

# Un modello matematico per la simulazione del processo di produzione del percolato in discarica controllata

S. M. Alfieri\*, M. Lamberti\*, P. P. Franzese\*\*, F. Giordano\*

\*\*Dipartimento di Scienze dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata

\*Istituto Matematica, Fisica ed Applicazioni, Università degli Studi di Napoli Parthenope

## Riassunto

L'impatto ambientale, anche a lungo termine, di una discarica controllata adibita allo stoccaggio dei rifiuti solidi urbani è essenzialmente legato alla dispersione dei prodotti di degradazione della componente organica dei rifiuti: percolato e biogas. In questo lavoro viene descritto un modello matematico sviluppato in ambiente MATLAB in grado di fornire simulazioni quantitative del processo di produzione del percolato in discarica. Una valutazione dell'attendibilità del modello proposto è stata effettuata mediante la sua applicazione alla discarica di Montegrosso (Comune di Potenza). Le simulazioni generate dal modello sono risultate discretamente accurate ed il confronto con i dati sperimentali forniti dal gestore dell'impianto ha consentito la validazione dei risultati.

## Introduzione

Negli ultimi anni è stata intrapresa una politica mirata allo sviluppo della raccolta differenziata, finalizzata al riutilizzo ed al riciclo dei materiali presenti nei rifiuti. Nonostante gli sforzi compiuti nel tentativo di indirizzare il nostro paese verso una gestione ottimale del sistema complessivo di smaltimento dei rifiuti urbani attraverso l'introduzione di sistemi integrati di smaltimento che includono il recupero, il riciclaggio, il compostaggio e la termodistruzione, la discarica controllata rappresenta ancora oggi il principale sistema di smaltimento dei rifiuti solidi urbani per molte realtà territoriali. Tra i diversi sistemi di smaltimento dei rifiuti quest'ultima risulta infatti quello più facilmente realizzabile e con problematiche di ordine tecnico, economico e legislativo minori.

I danni provocati alle matrici ambientali da tale sistema di smaltimento sono essenzialmente legati alla dispersione dei prodotti di degradazione della componente organica dei rifiuti: **il percolato ed il biogas**.

I problemi relativi alla dispersione del percolato nel sotto-

suolo possono essere minimizzati attraverso la posa in opera di membrane impermeabilizzanti, le quali non permettono la diffusione dei liquidi dal corpo della discarica all'ambiente circostante. Tale metodica presuppone un continuo monitoraggio per verificare l'integrità della membrana impermeabile, nonché la presenza di un sistema di drenaggio in grado di convogliare il percolato in cisterne di stoccaggio provvisorio per la raccolta ed il successivo trasporto in impianti di depurazione. La normativa vigente (D.lgs. 36/2003) impone che siano pianificate tutte le fasi dello smaltimento dei rifiuti in discarica. Il soggetto che richiede l'autorizzazione ha infatti l'obbligo di presentare una descrizione dettagliata degli interventi previsti sia nella fase di attività dell'impianto, che in quella di post-chiusura. Lo stesso Decreto legislativo, oltre ai piani di gestione operativa, post-operativa e di ripristino ambientale, prevede un piano di sorveglianza e controllo incentrato sulle misure da adottare per prevenire l'inquinamento delle acque da infiltrazioni di percolato nel terreno.

L'articolo 11 al comma 1 recita infatti: "Al momento della collocazione del rifiuto in discarica, il detentore deve fornire precise indicazioni sulla composizione merceologica, sul

la capacità di produrre percolato, sul comportamento a lungo termine e sulle caratteristiche generali del rifiuto da collocare in discarica”.

L’implementazione di modelli matematici in grado di simulare le reali condizioni nelle quali opera un sito di stoccaggio dei rifiuti consente una stima sufficientemente accurata delle volumetrie di percolato prodotto nel tempo da una discarica controllata. L’utilità delle simulazioni modellistiche si evidenzia sia nelle fasi di pianificazione di una discarica (dimensionamento degli impianti, verifiche di fattibilità, analisi tecniche, ecc.) che in quelle di controllo e monitoraggio (migrazioni di percolato alla falda, valutazione del rischio e dell’impatto ambientale).

In particolare, in questo lavoro viene descritto un modello matematico sviluppato dagli autori (Alfieri, 2004; Lamberti, 2002) e successivamente applicato alla discarica di Montegrosso (Comune di Potenza) al fine di valutare la sua affidabilità.

### Il modello “PRODPERC”

Il modello matematico “**Prodperc**” è stato sviluppato in ambiente MATLAB 6.1. Esso è realizzato sulla base di un modello idrologico applicato al corpo della discarica, tenendo conto di diversi fattori quali: le caratteristiche della discarica (dimensionamento e pendenza degli strati di coltivazione), i parametri meteorologici (temperatura e piovosità), le caratteristiche merceologiche del rifiuto e le modalità di gestione della discarica (composizione del rifiuto e del terreno di ricoprimento, presenza di canalette perimetrali per la raccolta delle acque piovane e ricircolo del percolato in discarica). I modelli di produzione del percolato solitamente sono basati sul bilancio idrologico nel corpo della discarica, ma spesso trascurano il contributo relativo alle reazioni biochimiche e quello inerente l’umidità del rifiuto. Questi fattori, generalmente di importanza secondaria, in alcuni casi possono invece assumere una certa consistenza. Una di queste situazioni si verifica quando le discariche sono collocate in regioni aride nelle quali la produzione di percolato è solo in parte legata alle precipitazioni e di conseguenza l’alto contenuto di umidità del rifiuto può giocare un ruolo rilevante nel processo di produzione del percolato. Altri fattori spesso ignorati sono la variazione della capacità di campo del rifiuto (Safari, 2002) ed i fenomeni di assestamento degli strati che rallentano il fenomeno della percolazione (Tchobanoglous, 1993).

Il modello “**Prodperc**” include nel bilancio idrologico il contenuto di umidità del rifiuto, nonché il calcolo delle variazioni della sua capacità di ritenzione (capacità di campo). E’ inoltre basato su di un approccio di tipo deterministico, nel quale ogni termine del bilancio idrologico è valutato separatamente mediante la sua esplicitazione analitica.

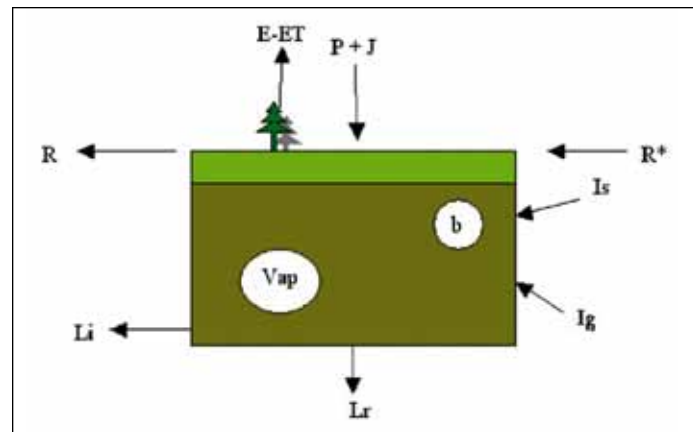


Fig. 1 - Schematizzazione del bilancio idrologico per una discarica controllata.

In Figura 1 viene rappresentato lo schema idrologico utilizzato da “**Prodperc**”, il cui bilancio può essere formalizzato nella seguente equazione:

$$I = P-ET + \Delta U_c + I_s + I_g + R^* + J$$

La quantità di percolato prodotto viene calcolata attraverso la seguente equazione<sup>1</sup>:

$$L_r = I + \Delta U_c + I_s + I_g + R^* + J$$

considerando la variazione di umidità nei rifiuti ( $\Delta U_{rsu}$ ) e nel terreno di ricoprimento ( $\Delta U_r$ ), la perdita di umidità dal rifiuto sotto forma di vapore (**vap**) e quella dovuta ai processi biologici di trasformazione della sostanza organica (**b**).

In generale possono essere trascurati: gli apporti dalle acque di falda ( $I_g$ ), il ruscellamento da zone limitrofe alla discarica ( $R^*$ ) e le infiltrazioni superficiali ( $I_s$ ), nonché le perdite attraverso il manto impermeabilizzante, supponendo che la discarica sia ben impermeabilizzata e circondata da canalette perimetrali per la raccolta dell’acqua piovana.

Il modello fisico-matematico è stato strutturato schematizzando il sistema discarica in strati, ognuno dei quali corrisponde alla quantità di rifiuto e terreno di ricoprimento abbancati in essa nel periodo di un anno. La scelta di una discretizzazione annua è risultata dall’assunzione di due condizioni di base:

- 1) Nel primo anno la produzione di biogas di uno strato di rifiuto è supposta essere pari a zero.
- 2) Tutta l’acqua che entra in uno strato, se non trattenuta dal rifiuto, percola sul fondo.

Il programma di calcolo realizzato dal modello è composto da circa 200 istruzioni e richiama 4 *function* denominate: **Vs**, **Rusc**, **Evap**, **Darcy**, composte complessivamente da circa 140 istruzioni. La *function* “**Vs**” calcola la produzione specifica volumetrica di biogas, in termini sia di acqua catabolica dei processi di idrolisi, sia di metano, ammoniaca ed anidride carbonica. I suoi dati di *input* sono: la quantità di residui alimentari e vegetali, carta, cartone, tessili, pelli, cuoio e legno. In Figura 2 viene rappresentata la quantità di biogas

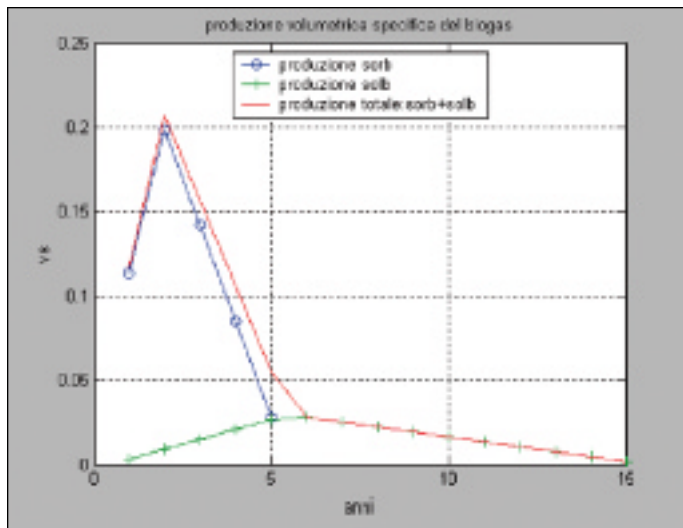


Fig. 2 - Produzione volumetrica specifica di biogas (Totale, SORB e SOLB).

prodotto ed il contributo fornito dalla sostanza organica lentamente biodegradabile (SOLB) e rapidamente biodegradabile (SORB).

La *function* “Rusc”, parte dalla *formula Razionale*<sup>2</sup> che calcola il ruscellamento come un’aliquota delle precipitazioni. I suoi parametri di *input* sono il coefficiente di ruscellamento e le precipitazioni.

La *function* “Evap” calcola la quantità d’acqua persa dalla discarica per evaporazione. I valori sono ricavati a partire dalla *formula di Turc*<sup>3</sup>. I suoi parametri di *input* sono: la temperatura e la precipitazione media mensile.

La *function* “Darcy” calcola, sulla base della *legge di Darcy*<sup>4</sup>, la quantità di percolato che fuoriesce da uno strato di rifiuti. I suoi parametri di *input* sono: l’altezza del rifiuto e del terreno di ricoprimento, la precipitazione efficace ed il numero di strati.

Il modello “Prodperc” è strutturato per generare cinque fasi principali:

1. Il modello legge i dati di *input* relativi al rifiuto, alla disca-

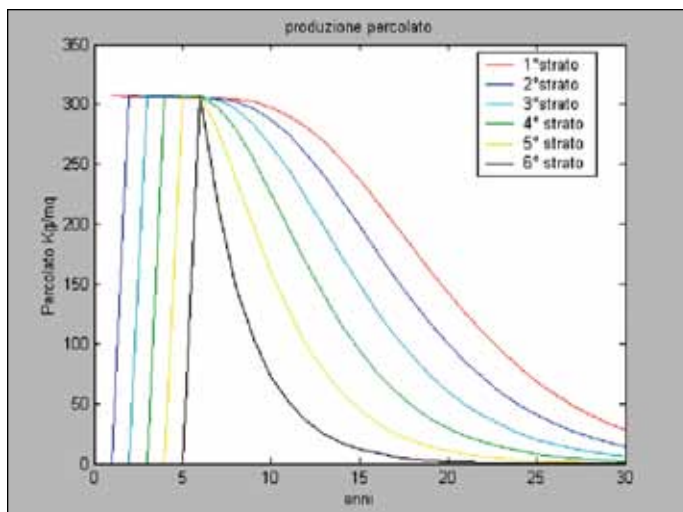


Fig. 3 - Produzione di percolato (Kg m<sup>-2</sup>) in 30 anni e per 6 strati.

rica ed al terreno di ricoprimento.

2. Viene calcolato il valore della precipitazione efficace annua negli *n* anni di esercizio della discarica; sono a questo livello richiamate le *function* “Rusc” ed “Evap”.
3. In un primo ciclo viene calcolata la quantità di percolato prodotto dagli strati superficiali: 1° strato al 1° anno, 2° strato al 2° anno, fino all’ennesimo strato all’ennesimo anno. Le *function* richiamate sono “Vs” e “Darcy”.
4. In due cicli innestati, per gli anni d’esercizio della discarica e per gli strati che compongono la discarica, viene calcolata la quantità di percolato prodotto da ciascuno strato a partire dal secondo anno di vita di ciascuno strato: 1° strato al 2° anno, 2° strato al 3° anno, 1° strato al 3° anno e così via fino al 1° strato all’ennesimo anno. Le *function* richiamate sono “Darcy” e “Vs”.
5. Sempre con due cicli innestati, viene calcolato il percolato prodotto a partire dall’anno *n*+1-esimo fino all’anno in cui si intende investigare la produzione di percolato (ad esempio per 30 anni). Le *function* richiamate sono “Darcy” e “Vs”.

Infine, “Prodperc” restituisce in *output* una matrice (*n* x *a*) nella quale *n* rappresenta il numero degli strati per i quali viene simulata la produzione di percolato, mentre *a* si riferisce al numero di anni nei quali è simulato il fenomeno di percolazione. Al fine di valutare i fenomeni di assestamento della massa di rifiuto, che incidono sulla compattezza dello strato rallentando il fenomeno della percolazione, è stato inserito un fattore che tiene conto della percentuale di liquido che in un anno non riesce a percolare dallo strato, restando intrappolato in quest’ultimo. Tale quantità viene considerata come contributo al contenuto d’umidità dello strato per le iterazioni successive. Inoltre, per simulare il rallentamento della percolazione si è deciso di diminuire la permeabilità del rifiuto (*K<sub>r</sub>*) di ciascuno strato di un fattore 0,2 per ogni strato sovrastante.

Nelle Figure 3 e 4 vengono riportate delle simulazioni di prova ipotizzando una porzione di discarica con una superficie di 1 m<sup>2</sup> e considerando delle condizioni di esercizio stan-

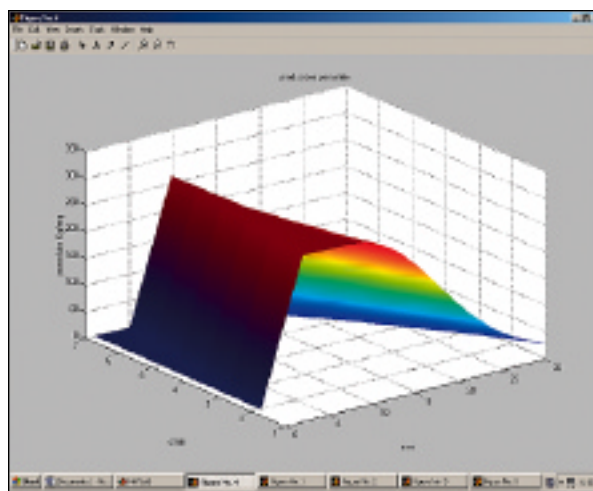


Fig. 4 - Rappresentazione 3D della produzione di percolato (Kg m<sup>-2</sup>) in 30 anni e per 6 strati.

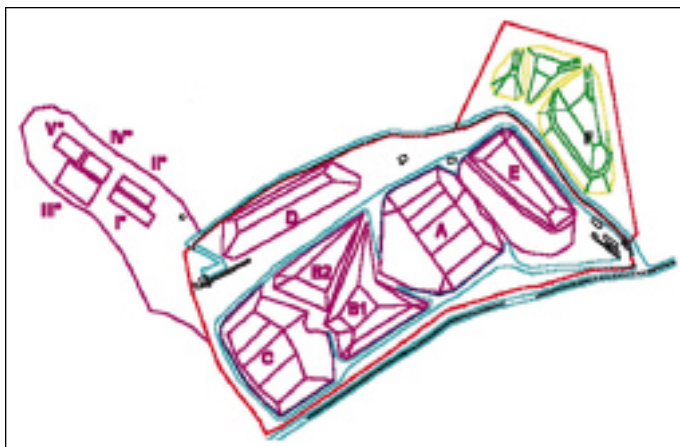


Fig. 5 - Planimetria della discarica di Montegrosso (Comune di Potenza).

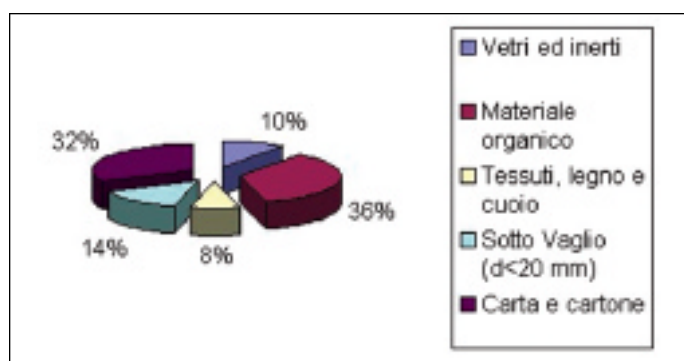


Fig. 6 - Composizione merceologica del rifiuto nel Comune di Potenza.

dard. I grafici in due e tre dimensioni visualizzano la produzione di percolato (espressa in kg m<sup>-2</sup>) di tutti gli strati della discarica nel periodo di 30 anni.

Una prima validazione del modello "Prodperc" è stata ottenuta attraverso l'applicazione del bilancio di massa che ha consentito l'esclusione di eventuali difetti strutturali nel programma.

### Caso studio: la discarica controllata del Comune di Potenza

#### Il sistema discarica

Il caso studio ha interessato la discarica controllata del Comune di Potenza, situata in località Montegrosso e composta da numerose vasche di stoccaggio. L'impianto è stato avviato nel 1989 e dal 1997 viene gestito dall'Azienda Comunale per la Tutela dell'Ambiente (A.C.T.A - Potenza), alla quale è affidata anche la raccolta dei rifiuti nel territorio comunale. Il sito di discarica è situato ad un'altitudine di circa 800 m sul livello del mare, ha un'estensione di circa 10 ha (ettari) ed è costituito da sei lotti principali esausti (denominati A, B1, B2, C, D ed E; Figura 5) nei quali sono stati conferiti, a partire dal 1989 e fino a settembre 2003, esclusivamente rifiuti solidi urbani. Dello stesso complesso fanno parte ulteriori vasche di conferimento: una attualmente in fase di coltivazione (vasca F) ed un'altra contigua, di più piccole dimen-

Lotto	Periodo di conferimento	Volumetria nominale (m <sup>3</sup> )	R.S.U. (Mg)	Fanghi (Mg)	Totale (Mg)
D	Mag 89 - dic 89	10.000	16.000	0	16.000
A	gen 90 - mar 93	100.000	76.000	15.200	91.200
C	apr 93 - sett 95	96.000	58.000	11.600	69.600
B2	ott 95 - sett 96	20.000	23.000	4.800	28.300
B1	ott 96 - giu 98	80.000	41.400	8.000	49.400
A	lug 98 - giu 99	100.000	25.000	0	25.000
B2	lug 99 - ago 00	20.000	30.800	0	30.800
E	sett 00 - sett 03	90.000	86.300	0	86.300
F	ott 03 - gen 04	63.000	9.400	0	9.400

Tabella 1 - Discarica di Montegrosso: cronologia.

sioni, non ancora attiva. Ai lotti dedicati alla raccolta di rifiuti solidi urbani, si aggiungono altri invasi di piccole dimensioni destinati al conferimento di inerti e scorie derivanti dalla termodistruzione dei rifiuti solidi urbani (lotti I, II, III, IV, V).

Gli impianti di interrimento controllato sono stati realizzati adottando tutte le misure preventive previste dalla normativa vigente atte ad evitare la dispersione dei prodotti della decomposizione dei rifiuti nell'ambiente circostante.

Per ogni lotto gli argini ed il fondo delle vasche sono stati accuratamente impermeabilizzati. Inoltre, sono presenti sistemi di estrazione del percolato con pozzi all'interno dei bacini di discarica e rete drenante posta sul fondo delle vasche. Il biogas prodotto viene raccolto grazie ad apposite reti di captazione costruite al procedere dei piani di coltivo o successivamente alla fase di coltivazione.

In Tabella 1 sono indicate per ciascuna vasca di conferimento le date di inizio e fine abbancamento dei rifiuti e le volumetrie smaltite, suddivise in rifiuti solidi urbani (R.S.U.) e fanghi.

La discarica di rifiuti urbani attualmente in fase di coltivazione presenta una volumetria di circa 63.000 m<sup>3</sup> ed è destinata allo smaltimento finale dei rifiuti solidi urbani prodotti dal Comune di Potenza.

La composizione del rifiuto che confluisce nella discarica di Montegrosso è stata valutata attraverso l'analisi della sua frazione merceologica, eseguita dall'A.C.T.A. - Potenza e dall'Università degli Studi della Basilicata (Anonimo, 1999). Il grafico in Figura 6 mostra le percentuali delle diverse frazioni merceologiche suddivise nelle seguenti categorie: carta e cartone; plastica e gomma; metalli; vetro ed inerti; materiale organico; tessuti, legno e cuoio.

Le caratteristiche climatiche della zona interessata dalla discarica indicano una piovosità moderata e ben distribuita nel corso dell'anno. La stazione meteo di Brindisi di Montagna (gestita dall'Agenzia Lucana per lo Sviluppo in Agricoltura) ha registrato nell'anno 2003 una piovosità pari a 669 mm anno<sup>-1</sup>. Pertanto, in tali condizioni, il processo di produzione del percolato in discarica risulta fortemente condizionato dall'apporto delle piogge, le quali influenzano il rap-

MESE	Vasca raccolta percolato N° 1	Vasca raccolta percolato N° 2	Silos raccolta percolato	Totale Complessivo
	(quantitativo espresso in kg)			
Gennaio	447.400	197.940	200.000	845.340
Febbraio	469.720	102.520	184.000	756.240
Marzo	508.740	238.860	208.000	955.600
Aprile	446.380	192.900	168.000	809.280
Maggio	256.020	159.860	199.550	615.430
Giugno	222.760	31.820	158.440	413.020
Luglio	190.420	54.680	165.530	410.630
Agosto	221.820	110.100	175.790	507.710
Settembre	195.140	28.380	167.350	390.870
Ottobre	332.120	139.900	181.970	653.990
Novembre	339.600	113.140	182.240	634.980
Dicembre	315.760	114.880	182.240	550.690
<b>TOTALE</b>	<b>3.947880</b>	<b>1.484.980</b>	<b>2.110.920</b>	<b>7.543.780</b>
Vasca raccolta percolato N° 1	Vasca raccolta percolato N° 2	Silos raccolta percolato		
Quantitativi di percolato provenienti da:				
Vasca rifiuti "A"	Vasca rifiuti "C"	Vasca rifiuti "E"		
Vasca rifiuti "B1"	Vasca rifiuti "D"			
Vasca rifiuti "B2"				

Tabella 2 - Percolato prodotto dalla discarica di Montegrosso (Potenza); riepilogo anno 2003.

porto tra evaporazione e precipitazioni, incrementando quindi la quantità di acqua che si infiltra in discarica nel tempo.

**Applicazione del modello "Prodperc"**

Il modello "Prodperc" è stato applicato ai singoli lotti della discarica di Montegrosso e le simulazioni prodotte sono state successivamente confrontate con i dati sperimentali forniti dal gestore dell'impianto<sup>5</sup>.

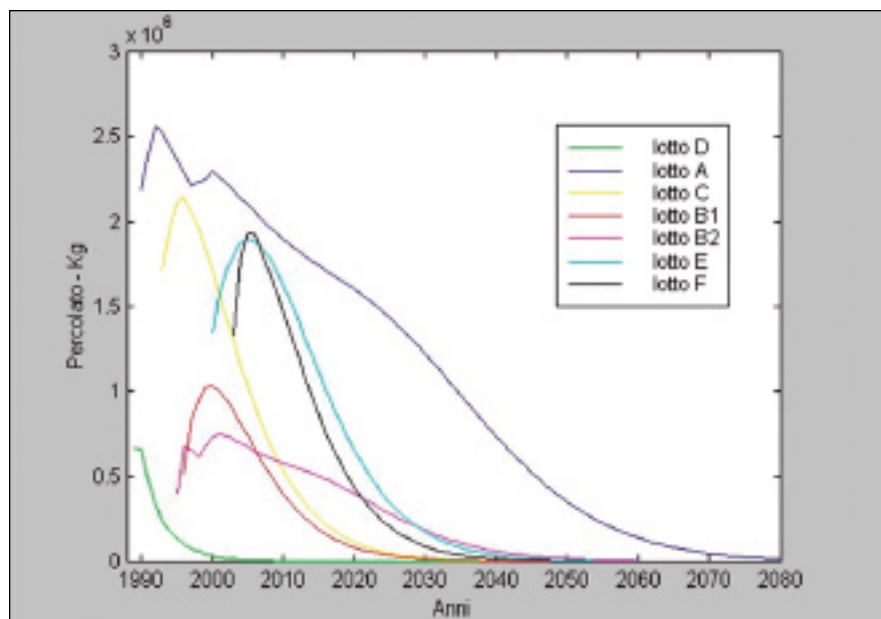


Fig. 7 - Discarica di Potenza: produzione di percolato per i singoli lotti di discarica.

L'impianto di discarica è suddiviso in quattro settori, realizzati in tempi diversi. Il primo settore è costituito dai lotti C e D; il secondo dai lotti A, B1 e B2; il terzo dal lotto E. Il quarto settore comprende una vasca attualmente in fase di coltivazione (F) ed un'altra non ancora attiva. In particolare, i dati necessari per inizializzare il modello, e, sulla base dei quali è stata verificata la sua attendibilità, si riferiscono ai quantitativi totali di percolato delle vasche di raccolta che raccolgono il percolato per i diversi settori.

Poiché ognuno di questi settori possiede un'unica vasca di raccolta del percolato non è stato possibile confrontare le simulazioni con i dati sperimentali dei singoli lotti, eccetto che per la vasca E.

Il primo passo è stato quindi quello di simulare i quantitativi di percolato prodotti applicando il modello ai singoli lotti del complesso (Figura 7).

Dai risultati ottenuti si può rilevare come la produzione di percolato aumenti durante gli anni di attività della discarica per poi decrescere, fino ad annullarsi dopo un periodo di tempo compreso tra i 30 ed i 40 anni. Questo andamento temporale riflette bene il reale processo di produzione del percolato, come rilevato anche attraverso i dati di letteratura. L'aumento della produzione nei primi anni di vita della discarica è dovuto principalmente al contributo delle acque meteoriche, il quale risulta superiore rispetto alle condizioni di discarica esaurita.

La normativa vigente impone infatti che la copertura del sito di discarica venga effettuata con materiali in grado di ridurre al minimo l'infiltrazione delle acque di precipitazione. Inoltre, nel periodo iniziale di esercizio della discarica la potenza di ritenzione degli strati di rifiuto è ancora ridotta e l'acqua infiltrata raggiunge in tempi più brevi lo strato di drenaggio. "Procedendo con l'abbancamento, i rifiuti operano una crescente ritenzione delle acque d'infiltrazione, esercitando altresì un'azione di laminazione: ne deriva una più contenuta produzione di percolato che si mantiene per lo più diluita nel tempo" (Gervasoni, 2001).

Nella fattispecie, i quantitativi stimati attraverso le simulazioni del modello sono risultati essere coerenti con la produzione attesa. Osservazioni statistiche su discariche esistenti dimostrano che la frazione maggiore di percolato prodotto è legata al valore delle precipitazioni nella misura media del 17%<sup>6</sup>. I valori simulati dal modello "Prodperc" oscillano tra il 15% ed il 20%, risultando quindi in pieno accordo con i dati di letteratura.

Nel grafico in Figura 8 vengono ad esempio riportate le percentuali di percolato simulate

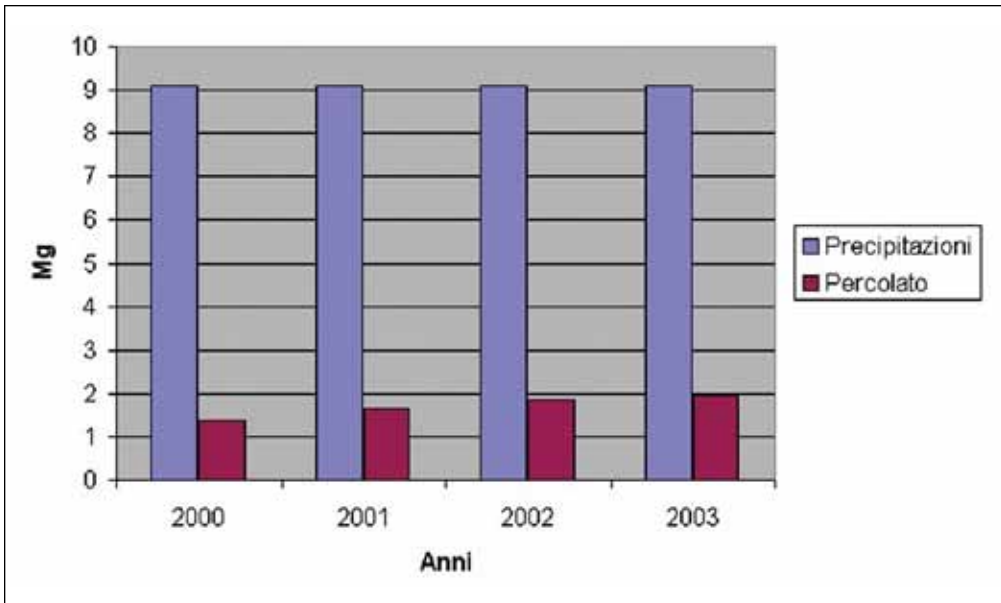


Fig. 8 - Produzioni di percolato simulate e precipitazioni annue: Lotto E.

in relazione alle piogge annue totali e per gli anni di attività del lotto E.

Nella seconda fase del caso studio, al fine di validare i risultati ottenuti, si è proceduto al confronto dei valori stimati attraverso le simulazioni con i dati sperimentali delle quantità di percolato raccolto nell'anno 2003 per le vasche di raccolta numero 1 e 2 e per il silos di raccolta. (Figure 9, 10 ed 11). Sono stati, inoltre, sommati i contributi alla produzione complessiva di percolato per ciascuno dei lotti che confluiscono i liquidi di percolazione nelle tre vasche di raccolta.

Sono stati quindi calcolati gli errori percentuali per le produzioni di percolato stimate attraverso le simulazioni del modello:

- 3 % sulla stima del percolato raccolto nella vasca N° 1;
- 12 % sulla stima del percolato raccolto nella vasca N° 2;
- 14 % sulla stima del percolato raccolto nel silos di raccolta.

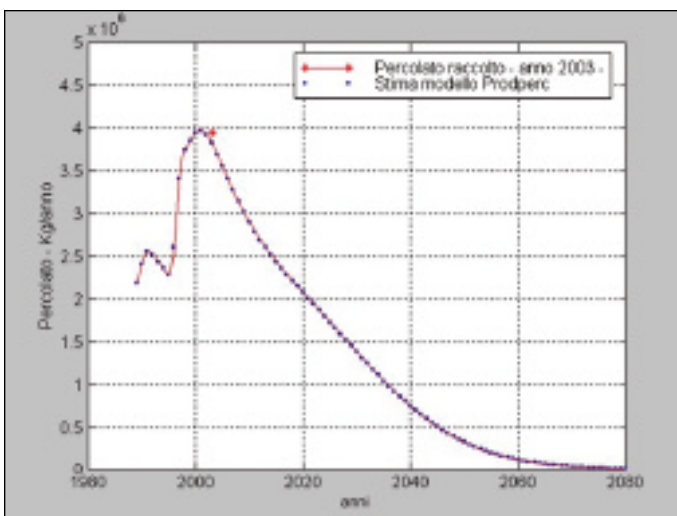


Fig. 9 - Produzione simulata: confronto con i dati sperimentali della vasca N° 1.

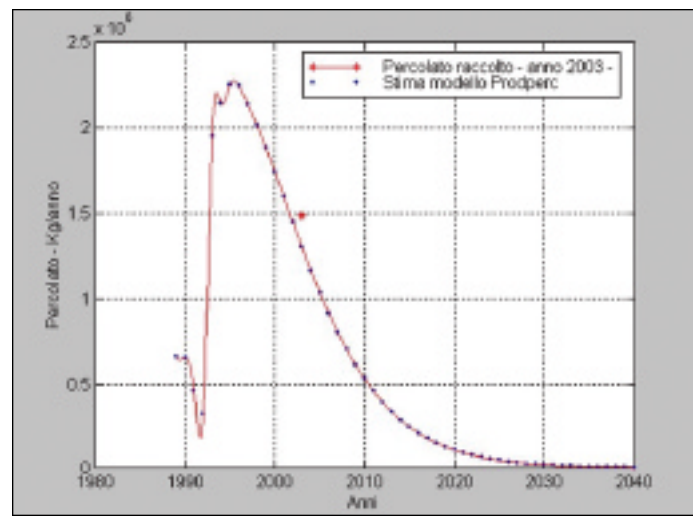


Fig. 10 - Produzione simulata: confronto con i dati sperimentali della vasca N° 2.

Tali valori confermano l'attendibilità dei risultati del modello, almeno per quanto concerne i quantitativi totali di percolato prodotto nel tempo. Ulteriori approfondimenti si rendono necessari infatti per valutare l'attendibilità dei risultati rispetto alla quantità di liquido che annualmente riesce a percolare attraverso gli strati, ovvero rispetto alla sua distribuzione temporale. A tal fine, disponendo di una serie temporale di dati sperimentali inerenti le produzioni complessive di percolato negli anni 1997 - 2003, si è proceduto ad un ulteriore confronto tra i dati sperimentali e la produzione complessiva simulata dal model-

lo "Prodperc" (Figura 12). Come si può notare, la curva simulata descrive abbastanza accuratamente la curva della produzione reale costruita sulla base dei dati sperimentali. L'errore percentuale medio risulta infatti del 14%.

Si rileva, inoltre, una leggera tendenza del modello ad anticipare i trend di produzione del percolato.

### Conclusioni

La conoscenza dei principi che regolano il processo di formazione del percolato in una discarica controllata, nonché la simulazione modellistica delle sue produzioni quantitative, risulta di notevole interesse non solo in merito alle problematiche di previsione e controllo dell'impatto ambientale a medio e lungo termine, ma anche, ad esempio, per poter pia-

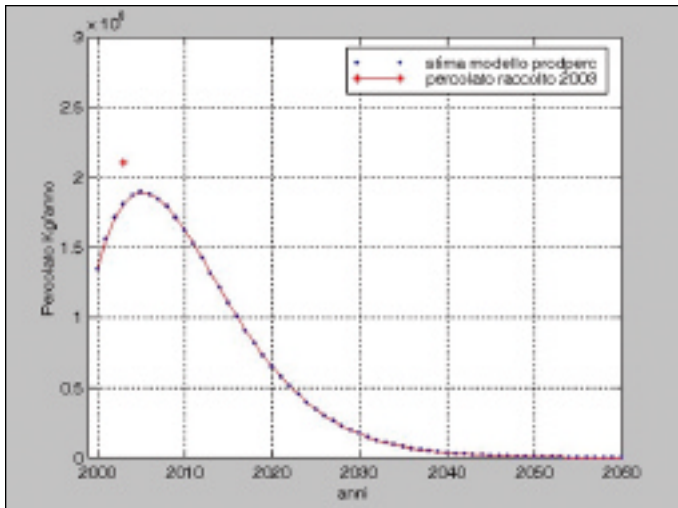


Fig. 11 - Produzione simulata: confronto con i dati sperimentali dei silos di raccolta.

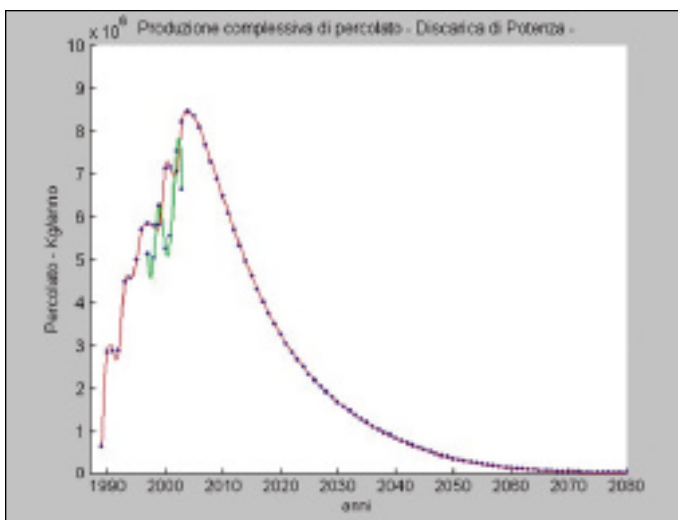


Fig. 12 - Produzione complessiva di percolato nella discarica di Potenza (curva rossa = simulazione modello Prodperc; curva verde = dati sperimentali).

nificare le modalità ed i tempi del suo smaltimento. Le simulazioni modellistiche della produzione di percolato realizzate mediante l'applicazione del modello "Prodperc" hanno fornito stime discretamente accurate. Tali stime risultano inoltre utili anche per la valutazione di interventi mirati alla riduzione dei tempi di smaltimento del percolato o per l'identificazione dell'impiantistica necessaria per un eventuale trattamento di depurazione *in-situ*, nonché per il suo corretto dimensionamento.

Tuttavia, i risultati forniti dal modello potrebbero essere ottimizzati considerando una discretizzazione mensile o stagionale, anziché quella annua. Il modello ipotizza infatti un aumento istantaneo del volume dei rifiuti, mentre nella realtà i conferimenti in discarica sono distribuiti sull'arco dell'intero anno. Inoltre, le portate di pioggia utilizzate si riferiscono a medie annue e pertanto non tengono conto delle variazioni stagionali degli afflussi. La combinazione di questi due fattori crea una discrepanza tra la produzione simulata e quella

reale, registrata anche dall'anticipo dei *trend* di produzione stimata nel confronto con i valori sperimentali.

In conclusione, possiamo comunque affermare che l'utilizzo di un approccio modellistico consente la simulazione delle produzioni di percolato in discarica con una accuratezza tale da consentire lo svolgimento di funzioni pianificatorie e di prevenzione del danno ambientale da parte dell'Ente gestore dell'impianto.

**Note**

- 1) I = infiltrazione; P = precipitazione; ET = evapotraspirazione;  $\Delta U_c$  = variazione di umidità del materiale di ricoprimento;  $I_s$  = infiltrazioni superficiali;  $I_g$  = apporti dovuti alle acque di falda;  $R^*$  = ruscellamento dalle aree limitrofe alla discarica; J = ricircolo.
- 2)  $R = (c * p)$   
(dove c = coefficiente di ruscellamento; p = pioggia totale annua).
- 3)  $E_{10} = (P_{10} + a) / (1 + (P_{10} + a) / L)^{1/2}$   
(dove  $P_{10}$  = precipitazione nel periodo di 10 giorni;  $E_{10}$  = evaporazione nel periodo di 10 giorni; a = quantità massima di acqua che può evaporare dal suolo in 10 giorni; L = fattore eliotermico).
- 4)  $q = K_s * H / hr$   
(dove q = quantità di percolato che riesce a fuoriuscire da uno strato di rifiuto;  $K_s$  = permeabilità del rifiuto; hr = altezza del rifiuto; H = altezza della falda sospesa).
- 5) Il gestore della discarica ha potuto fornire i dati di produzione, separati in base alle quantità estratte dalle diverse vasche di raccolta, solo relativamente all'anno 2003.
- 6) Percentuali di percolato inferiori al 10% rispetto al totale delle precipitazioni annue si riferiscono a discariche relativamente giovani, mentre valori superiori al 25% si riferiscono a discariche in attività da diversi anni.

**Bibliografia**

- 1) Alfieri, S. M. (2004). Il sistema delle discariche controllate nella Provincia di Potenza: studio modellistico integrato. Tesi di Laurea in Scienze Ambientali. Università degli Studi di Napoli Parthenope.
- 2) Anonimo (1999). Campagna di indagini sulla composizione dei rifiuti solidi urbani della città di Potenza. Azienda Comunale Tutela Ambientale, Università degli studi della Basilicata, Rapporto interno.
- 3) Celico, P. (1988). Prospezioni idrogeologiche, Liguori Editore.
- 4) D'Antonio, G. (1997). Trattamento dei rifiuti solidi urbani. Maggioli Editore.
- 5) Ficco, P., F. Gerardini (1999). La gestione dei rifiuti il nuovo sistema dopo il decreto Ronchi, Edizione ambiente.
- 6) Gervasoni, S. (1991). Discariche Controllate, Hoepli.
- 7) Islam, J., N. Singhal (2002). A one-dimensional reactive multi-component landfill leachate transport model, *Environmental Modelling & Software*, **17**: 531-543.
- 8) Lamberti, M. (2002). Il percolato nelle discariche di R.S.U. Un modello matematico per la verifica della produzione di percolato in discarica. Tesi di Laurea in Scienze Ambientali. Università degli Studi di Napoli Parthenope.
- 9) Safari, E., C. Baronian (2002). Modelling Temporal Variation in Leachate Quantity Generated at Kahrizak Landfill, *Proceedings of iEMS 2002 session*, **1**: 482-486.
- 10) Tutore, G. Nuove discariche controllate di rifiuti solidi. Dario Flaccovio Editore.
- 11) Tchobanoglous, G. (1993). Integrated solid waste management - Engineering Principles and management issues, Mc-Graw-Hill.