe, conformi a quelle indicate dalle linee guida prese in considerazione, va sottolineato come la direzione e la velocità

del vento non influenzano la misura captata (è importante che quest'ultima sia minore di 3 m/s come nel caso studio).

In **Figura 5.11** sono riportate le zone in cui è stato possibile calcolare il flusso interpolando i dati di concentrazione misurati in campo. In particolare sono rappresentate in rosso le zone in cui è stato calcolato un flusso dell'ordine di microgrammo al metro quadro al secondo, e in arancione quelle in cui il flusso è di un ordine di grandezza inferiore.

In **Tabella 5.9** riportati i valori di flusso calcolati in ogni sottozona presente nell'area.

**Tabella 5.9 AREA 1 - Valori di flusso di metano calcolati**

<b>ID Punto</b>	<b>Area (m2)</b>	<b>Flusso (g/m2/s)</b>	<b>Portata (g/s)</b>
121	518	4.10E-06	2.13E-03
128	538	3.35E-06	1.80E-03
104	350	3.27E-06	1.15E-03
103	350	1.61E-06	5.65E-04
131	1460	1.04E-06	1.52E-03
124	1400	9.35E-07	1.31E-03
113	700	7.35E-07	5.15E-04
120	700	6.40E-07	4.48E-04
110	1330	4.98E-07	6.63E-04
135	450	4.74E-07	2.13E-04
129	330	3.08E-07	1.02E-04
122		ND	
115		ND	
114		ND	
109		ND	
108		ND	
107		ND	
102		ND	
106		ND	
118		ND	
140		ND	
127		ND	
134		ND	
139		ND	
138		ND	
133		ND	
126		ND	

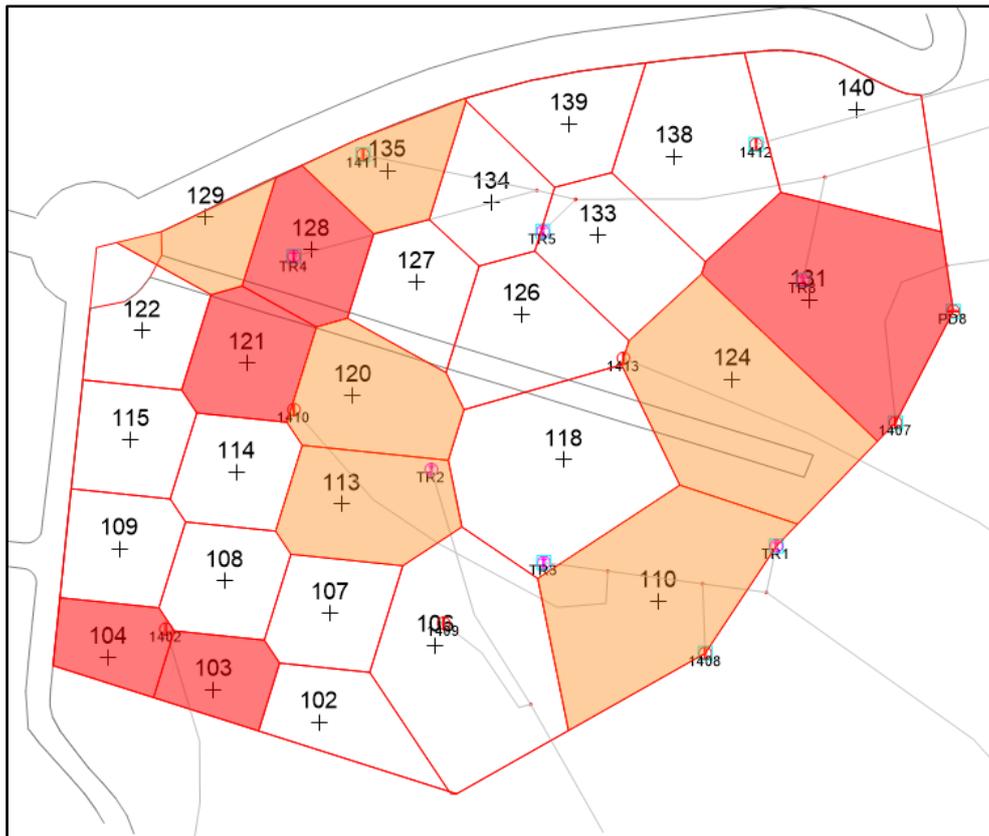


Figura 5.11 AREA 1 - Mappa dei flussi di biogas calcolati

### 5.3.2 Flux box survey AREA 2

In data 30/01/2019 è stata effettuato il *walkover survey* sull'AREA 2.

Per l'analisi dei flussi dell'AREA 2 si è utilizzato lo stesso iter utilizzato per l'AREA 1.

Il numero di punti di campionamento calcolato, ponendo  $Z$  pari a circa 1,6 ettari nell'equazione Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), che è risultato essere pari a 26.

Non avendo concentrazioni significative nell'area si è usata una maglia di punti regolare con l'aggiunta di un ventisettesimo punto dove è stata registrata la concentrazione di 1 ppm (**Figura 5.8**); la loro discretizzazione è stata effettuata utilizzando *poligoni di thiessen*.

In **Figura 5.12** viene riportata la discretizzazione dell'AREA 2.

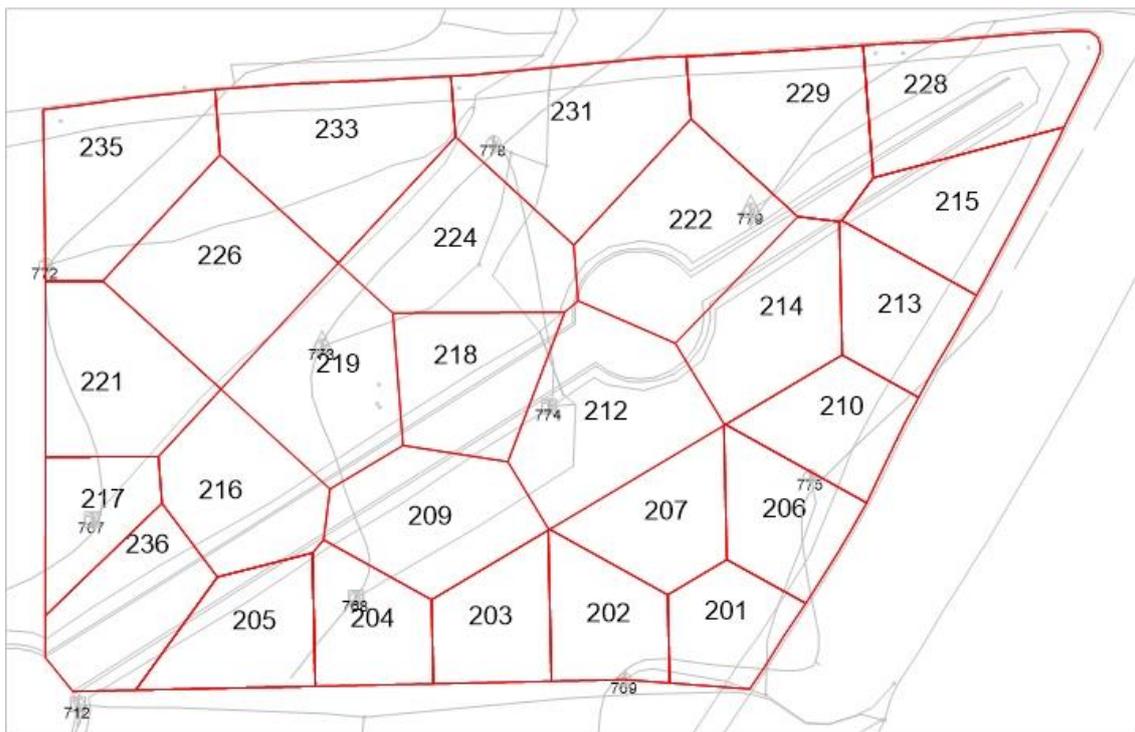


Figura 5.12 Discretizzazione AREA 2

Le condizioni operative e stagionali (inverno) rappresentano i flussi minimi di biogas in quanto l'influenza della temperatura e dell'umidità del suolo sono fattori che limitano la fuoriuscita. Date le influenze sottolineate sono stati monitorati i valori climatici come fatto per la *walkover survey*.

Tabella 5.10 Condizioni meteo medie registrate durante la *Flux box survey* del giorno 30/01/2018

Data	Temperatura (°C)	Pressione (hPa)	Umidità (%)	Velocità del vento (m/s)	Direzione del vento
30/01/2019	1	969	81	1.10	NE

In **Figura 5.13** sono riportate le zone in cui è stato possibile calcolare il flusso interpolando i dati di concentrazione misurati in campo. In particolare, sono rappresentate in arancione le zone in cui è stato calcolato un flusso dell'ordine del decimo microgrammo al metro quadro al secondo.

In **Tabella 5.11** vengono riportati i valori di flusso calcolati in ogni sottozona.

Tabella 5.11 AREA 2 - Valori di flusso di metano calcolati

ID Punto	Area (m2)	Flusso (g/m2/s)	Portata (g/s)
229	839	7.35E-07	6.17E-4
222	962	5.93E-07	5.70E-4
231		ND	
228		ND	

ID Punto	Area (m2)	Flusso (g/m2/s)	Portata (g/s)
224		ND	
215		ND	
213		ND	
210		ND	
214		ND	
212		ND	
207		ND	
206		ND	
201		ND	
202		ND	
203		ND	
209		ND	
204		ND	
205		ND	
216		ND	
210		ND	
233		ND	
235		ND	
226		ND	
221		ND	
219		ND	
236		ND	
217		ND	

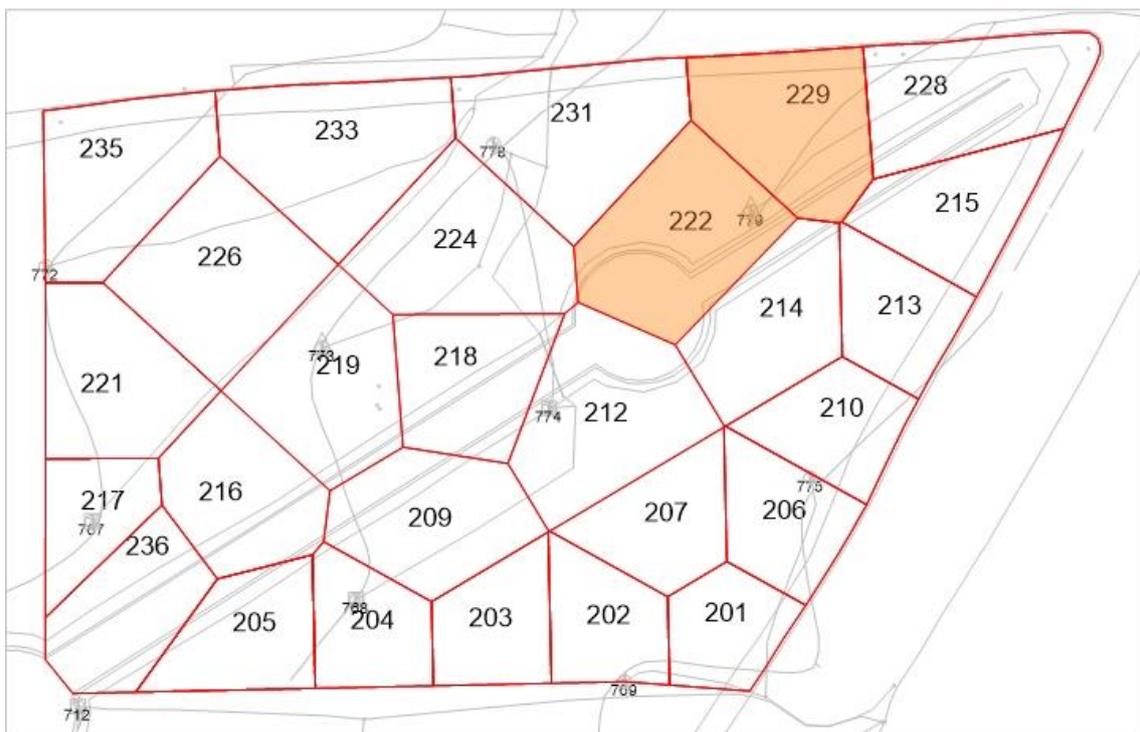


Figura 5.13 AREA 2 - Mappa dei flussi di biogas calcolati

## 5.4 Analisi risultati

Tale studio presentato risulta parziale e da completare con almeno un'altra campagna di misurazione che interesserà i mesi primaverili e/od estivi. Come sottolineato precedentemente i flussi emessi in atmosfera presentano delle fluttuazioni stagionali di difficile previsione, dato il numero delle numerose variabili che entrano in gioco. È lecito, comunque, aspettarsi un flusso massimo durante i mesi primaverili, in condizioni climatiche secche.

I dati per un confronto trovati in bibliografia sono per lo più espressi come emissioni diffuse mediate annualmente, è stato opportuno e pertinente effettuare comunque un confronto, data la peculiare affinità delle condizioni a contorno riscontrate (stratigrafia copertura superficiale, sistema di captazione di biogas).

Non essendoci limiti prescritti da leggi apposite, per stimare e valutare la magnitudo delle emissioni si fa riferimento a linee guida specifiche italiane ed inglesi.

La fondamentale Norma tecnica è quella emessa da UK EA nel 2010 “Guidance for Monitoring Landfill Gas Surface Emissions”, che, insieme alle metodologie espresse per la valutazione delle emissioni, fa riferimento a degli standard da considerare per la valutazione dei flussi misurati:

- Discariche con copertura superficiale ingegnerizzata intatta con sistema di captazione del biogas funzionante =  $1\text{E-}6 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s})$ ;
- Discariche provviste di *capping* provvisorio =  $1\text{E-}4 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s})$ .

Tali procedure sono state trasposte nella letteratura tecnica italiana dalla maggior parte delle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA Emilia-Romagna, ARPA Piemonte, ISPRA).

In particolare RECONnet nel 2016 ha specificato i flussi standard emessi in atmosfera delle diverse superfici in discarica (**Figura 5.14**); lo studio ha preso spunto dalle linee guida sulla gestione del gas discarica dell'UK EA del 2004.

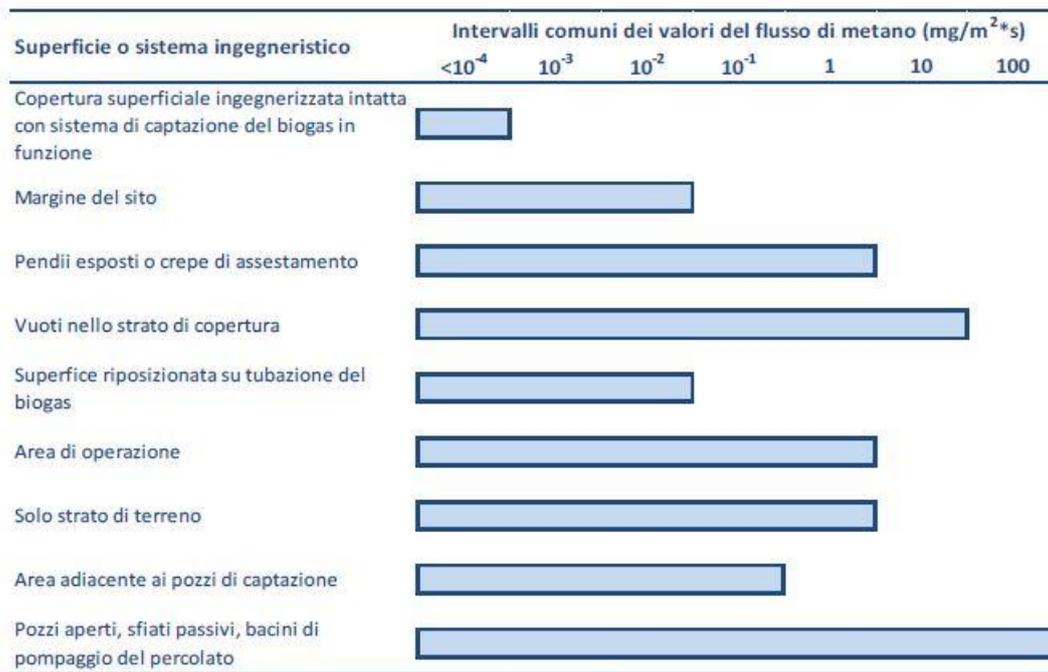


Figura 5.14 emissioni di biogas da diverse superfici o sistemi ingegneristici di discarica

Un confronto, per quanto preliminare, delle emissioni delle aree prese in considerazione con i limiti standard stabilita dalla linea guida inglese del 2010 è rappresentato nella tabella che segue.

Tabella 5.12 Confronto tra le medie emissive autunno-invernali e lo standard normativo (flussi espressi in  $\text{g}/(\text{m}^2\text{s})$ )

AREA 1	AREA 2	Standard normativo
5.79E-07	7.42E-08	1E-06

È da sottolineare come la **Tabella 5.12** indica che il valore standard non è stato superato nelle campagne stagionali effettuate, non che i flussi annuali attesi siano inferiori.

La tecnica di indagine utilizzata per il monitoraggio, la camera di flusso, è quella più diffusa nell'ambito della bonifica di discariche, specialmente per le emissioni provenienti da *capping*. Questa, adottando gli accorgimenti tecnici sopra citati (4.5.2 e 5.3), riesce a restituire delle misure significative dei flussi in gioco, comportando svariati vantaggi:

- Assenza di influenze date da altre sorgenti;
- Applicabile a tutte le tipologie di terreno, purché sostanzialmente pianeggiante e che non presenti irregolarità;
- Utilizzabile per contaminazioni superficiali (corpo di discarica).

Ma che porta in sé anche dei limiti, quali:

- L'incapacità, utilizzando il FID, di valutare l'emissione delle singole specie gassose, lo strumento, infatti, calcola il flusso complessivo di VOC. Per quanto riguarda le emissioni in discarica, come si è visto nel 1.2, il composto organico emesso

maggiormente è il metano, qualora dovessero essercene altri, essi saranno presenti in tracce non influenti dunque con la misura.

- L'influenza dei fattori ambientali, che però può essere limitata tramite una costruzione *ad hoc* della camera e degli accorgimenti operativi (4.5.2 e 5.3);
- Un limite intrinseco della metodologia stessa: la discretizzazione dell'area.

Effettuare una *walkover* precedentemente alla misura con la camera di flusso tende a ridurre gli errori di indagine, focalizzandola sulle aree più emittenti; da qui il discretizzare tramite i *poligoni di voronoi* le aree.

Sono presenti altre tecnologie in letteratura per il calcolo dei flussi, ma molto meno sperimentate in campo e robuste di quella presentata; una di queste è il vertical radial plume mapping (VRPM). Essa consiste in un rilevamento remoto ottico (ORS) del plume di contaminante, uscente dall'intera area contaminata, posto a valle della discarica rispetto la direzione del vento.

Per quanto concerne la misurazione di metano come (ORS) si è soliti utilizzare una sorgente TDL (Tunable Diode Laser), che emette un fascio di radiazione infrarossa, un riflettore ed un ricevitore. La particolarità di tale indagine è che essa non permette di individuare e valutare eventuali *hot spots* ma misura l'emissione dell'intero corpo discarica.

La tecnica VRPM descritta da EPA OTM-10 è stata utilizzata da Douglas Goldsmith per valutare le emissioni di 20 discariche sparse sul territorio statunitense (2011). Le discariche prese in esame hanno copertura superficiale di spessore variabile (compresa tra 1 e 2 m) ed è presente un sistema di collettamento del biogas. Tra le venti discariche quelle di interesse per lo studio effettuato sono due: una in quanto presenta un clima mediterraneo e un *capping* finale, e la seconda che, nonostante sia situata in North Carolina, avente dunque un clima caldo e umido, presenta un *capping* finale con l'uso di un telo in HDPE.

In **Tabella 5.13** si riportano le emissioni di riportate nello studio, connesse al lavoro di monitoraggio effettuato sulla discarica AMIAT.

**Tabella 5.13** Flussi di metano medi annuali riferiti sull'intera discarica statunitense espressi in g/m<sup>2</sup>/s (dati presi da Douglas Goldsmith et al. 2011) confrontati con i flussi massimi riscontrati nella discarica BdS

	<i>Capping</i> finale	<i>Capping</i> finale + HDPE
Clima continentale umido caldo	3.08E-04	1.04E-6
Clima mediterraneo	6.99E-05	ND
<b>Basse di Stura</b>	<b>4.10E-06</b>	<b>7.35E-07</b>

Lo studio ha evidenziato le seguenti riflessioni:

- Le emissioni più influenti sono state riscontrate in climi umidi subtropicali, a cui seguono climi caldi umidi continentali, freddi umidi continentali, mediterranei e semiaridi;
- La disposizione di un telo in HDPE nella copertura superficiale riduce di circa due ordini di grandezza le emissioni.

Il lavoro svolto presso la Vecchia Discarica "Basse di Stura" mostra dei valori inferiori a quelli riportati dall'articolo di Douglas Goldsmith del 2011 per climi mediterranei; va considerato che i valori riportati in **Tabella 5.13** rappresentano le medie annuali delle emissioni integrali diffuse delle discariche statunitensi.

Per quanto riguarda la letteratura italiana, la maggior parte dei testi trovati (discariche di Peccioli, Pozzino e Bellolampo) fa riferimento all'utilizzo di camere di accumulo per la quantificazione dei flussi. Di particolare importanza è stato lo studio svolto dall'Emendo s.r.l. presso la discarica di Moie di Maiolati Spontini, Ancona (*"Monitoraggio emissioni superficiale del biogas"* di Marzo 2013).

Il presente lavoro ha riguardato diverse "zone" della discarica, due delle quali con caratteristiche costruttive simili a quelle della discarica AMIAT di Torino:

- ZED A che presenta un *capping* costruito dopo il D.Lgs 36/03 (>2.5 m);
- ZED B che presenta un *capping* costruito prima D.Lgs 36/03 (pari a circa 1 m).

Con ZED che rappresenta l'acronimo di Zone omogenee ad Emissione Diffusa.

Si ricorda che il lotto B presenta uno spessore totale di 1.7 metri ed il lotto Sommitale ne presenta uno di 2.6 metri con aggiunta di telo in HDPE.

Nonostante le stratigrafie in esame sono differenti sono paragonabili per composizione; quella della discarica "Basse di Stura" ha degli spessori e delle composizioni più cautelativi.

In **Tabella 5.14** si confrontano i flussi misurati durante il 2017 nella discarica di Moie e quelli massimi stimati nella discarica di "Basse di Stura".

**Tabella 5.14** Flussi medi della discarica di Moie confrontati con i flussi massimi riscontrati nelle "features" di BdS riferiti alle diverse "zone" oggetto di studio

	g/m <sup>2</sup> /s	
	Moie	BdS
ZED A	5.61E-07	7.35E-07
ZED B	2.93E-07	4.10E-06

Dal confronto si evincono le seguenti considerazioni:

- La stesura di un telo in HDPE riduce notevolmente le emissioni, le "features" di BdS mostrano dei flussi inferiori alle emissioni diffuse presenti lungo tutta la "zone" ZED A della discarica di Moie;
- Per quanto riguarda il "capping" antecedente al D.Lgs 36/03 vi è la presenza di anomalie con delle emissioni più importanti nella discarica BdS;
- Mentre per la discarica di Moie l'impoverimento di produzione di biogas si riscontra in una diminuzione delle emissioni dei lotti più vetusti, per quanto riguarda la discarica BdS questa correlazione non si può effettuare.

## CONCLUSIONI

Quello delle emissioni superficiali è un problema di fondamentale importanza nella gestione di una discarica.

In letteratura si è riportato che una percentuale che va dal 10 al 25 % del metano totale prodotto da discarica, nonostante il collettamento e la copertura superficiale viene emesso in atmosfera (Spokas et al. 2006).

Nell'ambito di prescrizioni legali, le emissioni superficiali rappresentano una lacuna delle norme vigenti; la prima parte del lavoro di tesi ha, dunque, riguardato la ricerca di linee guida tecniche che potessero condurre lo studio. La messa a punto del sistema di monitoraggio, finalità del lavoro di tesi, è stata effettuata seguendo le indicazioni descritte dalle linee guida inglesi.

La tesi presentata rappresenta uno studio parziale del progetto di ricerca stipulato tra il Politecnico di Torino e AMIAT; è stata effettuata la sola misurazione delle emissioni nella stagione autunno-invernale.

La necessità dell'azienda committente nel richiedere tale consulenza, nasce dalle caratteristiche intrinseche del fenomeno di produzione di biogas. La permanenza nel tempo del rifiuto stoccato comporta una diminuzione della sostanza organica nel suo interno, che implica un impoverimento del tenore di metano nella miscela. Sotto determinate percentuali il biogas non rientra nei limiti di infiammabilità e si forma un range di incidenza di metano di non facile gestione (5-30%). Questa emergenza, usuale nelle discariche di rifiuti solidi urbani, è stata fronteggiata con una gestione alternativa del sistema di captazione, che potrebbe comportare un aumento delle emissioni.

Alla luce dei dati ricavati dalla sola campagna autunno-invernale si riscontrano flussi emessi diffusi mediati in tutta l'area di indagine ampiamente al di sotto del limite standard espresso dalla linea guida inglese.

Nel dettaglio le "anomalie" riscontrate sulle due AREA 1, più significative rispetto alla seconda area, non presentano evidenti correlazioni con la tipologia del pozzo; le sottozone a maggior emissione coincidono con gli intorni spaziali del pozzo 1402, 1410, TR4 e TR8, il primo gestito con captazione continua, i restanti tre ad intermittenza.

Dall'analisi dei flussi presentati nel capitolo precedente si evidenzia come la composizione del *capping* sia la caratteristica principale che influenza le fuoriuscite non controllate di metano. Per quanto l'età del lotto indirizzi l'attenzione verso l'AREA 2, di più recente coltivazione, i flussi maggiori sono stati misurati sull'AREA 1; la differenza risultante dal confronto delle due aree è di quasi un ordine di grandezza. La spiegazione di tale fenomeno è da ricondurre principalmente all'utilizzo del telo di HDPE lungo tutta la copertura superficiale del lotto Sommitale. Un secondo fattore plausibile è la fessurazione dello strato argilloso componente il *capping* dati i cedimenti differenziali del rifiuto ivi stoccato, data anche la maggiore vetustà del lotto.

Lo studio necessita di altre campagne di misurazione, atte ad analizzare il comportamento stagionale della discarica, e l'evoluzione temporale delle emissioni, come riscontrato in letteratura.

Per risolvere il problema a monte ed ovviare all'impoverimento del biogas, permettendo una captazione continua, in letteratura sono presenti varie tecnologia consolidate di upgrading del tenore di metano all'interno della miscela (assorbimento liquido, adsorbimento a pressione variabile, filtrazione con membrane e separazione criogenica). Depurare il biogas dalle "impurezze", oltre a renderlo infiammabile, permette di migliorare le rese energetiche, aumentando il suo potere calorifico.

## Bibliografia

AMIAT, “*SF1\_rev5\_gen15, Descrizione generale ed evoluzione del sito*”

AMIAT, “*SF2a\_biogas\_2018\_V12, L’impianto di gestione del biogas*”

AMIAT (Gennaio 2018), “*Gestione dei pozzi di estrazione del biogas in fase post operativa*”

Andreottola G., Cossu. (1988), “*Modello matematico di produzione del biogas in uno scarico controllato*”, RS rifiuti Solidi, vol.2, N.6

Angelidaki et al. (1999), “*A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas*” Biotechnology and Bioengineering 42

APAT (2005), “*Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi*”

ARPA Emilia-Romagna (2015), “*Linea guida operativa per il campionamento, il trasporto e l’analisi dei gas interstiziali nei siti contaminati*”

ARPA Piemonte (2013), “*Campionamento dei gas interstiziali e rilievo delle emissioni di vapori dal terreno in corrispondenza dei siti contaminati*”

Bertora et al. (2018) “*Assessment of Methane and Nitrous Oxide Fluxes from Paddy Field by Means of Static Closed Chambers Maintaining Plants Within Headspace*”, Journal of Visualized Experiments

Corti Andrea (Giugno, 2011), “*Monitoraggio delle emissioni diffuse e convogliate di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> della Ex-Discarica del Pozzino (PO)*”, Polo Universitario Città di Prato

D.Lgs. 13-1-2003 n. 36 Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti. Pubblicato nella Gazz. Uff. 12 marzo 2003, n. 59, S.O

Damiani e Gandolla (1992), “*Gestione del biogas da discariche controllate*”, Istituto per l’ambiente

Di Molfetta e Sethi (2012), “*Ingegneria degli acquiferi*”, Unitext

Di Trapani Daniele (Marzo, 2013), “*Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes*”, Waste Management 33

Douglas Goldsmith et al. (2011), “*Methane emissions from 20 landfills across the United States using vertical radial plume mapping*”, Journal of the Air & Waste Management Association

Environment Agency Wales (2010), “*Guidance on monitoring landfill gas surface emissions*”

Environment Agency UK (2004) “*Guidance on the management of landfill gas*”

Environmental Protection Agency US (2005), “*Guidance for evaluating landfill gas emissions from closed or abandoned facilities*”

Environmental Protection Agency US (2011), “*Optical Remote Sensing for Measurement and Monitoring of Emissions Flux*”

Gujer and Zehnder (1983), “*Conversion process in anaerobic digestion*”, Waste Science and Technology 15

ISPRA (2018), “*Progettazione del monitoraggio di vapori nei siti contaminati*”

Kanemasu et al. (1974), “*Field chamber measurements of CO<sub>2</sub> flux from soil surface*” Soil Science, 118

Luigi Delle Vergini – Flussi di gas clima alteranti emessi da discarica di rifiuti solidi urbani.

Kucera C., Kirkham D. R., (1971) “*Soil respiration studies in tall grass Prairie in Missouri*”, Ecology, 52

Levy et al (2011) “*Quantification of uncertainty in trace gas fluxes measured by the static chamber method*”, European Journal of Soil Science 62

Luo and Zhou (2006), “*Soil respiration and the environment*”

Magnano Enrico (2010), “*Biogas da discarica*” EPC LIBRI

Magnano Enrico, Emendo s.r.l. (Marzo, 2017), “*Monitoraggio emissioni superficiali del biogas*”

Metcalf and Eddy (1991), “*Wasrewater engineering: treatment, disposal, and reuse*”, McGraw-Hill

Raco Brunella (Febbraio, 2010), “*Gas emission into the atmosphere from controlled landfills: an example from Legoli landfill (Tuscany, Italy)*”, Environmental Science and Pollution Research 17

Sanders et al. (1999), “*Anther developmental defects in Arabidopsis thaliana male-sterile mutants*”, Sexual Plant Reproduction 11

Spokas (2006) “*Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection system*” Waste Management 26

Reconnet (Febbraio 2016), “*Determinazione e gestione dei livelli di guardia per il monitoraggio delle discariche*”

Vavilin et al. (1996), “*A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter*”, Bioresource Technology 96

Virgili G. et al (2008) “*Il FLUX-meter: implementazione di una strumentazione integrata portatile per la misura dei flussi di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> diffusi dal suolo*”, Giornale di Geologia Applicata 9

Witkamp et al. (1969), “*Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil*”, Ecology 50

Zabetakis M.g. (), “*Flammability characteristics of combustible gases and vapour*”, Bulletin 627, US Bureau of Mines 1965