

## Un algoritmo interattivo su personal computer per il calcolo della contaminazione e delle dosi conseguenti ad un incidente nucleare in Europa

Eugenio TABET

Laboratorio di Fisica, Istituto Superiore di Sanità, Roma (\*)

**Riassunto.** - L'algoritmo RANA (*radiological assessment of nuclear accidents*) permette di valutare in modo parametrico (per le diverse condizioni di diffusione atmosferica) le conseguenze di un incidente nucleare in un impianto europeo mediante il calcolo della struttura spaziale e temporale della contaminazione radioattiva propagatasi dalla sorgente e delle dosi collegate. RANA è espresso nel linguaggio di *Mathematica* e si avvale di un set di ipotesi semplificate sulla propagazione della nube e sulla catena che porta dalla contaminazione alle dosi agli individui esposti al materiale radioattivo. I calcoli, che sono effettuati con un personal computer, forniscono, attraverso pannelli interattivi di uso immediato, i valori delle dosi individuali e collettive a varie distanze dalla sorgente e a vari tempi. In caso di contaminazione diffusa, se non è conosciuto il termine di sorgente, RANA fornisce la struttura delle conseguenze radiologiche della contaminazione su base provinciale, regionale o nazionale.

*Parole chiave:* incidente nucleare, contaminazione radioattiva, dosi da radiazioni.

**Summary** (*An interactive algorithm for the calculation of the radiological consequences of a nuclear accident in Europe*). - The algorithm RANA (*radiological assessment of nuclear accidents*) is a tool which can be exploited to estimate the space and time structure of the radiological consequences of a radioactive release following a nuclear accident in Europe. The algorithm, formulated in the language of *Mathematica*, can be run on a personal computer. It uses simplified physical assumptions as for the diffusion of the cloud and the transfer of the contamination to the food chain. The user gets the needed information by means of interactive windows that allow a fast evaluation of dose and contamination profiles. Calculations are performed either starting from the source terms or from the knowledge of experimental contamination data. Radiological consequences, such as individual or collective doses from several exposure paths, are parametrized in terms of the atmospheric diffusion categories.

*Key words:* nuclear accident, radioactive contamination, dose evaluation.

### Introduzione

Il calcolo delle conseguenze di un rilascio di radioattività in un punto del continente europeo, suscettibile di dar luogo ad una contaminazione apprezzabile anche sul nostro territorio (e magari anche a dosi di rilievo), è tutt'altro che semplice se si vuole una descrizione in tempo reale del fenomeno della propagazione della nube radioattiva.

In tal caso si deve fare ricorso a strumenti di calcolo di notevole potenza ed a codici di calcolo piuttosto complessi, che richiedono in generale l'uso di aggiornati dati meteorologici su larga scala [1, 2].

Diverso è il caso se si vuole pervenire, come nel caso dell'algoritmo qui presentato, ad una schematica descrizione *parametrica* della propagazione del

materiale radioattivo dalla sorgente che lo ha generato, con l'obiettivo di stimare le conseguenze dell'incidente nelle diverse ipotizzabili condizioni di diffusione atmosferica. In tale caso sarà conveniente procedere ad una semplificazione anche delle ipotesi fisiche che intervengono, oltre che nella descrizione della diffusione atmosferica, nella deposizione al suolo del materiale rilasciato dall'impianto che ha subito l'incidente e, infine, nella dinamica del trasferimento alla catena alimentare della contaminazione depositata al suolo.

La semplificazione della descrizione fisica dell'evento di contaminazione dà luogo inevitabilmente a diverse approssimazioni nei risultati: questo svantaggio è tuttavia bilanciato da alcuni vantaggi, come la trasparenza delle ipotesi nei diversi segmenti della procedura di calcolo, la possibilità di implementare il modello fisico su un algoritmo capace di essere eseguito da un personal computer, la flessibilità di questo algoritmo e, infine, l'opportunità per l'utente di adattare, in una certa misura, il programma alle proprie esigenze.

---

(\*) Non più in servizio dall'ottobre 2000.

L'obiettivo dell'algoritmo RANA (*radiological assessment of nuclear accidents*) che si descrive in questo articolo è quello di fornire ai radioprotezionisti uno strumento di calcolo interattivo semplice, flessibile, modulare e adattabile che li aiuti a valutare le implicazioni di un incidente nucleare in termini di dose e di contaminazione, fornendo loro un ausilio per l'adozione delle misure di emergenza che dovessero rivelarsi necessarie.

Utenti di RANA possono dunque essere gli esperti dei laboratori regionali per la sorveglianza della radioattività ambientale, tecnici che forniscono consulenza al Dipartimento della Protezione Civile per le questioni nucleari, esperti dell'amministrazione sanitaria che possono essere chiamati, come avvenne per l'evento di Chernobyl, a valutare le implicazioni sanitarie di un massiccio rilascio radioattivo in un impianto nucleare non troppo distante dal confine italiano.

La prima versione di RANA è stata sommariamente descritta negli Atti della Conferenza dell'IRPA (International Radiation Protection Association) del 1999 [3]. La versione attuale differisce da quella del '99 per molti aspetti: è cambiata in modo radicale l'interfaccia con l'utente, sono state aggiunte all'algoritmo nuove funzioni che rendono più completo il ventaglio delle informazioni ricavabili da RANA, si sono considerate altre vie di esposizione capaci di dare contributi non trascurabili alle dosi e così via.

Il modello fisico che sarà descritto nel seguito è scritto in *Mathematica* [4], ciò che permette di avvalersi della cospicua potenza di calcolo disponibile all'interno di quel linguaggio: il programma può essere agevolmente eseguito su personal computer, richiedendo la maggior parte delle operazioni tempi di calcolo molto limitati, dell'ordine di qualche minuto.

I calcoli possono essere effettuati sia a partire dai termini di sorgente che dai valori di contaminazione al suolo o in aria. Se si seleziona il primo dei due metodi, RANA si avvale di una banca dati relativa ai reattori nucleari europei [5] che contiene i dati nucleari e geografici rilevanti per il calcolo, quali la tipologia dell'impianto, la sua potenza termica, l'ubicazione dell'impianto espressa dalle coordinate geografiche. RANA contiene al proprio interno anche alcuni parametri per il calcolo degli incidenti nei LWR, secondo la categorizzazione del Wash-1400 [6], ciò che rende molto agevole il calcolo se, appunto, si è in presenza di un incidente in un reattore ad acqua. Nel caso di altre tipologie di reattori, il programma richiede all'utente i pochi dati di partenza rilevanti, come le frazioni di rilascio per i vari radionuclidi.

Il calcolo delle conseguenze di un rilascio da una sorgente qualsiasi è reso possibile dal reattore *Jolly*, i parametri del quale possono essere fissati dall'utente così da simulare un rilascio arbitrario.

## Struttura e funzioni di RANA

RANA è un insieme coordinato di 18 *packages* interconnessi, ognuno dei quali è responsabile di uno dei moduli usati nella sequenza di calcolo delle conseguenze dell'incidente: ad esempio il modulo delle equazioni di base, quello relativo ai dati ed alle equazioni della diffusione atmosferica, il modulo che si riferisce ai parametri nucleari dei radionuclidi, quello per il calcolo delle dosi a partire dalla contaminazione nei vari comparti dell'ecosistema e così via. Questa struttura modulare presenta almeno due vantaggi: la possibilità di seguire in modo trasparente il percorso del calcolo e quella di introdurre modifiche nell'algoritmo, per esigenze particolari dell'utente.

RANA dispone di un *help on-line*, inserito all'interno dell'*help* di *Mathematica*, e di un manuale; l'utente si avvale poi di un esteso set di messaggi di errore per risolvere eventuali errori di sintassi nella gestione dell'algoritmo e di una nutrita serie di *palettes* per potersi orientare in modo agevole nei calcoli. È possibile, ad esempio, accedere alla *palette* dei fattori di dose, a quella degli impianti europei e così via, ottenendo in tal modo una rappresentazione rapida ed efficace di molte delle grandezze che intervengono nel calcolo. Per ogni provincia, infine, è possibile richiedere la mappatura o la mappatura pesata (con la potenza dell'impianto) dei reattori nucleari a distanze crescenti dalla località prescelta.

All'inizio del calcolo (che si attiva cliccando l'icona di una rana ed attendendo l'esecuzione di una brevissima sequenza musicale) un pannello interattivo chiede all'utente se la valutazione deve essere effettuata a partire da un termine di sorgente assegnato o da dati sperimentali (che, naturalmente, devono essere forniti all'algoritmo dall'utente e si presume siano disposti seguendo un format di riferimento predefinito). Se si sceglie il calcolo *ab initio*, una serie di pannelli interattivi richiederà all'utente i dati necessari per il calcolo: nome del reattore, categoria dell'incidente, inizio e durata del rilascio (con valori di default se questi non sono noti), scelta delle condizioni di deposizione al suolo lungo il cammino della nube (deposizione umida o secca) ed altro.

Quando questi dati sono stati elaborati (in tempi dell'ordine del minuto) RANA presenta all'utente tre finestre:

- la finestra dei dati nucleari, ove sono indicati i valori dell'attività rilasciata per ognuno dei 36 nuclidi di riferimento, assieme ai valori della vita media e del cammino libero medio in aria dei  $\gamma$  per quei radionuclidi;
- la finestra delle funzioni che possono essere utilizzate per il calcolo in modo interattivo;
- la finestra per il calcolo, ove sono indicati i dati essenziali dell'incidente preso in esame. Questa finestra conterrà le elaborazioni via via prodotte da RANA.

In Fig. 1 è rappresentata la prima finestra.

Dati nucleari {  $\tau$ ,  $\lambda^{-1}$ , c }

$\tau$  = Vita media del nuclide in secondi;

$\lambda$  = Distanza media di attenuazione dei  $\gamma$  emessi dal nuclide (in metri);

c = Attività rilasciata in PBq.

Krypton - 88	Stronzio - 89	Stronzio - 90	Stronzio - 91
Ittrio - 91	Zirconio - 95	Zirconio - 97	Molibdeno - 99
Rutenio - 103	Rutenio - 106	Tellurio - 127m	Tellurio - 131m
Tellurio - 132	Antimonio - 127	Antimonio - 129	Iodio - 131
Iodio - 132	Iodio - 133	Iodio - 134	Iodio - 135
Xenon - 133	Xenon - 135	Cesio - 134	Cesio - 136
Cesio - 137	Bario - 140	Lantanio - 140	Cerio - 141
Cerio - 144	Nettunio - 239	Plutonio - 238	Plutonio - 239
Plutonio - 240	Plutonio - 241	Curio - 242	Curio - 244

**Fig. 1.** - Il pannello interattivo dei dati nucleari nell'algoritmo RANA (*radiological assessment of nuclear accidents*). Cliccando uno dei nomi si ottengono i dati nucleari e l'attività rilasciata del nuclide prescelto.

Il calcolo procede ora in modo completamente interattivo: all'utente si chiede, una volta scelta la funzione che si desidera calcolare (ad es. la funzione Contaminazione1D, che fornisce l'andamento spaziale della contaminazione), di specificare via via le scelte necessarie. Nel caso di Contaminazione1D, si chiederà di specificare se si desidera l'attività in aria o al suolo, eventualmente a quale tempo, a quali distanze dalla sorgente, per quale nuclide e così via. Nel caso di risposte errate il pannello di domanda viene ripresentato, così da evitare un lungo percorso inutile.

I risultati del calcolo possono essere espressi in forma numerica o grafica, ove la funzione richiesta è espressa in termini della variabile prescelta (ad es. la distanza o il tempo) per una assegnata scelta delle condizioni esterne (ad es. la categoria di diffusione atmosferica) che possono essere arbitrariamente cambiate.

Se, invece, si vuole effettuare il calcolo a partire da dati sperimentali assegnati, RANA produrrà solo la seconda e la terza delle finestre sopra descritte e la sequenza interattiva, che darà luogo alle valutazioni richieste, procederà in modo analogo. In questo caso l'unico pannello interattivo preliminare richiede all'utente la data dell'incidente, rilevante per il calcolo della contaminazione della catena alimentare (cfr. più avanti).

Può essere utile menzionare la circostanza che il programma comprende anche un'istantanea, vale a dire uno strumento per fornire in modo automatico, cioè senza l'intervento dell'utente, una rapida descrizione dei valori dei più importanti indicatori delle conseguenze radiologiche dell'incidente, quali la contaminazione da iodio e da cesio, le dosi efficaci ed alla tiroide e la contaminazione del latte, in funzione della distanza, nell'intervallo spaziale prefissato dall'utente. RANA fornisce, infine, il livello della categorizzazione AIEA (Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica) secondo la scala INES (International Nuclear Event Scale), corrispondente al rilascio considerato ed il valore del rilascio equivalente in termini di iodio 131.

Va sottolineata la circostanza che l'utente più esperto potrà scegliere un percorso diverso da quello della sequenza dei pannelli interattivi, chiamando direttamente le funzioni ed assegnando loro gli argomenti opportuni. Questa seconda opzione è più laboriosa e si presta ad un maggior numero di errori, ma permette di utilizzare in modo diretto le grandezze che compaiono nei moduli dell'algoritmo, così che l'intera sequenza può risultare più trasparente.

### Le equazioni di base e la diffusione atmosferica

La schematizzazione della diffusione atmosferica utilizzata da RANA si avvale del modello gaussiano per le distanze corte e medie e del modello a *wedge* per le distanze lunghe [7]. La caratterizzazione delle diverse condizioni di diffusione è effettuata per il tramite delle classiche categorie di Pasquill-Gifford alle quali si è aggiunta una categoria media. Il passaggio dal modello gaussiano a quello a *wedge* avviene, in categoria  $i$  ( $i = A, B, C, \dots, Media$ ), ad una distanza  $x(i)$  dalla sorgente per la quale

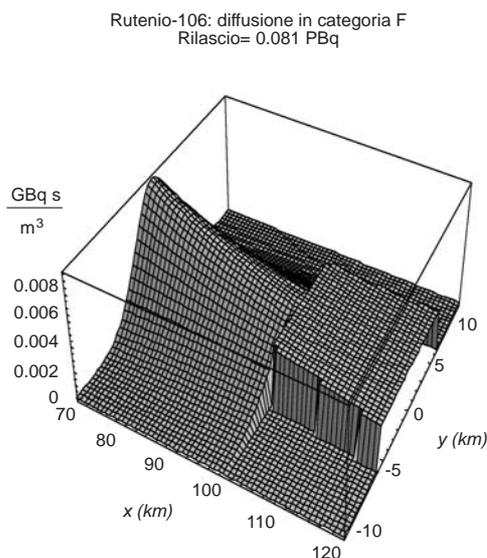
$$\sigma_z(i, x) = (2/\pi)^{1/2} H(i),$$

dove  $\sigma_k(i, x)$  è la larghezza del pennacchio nella direzione  $k$  ( $x, y, z$ ) e  $H$  è l'altezza dello strato di mescolamento. Per distanze  $> x(i)$  la nube è uniforme lungo l'asse  $z$  fino all'altezza  $H$  e, per semplicità, si suppone che sia descritta lungo l'asse  $y$  (la propagazione avviene lungo  $x$ ) da una funzione theta con ampiezza angolare costante data da:

$$\phi(i) = \tan^{-1}[2\pi \sigma_y(i, x(i))/ x(i)]^{1/2}$$

La Fig. 2 mostra la struttura del pennacchio nel modello gaussiano ed in quello a *wedge* in un calcolo esemplificativo: il raccordo tra le due descrizioni è effettuato assicurando la continuità sull'asse di propagazione della nube e conservando il valore dell'integrale della funzione di diluizione.

Come descritto in [3], il modello permette di tener conto, eventualmente, del galleggiamento termico del pennacchio dovuto al rilascio termico associato all'incidente e corregge per l'effetto di un rilascio prolungato. Il modello tiene conto degli effetti delle lunghe distanze (oltre qualche decina di km) mediante una correzione del tipo *random walk*. Per ogni prefissata categoria atmosferica  $j$  si ipotizza la persistenza della direzione del vento per una distanza  $\xi(j) \sim 3600 v(j)$ , dove  $v$  è la velocità del vento [m/s] nella categoria  $j$  prescelta.  $\xi(j)$  fornisce la misura del passo del *random walk*: da questo si può calcolare il cammino effettivo percorso dalla nube.



**Fig. 2.** - La struttura della nube nel modello gaussiano e nel modello a *wedge* in un esempio di rilascio in atmosfera. In testa al grafico la funzione che lo ha generato.

Infine, come è naturale, il modello tiene conto dell'effetto della nube finita nel calcolo della dose, del decadimento radioattivo, dell'impoverimento della nube per effetto della deposizione al suolo (in condizioni di deposizione secca o umida, su specificazione dell'utente) e del build-up nella fase che precede il rilascio, in quella della diffusione e dopo la deposizione al suolo. Analogamente si tiene conto degli effetti ambientali sull'attività al suolo e, come si vedrà meglio in seguito, sulla catena agricola. La dinamica ambientale della contaminazione del suolo è descritta dalle stesse equazioni utilizzate in [6].

Nel modulo che permette i calcoli a partire da dati sperimentali di contaminazione le conseguenze dell'incidente sono elaborate su base provinciale, per ciascuna delle regioni italiane ed i dati sono poi presentati su base provinciale, regionale o nazionale.

### Il calcolo della contaminazione della catena alimentare

Una particolare cura è stata posta per ottenere una modellizzazione realistica dei processi che, a partire dalla contaminazione al suolo e sulle matrici vegetali, portano alla contaminazione dei prodotti alimentari. Gli alimenti considerati comprendono i vegetali, il grano, la carne, il latte e la frutta.

Si presuppone che i vegetali freschi siano immessi sul mercato in modo continuativo: per gli altri alimenti si fa invece riferimento ad ipotesi standard. Richiesta all'utente la data dell'incidente (giorno e mese dell'anno), RANA seleziona in modo automatico, per ciò che riguarda la deposizione diretta, quei raccolti per i quali la data dell'incidente è compresa tra la data di inizio del processo di germogliazione e la data del raccolto. Gli altri segmenti rilevanti della produzione agricola danno, invece, un contributo che è limitato alla contaminazione dovuta all'assorbimento di attività dalle radici (considerato limitatamente al primo anno dopo la contaminazione). Se si tiene poi conto del fatto che nell'algoritmo si è introdotto un fattore di intercettazione foliare dipendente dal tempo e che l'effetto di *weathering* ambientale è anch'esso fortemente dipendente dall'intervallo temporale tra la deposizione al suolo del materiale radioattivo ed il raccolto, si comprende perché la data dell'incidente gioca un ruolo rilevante nel determinare la dimensione ed il profilo della contaminazione della catena alimentare.

Per i dati sui fattori di trasferimento della contaminazione dai vegetali ai prodotti di origine animale (latte e carne) si è fatto riferimento ai valori numerici generalmente adottati [8, 9] nella modellistica ambientale. Si rinvia al rif. [3] già citato per un confronto tra le previsioni di RANA e quelle dei modelli *Ecosys* e *Farmland* descritti nei riferimenti bibliografici testé citati.

### I calcoli di dose

RANA permette il calcolo delle seguenti vie di esposizione al materiale radioattivo, per uno o più dei radionuclidi inclusi nelle valutazioni di rilascio:

- l'irraggiamento esterno dalla nube (dose efficace ed alla pelle);
- l'irraggiamento interno da inalazione di aria contaminata (dose efficace ed alla tiroide);
- l'irraggiamento esterno da materiale radioattivo depositato al suolo (dose efficace);
- l'irraggiamento interno da ingestione di cibo contaminato (dose efficace ed alla tiroide);
- l'irraggiamento alla pelle per deposizione di materiale contaminato (dose alla pelle);
- (direttamente) la somma delle dosi efficaci dalle prime tre vie.

Le dosi sono calcolate per i gruppi di età dei lattanti (0-1 anno), dei bambini (1-12 anni) e degli adulti. Una *palette* permette di risalire in modo diretto ai valori dei fattori di dose utilizzati, che sono in genere quelli dei Basic Safety Standards europei [10]. Nel calcolo delle dosi da irraggiamento, per un'esposizione di durata arbitraria, si tiene conto del contributo del build-up dopo la deposizione.

I calcoli forniscono sia le dosi individuali che quelle collettive, valutate queste integrando sull'intervallo richiesto dell'asse x e fino a qualsiasi distanza laterale (y) dall'asse di propagazione della nube e tenendo conto, per le dosi da ingestione, dell'effettivo volume di cibo contaminato disponibile per il consumo.

E' possibile tener conto in modo puntuale dell'effetto, sulle dosi da ingestione, di un eventuale messa al bando di alimenti contaminati: ciò può rivelarsi utile nel valutare a priori le implicazioni sanitarie dell'adozione di misure restrittive sui consumi alimentari.

Nella versione attuale di RANA tutte le valutazioni di dosi si riferiscono solo agli effetti stocastici ai quali, verosimilmente, dovrebbero essere limitate le conseguenze, in Italia, di un incidente transfrontaliero europeo. Una nuova versione dell'algoritmo includerà comunque anche le funzioni per il calcolo di eventuali effetti deterministici.

### Come RANA presenta i risultati dei calcoli: alcuni esempi

Le figure e le tabelle seguenti mostrano alcuni degli strumenti utilizzati da RANA nel fornire i risultati dei calcoli richiesti (i calcoli sono stati effettuati nell'ipotesi di deposizione secca): ciò che si mostra sono direttamente le "uscite" del programma. Per quanto riguarda, invece, le funzioni disponibili in RANA, che ammontano a più di 100, si rinvia al riferimento [3] già citato, ricordando al lettore che alle dosi ivi considerate sono state aggiunte, come detto precedentemente, quelle alla pelle (per irraggiamento o deposizione) e quelle alla tiroide per ingestione di cibo contaminato.

**Tabella 1.** - Dose per irraggiamento dal suolo da cesio 137, in funzione della distanza dalla sorgente (km), per un'esposizione di 7 giorni: si mostra l' "uscita" dell'algoritmo RANA

#### Cesio-137: ground dose [in mSv] in categoria Media

Tempo di esposizione = 7 giorni

Adulti

(Rilascio = 8.71 PBq)

Distanza dall'asse = 0 km

100	$2.5 \times 10^{-2}$
120	$2. \times 10^{-2}$
140	$1.7 \times 10^{-2}$
160	$1.5 \times 10^{-2}$
180	$1.3 \times 10^{-2}$
200	$1.2 \times 10^{-2}$

**Tabella 2.** - Il calcolo della dose alla tiroide (da inalazione degli isotopi dello iodio) a distanze crescenti dalla sorgente, in km: si mostra l' "uscita" dell'algoritmo RANA

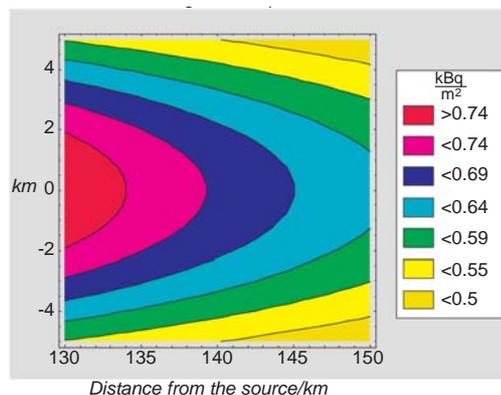
#### Iodio-131, Iodio-132, Iodio-133, Iodio-134, Iodio-135:

Somma delle dosi alla tiroide [in Sv] in categoria D

Lattanti

Distanza dall'asse = 0 km

150	$2.4 \times 10^{-1}$
170	$1.9 \times 10^{-1}$
190	$1.6 \times 10^{-1}$
210	$1.3 \times 10^{-1}$
230	$1.1 \times 10^{-1}$
250	$9.7 \times 10^{-2}$
270	$8.3 \times 10^{-2}$
290	$7.2 \times 10^{-2}$

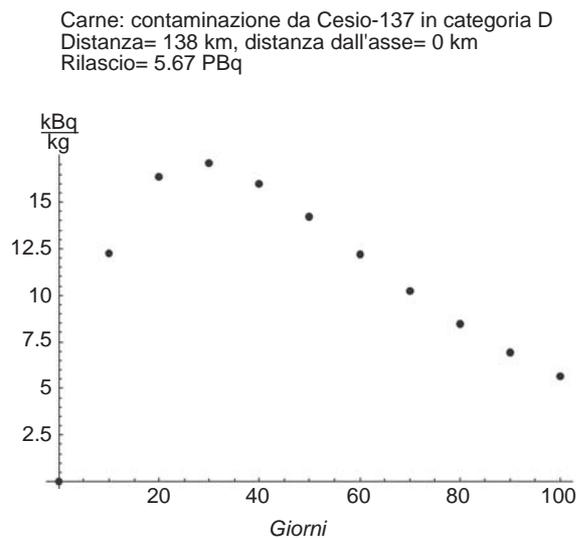


**Fig. 3.** - Un esempio di curve di isoconcentrazione al suolo.

Nella Tab. 1 si mostra l'andamento della contaminazione al suolo di cesio 137, mentre la Tab. 2 fornisce l'andamento spaziale della dose alla tiroide dei lattanti conseguente all'inalazione degli isotopi dello iodio, nel grave incidente ipotetico considerato. RANA fornisce anche curve di isocontaminazione, in diversi formati, come mostrato, per uno dei formati, in Fig. 3. La Fig. 4 mostra un esempio di calcolo della contaminazione della carne da cesio 137; analoghe tabelle e figure sarebbero generate nel caso di valutazioni basate su dati sperimentali di contaminazione delle matrici ambientali, in luogo di quelle calcolate dai termini di sorgente.

### Conclusioni

L'algoritmo RANA, illustrato in questo lavoro, è stato concepito con l'obiettivo di fornire alla comunità radioprotezionistica uno strumento versatile che



**Fig. 4.** - Variazione nel tempo della contaminazione da cesio di carne bovina: si noti il tempo considerevole richiesto per raggiungere il valore di picco.

permetta, con un personal computer e con l'ausilio dell'ambiente di calcolo costituito da *Mathematica*, la stima delle prevedibili conseguenze di un rilascio radioattivo in un impianto europeo. L'uso di RANA può avvenire a due livelli:

- un livello interattivo mediante le risposte ad una sequenza di *prompts*;
- un livello di carattere più tecnico, che richiede una certa familiarità con *Mathematica*.

La versione attuale di RANA dovrebbe permettere di soddisfare la maggior parte delle esigenze che possono presentarsi, in caso di incidente nucleare, agli operatori del settore. In ogni caso una versione futura del programma conterrà alcune funzioni e opzioni aggiuntive, sì da fornire un ventaglio più completo di risposte nel calcolo.

L'attività attualmente in corso per lo sviluppo ulteriore di RANA prevede anche altri aspetti innovativi: tra questi riveste un particolare significato la modellizzazione di ostacoli orografici nella propagazione della nube ed il passaggio dalla descrizione in termini di distanza dall'impianto (quando si utilizzi la sequenza di calcolo dai termini di sorgente) a quella di carattere geografico.

La versione attuale di RANA sarà messa a disposizione degli operatori del settore quando saranno stati effettuati i controlli e le verifiche richiesti dalla natura stessa dell'algoritmo.

#### Ringraziamenti

Nel corso dell'elaborazione di RANA, avvenuta in questi ultimi anni, l'autore ha potuto avvalersi di scambi di idee, suggerimenti e critiche da parte di numerosi colleghi. In particolare, si desidera ringraziare Gianni Petrangeli e Cristina Nuccetelli per discussioni e consigli molto fruttuosi e Antonia Rogani per aver contribuito con vari suggerimenti a far sì che RANA possa essere uno strumento realmente utile alla comunità radioprotezionistica.

Presentato il 20 febbraio 2001.

Accettato il 21 giugno 2001.

#### BIBLIOGRAFIA

1. KfK and NRPB. *Cosyma: a new program package for accident consequence assessment*. Brussels: CEC; 1991. (Report EUR 13028).
2. Chanin DI, Sprung JL, Ritchie LT, Jow HN. *Melcor accident consequence code system (MACCS): user guide*. Albuquerque: US Nuclear Regulatory Commission; 1990. (Report NUREG/CR-491).
3. Tabet E. Radiological assessment of nuclear accidents (RANA): an interactive algorithm for contamination and dose evaluation following a nuclear accident in Europe. In: *Proceedings of IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe*. Budapest, 22-27 August 1999. Budapest: S. Deme Editor; 2000. p. 739-46.
4. *Mathematica*. USA: Wolfram Research Inc.; 1999. Version 4.0 CD-ROM.
5. *Nuclear power plants in the world*. The Netherlands: Ministry of housing, spatial planning and the environment, province of Gelderlands; 1996. Version 1.0. CD-ROM
6. *Reactor safety study: an assessment of accident risk in US commercial nuclear power plants*. Washington: US Nuclear Regulatory Commission; 1975. (Report Wash-1400. NUREG-75/014).
7. Report to the American Physical Society of the study group on light water reactors. *Rev Mod Phys* 1975;47 Suppl. n. 1.
8. Muller H, Prohl, G. Ecosys-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Phys* 1993;60(3):232-52.
9. Brown J, Simmons JR. *A dynamic model for the transfer of radionuclides through terrestrial foodchains*. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; 1995. (NRPB-R 273).
10. CEC Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the danger arising from ionizing radiation. *Off J Eur Commun* L159/1.