

Comune di Colle Sannita

Provincia di Benevento



P.O.R. Campania FESR 2007 / 2013

Obiettivo operativo 1.2

Migliorare la salubrità dell'ambiente - Programmazione attività a) e b)

Committente	Comune di Colle Sannita
Progetto	Piano Operativo ed Attività di Bonifica della discarica comunale in località Acqua Solfatarata

PROGETTO ESECUTIVO

Relazione descrittiva delle matrici contaminanti e degli afflussi meteorici

TAV. N°	E.2	Scala	
---------	-----	-------	--

I progettisti

Dott. Ing. Angelo FINELLA

Dott. Ing. Christian BELMONTE

Dott. Agr. Giuseppe ZEOLLA

L'impresa esecutrice



Visti ed approvazioni

Il Sindaco

Dott. Giorgio Carlo Nista

Il RUP

Ing. Giuseppe MARTUCCIO

INDICE

1 - PREMESSA

2 - INQUADRAMENTO METEOCLIMATICO

2.1 – Apporti meteorici intensi

2.2 – Schema metodico adottato

2.3– Applicazione del metodo

Allegati

1 - PREMESSA

Il presente documento, descrive la metodologia applicata per la quantificazione degli afflussi pluviometrici sull'area di discarica, necessari al successivo dimensionamento delle opere di regimazione delle acque superficiali, nell'ambito del progetto definitivo di messa in sicurezza definitiva, ai sensi del D.Lgs. 152/2006, della discarica dismessa, di Rifiuti Solidi Urbani, in località Acqua Solfatarà, nel Comune di Colle Sannita. Nella presente relazione vengono descritti i calcoli effettuati per il dimensionamento e la verifica idraulica della rete di drenaggio delle acque meteoriche interne al sito, ricadenti al di sopra del sistema di copertura impermeabile. Il progetto prevede la realizzazione di un sistema di drenaggio superficiale, strutturato in modo tale da intercettare le acque provenienti dalla superficie del capping impermeabile.. Le acque drenate dal predetto sistema, saranno convogliate in punti di recapito differenziati per poi essere immesse, a seguito di confronto tra le concentrazione degli analiti in soluzione ed i relativi livelli di CSC, nel sistema idrologico naturale. Al fine di garantire una duratura ed efficiente funzionalità del sistema di drenaggio superficiale, è fondamentale dimensionare in modo corretto le opere di smaltimento delle acque. In questo contesto è di prioritaria importanza la quantificazione degli afflussi pluviometrici sull'area di discarica, dunque si espone in seguito la metodologia ed i calcoli adottati per l'ottenimento degli stessi.

2 - INQUADRAMENTO METEOCLIMATICO

L'area sede dell'intervento in oggetto è caratterizzata da un clima temperato mediterraneo. L'analisi delle caratteristiche meteorologiche della zona è stata condotta prendendo come riferimento la stazione di rilevazione di Colle Sannita che dista circa 2 km dal sito di indagine. Nello specifico, i calcoli analitici per la definizione della curva di possibilità pluviometrica, sono stati elaborati prendendo in considerazione l'intervallo temporale compreso tra il 1966 e il 1998. Sono stati utilizzati esclusivamente i dati disponibili in modo continuo nell'arco dei singoli anni, escludendo gli anni con mancanza di dati o incompletezza degli stessi. Si segnala, in merito alle precipitazioni, che l'afflusso meteorico medio annuo, valutato su un periodo complessivo di 23 anni e riferito a durate di 24 ore, per la menzionata stazione di rilevamento, è pari a 104,3 mm.

2.1 – Apporti meteorici intensi

Per definire correttamente la portata di progetto e dimensionare correttamente la rete drenante le acque meteoriche incidenti sulla copertura del sito, è stata determinata una curva di possibilità pluviometrica specifica per l'area oggetto di studio, caratterizzata da un tempo di ritorno pari a 200 anni. Come area di incidenza delle precipitazioni, è stata considerata esclusivamente l'impronta a terra della discarica, in quanto l'azione di bonifica definitiva contempla la separazione materiale tra le acque di ruscellamento esterne alla discarica e quelle che insistono sul capping di chiusura. Viene preso per assunto dunque che le acque oggetto di regimazione superficiale e dunque di quantificazione sono esclusivamente quelle che insistono sulla discarica. La curva di possibilità pluviometrica è stata costruita facendo riferimento ai dati desunti dalle rilevazioni strumentali effettuate del Genio Civile della Provincia di Benevento. In particolare, la metodologia di calcolo utilizzata è quella proposta da Gumbel che riesce a fornire dati affidabili per bacini di ridotte dimensioni. La teoria, che verrà esposta in seguito, è caratterizzata da tre fasi tra loro propedeutiche. Partendo infatti dalla schematizzazione dei dati rilevati alle stazioni pluviometriche, si

giunge al calcolo della curva di possibilità pluviometrica per giungere infine alla stima della portata del bacino. Nel caso in esame non si sta esaminando un vero e proprio bacino idrografico, ma una sezione areale dello stesso molto ridotta. Pertanto, l'applicazione della teoria viene terminata alla definizione della curva di possibilità pluviometrica che ci permette di stimare la massima altezza di pioggia riferita ad uno specifico tempo di ritorno. La portata, o più precisamente la quantità di acqua che può incidere sull'area esaminata all'evenienza di un determinato evento meteorico, viene ottenuta come prodotto tra la massima altezza di pioggia e l'area indagata. Nello specifico, come già accennato, la stima è stata riferita ad un evento meteorico di durata $t = 24$ ore con tempo di ritorno di 200 anni.

2.2 – Schema metodico adottato

Per la determinazione delle altezze critiche di pioggia con il metodo di Gumbel, relative ad un generico bacino idrografico B, delimitato in base agli spartiacque morfologici, si provvede alla individuazione, dall'esame degli Annali del Servizio Idrografico Italiano, delle altezze massime di pioggia registrate per la durata di 1, 3, 6, 12, 24 ore. I dati si riferiscono alla stazione pluviometrica di Colle Sannita (BN) e riguardano 23 anni di osservazioni, dal 1966 al 1998, in modo non continuativo a causa della inesistenza di alcune osservazioni annuali. Nel seguito si riportano i dati pluviometrici tabellati e quelli ottenuti, dall'elaborazione statistica effettuata con il metodo di Gumbel, relativi alle altezze massime (H_{max}) e critiche (H_{crit}) di pioggia, con tempi di ritorno di 10, 30, 50, 100, 200 anni. Dopo una breve descrizione del metodo "Gumbel", si riportano nel seguito le formule adottate per il calcolo delle altezze di pioggia citate. Nella progettazione di opere idrauliche orientate al controllo delle portate di piena, è prioritariamente indispensabile procedere alla stima della portata massima prevedibile che le solleciterà nel corso della loro vita prevista. La portata, nella maggior parte dei casi, è originata dalle precipitazioni meteoriche e, più in generale, dipenderà dalle caratteristiche molto variabili, sia nel tempo che nello spazio, delle trasformazioni che l'acqua subisce durante il suo ciclo idrologico. In siffatte condizioni, è praticamente impossibile calcolare la massima portata prevedibile in senso deterministico e bisognerà, quindi, affrontare il problema nel solo modo possibile, e cioè in termini probabilistici. Significa, cioè, che la portata di piena va considerata come una variabile casuale, la quale, conseguentemente, dovrà essere stimata relativamente ad un livello di probabilità che essa ha di non essere superata o, meglio ancora, relativamente ad un periodo di tempo (detto tempo di ritorno) che intercorre, in media, tra due eventi in cui il valore di tale portata viene superato.

In genere, è possibile riconoscere due tipi di problemi, a seconda del tipo di informazioni di cui si dispone:

- ✓ stima della portata di piena di progetto direttamente dall'analisi probabilistica di osservazioni dirette di portata fatte in passato nel sito;
- ✓ stima della portata di piena di progetto attraverso l'analisi probabilistica preliminare delle precipitazioni nel bacino idrografico interessato e la simulazione conseguente del processo della loro trasformazione in deflussi.

Il calcolo che seguirà si occupa del secondo caso, quello cioè riguardante, in particolare, i bacini idrografici non monitorati e di non eccessive dimensioni (al più qualche decina di km^2). Pertanto, in numerosi casi pratici si dispone solo delle precipitazioni meteoriche in alcuni punti del bacino. In tali casi la portata sarà stimata simulando, attraverso un modello matematico, il processo di trasformazione afflussi-deflussi nel bacino idrografico. Nel seguito viene affrontato il calcolo mediante l'analisi probabilistica delle precipitazioni con particolare riferimento alle cosiddette curve di possibilità pluviometrica, indicate spesso con l'acronimo cpp, adottando le formule appresso riportate.

$$H_{\max}(t, T) = m - \frac{\left(\ln \left(- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right)}{k} \quad 1)$$

$$H_{\text{crit}}(t, T) = a \times t^n \quad 2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H_i})^2}{n-1}}$$

$$k = \frac{1}{0,78 \times s}$$

$$m = \overline{H_i} - \frac{0,577}{k}$$

Per la (2) il coefficiente “a” e l’esponente “n” sono stati determinati con il metodo dei minimi quadrati, secondo le seguenti relazioni matematiche:

$$n = \frac{\sum (\log t - \overline{\log t}) \times \log H_{\max}(t, T)}{\sum (\log t - \overline{\log t})^2}$$

$$a = 10^{(\overline{\log H_{\max}(t, T)} - n \cdot \overline{\log t})}$$

I valori delle Hcrit (t,T) calcolate, unitamente agli altri parametri idrologici, sono riportati, in appendice, in appositi diagrammi e tabelle.

I simboli adottati nelle formule assumono i seguenti significati:

Hmax (t, T) = altezza massima di pioggia con tempi di ritorno;

Hcrit (t, T) = altezza critica di pioggia con tempi di ritorno;

$\overline{H_i}$ = media aritmetica delle altezze massime di pioggia registrate per la durata di 1, 3, 6, 12, 24 ore negli anni di osservazione;

s = deviazione standard;

Ln = logaritmo naturale;

t = durata della pioggia di 1, 3, 6, 12, 24 ore;

T = tempi di ritorno di 10, 30, 50, 100, 200 anni.

2.3– Applicazione del metodo

Per la definizione della curva di probabilità pluviometrica, è stato utilizzato uno specifico software di elaborazione che, partendo dalla immissione dei dati pluviometrici misurati alla stazione di riferimento, utilizzando specifici algoritmi, permette sviluppare automaticamente le indicazioni teoriche esposte in precedenza. Sono state considerate le condizioni che possono indurre le massime sollecitazioni al sistema drenante in progetto, applicando un tempo di ritorno di 200 anni ed ipotizzando un evento meteorico eccezionale con precipitazione ininterrotta in un intervallo temporale di $T=24$ ore. Dall'analisi è risultata un'altezza critica di pioggia equivalente a $271,13 \text{ mm} = 0,27\text{m}$. Considerando l'estensione areale della discarica equivalente a 3.620 mq ed applicando il prodotto tra altezza critica di pioggia ed area della discarica si ottiene un quantitativo massimo di acqua uguale a $Q= 975,51 \text{ mc}$. Lo scopo del presente studio è quello di ottenere la portata di progetto a cui fare riferimento per il dimensionamento dei canali drenanti da realizzare a contorno della discarica. Si conviene a quanto richiesto correlando la portata massima all'unità di tempo rappresentativa che si usa in genere per le portate che è definita dal rapporto litri/secondo o volume/secondo. Osservando che il periodo dell'evento considerato è di 24 ore si deve dunque interpretare questo intervallo di tempo in secondi e si ottiene dunque:

$$Q_h (\text{Portata oraria in mc/ora}) = Q/T \rightarrow 975,51 \text{ mc} / 24 \text{ ore} = 40,64 \text{ mc/h}$$

Osservando che :

$$1 \text{ ora} = 3600 \text{ sec.}$$

si ottiene che la portata al secondo Q_n è data dal seguente rapporto:

$$Q_n = Q_h / 3600 \text{ sec} = 40,64 \text{ mc} / 3600 \text{ sec} = \mathbf{0,011 \text{ mc/sec}}$$

Assumendo che $1 \text{ mc} = 1000$ litri si ottiene che la portata oraria in litri Q_l è uguale a:

$$Q_l (\text{Portata in litri}) = Q_h \times 1000 = 40,64 \text{ mc} \times 1000 = 40640 \text{ litri}$$

A questo punto è agevole ottenere la portata in litri al secondo Q_s che è uguale a:

$$Q_s = Q_l / 3600 \text{ sec} = 40640 \text{ litri} / 3600 \text{ sec} = 11,28 \text{ l/sec}$$

Nel dimensionamento delle opere di smaltimento delle acque superficiali dovrà dunque essere applicata una portata di progetto uguale a **$Q_s=11,281 \text{ l/sec}$** .

Il tecnico

DATI PLUVIOGRAFICI

(Precipitazioni di massima intensità registrate al pluviografo su 1, 3, 6, 12, 24 ore consecutive)

Stazione di : Colle Sannita

Quota (m s.l.m.) 720

Numero di osservazioni : N = 23

Anno	t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
1966	30,00	40,00	101,00	109,00	116,20
1968	30,00	60,00	100,00	161,00	275,60
1969	22,40	40,00	60,00	85,00	96,60
1970	32,40	48,40	58,00	77,40	107,40
1971	15,20	38,00	59,60	90,00	106,40
1972	22,00	34,00	47,00	71,60	90,00
1973	22,60	35,60	41,80	41,80	43,60
1974	33,00	50,00	52,00	57,00	87,00
1975	26,00	45,00	62,00	103,00	113,00
1976	33,40	45,00	64,00	76,00	135,00
1977	31,00	35,00	42,00	73,00	93,60
1978	36,00	47,00	57,00	85,00	124,00
1979	20,00	37,00	43,00	70,00	100,00
1980	37,00	53,00	54,00	63,40	97,00
1981	50,00	54,00	91,00	94,00	94,00
1982	21,80	37,00	43,00	73,00	98,60
1983	29,00	54,00	76,00	98,00	141,00
1990	19,20	34,20	40,20	46,40	56,80
1991	21,40	26,20	41,60	61,20	79,60
1993	15,60	27,20	31,00	34,40	72,80
1995	22,00	40,20	71,00	77,60	77,60
1997	38,60	99,60	127,60	130,00	139,20
1998	18,60	31,40	44,40	44,40	52,40

ANALISI STATISTICA DEI DATI PLUVIOGRAFICI
(Metodo di Gumbel)

Tabella 1 - Valori per ciascuna durata t , della media $\mu(h_t)$, dello scarto quadratico medio $\sigma(h_t)$ e dei due parametri α_t e u_t della legge di Gumbel (prima legge del valore estremo "EV1")

N =	23	t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
$\mu(h_t)$		27,27	43,99	61,18	79,23	104,23
$\sigma(h_t)$		8,49	15,05	23,84	28,98	45,38
$\alpha_t = 1,283/\sigma(h_t)$		0,15	0,09	0,05	0,04	0,03
$u_t = \mu(h_t) - 0,45\sigma(h_t)$		23,45	37,22	50,45	66,18	83,81

Tabella 2 - Altezze massime di pioggia regolarizzate (mm)

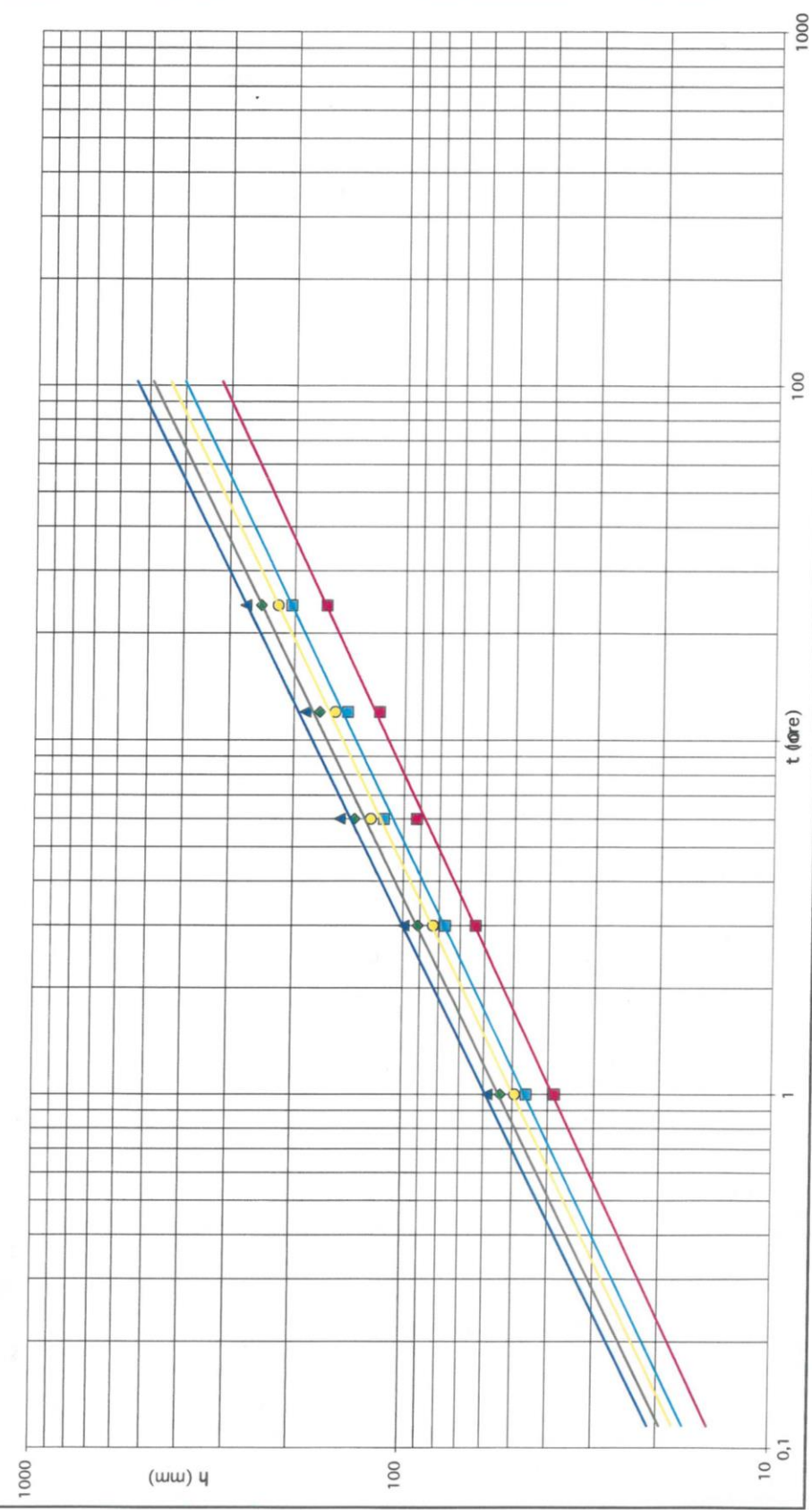
Tr		t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
10 anni	$h_{\max} =$	38,34	63,61	92,27	117,02	163,41
30 anni	$h_{\max} =$	45,85	76,91	113,35	142,63	203,52
50 anni	$h_{\max} =$	49,27	82,98	122,97	154,32	221,83
100 anni	$h_{\max} =$	53,90	91,17	135,94	170,09	246,53
200 anni	$h_{\max} =$	58,50	99,33	148,87	185,81	271,13

Tabella 3 -

Tr	LEGGE DI PIOGGIA $h = a \times t^n$		
10 anni	→	$h=38,845 \times t^{0,4542}$	
30 anni	→	$h=46,44 \times t^{0,4657}$	
50 anni	→	$h=49,909 \times t^{0,4697}$	
100 anni	→	$h=54,59 \times t^{0,4743}$	
200 anni	→	$h=59,255 \times t^{0,478}$	

Tr 10; $y = 38,845x^{0,4542}$ Tr 30; $y = 46,44x^{0,4657}$ Tr 50; $y = 49,909x^{0,4697}$ Tr 100; $y = 54,59x^{0,4743}$ Tr 200; $y = 59,255x^{0,478}$

Curve di probabilità pluviometrica



STIMA DEL VOLUME DI PERCOLATO PRESENTE IN DISCARICA

Premessa

La quantificazione volumetrica e la localizzazione del percolato presente all'interno del corpo di discarica, è di fondamentale importanza in quanto condiziona la necessità o meno di intervenire con uno o più cicli di aspirazione dello stesso. A rendere questo aspetto ancora più importante, è il livello effettivo del percolato dal fondo della discarica che può subire drastiche variazioni in funzione degli afflussi pluviometrici che insistono sul sito. In altri termini, ponendo una condizione iniziale con assenza di impermeabilizzazione superficiale della discarica, si possono generare, all'evenienza di particolari eventi meteorici, innalzamenti dei livelli che potrebbero indurre tracimazione del percolato nelle zone di ciglio delle scarpate di contenimento perimetrale. Questo aspetto verrebbe ulteriormente amplificato in condizioni di perfetta tenuta impermeabile del fondo discarica. In realtà, a causa della eterogeneità dei rifiuti che sono stati sversati in periodi in cui non veniva applicata alcuna differenziazione, con la presenza di elementi metallici, legnosi o porzioni di manufatti che hanno contribuito a danneggiare i teli di fondo, la perfetta tenuta non viene raggiunta. La conseguenza primaria a tutto questo si identifica con punti di perdita e migrazione all'esterno del percolato. Inoltre, il decreto legislativo n. 36/03 stabilisce in modo espresso che *"il percolato e le acque raccolte devono essere trattate in impianto tecnicamente idoneo di trattamento al fine di garantirne lo scarico nel rispetto dei limiti previsti dalla normativa vigente in materia. La concentrazione del percolato può essere autorizzata solo nel caso in cui contribuisca all'abbassamento del relativo battente idraulico; il concentrato può rimanere confinato all'interno della discarica"*. Nel caso in esame non si ha certezza del punto in precedenza e dunque si ritiene necessario provvedere alla asportazione del percolato presente

Caratteristiche geometriche della discarica

Nel caso della discarica di Colle Sannita, è da tenere conto anche della conformazione geometrica e della evoluzione che la discarica ha subito a seguito degli adeguamenti strutturali apportati negli anni di esercizio.

In sostanza, la discarica, nel periodo di conferimento di RSU, non ha subito variazioni per quanto riguarda l'impronta in planimetria che ha una forma regolare di un quadrilatero con dimensioni 50m x 45m. La vasca di conferimento è stata realizzata applicando, alla superficie del rilevato perimetrale, una guaina impermeabilizzante con giunzioni termosaldate. Durante il conferimento di RSU, non è stata effettuata alcuna forma di differenziazione dei rifiuti e sono stati stoccati anche elementi di origine metallica, legnosa e litoide che, per la loro conformazione e per il modo caotico in cui sono stati stoccati, hanno sicuramente generato delle lesioni alla guaina impermeabilizzante. Per questo non si è certi di un efficace tenuta che impedisca al percolato di migrare all'esterno della discarica. Non è comunque da escludere la formazione di aree o sacche con concentrazione di percolato di cui non è possibile quantificare correttamente dimensione e collocazione.

Questa osservazione è confortata dalle indagini di geologiche indirette. Nelle operazioni di caratterizzazione del sito sono state infatti realizzati due stendimenti geoelettrici e conseguenti elaborazioni tomografiche degli stessi. Dalle elaborazioni grafiche si riesce ad individuare un punto di migrazione del percolato al di sotto dell'impermeabilizzazione, a conferma che detto sistema è

stato evidentemente compromesso o danneggiato. Per completezza si riporta in allegato alla presente la relazione interpretativa degli stendimenti geoelettrici realizzati.

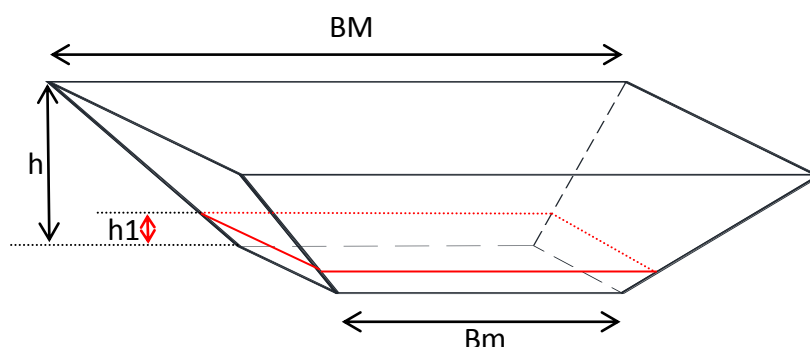
Quantificazione volumetrica del percolato

Nello specifico, la geometria del secondo settore è assimilabile ad una piramide tronca rovesciata di cui è possibile calcolare il volume come segue:

$$V = h/3 \times [SBm + SBM + \sqrt{(SBm \times SBM)}] = 4/3 \times [1.400m^2 + 2.250m^2 + \sqrt{(1.400m^2 \times 2.250m^2)}] =$$

$$V = 7.233 m^3$$

Al fine di valutare il quantitativo di percolato presente nell'invaso si è proceduto effettuando una sottrazione volumetrica tra il volume dell'intero invasore e la piramide tronca rovesciata che ha come base minore la stessa dell'intero invasore e come base maggiore quella intercettata sulle sponde dal livello del percolato misurato direttamente nella vasca di raccolta dello stesso (in rosso).



Il livello misurato nella vasca di raccolta del percolato è uguale a 6,5m dal bocca-pozzo (il pozzo emerge per 2,5m fuori terra). Assumendo una altezza utile dell'invasore, dal fondo alla base del pozzo, di 4m, alla luce della misura effettuata si evince che l'altezza del livello statico del percolato dal fondo discarica è uguale a 0,5m che sarà assunto come h1. Applicando una costruzione geometrica è stata calcolata una superficie equivalente a 372m² che verrà assunta come base maggiore SBM nella seguente formula per il calcolo di V1:

$$V1 = h1/3 \times [SBm + SBM + \sqrt{(SBm \times SBM)}] = 0,5/3 \times [1.400m^2 + 1.924m^2 + \sqrt{(1.400m \times 1.924m^2)}] =$$

$$V = 827,5 m^3$$

Il volume calcolato, in effetti non è interamente occupato da percolato, in quanto lo stesso è misto alla frazione solida. Viene considerata dunque una riduzione di volume del 40% con volume stimato effettivo di 331 m³.

Nelle fasi di sopralluogo in discarica, è stato ispezionato per due volte e rispettivamente nell'estate 2013 ed in primavera 2014, un pozzo interno alla stessa. Si è osservato un aumento del livello di pochi centimetri nel periodo invernale. Questo aspetto conferma che il percolato presente in discarica non subisce innalzamenti rilevanti al variare degli afflussi meteorici, facendo supporre che in prossimità del livello misurato sia presente una via di fuga del percolato a causa di

difetti di integrità della membrana impermeabilizzante di fondo. Questo inconveniente verrà eliminato applicando il capping di copertura che inibirà la infiltrazione delle acque.

Metodo di prelievo e smaltimento del percolato

Raffrontando il volume stimato di percolato con il volume dell'intera discarica, potrebbe apparire superfluo, in un contesto di mitigazione del rischio di inquinamento, effettuare l'asportazione del percolato presente. In effetti la pericolosità del percolato non risiede esclusivamente nel quantitativo rilevato, ma anche e soprattutto sulle caratteristiche di concentrazione degli elementi inquinanti in soluzione. La bonifica / messa in sicurezza definitiva è indirizzata a precludere la migrazione degli inquinanti presenti in discarica e di cui è difficile o impossibile effettuare la rimozione. Inoltre, non devono essere sottovalutate le interferenze associate a sollecitazioni di carattere statico, sia intrinseche alle strutture (resistenza statica del capping, delle barriere idrauliche, dei drenaggi, delle canalette, ecc.), sia proprie della componente naturale (eventi sismici, fenomeni gravitativi, calamità meteoriche, ecc.) che possono alterare l'equilibrio o assetto del corpo di discarica, ponendo in essere fughe incontrollate di percolato. Dopo questa breve precisazione, possiamo affermare che, al fine di evitare o minimizzare fughe di eventuale percolato, si rende necessario ridurre il problema alla base, cercando di asportarne quanto più possibile.

Tenendo conto delle caratteristiche costruttive della discarica oggetto di prelievo di percolato, si opererà mediante aspirazione, direttamente dalla pozzo di raccolta, con pompa idraulica collegata a cisterna su autocarro. L'aspirazione verrà effettuata a più riprese, intervallate tra loro, in modo da favorire la migrazione del percolato presente nelle aree più distanti. Ogni fase di aspirazione verrà avviata a seguito di verifica di innalzamento del battente idraulico del percolato. Nel momento in cui, effettuando la misurazione del predetto livello, non si osserveranno innalzamenti del livello, il pompaggio si riterrà concluso. L'allestimento di sicurezza dell'automezzo utilizzato, dovrà rispondere, sia in fase di prelievo che di trasporto, alle direttive dettate dal DM 152/2006 Testo Unico Ambientale e dovrà essere fornito da ditta specializzata nel settore e munita di tutte le autorizzazioni e certificazioni in merito. Le operazioni di estrazione del percolato saranno eseguite alla presenza di un responsabile dell'ARPAC che provvederà al prelievo di un campione da porre ad analisi presso i laboratori dell'Ente di tutela. Oltre al campione destinato all'ARPAC, verranno prelevati altri 2 campioni che verranno sottoposti ad analisi presso laboratorio certificato che provvederà a consegnare i risultati all'Ente gestore della fase di post-bonifica.

Successivamente all'ultimazione della bonifica, si provvederà, così come descritto all'Allegato N°9 *Piano di monitoraggio e controllo post-operativo*, ad effettuare con cadenza temporale prestabilita, il rilevamento del livello di percolato e le analisi di laboratorio degli eventuali campioni prelevati e la rimozione del percolato accumulato. Si specifica che il prelievo dei campioni dovrà essere effettuato mediante bailer asettici monouso.

Il tecnico

Stima delle emissioni di biogas

Premessa

Nel quadro complessivo delle azioni da porre in essere per la messa in sicurezza definitiva e la bonifica della discarica di Colle Sannita, riveste particolare importanza la quantificazione del biogas che si genera in discarica, in funzione della quale viene individuato il sistema per l'eventuale captazione. Vengono esposti in seguito i caratteri salienti della formazione di biogas in discarica di RSU e le metodologie applicate maggiormente per la quantificazione dello stesso. A seguito di quanto sopra, viene applicato il modello ritenuto più adatto alle caratteristiche della discarica, viene quantificato il volume significativo di biogas ancora generabile in discarica ed infine viene proposto il sistema di smaltimento o captazione che concilia in modo efficace gli aspetti tecnici-realizzativi con la sostenibilità economica dell'intervento.

1. L'origine del biogas da discariche di rifiuti

Le discariche di rifiuti solidi urbani sono sorgenti significative di metano (CH_4) e diossido di carbonio (CO_2). In aggiunta a questi due gas sono prodotte anche minori quantità di composti organici non metanici tra i quali alcuni composti organici volatili reattivi e pericolosi. Il metano e l'anidride carbonica sono i costituenti principali del "biogas" (LFG, "landfill gas") e sono prodotti durante la decomposizione anaerobica di sostanza organica e delle proteine presenti nei rifiuti smaltiti in discarica che vengono inizialmente trasformati in zuccheri, poi principalmente in acido acetico ed, infine, in CH_4 e CO_2 .

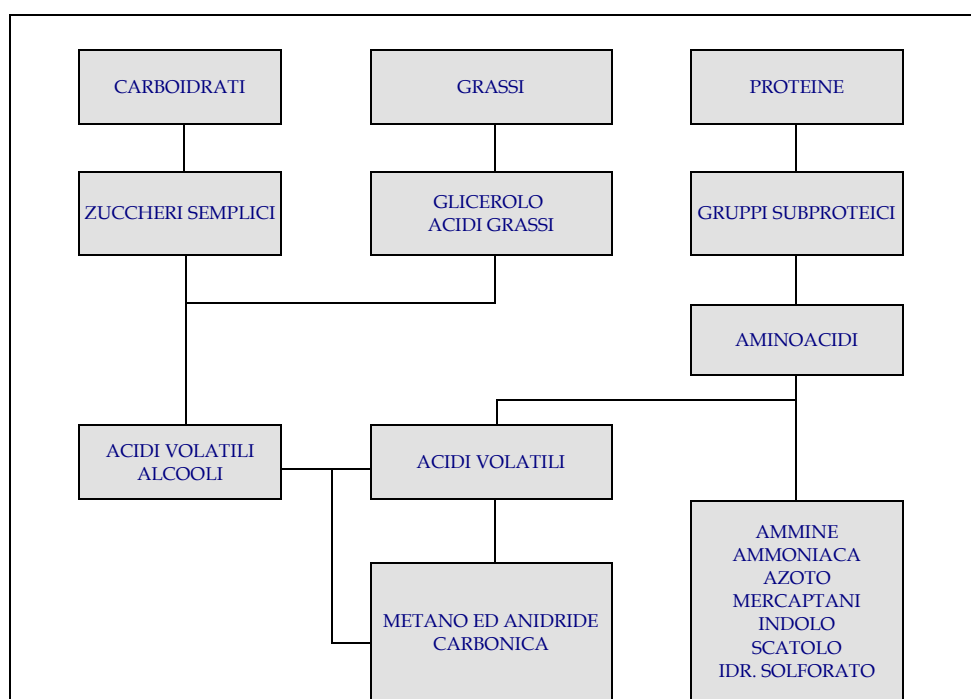


Fig.1 - Rappresentazione schematica dei successivi stati di demolizione della sostanza organica durante il processo di fermentazione anaerobica

La decomposizione anaerobica ha luogo in assenza di ossigeno ed è un processo complesso nel quale le condizioni ambientali giocano un ruolo fondamentale. Tra i fattori ambientali più importanti sono da considerare:

- ✓ il contenuto d'acqua del rifiuto;
- ✓ la presenza e distribuzione dei microrganismi;
- ✓ la concentrazione di nutrienti;
- ✓ la composizione merceologica e la pezzatura media dei rifiuti;
- ✓ il pH e la temperatura all'interno del cumulo di rifiuti;
- ✓ l'eventuale infiltrazione di acqua.

Il processo di generazione del biogas può essere schematizzato in quattro fasi caratteristiche di tutto il ciclo di vita della discarica. Durante tali fasi varia sia la velocità di formazione del biogas che la sua composizione.

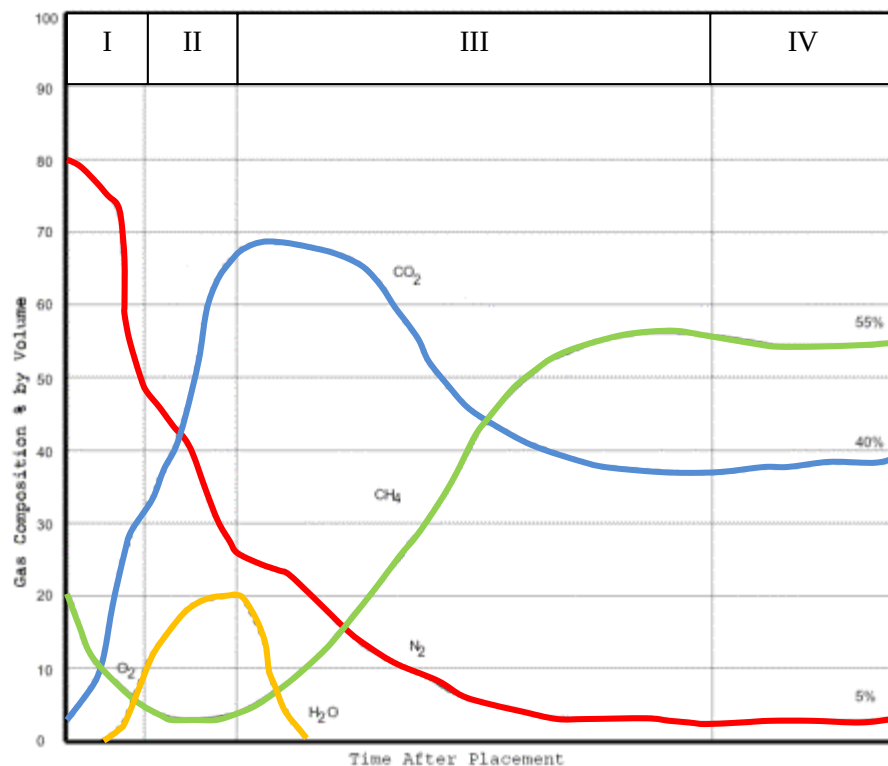


Fig. 2 - Evoluzione tipica della composizione del biogas nel tempo.

Fasi del processo:

- I. Aerobica;
- II. Anaerobica, non-metanica;
- III. Anaerobica, metanica, non-stazionaria;
- IV. Anaerobica, metanica, stazionaria.

La prima fase è "aerobica" ed il principale gas prodotto è l'anidride carbonica (CO₂). La seconda fase è caratterizzata da una forte diminuzione della concentrazione di ossigeno che porta l'ambiente ad operare in condizioni anaerobiche. Si assiste ad una notevole produzione di CO₂ ed, in misura minore, di idrogeno (H₂). Nella terza fase

(sempre anaerobica) inizia la generazione di CH₄ associata ad una riduzione della CO₂ precedentemente prodotta. Il contenuto di azoto (N₂) nel biogas è inizialmente elevato nella prima fase aerobica e decresce molto velocemente durante la seconda e la terza fase (anaerobiche). Nella quarta ed ultima fase la produzione di biogas raggiunge condizioni di quasi stazionarietà e la composizione del biogas rimane pressoché costante. La durata delle varie fasi e dell'intera sequenza dipende dalle condizioni presenti in discarica (composizione del rifiuto, caratteristiche del materiale di copertura, schema progettuale) e può variare anche in funzione delle condizioni climatiche, come la quantità delle precipitazioni atmosferiche e la temperatura ambientale. La produzione di biogas ha un periodo di latenza di circa un anno a causa della presenza di condizioni aerobiche nel periodo iniziale e dell'attività biologica rivolta alla formazione di acidi volatili nella prima fase del processo anaerobico. Nelle discariche tuttavia la produzione di metano potrebbe avere un periodo di latenza iniziale che può durare anche più di un anno. Essa è determinata da due fattori:

- ✓ all'esistenza di condizioni iniziali aerobiche;
- ✓ la prevalenza delle attività biologiche anaerobiche rivolte alla produzione di acidi volatili (batteri acido produttori).

Il periodo di latenza è normalmente caratterizzato da apprezzabili produzioni di idrogeno, oltre che di CO₂. I rifiuti smaltiti in una discarica controllata possono produrre biogas per 20 - 30 anni.

Le reazioni biochimiche di trasformazione della sostanza organica in biogas sono complesse, tuttavia McCarty ne ha proposto una di tipo empirico:



Componenti	Percentuale volumetrica in secco [%]
Metano	47,5
Anidride Carbonica	47,0
Azoto	3,7
Ossigeno	0,8
Idrocarburi Paraffinici	0,1
Idrocarburi policiclici Aromatici	0,2
Idrogeno	0,1
Idrogeno solforato	0,01
Monossido di carbonio	0,1
Composti in tracce (1)	0,5
Caratteristiche	Valore
Temperatura alla sorgente	41°C
Potere Calorifico	Inferiore 17.727 kJ/m ³
Densità	1.04 kg/m ³
Umidità	Saturo (tracce presenti nella fase acquosa) (2)
(1) anidride solforosa, benzene, toluene, cloruro di metilene, percloroetilene e solfuro carbonilico in concentrazione sino a 50 ppm; (2) acidi organici (7,06 mg/m ³) ed ammoniacale (0,71 mg/m ³)	

Tab. 1 - Composizione tipica del biogas da discarica

Oltre alla già nota importanza del metano come gas ad effetto serra, la presenza del CH₄ nelle discariche di rifiuti deve essere monitorata attentamente a causa delle sue caratteristiche esplosive in ambienti confinati non appena la sua concentrazione risulta essere compresa tra il 5% ed il 15%. Inoltre, esso risulta dannoso sia per l'uomo (può provocare asfissia in ambienti chiusi) che per la vegetazione (può avere effetti letali per la vegetazione a causa dell'asfissia delle radici quando esse vengono investite dal gas nel sottosuolo).

2. La stima delle emissioni di metano da discariche mediante modelli previsionali

In linea di massima si può affermare che un modello previsionale della produzione di biogas in discarica sia normalmente costituito da una parte di carattere stechiometrico e da un'altra a carattere biochimico-cinetico.

Il sottomodello stechiometrico ha come input principale la composizione merceologica dei rifiuti posti in discarica controllata, e, come output, la quantità di carbonio organico gassificabile, dalla quale è possibile poi calcolare la quantità massima di biogas producibile dalla degradazione dell'unità di massa di rifiuto;

il sottomodello biochimico descrive invece l'evoluzione temporale del processo di massificazione del carbonio organico disponibile tramite le costanti di degradabilità tenendo conto di alcuni parametri quali il contenuto di acqua, la pezzatura media e la temperatura. La struttura appena descritta caratterizza la maggior parte dei modelli più diffusi, tra cui:

- » **PALOS VERDES** Model;
- » **SCHOLL CANYON** Model;
- » **SHELDON-ARLETA** Model;
- » **MGM EMCOM** Model;
- » **EPA** Model.

In estrema sintesi è tuttavia possibile individuare alcuni parametri fondamentali che sono alla base di un modello revisionale per la produzione di biogas:

- » Contenuto di carbonio organico e sua frazione gassificabile;
- » Cinetica di degradazione della frazione organica;
- » Umidità;
- » Tempo di generazione;
- » Tempo di ritardo iniziale.

3. Contenuto di carbonio organico e sua frazione gassificabile

Appare chiaro come il contenuto di carbonio organico ed il suo grado di degradabilità dipendano dalla composizione merceologica del rifiuto. In via del tutto approssimativa si può considerare che il 50% della sostanza organica sia rappresentato dal carbonio, e che solo la sua metà sia gassificabile.

4. Cinetica di degradazione della frazione organica

La definizione della cinetica di reazione consente di valutare l'evoluzione temporale del fenomeno degradativo e quindi la durata della produzione di biogas.

L'espressione generale è del tipo:

$$DC/dt = f(t, C^n)$$

Dove con C si è indicata la concentrazione di carbonio organico gassificabile e con n l'ordine della cinetica.

Tale relazione è usualmente applicata ad una massa di rifiuti depositata in uno stesso strato o in un determinato periodo (mese o semestre).

Particolare attenzione va rivolta all'esponente n che rappresenta l'ordine del modello. Una cinetica di ordine zero ($n=0$) implica che variazioni non eccessive di C , non influenzano la velocità di massificazione della frazione organica del rifiuto, ed essa quindi risulta evidentemente costante nel tempo, eventualmente influenzabile solo da altre condizioni al contorno, quali il contenuto di acqua e la disponibilità di nutrienti. Alcuni processi dovuti ad un certo numero di reazioni, vengono descritti da cinetiche del secondo ordine ($n=2$) (ad esempio massificazione anaerobica della sostanza organica).

Tuttavia la maggior parte dei modelli attualmente in uso fa riferimento a cinetiche del primo ordine, in cui il fattore limitante del processo è rappresentato dalla concentrazione di carbonio gassificabile residuo.

Questo modello esprime il fatto che la velocità di massificazione presenta normalmente un andamento decrescente nel tempo:

$$-dC/dt = kC$$

con k costante di degradazione (che tiene conto anche della fase di idrolisi), definita, in genere, per almeno tre tipologie di substrato gassificabile:

1. velocemente biodegradabile - RB;
2. mediamente biodegradabile - MB;
3. lentamente biodegradabile - LB.

Umidità

Affinché abbia luogo un'attività di degradazione anaerobica l'umidità del rifiuto deve essere compresa tra il 50% e l'80%. Per valori inferiori, che si registrano per climi aridi o per rifiuti pre-trattati meccanicamente, la cinetica risulta notevolmente rallentata causando un'estensione della durata della fase di produzione del biogas.

Tempo di generazione

La durata del processo di massificazione è considerata variabile tra i 15 ed i 50 anni. Il parametro normalmente considerato per la definizione del tempo di generazione è il cosiddetto tempo di dimezzamento $t_{1/2}$, ovvero il lasso di tempo necessario alla degradazione della metà della quantità complessiva di carbonio gassificabile.

Nei modelli del primo ordine esso è calcolato in funzione della costante di degradazione attraverso l'espressione:

$$t_{1/2} = \ln 2/k$$

Tempo di ritardo iniziale

Rappresenta il tempo necessario per la prima comparsa del biogas, ed è essenzialmente legato al processo di acclimatazione della biomassa responsabile del consumo della sostanza organica biodegradabile. Il valore del tempo di ritardo dipende dalle caratteristiche del rifiuto in termini di biodegradabilità e grado di compattazione, nonché dalle modalità di gestione della discarica.

In base ai dati riportati in letteratura è possibile assumere quali intervalli tipici del tempo di ritardo i seguenti: 0-0,3 anni per la frazione RB, 1,5-2 anni per la frazione MB e circa 5 anni per la frazione LB.

5. Metodologie di stima delle emissioni di metano e risultati

La stima della quantità di metano che si genera dalle discariche di rifiuti viene nel seguito svolta utilizzando una metodologia di calcolo basata sull'utilizzo di una relazione cinetica del primo ordine.

La scelta di una cinetica piuttosto che di un'altra è basata sul grado di conoscenza dei parametri che interessano la relazione in esame.

In questo caso viene utilizzata una relazione proposta dall'EPA e sperimentata anche in Italia, così come ampiamente documentato in bibliografia.

6. Le caratteristiche della discarica

La discarica in esame è ubicata in località "Colle Sannita" nel comune di Colle Sannita. In essa sono stati conferiti esclusivamente RSU non differenziati.

La deposizione dei rifiuti è iniziata nel marzo del 1994, ed è terminata nel settembre del 2002.

Di particolare interesse ai fini delle valutazioni inerenti la produzione di biogas è il calcolo della presenza di sostanza organica biodegradabile e di cellulosa nelle frazioni "carta, cartone e legno". Appare chiaro che un elevato contenuto di sostanza organica, così come si evince dalla tabella sottostante, non fa altro che favorire la produzione di biogas e quindi di metano.

Frazione	%	Note
<i>Sottovaglio</i>	11.0	
<i>Materie Cellulosiche</i>	26.2	carta, cartone, pannolini
<i>Materie Plastiche</i>	15.8	plastica leggera, plastica pesante e gomme
<i>Metalli</i>	3,6	
<i>Materie Inerti</i>	8.0	vetro, inerti pesanti
<i>Materie Organiche</i>	28.9	Scarti mensa, scarti verdi,
<i>Tessili</i>	6.5	Tessili, legno, cuoio

Tab. 3 - Analisi merceologica relativa agli RSU del comune di Colle Sannita

Nella tabella successiva vengono riportate le caratteristiche chimico-fisiche rinvenibili mediamente su rifiuti solidi urbani con caratteristiche simili a quelli conferiti nella discarica di Colle Sannita.

Parametro	%
Umidità	34.25
Carbonio	43.97
Idrogeno	7.27
Ossigeno	36.96
Azoto	1.58
Zolfo	3.92
	kcal/kg
PCI rifiuto tal quale	1931.2

Tab. 4 - Caratteristiche chimico-fisica tipiche relativa agli RSU

4.1 Metodologia cinetica del primo ordine

Un approccio più complesso alla stima delle emissioni di metano dalle discariche è rappresentato dal cosiddetto "modello di decadimento del primo ordine". A differenza della stima condotta attraverso la metodologia ibrida, in cui si è comunque introdotto un fattore temporale, l'approccio cinetico permette una stima dell'andamento delle emissioni nel tempo più conforme ai reali processi che si instaurano nelle discariche. Il modello cinetico del primo ordine è stato ampiamente utilizzato per lo studio delle emissioni di metano da singole discariche, ma può essere efficacemente esteso per la modellizzazione delle emissioni di intere regioni. La relazione di tipo esponenziale rappresenta la formulazione matematica del modello cinetico del primo ordine.

$$Q = k \cdot L_0 \cdot R_x \cdot e^{-k(T-x)}$$

dove:

Q = metano generato nell'anno corrente [$m^3/anno$];

L_0 = metano potenzialmente generabile per unità di rifiuto [m^3/t]. Dipende dalla composizione del rifiuto ed è di difficile stima. I valori possono variare da meno di 100 a più di 200 m^3/t ; (densità gas metano = 0.74 kg/m^3).

R_x = quantitativo di rifiuti smaltiti in discarica nell'anno corrente [$t/anno$];

k = costante di generazione del metano. Dipende dalle condizioni ambientali del sito dove è collocato l'impianto. L'intervallo di variabilità di k va da meno di 0,005 a 0,4 $anno^{-1}$, dove gli alti valori sono associabili a condizioni di elevata umidità in discarica [$anno^{-1}$];

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

T = anno corrente [$anno$].

E' da ricordare che alti valori di k fanno riferimento ad elevata umidità nel corpo della

discarica e che quest'ultimo parametro, insieme a temperatura e pH, rappresenta un fattore chiave che influenza l'intero processo fermentativo alla base della trasformazione della frazione organica dei rifiuti in metano.

Nel caso in esame sono stati considerati i seguenti valori :

$$L_0 = 140 \text{ mc/ton};$$

$$k = 0,05 \text{ anno}^{-1}.$$

I grafici rappresentati in seguito riportano l'andamento della produzione teorica e teoricamente captabile del metano per la discarica di RSU situata nel comune di Colle Sannita alla località Acqua Solfatarata. La valutazione è riferita a due periodi distinti, il primo con inizio nel 1994 e termine nel 1997, il secondo con inizio nel 1998 e termine nel 2002. Questa distinzione è stata fatta in base alle indicazioni dell'Amministrazione Comunale che confermano, per il secondo periodo, una differenziazione degli RSU

Prospetto conferimento rifiuti e produzione biogas 1° periodo

attenzione a non sovrapporre le quantità di RS inserite nei vari anni con quelle del 2° periodo

Anno	Q.tà RS inserita (tonnellate)	biogas teor. generabile (Nm³)	biogas teor. captabile (Nm³)
1989		0	0
1990		0	0
1991		0	0
1992		0	0
1993		0	0
1994	720	0	0
1995	720	18.947	9.473
1996	720	52.561	26.281
1997	720	77.619	38.809
1998		94.119	47.060
1999		83.116	41.558
2000		52.983	26.492
2001		31.041	15.520
2002		17.289	8.644
2003		11.728	5.864
2004		10.262	5.131
2005		8.796	4.398
2006		7.330	3.665
2007		5.864	2.932
2008		4.398	2.199
2009		2.932	1.466
2010		1.649	825
2011		733	366
2012		183	92
2013		0	0
2014		0	0
2015		0	0

Tab. 5 - Riepilogo conferimento RSU per il primo periodo

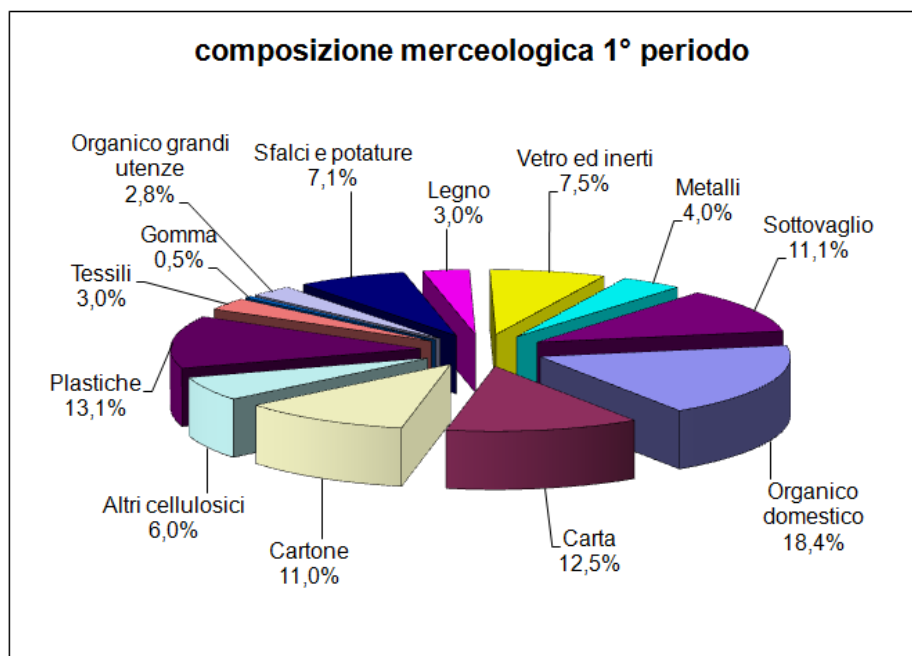


Fig. 3 - Grafico composizione merceologica RSU per il primo periodo

Prospetto conferimento rifiuti e produzione biogas 2° periodo

attenzione a non sovrapporre le quantità di RS inserite nei vari anni con quelle del 1° periodo

Anno	Q.tà RS inserita (tonnellate)	biogas teor. generabile (Nm³3)	biogas teor. captabile (Nm³3)
1989		0	0
1990		0	0
1991		0	0
1992		0	0
1993		0	0
1994		0	0
1995		0	0
1996		0	0
1997		0	0
1998	720	0	0
1999	720	14.719	7.360
2000	720	40.972	20.486
2001	720	60.852	30.426
2002	720	74.361	37.180
2003		81.497	40.749
2004		70.531	35.265
2005		47.636	23.818
2006		30.718	15.359
2007		19.778	9.889
2008		14.814	7.407
2009		12.839	6.419
2010		10.864	5.432
2011		8.888	4.444
2012		6.913	3.457
2013		4.938	2.469
2014		3.160	1.580
2015		1.778	889

Tab. 6 - Riepilogo conferimento RSU per il secondo periodo

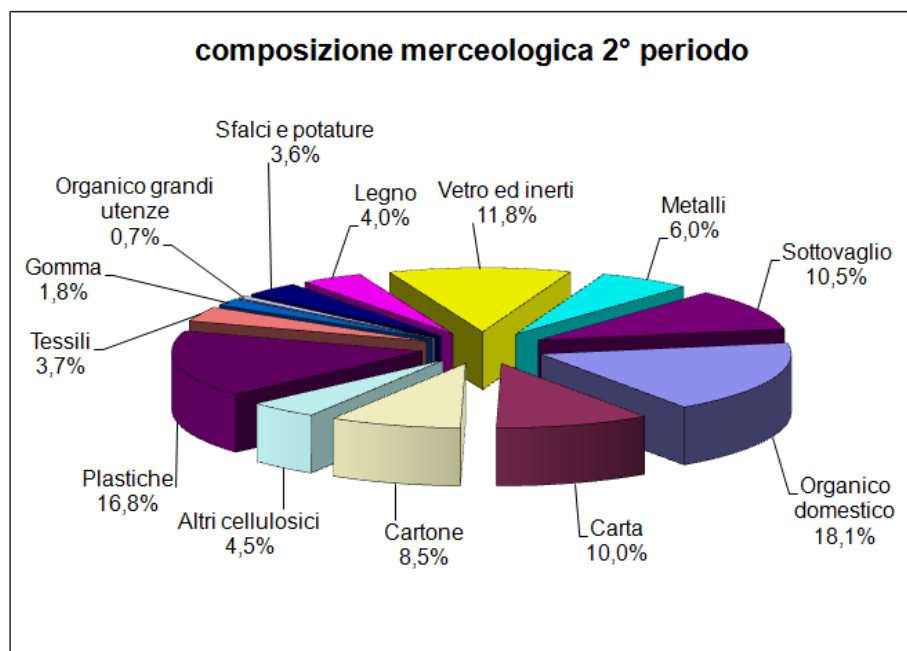


Fig.4 - Grafico composizione merceologica RSU per il secondo periodo

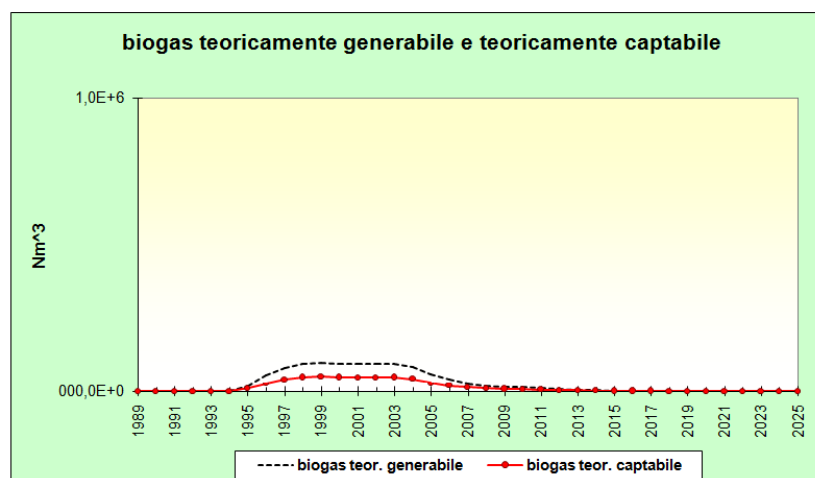


Fig. 5 - Grafico biogas teoricamente generabile e captabile

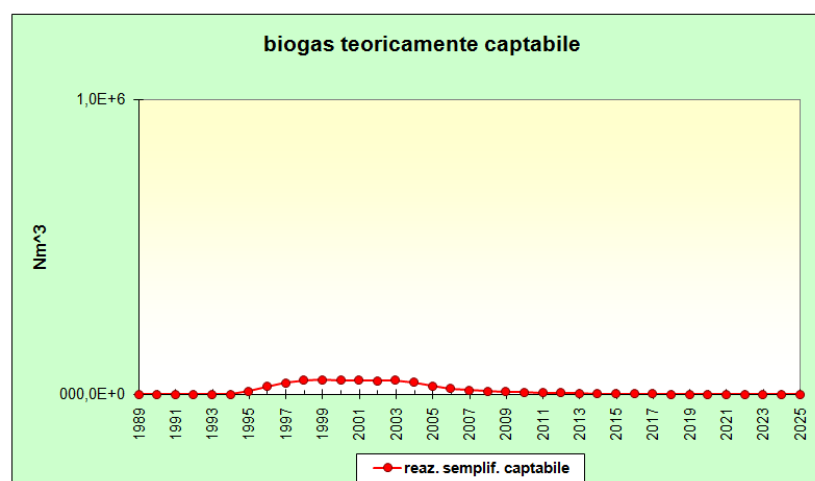


Fig. 6 - Grafico biogas teoricamente captabile

Depurazione del biogas grezzo

Per il recupero dell'energia dal biogas, si impone così un impianto di depurazione che consenta di abbattere gli inquinanti senza dispersioni in atmosfera, ma inviandoli al sistema di trattamento del percolato, consentendo così lo smaltimento negli impianti preposti a questo scopo, e ottenere un Biogas depurato che consenta un funzionamento ottimale dei Motori endotermici e un livello di emissioni in atmosfera ampiamente entro i limiti. In particolare si considerino i seguenti componenti: CO_2 - Anidride Carbonica o Biossido Di Carbonio. La presenza di CO_2 nel Biogas viene ridotta nel processo di abbattimento, nelle torri di lavaggio. Una corretta combustione con un giusto apporto di O_2 porta alla formazione di H_2O che viene persa sotto forma di vapore e di CO_2 , non dando origine al dannoso CO.

- H_2S - Idrogeno Solforato
- HCl - Acido Cloridrico
- HF - Acido Fluoridrico
- Composti Del Silicio

L'idrogeno solforato è prodotto dalla fermentazione anaerobica di prodotti che contengono composti di zolfo. Viene abbattuto pressoché totalmente nelle colonne di lavaggio e quindi avviato di trattamento, evitando così sia la dispersione nell'ambiente sia il trascinamento verso i motori endotermici utilizzatori. L'Acido Cloridrico e l'Acido Fluoridrico vengono anch'essi interamente abbattuti, trasformandosi in Cloruri e Fluoruri di Sodio e Calcio, avviati quindi all'impianto di trattamento.

4.1. I dati a disposizione

I dati disponibili riguardano, innanzitutto, le quantità di rifiuti solidi urbani ed assimilabili agli urbani conferite in discarica. Il conferimento veniva effettuato da personale dell'Amministrazione Comunale e non sono stati redatti registri attestanti i quantitativi conferiti. Si è potuto, comunque, accertare che venivano conferiti giornalmente, in media, 2 tonnellate di RSU in base alla capienza dell'automezzo utilizzato. Facendo riferimento all'intero anno, è stato calcolato un conferimento annuale di 720 tonnellate. In realtà, i valori annui sono stati sicuramente variabili, con una diminuzione per ultimi anni di attività dovuta ad una certa forma di differenziazione. Si è ritenuto opportuno applicare per ogni anno lo stesso valore al fine di ottenere una valutazione, sicuramente sovradimensionata, ma cautelativa.

Anno di conferimento	R.S.U. [tonn]
1994	720
1995	720
1996	720
1997	720
1998	720
1999	720
2000	720
2001	720
2002	720

Tab. 7 - Cronologia del conferimento di rifiuti solidi urbani
(Fonte : Amministrazione comunale di Colle Sannita)

Per quanto riguarda la composizione merceologica del rifiuto smaltito, purtroppo, non esistono studi specifici effettuati sull'impianto, né nell'ambito territoriale in cui è situata la discarica. Allo scopo di poter applicare modelli che richiedono tali dati, si è usata la composizione merceologica media nazionale dei rifiuti prodotti in Italia .

Nel contesto esaminato non è stato e non è possibile valutare la rispondenza dei modelli teorici di generazione di biogas con dati quantitativi reali sul biogas a causa della mancanza di impianti di captazione o aspirazione.

4.2. La scelta dei modelli applicabili

In base ai dati resi disponibili dall'Amministrazione Comunale sulla discarica si è valutata l'applicabilità dei modelli analizzati precedentemente. La necessità di dover effettuare dei test appositi sull'impianto di aspirazione del biogas, per ottenere i parametri necessari, rende l'applicazione del metodo del "Pressure rebound", praticamente impossibile. Alcuni dati richiesti, benché reperibili con apparecchiature non sofisticate, sono, infatti, ad esclusivo uso di questo modello ed è necessario il ricorso a manodopera specializzata e procedure apposite per ottenerli. Oltretutto, il modello avrebbe fornito solo un dato relativo al breve periodo, difficilmente analizzabile in ragione delle trasformazioni subite, nel tempo, dall'impianto e dalle caratteristiche dei rifiuti smaltiti. L'applicazione del modello della "reazione semplificata", così come quella del modello LandGEM dell'Agenzia statunitense di protezione dell'ambiente (EPA), richiede la conoscenza di dati più facilmente ottenibili dall'esame di relazioni tecniche e di parametri di esercizio dell'impianto. I dati necessari riguardano le quantità di rifiuti introdotte in discarica nei vari anni di esercizio dell'impianto e, nel primo caso, le caratteristiche chimico fisiche degli stessi, il contenuto d'acqua, nonché la composizione merceologica del rifiuto e dati sulle percentuali di biodegradabilità delle varie classi. Nel secondo caso sono necessari, per ottenere risultati più attinenti alla situazione reale in esame, dati sulle caratteristiche costruttive e di esercizio del sistema di estrazione del biogas, dati sulla piovosità della zona, sulle caratteristiche di biodegradabilità e sul grado di compattazione raggiunto dal rifiuto.

Viste le precedenti considerazioni ed i dati a disposizione si è ritenuto utile procedere alla applicazione dei metodi della "reazione semplificata" e LandGEM dell'US-EPA ed

alla analisi dei risultati forniti da questi. Si deve comunque notare che i metodi indicati servono, in ogni caso, per effettuare previsioni di massima e fanno riferimento entrambi al biogas teoricamente generabile dalla massa di rifiuti. La quantità di quest'ultimo risulta sempre sensibilmente diversa da quella del biogas "captato" dall'impianto di aspirazione. Inoltre, diversi andamenti delle reazioni biologiche, dovuti a fenomeni non modellabili, e l'eventuale presenza di agenti inibitori, possono influire in modo diverso sulle velocità di reazione e sulla quantità di biogas effettivamente generato.

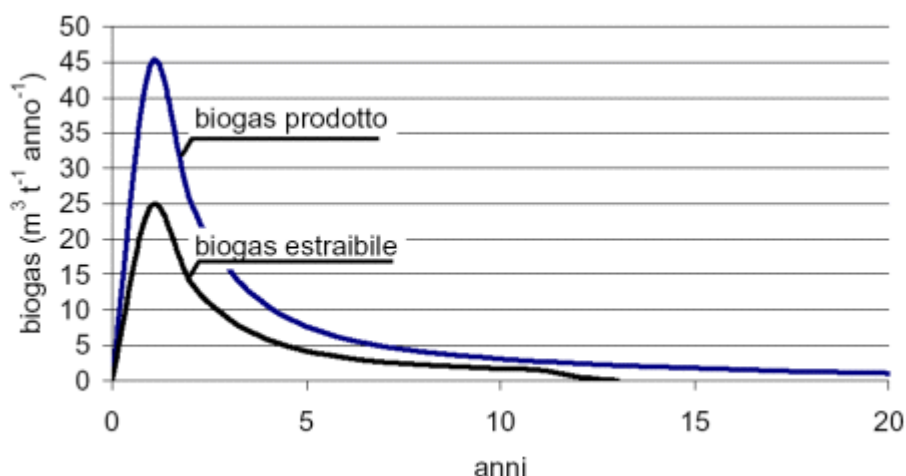


Fig. 7 - Rapporto tra biogas prodotto ed estraibile

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

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

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

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

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

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

Tabella 8 – Composizione merceologica analitica dei RSU (dati medi italiani, 1997)

Come già accennato, considerando l'incidenza della differenziazione durante l'esercizio della discarica sul processo di generazione del biogas, si è deciso di suddividere l'arco di vita della discarica in due intervalli di tempo. Per ognuno dei due periodi è stata poi considerata una diversa composizione merceologica media del rifiuto, in modo da tener conto del minor apporto percentuale di materiale organico negli ultimi anni.

Per il primo arco di tempo, dal 1994 al 1997, quando tutti i rifiuti urbani addotti alla discarica venivano abbancati e non veniva applicata alcuna forma di differenziazione, si è deciso, in mancanza di studi attendibili riferiti a quegli anni, di utilizzare la composizione merceologica media italiana del rifiuto riportata in Tabella 9 e nel grafico seguente. (Fig. 26).

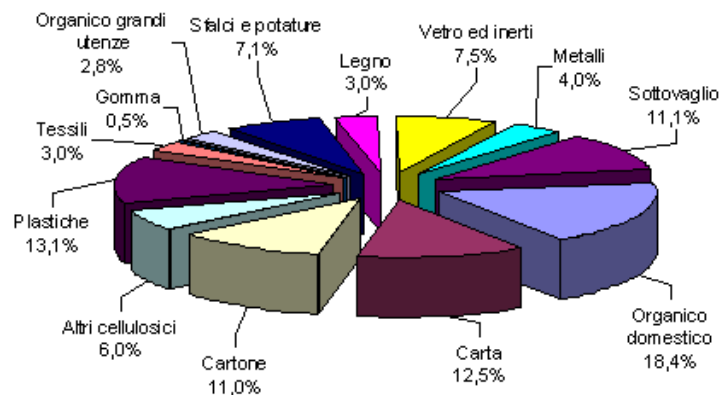


Fig. 8 - Composizione merceologica media RSU italiani

Per il periodo che va dal 1998 al 2002, si è considerata una composizione del rifiuto in cui la frazione organica è stata ridotta, a vantaggio della parte inorganica.

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

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

Tab. 9 – Composizione chimica elementare media delle frazioni merceologiche

Non avendo a disposizione valori certi, sempre attingendo a dati di letteratura, sono state fissate le percentuali di biodegradabilità delle varie classi merceologiche così come riportate nella Tabella 11. Riguardo a questo parametro non esistono molti studi sui rifiuti ai quali poter fare riferimento, e ciò, purtroppo, influisce in maniera determinante sulla precisione dei risultati del modello poiché da questo parametro dipende la quantità di materia che, reagendo, dà origine al biogas. Inoltre, così come già spiegato nella descrizione del modello, bisognerebbe conoscere le velocità di biodegradazione in modo da poter trattare separatamente le quantità di materia che reagiscono più velocemente e quelle che al contrario, vengono degradate nel lungo periodo.

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

Tab. 10 – Percentuali di biodegradabilità usate nei calcoli

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

Il foglio elettronico creato può essere adattato a diversi "scenari" e sono modificabili a piacimento tutti i parametri qualitativi e quantitativi del rifiuto, nonché gli intervalli di tempo caratteristici del modello. Vengono inoltre rappresentati e messi a confronto in più grafici gli andamenti nei vari anni della generazione teorica di biogas, delle quantità teoricamente captabili e di quelle realmente captate dall'impianto.

Microsoft Excel - reazione_semplificata+2merceologie.xls										
File Modifica Visualizza Inserisci Formato Strumenti Dati Finestra ?										
Aria 10 G C S [Formattazione] [Stili] [Tabelle] [Diagrammi] [Strumenti] [Dati] [Finestra] [?]										
K1	fx									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
3	Parametri del metodo della "reazione semplificata" per il 1° periodo									
4	Negli inerti è incluso lo zolfo									
5	Categoria merceologica	% umidità u.i	% biodegr. B.i	Reaz. Veloce V.i	Reaz. Lenta L.i	C	H	O	II	Inerti
6						% s.s.	% s.s.	% s.s.	% s.s.	% s.s.
7	Organico domestico	75,00%	65%	100%	0%	28,70%	3,10%	29,20%	1,90%	37,10%
8	Carta	15,00%	50%	100%	0%	44,40%	4,40%	40,90%	0,10%	10,20%
9	Cartone	12,50%	45%	100%	0%	44,00%	5,90%	44,60%	0,30%	5,20%
10	Altri cellullosici	20,00%	45%	100%	0%	44,20%	5,15%	42,75%	0,20%	7,70%
11	Plastiche	6,00%	0%	0%	0%	60,00%	7,20%	22,80%	0,00%	10,00%
12	Tessili	20,00%	50%	0%	100%	39,60%	6,50%	25,30%	5,60%	23,00%
13	Gomma	2,00%	0%	0%	0%	78,00%	10,00%	0,00%	2,00%	10,00%
14	Organico grandi utenze	70,00%	65%	100%	0%	28,70%	3,10%	29,20%	1,90%	37,10%
15	Sfaldi e potature	50,00%	60%	40%	0%	45,50%	8,70%	20,10%	1,80%	23,90%
16	Legno	22,00%	65%	0%	100%	49,50%	6,00%	42,70%	0,20%	1,60%
17	Vetro ed inerti	2,50%	0%	0%	0%	0,50%	0,40%	0,40%	0,15%	96,05%
18	Metalli	4,00%	0%	0%	0%	4,50%	0,60%	4,30%	0,10%	90,50%
19	Sottovaglio	40,00%	20%	0%	100%	26,30%	3,00%	2,00%	0,50%	68,20%
20	% s.s. = percentuale riferita alla sostanza secca									
21	aggi automatico									
22										
23	Categoria merceologica	% in peso w.i	% secco w.s.i	% s.biodegr.veloce w.s.bd.j.V	% s.biodegr.lenta w.s.bd.j.L	quantità reazione VELOCE (% su tal quale)				
24						C	H	O	II	Inerti
25	Organico domestico	18,40%	4,60%	2,99%	0,00%	0,86%	0,09%	0,87%	0,06%	1,11%
26	Carta	12,50%	10,63%	5,31%	0,00%	2,36%	0,23%	2,17%	0,01%	0,54%
27	Cartone	11,00%	9,63%	4,33%	0,00%	1,91%	0,26%	1,93%	0,01%	0,23%
28	Altri cellullosici	6,00%	4,80%	2,16%	0,00%	0,95%	0,11%	0,92%	0,00%	0,17%
29	Plastiche	13,10%	12,31%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
30	Tessili	3,00%	2,40%	0,00%	1,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,48%
31	Gomma	0,50%	0,49%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
32	Organico grandi utenze	2,80%	0,84%	0,55%	0,00%	0,16%	0,02%	0,16%	0,01%	0,20%
33	Sfaldi e potature	7,10%	3,55%	1,28%	0,85%	0,58%	0,11%	0,26%	0,02%	0,31%
34	Legno	3,00%	2,34%	0,00%	1,52%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,75%
35	Vetro ed inerti	7,50%	7,31%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
36	Metalli	4,00%	3,84%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	Sottovaglio	11,10%	6,66%	0,00%	1,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,35%
38	Totali	100,00%	69,40%	16,62%	4,91%	6,82%	0,82%	6,32%	0,11%	2,55%
39										
40										
41										
42										
43										
44										
45										
46										
47										
48										
49										
50										
51										
52										
53										
54										
55										
56										
57										
58										
59										
60										
61										
62										
63										
64										
65										
66										
67										
68										
69										
70										
71										
72										
73										
74										
75										
76										
77										
78										
79										
80										
81										
82										
83										
84										
85										
86										
87										
88										
89										
90										
91										
92										
93										
94										
95										
96										
97										
98										
99										
100										

Fig. 9 - Foglio elettronico realizzato per il modello della "reazione semplificata"

Se per di più è possibile prevedere l'andamento dell'afflusso in discarica dei rifiuti urbani per gli anni a venire, si possono facilmente ottenere dei dati quantitativi su cui poter effettuare valutazioni e scelte, sia tecniche che economiche. Si potrebbero usare, per esempio, i risultati ottenuti per il dimensionamento di massima di un impianto di captazione e per valutare l'opportunità di installare un sistema di recupero energetico. Il metodo utilizzato permette di calcolare la quantità di biogas teoricamente generabile dalla massa di rifiuti. La quantità effettivamente generata, e quindi teoricamente captabile in condizioni ottimali (recupero del 100%), è in realtà molto inferiore. Molti Autori indicano che la quantità di biogas effettivamente generata si aggira intorno al 50% di quella che si otterrebbe nel caso che tutta la materia degradabile reagisse completamente e anaerobicamente. Infatti, non tutto il materiale degradabile deposto in discarica può decomporsi, anche perché talvolta manca l'acqua necessaria alle reazioni chimiche ed ai microrganismi. Inoltre, nel primo periodo che segue la sistemazione dei rifiuti in discarica, prevalgono le reazioni aerobiche e non si ha produzione di metano. Ciò è chiaramente rappresentato dal grafico seguente, ottenuto con i dati reali del caso di studio ed ipotizzando un afflusso costante di rifiuti pari a 720 t/anno fino al 2002, anno di chiusura della discarica.

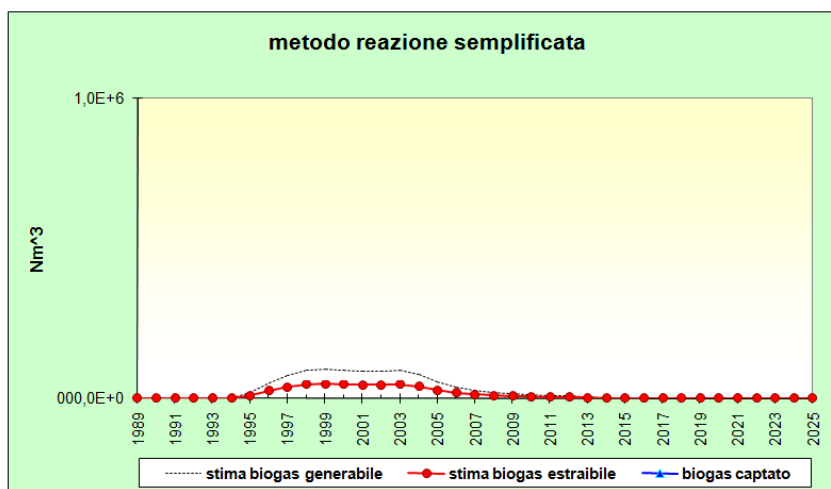


Fig. 10 - Grafico del metodo della reazione semplificata

4.4 - Valutazione economica e tecnica di realizzazione dell'impianto di captazione e sfruttamento

Al fine di giustificare la necessita o meno di un impianto di estrazione del biogas, si è ritenuto opportuno effettuare una simulazione dell'ipotetico utilizzo dello stesso biogas, considerando il suo utilizzo per l'alimentazione di un cogeneratore con motore endotermico classico di piccola taglia per la produzione di energia termica ed energia termica. Abbiamo considerato a tale scopo l'utilizzo di un cogeneratore da 20kW e valutato, in base al consumo standard orario (m^3/h) dello stesso, il periodo di funzionamento con riferimento al quantitativo in m^3 biogas reperibile dalla discarica per un intervallo del secondo periodo di vita che va dal 2014 al 2018 (vedi tabella allegata). In seguito sono riassunti i risultati di calcolo.

Anno	Biogas teoricamente captabile	Consumo orario (m^3/h)	Ore totali di funzionamento	Giorni di funzionamento
2014	1580	7,4	213,24	8,87 gg
2015	889	7,4	120,13	5 gg
2016	395	7,4	53,37	2,2 gg
2017	99	7,4	13,37	0,5 gg
2018	0	7,4	0	0

Tab. 11 – Periodo di funzionamento del cogeneratore

	Energia prodotta Kwh/anno	Costo energia (€/Kwh)	Costi di acquisto e installazione (€)	Ricavi da energia prodotta (€)	Differenza costi ricavi (€)
	4270	0.18		768,6	
	2402	0.18		432,36	
	1067	0.18		192,06	
	267	0.18		48,06	
	0	0.18		0	
TOTALI	8006		- 35.000	+ 1441.08	-33.558,92

Tab. 12 – Stima dei ricavi

L'energia elettrica prodotta, usando come combustibile il biogas, può essere venduta all'ENEL con un ricavo di circa 8,5 eurocent per KWh. Per ottenere una resa positiva dal funzionamento dell'impianto, si deve valutare un tempo di ammortamento di spesa compreso tra 24 e 30 mesi. Inoltre, da casi di studio in merito, la realizzazione di un

impianto per la produzione di energia elettrica dal biogas è conveniente solo se si dispone di una portata di biogas all'impianto superiore ai 200 m³/ora e per potenze installate a partire da 400 KW. L'investimento di capitale, per poter realizzare le strutture impiantistiche necessarie al sito in esame, non è eccessivo e può essere valutato considerando un impegno economico intorno a €1.000/kW installato (cogeneratore endotermico 20 kWp) e ulteriori € 15.000 di spesa per installazione della rete di captazione. E' stato preventivato dunque un impegno economico di €35.000. Dalla tabella XX si evince che a fronte di € 35.000 di spese per impianto di captazione e cogenerazione, si registrano entrate €1.441,08 con una perdita di €33.558,92 che non potranno essere recuperati nemmeno nel lungo termine in quanto dal 2014 al 2017 si registrerebbero volumi sempre decrescenti di biogas con una stima di funzionamento nell'intero intervallo temporale di soli 17 giorni. A questo punto si è ritenuto superfluo valutare l'entità di energia termica producibile che sicuramente è dello stesso ordine di grandezza dell'energia elettrica. Per quanto riguarda gli aspetti puramente tecnici è da considerare che gli impianti di captazione assolvono al massimo alle proprie potenzialità esclusivamente se vengono progettati contestualmente alla realizzazione della discarica, in quanto i camini di estrazione vengono posizionati in modo tale da intercettare il biogas per l'intero spessore di rifiuti abbancati. Per il sito in esame, al fine di ottenere una configurazione ottimale sarebbe necessario effettuare delle perforazioni all'interno del corpo di discarica con elevati rischi per gli operatori in fase di realizzazione e con la concreta eventualità di intercettare e perforare la membrana di fondo elevando le condizioni di contaminazione da parte del percolato. Si evince dunque che le già esigue volumetrie captabili in base ai calcoli effettuati con l'applicazione della reazione semplificata, sono ulteriormente penalizzate da quanto esposto in precedenza. Inoltre, la metodologia di abbancamento di RSU è stata effettuata senza seguire lo schema a moduli indipendenti e lo stato di inattività della discarica si protrae da circa dieci anni. Questi ultimi aspetti portano a considerare che la produzione di biogas residuo è stata ed è sicuramente discontinua a livello temporale e non omogenea riguardo all'area ed allo spessore di discarica, con la probabile localizzazione di piccole sacche di accumulo, di cui non si conoscono le dimensioni e la precisa ubicazione e la cui intercettazione sarebbe estremamente casuale.

5. CONCLUSIONI

Lo sfruttamento del biogas prodotto in discarica è sicuramente un ottimo metodo per poter recuperare energia da materiali che non possono più essere sfruttati in nessun altro modo. In quest'ottica, l'utilizzo di metodi per stimare la quantità di biogas producibile nel tempo può rappresentare un valido strumento a supporto dell'opera del progettista o di chi preposto alla gestione di un futuro impianto di captazione e sfruttamento. L'uso di tali metodi è tanto più proficuo quante più informazioni si è in grado di fornire sulla quantità di rifiuti da smaltire e sulla composizione degli stessi. In generale, già in fase di progetto della discarica è utile, infatti, stabilire la convenienza o meno dell'installazione di un impianto per il recupero energetico ed eventualmente adottare delle soluzioni impiantistiche mirate ad ottenere il massimo rendimento di captazione. Nel caso in esame, la stima è stata effettuata prendendo in considerazione una discarica progettata e realizzata senza opere di recupero del biogas. Si è potuto stimare la produzione di biogas residuo e valutare, in base ai volumi captabili, la

convenienza, ambientale, tecnica ed economica derivante dall'installazione di un sistema di captazione. Tra i modelli esaminati, quello della "reazione semplificata" è quello che ha fornito i risultati migliori, soprattutto nella forma adattata a considerare due diverse distribuzioni della composizione merceologica del rifiuto in due periodi distinti, la cui ampiezza può essere variata secondo necessità. Le stime fornite rispecchiano con ottima approssimazione l'andamento dei dati reali relativi al caso specifico della discarica di Colle Sannita, ed è ipotizzabile una corrispondenza altrettanto buona con altre realtà, quantomeno italiane. Per quanto riguarda il caso di studio, il quantitativo di gas captato corrisponde a circa il 60% di quanto si stimi possa essere la produzione reale di biogas in discarica (calcolata col modello della "reazione semplificata"). Tale risultato è perfettamente nella media dei casi riportati in letteratura. Al contrario, l'utilizzo del modello LandGEM dell'US-EPA non ha portato, nella situazione esaminata, a risultati soddisfacenti, soprattutto per quanto riguarda la possibilità di prevedere la generazione di biogas per gli anni a venire. Ciò probabilmente è dovuto a differenti ipotesi sulle quali è stato basato il modello, legate ad una realtà, quella americana, dalle caratteristiche troppo dissimili da quelle italiane, sia per quanto riguarda la composizione del rifiuto (che in questo modello non viene presa in considerazione), che per le dimensioni tipiche degli impianti. Il metodo della "reazione semplificata" è, quindi, da preferirsi, e per ottenere risultati ancora migliori, sarebbe vantaggioso eseguire indagini più accurate sulla composizione dei rifiuti abbancati in discarica e procedere ad una omogeneizzazione degli stessi. Dai risultati ottenuti, si può concludere che il controllo della produzione di biogas, coadiuvato dall'utilizzo di un idoneo modello matematico previsionale, quale può essere quello della "reazione semplificata", può svolgere un ruolo importante ai fini di una oculata gestione operativa e post-operativa delle discariche, volta ad ottenere il minimo impatto ambientale ed il massimo recupero possibile di energia dai rifiuti. Analizzando i risultati emersi dalla valutazione economica e tecnica effettuata per comprendere se sia necessario o meno realizzare un impianto di captazione e sfruttamento del biogas, si giunge alle seguenti conclusioni. Il prospetto economico, delle eventuali entrate derivanti da sfruttamento del biogas, denuncia una evidente perdita di risorse, peraltro irrecuperabili, considerando che l'investimento è di gran lunga superiore alle esigue entrate. Si conclude dunque che non si ritiene necessario predisporre un sistema di captazione e sfruttamento del biogas, ma unicamente un sistema di monitoraggio dello stesso mediante camini di espulsione a depressione naturale.

Il tecnico

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, (2001). Sardinia 2001

Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, LEACHATE AND LANDFILL GAS, Volume II, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italia.

2. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, (1999). Sardinia 99

Seventh Waste Management and Landfill Symposium, LEACHATE, GAS, OPERATION AND HEALTH EFFECTS IN LANDFILLS, Volume II, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italia.

3. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, (1995). Sardinia 95 *Fifth International Landfill Symposium, CONCEPTS, PROCESSES, TECHNOLOGIES & OPERATION, Volume I*, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italia.

4. G. Pasquali, B. Bonori, M. Bergonzoni, (2001). *Landfill gas production valued with a mathematical method*, in Sardinia 2001 (Rif.1), pp. 443 – 450.

5. Eastern Research Group, Inc, for the Committee of the Emission Inventory Improvement Program and US-EPA Air Pollution Prevention and Control Division, (2001). VOL.III, C.15, LANDFILLS. EPA, North Carolina, USA.

6. Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, US-EPA, (08/1997; 11/1998). Emission factor documentation for AP-42 Section 2.4 Municipal solid waste landfills, US-EPA, North Carolina 27711, USA.
7. S.A. Thorneloe et al., (1998). *User's Manual - Landfill Gas Emission Model Ver. 2.01*, US-EPA Air Pollution Prevention and Control Division, Research Triangle Park, North Carolina 27711, USA.

8. G. Thrupp, J.M. Lamborn, T.A. Delfino, (1999). Landfill Gas generation rates estimated from pressure rebound in extraction systems, in Sardinia 99 (Rif. 2), pp. 449 – 456.

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

10. ANPA Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ONR Osservatorio Nazionale sui Rifiuti, (2001). *Rapporto Rifiuti 2001*, ANPA, Roma.

11. ANPA Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ONR Osservatorio Nazionale sui Rifiuti, (1999). *Secondo rapporto sui rifiuti urbani e sugli imballaggi e rifiuti di imballaggio*, ANPA, Roma.

12. Provincia di Ancona, (2001). *Piano Provinciale di Gestione Rifiuti della Provincia di Ancona*. Supplemento n° 23 al B.U.R. n° 91 del 09 Agosto 2001.

13. Regione Marche, (2000). *Piano Regionale per la Gestione dei Rifiuti*. B.U.R.M. n° 7 del 25/01/2000
14. U.S. Environmental Protection Agency (1999). *Municipal Solid Waste Landfills, Volume 1: Summary of the Requirements for the New Source Performance Standards and Emission Guidelines for Municipal Solid Waste Landfills*. US-EPA Office of Air Quality Planning and Standards, EPA-453/R-96-004. Research Triangle Park, North Carolina, USA.
15. SO.GE.NU.S. S.p.A. – Studio Mosca, (1996-2002), *Rapporti tecnici trimestrali sulla gestione dell'impianto di smaltimento RSU ed RSA, discarica "Cornacchia", Moie di Maiolati Spontini (AN)*.
16. P. Carrescia, G. Caldelaresi, Provincia di Ancona, *La produzione dei rifiuti solidi urbani nella Provincia di Ancona dal 1991 al 1994*. Provincia di Ancona.
17. G. Pasquali, (2000), *Dispense del corso di Ingegneria Chimica Ambientale*. Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Bologna.
18. Comitato Tecnico Discariche, (1997), *Linee guida per le discariche controllate di rifiuti solidi urbani*. Centro di Ingegneria Sanitaria Ambientale, Cagliari.
19. G. Lonati, *Appunti di Ingegneria Sanitaria Ambientale*. Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria. Cremona.
20. ENEA, (1999). *Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili*, ENEA, Roma.
21. Istituto di Ricerche Ambiente Italia, Legambiente, (2002). *Ambiente Italia 2002*, Edizioni Ambiente.
22. Sito internet dell'U.S. Environmental Protection Agency, *The Landfill Methane Outreach Program* – www.epa.gov/lmop/
23. Sito internet dell'U.S. Environmental Protection Agency, *The Office of Solid Waste (OSW)* – www.epa.gov/epaoswer/osw/index.htm
24. Sito internet dell'Enea, Ente per le nuove tecnologie, l'energia e l'ambiente – www.enea.it
25. Legambiente, Centro di documentazione ambientale di Roma, –www.legambiente.com

26. Sito internet dell'ANPA, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente – www.sinanet.anpa.it

27. Sito internet del CTN-RIF ANPA Centro Tematico Nazionale Rifiuti – www.arpa.piemonte.it/ctnrifiuti/ctn_home_rif.htm

28. Sito internet del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – www.minambiente.it

29. Sito internet della Commissione Europea, settore Ambiente – http://europa.eu.int/comm/environment/index_it.htm

30. Sito internet dell'azienda SO.GE.NU.S. S.p.A. – Raccolta, trasporto, smaltimento, deposito temporaneo rifiuti pericolosi, impianto di trattamento rifiuti speciali, impianto di compostaggio, gestione impianti di smaltimento RSU ed assimilabili, speciali industriali – www.sogenus.com

31. Sito internet istituzionale della Provincia di Ancona, Area Tutela dell'Ambiente – www.provincia.ancona.it

32. Sito internet del DIAR Sezione Ambientale del Politecnico di Milano – www.amb.polimi.it

33. Sito internet dell'Ing. G. Ciciliani – www.ciciliani.isgreat.net