



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di codici e strumenti di simulazione numerica per l'analisi
dell'impatto ambientale di installazioni nucleari per analisi di
scenario

M. Sumini, F. Teodori



Report RdS/2011/163

SVILUPPO DI CODICI E STRUMENTI DI SIMULAZIONE NUMERICA PER L'ANALISI
DELL'IMPATTO AMBIENTALE DI INSTALLAZIONI NUCLEARI PER ANALISI DI SCENARIO

M. Sumini, F. Teodori

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in
materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare

UNIVERSITA' Di BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale

DIENCA

**Sviluppo di Codici e Strumenti di Simulazione Numerica per
l'Analisi dell'Impatto Ambientale di Installazioni Nucleari
per Analisi di Scenario**

Autori

Marco Sumini

Francesco Teodori

CERSE-UNIBO RL 1309/2011

BOLOGNA, SETTEMBRE 2011

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP4 punto A2
AdP MSE - ENEA "Ricerca di Sistema Elettrico" - PAR2008-09
Progetto 1.3 – "Nuovo Nucleare da Fissione".

Indice

1	Introduzione – Il ruolo degli strumenti di simulazione	3
2	Requisiti di un adeguato strumento di simulazione	5
2.1	Requisiti necessari	5
2.2	Requisiti altamente desiderabili	6
2.3	Requisiti discrezionali	7
3	Lo stato dell'arte nel panorama internazionale	8
3.1	RASCAL	9
3.1.1	ST-Dose	9
3.1.2	MetProc	9
3.1.3	UF6Plume	10
3.1.4	FM-Dose	10
3.1.5	Decay	10
3.1.6	BackCalc	10
3.1.7	Librerie dati	10
3.1.8	Restrizioni	10
3.2	HotSpot	11
3.2.1	Modelli di dispersione in atmosfera	11
3.2.2	Modelli speciali	11
3.2.3	Nuclear Explosion	11
3.2.4	FIDLER Calibration and Lung Screening	12
3.2.5	Radionuclides in the Workplace	12
3.2.6	Percentile Dose using Historical Meteorological Data	12
3.2.7	I fattori di dose	12
3.3	La famiglia di codici ResRAD	13
3.4	ResRAD	13
3.5	ResRAD-BUILD	14
3.6	ResRAD-OFFSITE	15
3.7	ResRAD-RECYCLE	15
3.8	GENII 2	16
3.8.1	Capacità e limitazioni	16
3.8.2	Pathway e Scenari	17
4	Il progetto GENII-LIN	18
4.1	Capacità del Codice	18
4.1.1	Scenari Far field	19
4.1.2	Scenari Near-Field	19
4.2	STRUTTURA DEL CODICE	20
4.2.1	ENVIN	22
4.2.2	ENV ed ENV13	23
4.2.3	DOSE e DOSE13	25
4.2.4	INTDF e INTDF13	26
4.2.5	EXTDF e EXTDF13	28
4.3	Unità di Controllo Centrale	30
5	Conclusioni	31
5.1	Il GENII-LIN e i requisiti necessari	31
5.2	Il GENII-LIN e i requisiti altamente desiderabili	33
5.3	Il GENII-LIN e i requisiti discrezionali	33

6 Bibliografia..... 34

1 Introduzione – Il ruolo degli strumenti di simulazione

Perché efficaci ed utilizzabili, le valutazioni di impatto e rischio devono essere inserite in contesti quanto più possibile reali. La crescente complessità del mondo nel quale viviamo, impone a tal fine la messa a punto e adozione di strategie di valutazione atte ad affrontare un ampio range di problematiche ecologiche sociali culturali, in altre parole, perseguire strategie che superino la classica valutazione di impatto.

Muoversi in questa direzione espone al rischio di rendere l'analisi improponibile o troppo costosa, ragione per la quale molta attenzione deve essere prestata al problema di focalizzare le risorse a disposizione sui principali problemi, senza con questo far perdere all'analisi completezza ed efficacia.

L'approccio classico da regolamentazione basato su procedure formali di valutazioni di rischio, come descritte dall'EPA e da organi di controllo nazionali e locali, disponibili in numerosi documenti guida, è ormai superato e ad esso si va sostituendo una valutazione integrata del rischio, la quale contempla l'impiego sinergico di molte metodologie di analisi (8).

Gli impatti possono essere classificati in due categorie generali, che, in termini cronologici, in uno schema causa effetto, possiamo indicare come primaria e secondaria.

La categoria primaria, è la causa diretta, ossia l'effetto sui processi biologici dovuto all'esposizione di un organismo alla contaminazione. Le principali componenti di questa categoria, che costituisce il termine di rischio, sono gli effetti sulla salute umana e gli effetti ecologici.

La categoria secondaria, comprende gli impatti non direttamente biologici, come gli impatti economici e socioculturali. Questa categoria include

- sia impatti, che derivino da effetti primari sulla salute e dalle azioni intraprese dalla popolazione, per evitare il rischio percepito, non necessariamente reale, di effetti primari;
- sia impatti derivati da azioni, intraprese dalle agenzie governative, per prevenire quegli effetti.

Le conseguenze economiche del calo di domanda di prodotti, che potrebbero essere contaminati, e gli effetti psicologici sulla popolazione di controversie sulla salute umana o sullo stato dell'ecosistema sono esempi di questo tipo di impatto. Ancora, se i rischi di effetti primari sono sufficientemente alti, da promuovere azioni delle autorità di controllo, per prevenire gli effetti sulla salute della popolazione o prevenire maggiori effetti ecologici, impatti secondari possono scaturire da queste azioni.

Le valutazioni di impatto e rischio devono fornire agli organi preposti informazioni quanto più esaustive ed essenziali a supporto delle decisioni da prendere e delle azioni da mettere in atto. In questo ambito le relazioni tra impatti primari e secondari forniscono le basi per evitare analisi

non necessarie e infruttuose. Si deve esercitare un'azione di screening degli effetti primari, i quali vengano messi in relazione con i potenziali impatti secondari. Tale azione di screening deve identificare i principali contaminanti, le principali pathway e i principali recettori, seguendo il principio di dominanza. Le interrelazioni tra contaminanti e pathway, che forniscono il rischio ad un dato recettore, devono essere considerate, tanto estesamente, quanto permettono le informazioni a disposizione. Le inevitabili incertezze possono essere confinate con l'uso di tecniche di bounding. Nel tracciare relazioni e nell'assicurare, che importanti legami non siano sovrastimati né trascurati, è consigliabile costruire reti di dipendenza, le quali costituiscono un valido strumento concettuale. L'inevitabile incertezza associata alle analisi di screening si può ridurre cercando di essere quanto possibile esaustivi, nell'identificare le pathway, dai contaminanti dominanti ai recettori più affetti. Tutte quelle potenziali situazioni in grado di produrre effetti primari che non si possano neutralizzare, devono essere valutate con un'analisi dettagliata che interessi le categorie di impatto primaria e secondaria. Queste valutazioni devono focalizzarsi su impatti che si concretizzino nell'arco di tempo di una singola generazione (~50 anni). Impatti oltre detto intervallo di tempo devono essere trattati in prima analisi in termini qualitativi, con la prospettiva di trasferimento iterativo di responsabilità sulle valutazioni future, per assicurare un controllo continuo delle condizioni del sito nel tempo.

A riassumere, l'analisi dell'impatto ambientale è, per sua natura, multidisciplinare, coinvolgendo competenze nel campo della radioprotezione, della medicina, della biologia, della fisica dell'atmosfera, dell'idrologia, della socio-economia.

Resta la centralità del problema degli impatti primari sugli esseri umani e sull'ecosistema in generale e l'essenzialità dello sviluppo di strumenti di simulazione di complessità intermedia, specializzati alla determinazione di tali effetti. L'importanza di questi strumenti è confermata dagli sforzi compiuti in questa direzione da centri di ricerca di indubbio prestigio tra i quali citiamo l'Argonne National Laboratory (ANL), il Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), il Sandia National Laboratory e l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL).

2 Requisiti di un adeguato strumento di simulazione

La selezione e lo sviluppo di strumenti di calcolo efficaci alla determinazione degli effetti primari, richiedono di delineare le caratteristiche, che un codice debba avere per essere idoneo alla valutazione (10). Il codice deve avere tre componenti essenziali: un *pre-processore*, un *kernel* di calcolo e un *post-processore*.

Il preprocessore deve gestire i dati di input ed elaborarli per la simulazione. Il *kernel* di calcolo deve modellare il trasporto dei radionuclidi in ambiente fino al recettore, determinando l'esposizione esterna ed interna e calcolando la dose radiologica e il rischio sanitario. Il *post-processore* deve estrarre i risultati della simulazione ed elaborarli presentandoli in modo intelligibile all'utilizzatore.

Il cuore del programma è la componente di calcolo, la quale deve possedere requisiti precisi, perché il codice possa assolvere ai suoi scopi. Tali requisiti possono essere classificati in tre categorie:

- *necessari* - sono quelle capacità minime che un codice deve possedere per perseguire gli obiettivi della valutazione; per quanto in molti casi il pre-processore e il post-processore possano essi stessi essere usati per fornire al codice alcune di queste capacità, è preferibile che queste siano soddisfatte dalla componente di calcolo;
- *altamente desiderabili* - sono quelle capacità, che non necessariamente il codice deve possedere, ma che ne faciliterebbero molto l'uso ed arricchirebbero la sua capacità di soddisfare le necessità della valutazione;
- *discrezionali* - sono quelle capacità che, qualora presenti, aiuterebbero la valutazione, senza tuttavia essere indispensabili.

2.1 Requisiti necessari

- **Trasporto in generale**
- Il codice deve essere capace di modellare rilasci annuali di contaminanti.
- Il codice deve essere capace di utilizzare parametri di trasporto, che siano specifici del sito in esame, in luogo di parametri di default di carattere più generale.
- Il codice deve essere in grado di modellare rilasci cronici di contaminanti sul lungo periodo.
- Il codice deve essere in grado di modellare il trasporto in ambiente e la conseguente esposizione, che seguano rilasci impulsivi di breve durata, di qualche ora o di qualche giorno
- Per i vari percorsi di trasporto ed esposizione, il codice deve essere in grado di interrelare sequenzialmente i vari moduli di calcolo, in modo che le concentrazioni calcolate, che siano output di ciascun modulo, siano input dei moduli a seguire.
- **Trasporto in acqua superficiale**
- Il codice deve presentare un semplice modello di diluizione per simulare il trasporto in acqua di superficie.
- Il codice deve essere capace di usare valori annuali di flusso variabili.
- **Trasporto nei sedimenti**
- Il codice deve essere capace di simulare il trasporto nei sedimenti, ossia, il trasferimento di contaminazione dall'acqua ai sedimenti, il susseguente trasferimento di questa contaminazione alle altre matrici e l'esposizione diretta di individui ai sedimenti

- **Trasporto in aria**
- Il modello di trasporto e diluizione del contaminante in aria deve essere in grado di fornire valori medi dei diversi parametri per ciascuno dei settori angolari (in genere 16), nei quali venga suddivisa la rosa dei venti.
- Il codice deve contenere un modulo per calcolare il trasferimento di contaminante dall'aria al suolo.
- **Trasporto nelle catene alimentari**
- Il codice deve usare formulazioni consolidate, per modellare il trasferimento e l'accumulo di contaminante nelle catene alimentari.
- Il codice deve permettere l'uso di parametri tipici del sito in esame, per calcolare il trasporto e l'accumulo di contaminanti nelle catene alimentari
- **Esposizione**
- Nel modellare il trasporto di contaminante attraverso le catene alimentari, il codice deve essere in grado di distinguere e modellare simultaneamente le diverse categorie alimentari (carne, grano, vegetali a foglia larga...) ciascuna con i propri parametri di consumo e uptake.
- Il codice deve essere in grado di modellare almeno cinque vie di esposizione (inalazione, ingestione, immersione, esposizione diretta al suolo, esposizione diretta ai sedimenti)
- **Dose e rischio**
- Il codice deve fare proprie le raccomandazioni del Federal Guidance Report 13, per i fattori di dose e per le procedure di valutazione del rischio.
- Le dosi devono essere calcolate usando fattori di dose, che varino con l'età dei soggetti interessati.
- **Dati di input e output**
- Il codice deve fornire le dosi e il rischio specificamente per pathway, radionuclide, tipo di esposizione e per anno.
- I risultati devono essere presentati in una forma trasparente, che li renda agevolmente verificabili.
- **Altro**
- Sono richiesti modelli speciali per C14 e H3 , in quanto il comportamento di questi contaminanti nell'ambiente è diverso da quello di altri contaminanti.
- I modelli devono tener conto del decadimento dei radionuclidi durante il trasporto, considerando anche l'accumulo dei prodotti di decadimento.

2.2 Requisiti altamente desiderabili

- **Trasporto in acqua di superficie**
- Il codice dovrebbe includere addizionali capacità per simulare diversi fenomeni di trasporto, che possano interessare l'acqua di superficie, ad esempio la formazione di bacini per infiltrazione.
- **Trasporto in aria**
- Il codice deve avere la capacità di utilizzare serie meteorologiche annuali.
- **Trasporto nelle catene alimentari**
- Il codice deve essere in grado di tener conto della risospensione del suolo contaminato e della successiva deposizione sui raccolti.
- Il codice deve essere in grado di considerare il buildup nel tempo della contaminazione del suolo, nel caso di deposizione a lungo termine.
- **Esposizione**
- Il codice dovrebbe avere la capacità di elaborare parametri di esposizione imposti dall'utente.
- **Dati di input e output**

- Un processo di valutazione richiede generalmente molteplici run del codice con parametri di input variabili, perciò è desiderabile un'interfaccia utente che agevoli l'inserimento dati.
- I moduli di calcolo dovrebbero produrre risultati intermedi che possano essere visionati; ad esempio dovrebbe essere possibile visionare la concentrazione di attività nei vegetali in una determinata matrice alimentare
- **Altro**
- Il codice dovrebbe permettere di considerare rilasci di durata pluriennale con tassi di rilascio variabili di anno in anno.
- Il codice dovrebbe permettere analisi di sensitività e di incertezza, usando distribuzioni probabilistiche dei parametri di input.

2.3 Requisiti discrezionali

- **Dose e rischio**
- I fattori di dose, quali forniti dalle tabelle delle pubblicazioni della ICRP, possono non essere adeguati a calcolare la dose cumulata, ossia la dose impegnata dovuta a esposizioni prolungate a coprire diversi anni. Per acquisire questa capacità il codice deve avere dei moduli in grado di calcolare fattori di dose idonei, seguendo le procedure raccomandate dalle più recenti pubblicazioni della ICRP.
- E' impossibile disporre di fattori di dose esterna che coprano tutte le possibili esposizioni. E' prassi comune, in radioprotezione ambientale, fare riferimento a tre situazioni standard: immersione in aria contaminata, esposizione a suolo contaminato in superficie, esposizione a suolo contaminato fino a profondità infinita. In genere la superficie del suolo é modellata come un piano infinito e il suolo come un semispazio infinito. In alcune situazioni, le geometrie di esposizione sono molto diverse e può essere necessario disporre di fattori di dose specifici, che il codice deve essere in grado di calcolare.
- **Altro**
- Le capacità del codice possono compiere un salto di qualità, integrandolo con i sistemi informatici territoriali. Questo permette una più efficiente costruzione dell'input e una corretta interpretazione dell'output, che non può prescindere da una contestualizzazione dei risultati alla situazione del territorio.

3 Lo stato dell'arte nel panorama internazionale

L'idea di utilizzare codici per la radioprotezione non è nuova. Inizia già dai primi anni 60 per raggiungere una particolare vivacità intorno ai primi anni 80. Ricordiamo in proposito ISOSHL (1966), KRONIC (1973), DACRIN (1974), SUBDOSA (1975), PABML (1980), ONSITE/MAXI (1984). La diffusione di questi codici è stata ostacolata dalla ancora scarsa diffusione dei PC e dalle ancora scarse capacità di calcolo di quest'ultimi. L'assenza inoltre di interfacce grafiche avanzate rendeva questi codici di non facile impiego senza conoscenze informatiche di un qualche livello. L'insieme di queste circostanze ha fatto sì che questi prodotti, per quanto interessanti e promettenti, restassero confinati all'interno di pochi centri specializzati, che disponessero di macchine sufficientemente potenti e personale specializzato.

Intorno ai primi anni 90, le cose cominciano a muoversi. La diffusione di PC su larga scala, il loro costo ormai accessibile, la loro potenza di calcolo apprezzabile, rinnova l'interesse verso quegli strumenti di calcolo, lo sviluppo dei quali non era stato, per la verità, mai abbandonato. È alla fine degli anni 80 che vede la luce il GENII-1.485, il quale raccoglie l'eredità dei codici citati, per integrarli nella prima vera SUITE di calcolo per la radioprotezione ambientale. Esso presenta un'interfaccia utente interattiva, per quanto embrionale, in grado di guidare l'utilizzatore alla generazione del file di input senza che siano per questo necessarie conoscenze informatiche di un certo livello.

I codici di nuova generazione hanno il vantaggio di essere costruiti su librerie grafiche avanzate e possono contare sulle capacità di elaborazione dei nuovi calcolatori. Questo rende possibile non solo una più efficace visualizzazione dei risultati, ma anche l'adozione di interfacce utente "user friendly", che permettono di utilizzare i codici con relativa facilità. Tra i codici più largamente diffusi possiamo citare:

RASCAL (Lawrence Livermore National Laboratory)

Hotspot (Oak Ridge National Laboratory)

RESRAD (Argonne National Laboratory)

GENII-2 (Pacific Northwest National Laboratory)

GENII-LIN (Laboratorio di Montecuccolino – Università di Bologna)

In questa sezione, ci soffermeremo a descrivere ciascuno di essi, tranne il GENII-LIN, al quale verrà dedicato l'intero prossimo capitolo. Premettiamo che, nel loro insieme, permettono di coprire in modo esaustivo la totalità delle situazioni che possano presentarsi nella pratica. La

scelta del codice da utilizzare dipende di volta in volta dal particolare scenario oggetto di indagine e dalle informazioni alle quali si ha accesso.

3.1 RASCAL

Il RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis) è il principale strumento computazionale della statunitense Nuclear Regulatory Commission (NRC), da utilizzare nelle emergenze radiologiche. Il RASCAL stima dosi da incidenti radiologici da confrontare con le soglie di tolleranza per gli effetti acuti sulla salute. Valuta rilasci da impianti nucleari di potenza, piscine di stoccaggio di combustibile e cask, impianti di trattamento del combustibile, impianti di gestione di materiale radioattivo. E' stato concepito per essere usato nella valutazione di dose durante gli interventi di risposta alle emergenze radiologiche. Il sistema è pensato come strumento per il personale di intervento, per condurre una valutazione della dose e una previsione delle conseguenze e per addestramento ed esercitazioni. Il modello è stato sviluppato per tenere in conto i maggiori aspetti del termine di sorgente, trasporto, dose e conseguenze. Il calcolo del termine di sorgente in Rascal consiste nella stima dell'ammontare di materiale radioattivo rilasciato, sulla base di un'ampia panoramica di potenziali scenari di incidenti radiologici. I calcoli di termine di sorgente pertinenti agli incidenti agli impianti di gestione del combustibile possono essere classificati come:

- incidenti di criticità;
- incidenti del ciclo del combustibile – UF;
- incendio che coinvolga uranio ed esplosioni;
- rilasci di isotopi.

Il codice ha una struttura modulare e comprende sei moduli di calcolo: ST-Dose, FM-Dose, Decay, BackCalc, UF6Plume, and Met-Proc.

3.1.1 ST-Dose

ST-Dose (Source Term to Dose) stima un termine di sorgente radioattivo, calcola il trasporto in atmosfera e le dosi da radiazione. Oltre alla sorgente è possibile modellare meccanismi di abbattimento (spray, filtri...), che siano usati durante l'emergenza. Sia la sorgente che i meccanismi di abbattimento possono essere fatti variare nel tempo. I risultati sono esposti come grafici o come tabelle riassuntive o dettagliate. Si possono avere in output dosi cumulate, ratei di dose e deposizione. Tutti i risultati possono essere interpolati dalla griglia di calcolo a qualunque recettore arbitrariamente posizionato fuori dai nodi. ST-dose può utilizzare sia file dati meteorologici precalcolati, creati da *MetProc*, sia dati meteo in tempo reale.

3.1.2 MetProc

MetProc è utilizzato per introdurre e visualizzare dati meteorologici, che siano osservati o frutto di previsioni. Esso crea i file dati dei quali necessitano *ST-Dose* e *UF6Plume* e dispone i campi di dati meteorologici usati da detti strumenti. Esso può processare dati provenienti da più di una stazione meteorologica, può calcolare le classi di stabilità e può supplire ragionevoli valori di default, quando siano disponibili informazioni solo parziali. *MetProc* può essere richiamato da *ST-Dose* o essere lanciato come programma indipendente.

3.1.3 UF6Plume

UF6Plume calcola esposizioni all'uranio e a concentrazioni di HF dovute a rilasci di UF₆. Include un modello di dispersione per la diffusione iniziale di UF₆ e un modello termodinamico per trattare le reazioni chimiche esotermiche tra UF₆ e H₂O, che producono HF e UO₂F₂. Esso consente anche calcoli di innalzamento del pennacchio, dovuto alla temperatura dell'UF₆ e del calore di reazione.

3.1.4 FM-Dose

A partire da concentrazioni di nuclidi misurate in aria e nel suolo, FM-Dose (Field Measurements to Dose) calcola i limiti di emergenza per i lavoratori, le dosi e i ratei di esposizione nelle fasi iniziali e intermedie. Le dosi e i ratei di esposizione iniziali sono tabulati. I dati intermedi sono graficati su un periodo di 180 giorni.

3.1.5 Decay

Decay calcola il decadimento radioattivo e l'evoluzione della popolazione dei figli su un determinato periodo di tempo variabile da un minuto a 50 anni.

3.1.6 BackCalc

BackCalc risolve in qualche modo il problema inverso: stima potenziali ratei di rilascio, che possano essere associati ad un set di dati di misura, partendo da una descrizione delle condizioni meteo e dal probabile scenario di rilascio. Si basa su modelli gaussiani. Con l'ausilio di tecniche Monte Carlo, stima un gran numero di tassi di rilascio, che siano consistenti con le condizioni meteo e la loro incertezza, con lo scenario di rilascio e con i dati di misura. Queste stime sono usate per determinare il più verosimile, il medio e la media geometrica dei tassi di rilascio oltre a un tasso di rilascio che rappresenti il 90mo percentile. *BackCalc* fornisce pure la funzione densità di probabilità la cumulata.

3.1.7 Librerie dati

I database, inclusi in RASCAL, contengono buona parte delle informazioni necessarie per eseguire i calcoli. E' presente un database delle installazioni nucleari statunitensi, che include tutte le informazioni richieste dai moduli ST-Dose e MetProc, per tutte le installazioni regolate dalla NRC. Esiste un database, che include tutti i fattori di dose e gli inventari dei nuclidi dei reattori nucleari. Le catene di decadimento dei radionuclidi possono essere visualizzate graficamente o tabulate. Possono essere costruiti database di campagne di misura, che permettano poi all'utente di disporre di tutti i dati misurati durante le emergenze. Tutti i database possono essere letti da FM-Dose, per usare le misure come input al modello.

3.1.8 Restrizioni

Poiché RASCAL è concepito per essere usato durante un'emergenza radiologica, si assume che l'ammontare di radioattività rilasciata e le condizioni meteo non siano note con precisione. Le dosi calcolate con RASCAL sono perciò da assumersi come stime rozze. Le sole tipologie di

dose considerate sono la dose esterna e la dose interna da inalazione. Non viene considerata l'ingestione.

3.2 HotSpot

Il codice HotSpot è stato creato per fornire ai fisici sanitari uno strumento di calcolo veloce per valutare incidenti che interessino materiali radioattivi. HotSpot è un'approssimazione del primo ordine degli effetti delle radiazioni associati al rilascio in atmosfera di materiale radioattivo.

3.2.1 Modelli di dispersione in atmosfera

HotSpot implementa una formulazione ibrida del ben noto e collaudato modello gaussiano, ampiamente usato per valutazioni iniziali di emergenza e analisi di sicurezza. Modelli specializzati valutano le conseguenze della contaminazione di un'area o del rilascio di materiale radioattivo che risulti da

- rilascio esplosivo di plutonio;
- incendio di plutonio;
- risospensione di plutonio;
- rilascio esplosivo di uranio;
- incendio di uranio;
- rilascio di trizio.

Le esplosioni sono da intendersi non nucleari. Modelli "più generali", trattano il rilascio di uno qualunque dei radionuclidi, che siano presenti nella libreria di HotSpot, o di una qualunque miscela di essi, definita dall'utente, fino a un massimo di 50. Questi modelli stimano l'impatto radiologico, che segua il rilascio a puff o continuo (di breve durata, fino a qualche ora), il rilascio esplosivo, l'incendio e la risospensione di materiale radioattivo. Delle sorgenti virtuali vengono costruite per modellare la distribuzione atmosferica iniziale del materiale emesso. Scenari tipici, per ciascun dei modelli di dispersione citati, sono preconfezionati in HotSpot e accessibili dall'utilizzatore. In aggiunta l'utilizzatore può costruire e salvare scenari personalizzati.

3.2.2 Modelli speciali

A fianco ai modelli di dispersione atmosferica, HotSpot dispone di quattro moduli speciali:

- Nuclear Explosion;
- FIDLER Calibration and Lung Screening;
- Radionuclides in the Workplace; e
- un modulo per calcolare il percentile della dose usando serie storiche dei dati meteorologici.

3.2.3 Nuclear Explosion

Il modulo Nuclear Explosion stima gli effetti di un'esplosione in superficie di un'arma nucleare. Questi includono effetti pronti (gamma, neutroni, onda d'urto ed effetti termici) e valutazione del fallout. La valutazione del fallout include il tempo di arrivo del fallout, la dose al momento dell'arrivo e la dose integrata su diversi intervalli di tempo, per esempio, le prime sei ore, il

primo giorno, la prima settimana, ecc... L'utente può scegliere l'inizio e la durata dell'esposizione.

3.2.4 FIDLER Calibration and Lung Screening

Il modulo FIDLER (Field Instrument for the Detection of Low-Energy Radiation) è un'utilità per calibrare strumenti di misura per il monitoraggio della contaminazione da plutonio del suolo e per fornire un primo screening della possibile assunzione di plutonio nei polmoni. Tuttavia, il modulo

FIDLER può essere applicato a qualsiasi strumento in grado di rilevare livelli di radiazione esterna, non solo dovuta a misture di plutonio. Le recenti versioni di FIDLER sono accoppiate a rivelatori multicanale.

3.2.5 Radionuclides in the Workplace

Il modulo Radionuclides in the Workplace fornisce una guida per una iniziale pianificazione di attività sperimentali ed ambienti di lavoro. La scelta di un ambiente di lavoro è generalmente basata sulla pericolosità relativa di un'operazione e sulla quantità e radiotossicità dei radionuclidi coinvolti. La pericolosità di un'operazione è determinata valutando il tipo di radionuclide da usare, la sua forma chimico fisica, la massa del materiale contenete il radionuclide e la natura dell'operazione, che si intenda eseguire.

3.2.6 Percentile Dose using Historical Meteorological Data

Questo modulo calcola il 95mo percentile della dose su una griglia polare centrata sul punto di emissione e costruita considerando fino a 20 distanze radiali e 16 settori angolari, che coprono l'intero angolo giro. I valori di default del percentile sono 50mo , 90mo , 95mo , 99mo e 99.5mo . L'utente può selezionare valori arbitrari che siano compresi tra 50mo e 100mo . HotSpot richiede un input che sia costituito da un file di input di osservazioni meteorologiche orarie a coprire un arco di tempo fino a 5 anni e calcola il percentile in due modi: o via una intermedia distribuzione di Joint Frequency o calcolando i valori di dose per ciascun set di osservazioni orarie. Quello che prevede l'uso della distribuzione Joint Frequency è di gran lunga il metodo più veloce. La Joint Frequency è costruita considerando 9 gruppi di velocità, scelti dall'utente.

3.2.7 I fattori di dose

HotSpot usa le metodologie dosimetriche suggerite dalla ICRP, incorporate nel Federal Guidance Report 11, nel Federal Guidance Report 12 e nel Federal Guidance Report 13.

Dal FGR 11 acquisisce i fattori di dose, nella forma di dose equivalente impegnata sui 50 anni, per inalazione acuta di radionuclidi, basati sui modelli biocinetici e dosimetrici della ICRP 30.

Dal FGR 12 acquisisce i coefficienti di dose nella forma di ratei di dose per esposizione esterna a radionuclidi in aria, acqua e suolo.

Dal FGR 13 acquisisce fattori di dose, usando il più recente modello del tratto respiratorio della ICRP 66 e usando le metodologie delle pubblicazioni ICRP 60/70.

In aggiunta ai fattori di dose efficace impegnata sui 50 anni, per inalazione, HotSpot dispone anche di “fattori acuti” di dose, per stimare effetti deterministici. Questi “fattori acuti” possono essere usati, per stimare l’impatto radiologico immediato per esposizione acuta a forti dosi. Gli organi bersaglio considerati, quando si scelga questa opzione, sono la parete del piccolo intestino, il midollo osseo e la tiroide.

3.3 La famiglia di codici ResRAD

La famiglia di codici ResRAD è stata sviluppata dalla divisione di scienze ambientali dell’Argonne National Laboratory (ANL), con sostegno del Department of Energy (DOE), per valutare il rischio ambientale e per la salute umana, in siti contaminati da materiali radioattivi e sostanze chimiche pericolose. I codici ResRAD comprendono

- ResRAD per suolo contaminato con radionuclidi;
- ResRAD-BUILD, per edifici contaminati con radionuclidi;
- ResRAD-CHEM, per suolo contaminato con sostanze chimiche;
- ResRAD-BASELINE, per valutazioni di rischio per concentrazioni misurate sia di radionuclidi che di sostanze chimiche nelle matrici ambientali;
- ResRAD-ECORISK, per valutazioni di rischio ambientale;
- ResRAD-RECYCLE, per riciclo e riutilizzo di materiali e strumenti contaminati da radionuclidi;
- ResRAD-OFFSITE, per valutazioni di dosi e rischio a recettori situati al di fuori dal sito contaminato.

Quattro di questi codici (ResRAD, ResRAD-RECYCLE, ResRAD-BUILD e ResRAD-OFFSITE) permettono analisi di incertezza e offrono all’utente la possibilità di inserire in input distribuzioni probabilistiche dei parametri. Proprio su questi codici ci soffermeremo, in quanto specifici della radioprotezione e perché di essi si ha esperienza diretta, maturata nel corso degli anni.

3.4 ResRAD

Il codice ResRAD (Residual RADioactivity) è stato sviluppato come strumento multifunzionale per assistere nello sviluppo di criteri di decontaminazione e nella valutazione di dose e rischio associati a materiali radioattivi residui. Il ResRAD può essere usato per:

- calcolare concentrazioni limite nel suolo;
- calcolare potenziali dosi annuali e rischio a lavoratori o individui della popolazione, che risultino dall’esposizione al materiale radioattivo residuo presente nel suolo;
- calcolare le concentrazioni di radionuclidi nelle varie matrici (aria, acqua di superficie, falde), conseguenza delle concentrazioni nel suolo;
- supportare un’analisi di costi e benefici che possa aiutare nel processo di pianificazione di opere di bonifica.

Per tutte queste operazioni tutte le possibili pathway di esposizione vanno prese in considerazione.

- esposizione esterna diretta al suolo contaminato;
- dose interna da inalazione di radionuclidi dispersi in aria, inclusi i figli del radon;
- dose interna per ingestione di:
 - prodotti agricoli cresciuti su suolo contaminato e irrigati con acqua contaminata;
 - prodotti di origine animale provenienti da bestiame alimentato con cibi e acqua contaminati;
 - ingestione d'acqua da falde contaminate;
 - prodotti ittici contaminati; e
 - suolo contaminato.

Il ResRAD non risolve equazioni del trasporto. Usa un metodo d'analisi nel quale il percorso di esposizione dalle concentrazioni di radionuclidi nel suolo al componente di un gruppo critico è espresso come somma di tratti, che si traduce matematicamente come prodotto di fattori di tratto. I fattori di tratto corrispondono a segmenti di percorso che connettono i comparti ambientali, attraverso i quali i radionuclidi possono essere trasportati e la radiazione emessa. La dose radiologica, il rischio per la salute, le concentrazioni limite nel suolo e nelle matrici ambientali sono calcolati su intervalli di tempo definiti dall'utilizzatore. La sorgente si evolve nel tempo, per tener conto del decadimento radioattivo, dell'accumulo di prodotti decadimento, dell'erosione della diffusione e del mescolamento.

3.5 ResRAD-BUILD

Il ResRAD-BUILD è stato sviluppato per valutare la dose radiologica potenziale, alla quale venga esposto un individuo, che lavori o viva in un edificio contaminato da materiale radioattivo. Il contaminante presente nelle strutture può essere rilasciato nell'aria ambiente tramite meccanismi quali la diffusione (radon, acqua triziata), rimozione meccanica (attività di decontaminazione) o erosione. Il trasporto di materiale radioattivo all'interno dell'edificio, anche da un comparto all'altro, è calcolato tramite un modello di qualità dell'aria indoor. Il modello di qualità dell'aria valuta il trasporto di particolato radioattivo e del radon e dei suoi figli dovuto a:

- scambio d'aria tra i compartimenti e con l'ambiente esterno;
- deposizione e risospensione di particolato; e
- decadimento radioattivo.

Il disegno del ResRAD-BUILD è simile a quello del ResRAD: l'utente può costruire lo scenario di esposizione aggiustando i parametri di input. Tipicamente gli scenari di occupazione dell'edificio includono occupazione a lungo termine (residenti e lavoratori) e occupazione a breve termine (lavoratori occasionali e visitatori). Nel primo caso, si hanno usualmente rilasci bassi. Nel secondo caso si possono avere forti rilasci in tempi brevi (lavori di ristrutturazione). Il codice è in grado di trattare scenari, che prevedano fino a dieci recettori e fino a dieci sorgenti di contaminazione, arbitrariamente localizzati all'interno dell'edificio. La dose calcolata può essere la dose individuale a un unico recettore, che passi del tempo in diverse locazioni, o collettiva.

Il ResRAD-BUILD considera sette tipi di esposizione:

- esposizione esterna diretta alla sorgente;
- esposizione esterna al materiale depositato sul pavimento;
- inalazione di particolato;
- inalazione di aerosol di figli del radon e di vapori di acqua triziata;
- ingestione involontaria di materiale radioattivo direttamente dalla sorgente;
- ingestione di materiale contaminato depositato sulle superfici.

Il codice può calcolare l'attenuazione dovuta a schermature interposte tra sorgente e recettore.

L'utente può definire la composizione dello schermo, scegliendo tra otto tipi di materiale, e può stabilire spessore e densità. La sorgente può essere modellata come puntiforme, lineare, areale o volumetrica. Le sorgenti volumetriche possono essere composte da strati di diversi materiali fino a un numero di 5, ognuno dei quali da considerarsi omogeneo e isotropo.

3.6 ResRAD-OFFSITE

Il ResRAD-OFFSITE valuta la dose radiologica il rischio a un individuo che si trovi all'interno o all'esterno di un'area di iniziale (primaria) contaminazione. La contaminazione primaria, che è la sorgente di tutti i rilasci contemplati dal codice, si assume sia uno strato di suolo. Si considerano rilasci del contaminante in atmosfera, alla superficie del suolo e in acqua di falda. Il codice modella il trasporto di contaminati dalla sorgente primaria alle aree agricole, ai pascoli, ai pozzi d'acqua e ai bacini d'acqua. Calcola anche l'accumulo di contaminanti in quelle zone.

Il ResRAD-OFFSITE considera nove pathway di esposizione:

- esposizione esterna al suolo contaminato;
- inalazione di particolato;
- inalazione di radon;
- ingestione di prodotti vegetali;
- ingestione di carne;
- ingestione di latte;
- ingestione di prodotti ittici;
- ingestione d'acqua;
- ingestione accidentale di suolo.
-

3.7 ResRAD-RECYCLE

Il ResRAD-RECYCLE è un codice sviluppato per effettuare valutazioni di dose radiologica e di rischio, associati al riciclo e al riutilizzo di materiali contaminati da radionuclidi. Il codice considera le fasi significative e rappresentative del processo di riciclo e lavorazione e, per ciascuna di esse, provvede scenari di esposizione.

E' preso in considerazione il rischio ai lavoratori e agli utilizzatori dei prodotti finali, sia sul breve termine (un anno), che sul lungo termine (vita di uno specifico prodotto). Viene stimato sia il rischio individuale, che quello collettivo.

Il ResRAD-RECYCLE è sufficientemente flessibile, da permettere la modifica dei parametri di esposizione, per sviluppare scenari personalizzati. Ha inoltre la capacità di effettuare analisi

probabilistiche per studiare distribuzioni statistiche di potenziali dosi e rischi. Ai fini della modellizzazione, sono stati distinti due generali tipi di scenario di esposizione:

- uno scenario relativo ai lavoratori, per valutare dose e rischio ai lavoratori, che processino i materiali da riciclare;
- uno scenario relativo ai prodotti finali, per valutare dose e rischio a persone che usino o siano in altro modo esposte ai prodotti realizzati a partire da materiali riciclati.

Gli scenari relativi ai lavoratori modellano potenziali esposizioni associate a

- trasporto di rottami metallici radioattivi dal luogo di origine alla fonderia;
- processo di fusione e lavorazione di lingotti;
- trasporto dei lingotti agli impianti di fabbricazione;
- fabbricazione dei prodotti;
- distribuzione dei prodotti.

Gli scenari relativi ai prodotti finali modellano l'esposizione legata all'uso dei prodotti derivati dal riciclo e includono:

- prodotti di consumo;
- prodotti pubblici (pavimentazioni, ponti ed edifici);
- prodotti controllati (schermature e contenitori per sostanze radioattive);
- prodotti superficialmente contaminati riutilizzati (strumenti ed edifici decontaminati).

Oltre a queste due classi di scenari, sono anche considerate potenziali esposizioni della popolazione, durante il trasporto dei rottami metallici radioattivi. In totale, il ResRAD-RECYCLE contempla 41 scenari. Di questi, 35 si applicano sia all'acciaio che all'alluminio, 3 si applicano solo all'acciaio e 3 si applicano solo all'alluminio.

Gli scenari di esposizione, che possono essere costruiti col ResRAD-RECYCLE, non sono limitati a quelli di default. Di nuovi ne possono essere creati, selezionando uno scenario di default, modificando i parametri di esposizione e costruendo una geometria personalizzata, per le sorgenti di radiazione, che meglio rifletta le condizioni reali di esposizione.

3.8 GENII 2

Il codice GENII è stato sviluppato dal Pacific Northwest National Laboratory per la statunitense Environmental Protection Agency, per incorporare i modelli di dosimetria interna suggeriti dalla ICRP e le metodologie di stima di rischio radiologico del Federal Guidance Report 13, nella versione più recente dei modelli di trasporto ambientale sviluppati ad Hanford.

Il GENII è stato sviluppato per fornire un set di programmi tecnicamente recensiti e documentati, per calcolare la dose radiologica e il rischio da radionuclidi rilasciati in ambiente. Per quanto il codice sia stato inizialmente sviluppato per il sito di Hanford, ha sufficiente flessibilità per adattarsi ad un'ampia varietà di siti e situazioni.

3.8.1 Capacità e limitazioni

Il GENII è in grado di calcolare dose radiologica per rilasci acuti e cronici. Viene trattato il trasporto di radionuclidi in aria, in acqua e dovuto ad attività biologica. Le opzioni di trasporto in

aria includono modelli plume e puff, entrambi con la possibilità di imporre l'altezza effettiva dello stack, oppure di considerare l'innalzamento del pennacchio, per galleggiamento o inerzia. Negli scenari di rilascio in prossimità di edifici, si può tener conto anche del building wake. Il codice permette di fare stime di rischio per la salute, sia individuali che relativi alla popolazione; queste sono ottenute, applicando appropriati fattori di rischio alla dose equivalente efficace o alla dose assorbita da ciascun organo. Inoltre il codice usa i fattori tumorali di rischio del FGR 13 per stimare rischi relativi a ciascun organo e tessuto specifico. I dati di input sono forniti al codice tramite un'intuitiva interfaccia utente. Valori di default dei parametri di esposizione e consumo sono suggeriti, sia per l'individuo medio che per l'individuo critico, tuttavia questi dati possono essere modificati dall'utente. Informazioni sul termine di sorgente possono essere fornite come quantità di radionuclidi rilasciati, in caso di fenomeni di trasporto, o come concentrazioni nelle matrici ambientali (aria, acqua, suolo). Nel fornire concentrazioni primarie o derivate di radionuclidi, è possibile tener conto del decadimento di progenitori e dell'accumulo di prodotti di decadimento, prima dell'inizio dell'esposizione. Un singolo run del codice può trattare un numero illimitato di radionuclidi, inclusa la sorgente, e ogni radionuclide che si accumuli per decadimento dei progenitori, in quanto il sistema processa individualmente ogni catena di decadimento.

Il codice viene gestito da un'interfaccia grafica costituita dal FRAMES (Framework for Risk Analysis in Multimedia Environmental Systems), che guida l'utente alla costruzione degli input per i moduli di dispersione atmosferica, geoidrologia, trasporto biologico e trasporto in acqua di superficie. I recettori, siano essi individui, popolazioni o intrusi in ambiente contaminato, sono individuati per direzione e distanza dal punto d'emmissione (griglie polari e quadrate).

3.8.2 Pathway e Scenari

Gli scenari di rilascio contemplati includono rilasci acuti e cronici in acqua e in aria (sorgenti al suolo o in quota) e contaminazioni iniziali di suolo e superfici. Per dosi da acque superficiali, il GENII implementa i modelli del LADTAP del NRC. Gli scenari di esposizione considerano l'esposizione diretta all'acqua (nuoto, navigazione e pesca), al suolo (sorgenti sepolte e superficiali), all'aria (nube finita e semi infinita), inalazione e ingestione. Il modello del trizio include considerazione sul trizio in molecole organiche.

Originariamente il GENII faceva riferimento alle raccomandazioni della ICRP 28, 30 e 48. Nelle versioni più recenti, il GENII offre ancora quell'opzione, tuttavia fa proprie anche le raccomandazioni delle ICRP 56-72 e dei relativi fattori di rischio pubblicati nel FGR 13.

4 Il progetto GENII-LIN

Il GENII-LIN (17) (18) (19) (20) è un discendente del codice GENII v1 (21) (22), sviluppato dal Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), negli anni 80, fino a raggiungere maturità nei primi anni 90 con la release 1.485. Il GENII fu sviluppato con l'intento di produrre un set di programmi, che permettessero il calcolo di dose da radiazione e rischio per il rilascio di radionuclidi in ambiente e per esposizione a contaminazione residua. Nel 2003, ottenemmo il permesso di utilizzare il sorgente del GENII-1.485, per sviluppare un nostro proprio sistema software. Sebbene il disegno originale del pacchetto, che trovammo particolarmente efficace, sia stato conservato il GENII-LIN presenta molte migliorie significative e nuove capacità.

4.1 Capacità del Codice

Il GENII-LIN è un codice opensource di radioprotezione ambientale, sviluppato su piattaforma Linux, che permette il calcolo di dose e rischio da radiazioni quali conseguenze di radionuclidi rilasciati nell'ambiente. Le capacità del GENII-LIN includono:

- capacità di calcolare dose sia per rilasci acuti che cronici, con opzioni per dose annuale, dose impegnata e dose cumulata;
- capacità di valutare vie di esposizione che includano esposizione diretta all'acqua (nuoto, navigazione, pesca...), al suolo (sorgenti sepolte e superficiali) e all'aria (modello a nube finita e a nube semi-infinita), inalazione e ingestione.

Gli scenari possibili oggetto di analisi sono:

- rilasci acuti in aria, da sorgenti al suolo o in quota, o in acqua;
- rilasci cronici in aria, da sorgenti al suolo o in quota, o in acqua;
- contaminazione iniziale di suolo o superfici.

Il pacchetto GENII-LIN può valutare dosi per tutta una serie di possibili scenari che possiamo raccogliere in due categorie generali: “*far-field*” e “*near-field*”.

Ogni qual volta ci si focalizzi sull'impatto di un particolare rilascio di materiale radioattivo in un ambiente vasto, quale può essere la dose per rilascio da un camino, a popolazioni o individui sottovento, si ha a che fare con scenari di tipo “*far-field*”.

In uno scenario “*near-field*”, l'attenzione è rivolta alla dose che un individuo possa ricevere per il persistere in una particolare locazione, come risultato di una contaminazione iniziale o della presenza di sorgenti esterne, quali, ad esempio, rifiuti sepolti o sottosuolo contaminato.

In uno scenario “*near-field*”, i livelli di contaminazione nelle diverse matrici ambientali può essere noto. C'è da dire che i due tipi di scenario non sono mutuamente esclusivi. Esistono situazioni per le quali la dose ad individui da sorgenti remote può essere calcolata sia come “*far-field*” che “*near-field*”, con identico risultato. Qui di seguito entreremo nello specifico dando esempi di usuali scenari “*far-field*” e “*near-field*”.

4.1.1 Scenari Far field

Possono essere classificati *far-field* un considerevole numero di scenari, che comunemente si incontrano nella pratica:

- *rilasci cronici in atmosfera* – dosi previste o pregresse a individui e popolazioni a determinate distanze e in determinate direzioni rispetto alla sorgente d'emissione, per immersione, inalazione, deposizione e ingestione. Scenari di questo tipo sono usati per dimostrare aderenza alle normative che regolano le sorgenti radioattive.
- *rilasci acuti in atmosfera* - dosi previste o pregresse a individui e popolazioni a determinate distanze e in determinate direzioni rispetto alla sorgente d'emissione, per immersione, inalazione, deposizione e ingestione. Questa classe di scenari sono tipici analisi di sicurezza e valutazioni di impatto ambientale.
- *rilasci cronici in acque superficiali* – dosi previste o pregresse a individui o popolazioni a determinate distanze sottocorrente da un punto di rilascio, per nuoto, navigazione, attività su litorale, ingestione d'acqua, ingestione di prodotti ittici, ingestione di prodotti di origine animale e vegetale, contaminati per irrigazione, esposizione al suolo contaminato per irrigazione. Scenari di questo tipo sono usati per dimostrare aderenza alle normative che regolano le sorgenti radioattive.
- *rilasci acuti in acque superficiali* - dosi previste o pregresse a individui o popolazioni a determinate distanze sottocorrente da un punto di rilascio, per nuoto, navigazione, attività su litorale, ingestione d'acqua, ingestione di prodotti ittici, ingestione di prodotti di origine animale e vegetale, contaminati per irrigazione, esposizione al suolo contaminato per irrigazione. Questa classe di scenari sono tipici analisi di sicurezza e valutazioni di impatto ambientale.

4.1.2 Scenari Near-Field

Molti altri tipi di scenario possono essere classificati come near-field:

- *contaminazione iniziale di suolo e superfici* – dosi individuali che risultino da superfici o suolo contaminati per contatto diretto, risospensione, assorbimento nei vegetali. Calcoli di questo tipo sono tipici dell'analisi di impatto di operazioni di decontaminazione e dismissione.
- *contaminazione iniziale del sottosuolo* - dosi individuali che risultino da superfici o suolo contaminati per contatto diretto, risospensione, assorbimento nei vegetali. Il suolo in superficie può essere contaminato per redistribuzione manuale o trasporto biologico. Calcoli di questo tipo possono essere usati per analizzare l'impatto della disposizione di rifiuti radioattivi.
- *contaminazione di acqua superficiale* - dosi previste o pregresse a individui o popolazioni da acqua contaminata, per nuoto, navigazione, attività su litorale, ingestione

d'acqua, ingestione di prodotti ittici, ingestione di prodotti di origine animale e vegetale, contaminati per irrigazione, esposizione al suolo contaminato per irrigazione. Scenari di questo tipo sono usati per dimostrare aderenza alle normative che regolano le sorgenti radioattive.

- *effetti cumulati* – situazioni nelle quali contaminazioni iniziali del suolo e delle matrici ambientali si combinano con contributi da sorgenti esterne in aria o in acqua. Queste situazioni sono esplicative di come scenari “near field” e “far field” possono essere concettualmente combinati.

Sottolineiamo ancora che gli scenari “far field” e “near field” non sono mutualmente esclusivi e che in certi casi entrambi gli approcci possono essere usati. Si può immaginare, ad esempio, che una regione contaminata venga raggiunta da una nube radioattiva emessa da una sorgente lontana.

4.2 STRUTTURA DEL CODICE

Il GENII-LIN nasce come porting del pacchetto software GENII su piattaforma Linux. La porzione GENII del GENII-LIN contiene il programma che fu sviluppato per incorporare i modelli di dosimetria interna raccomandati dalla International Commission on Radiological Protection (ICRP) nei modelli di analisi di contaminazione ambientale sviluppati e in uso ad Hanford. GENII, che è disponibile presso l'RSICC con identificativo CCC-601, è un sistema di sei programmi (ENV, ENVIN, DOSE, INTDF, EXTDF, DITTY) e delle associate librerie dati che nell'insieme costituiscono l'Hanford Dosimetry System (GENeration II) concepito per stimare potenziali dosi a individui o popolazioni da rilasci, sia accidentali che di routine, di radionuclidi in aria o acqua e da residua contaminazione da operazioni di dismissione. Abbiamo scelto di costruire il nuovo codice sul GENII, perché quest'ultimo è ben documentato, tecnicamente recensito, a sorgente aperto ed è ancora considerato uno strumento di riferimento (23) (24).

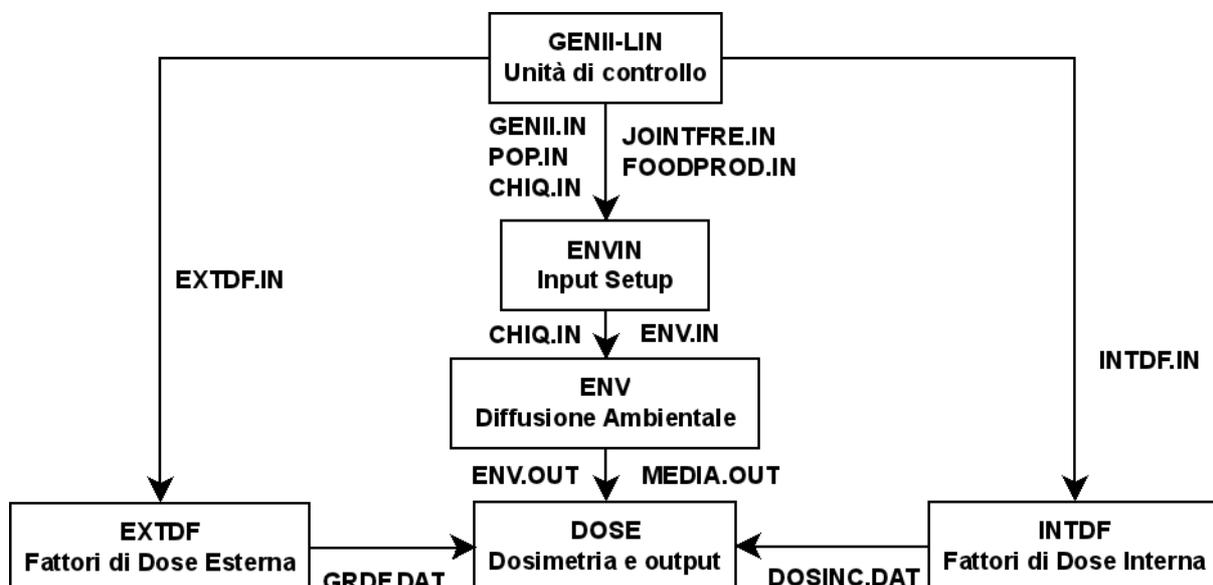


Fig. 1: Struttura del GENII-LIN quando venga scelta l'opzione ICRP30

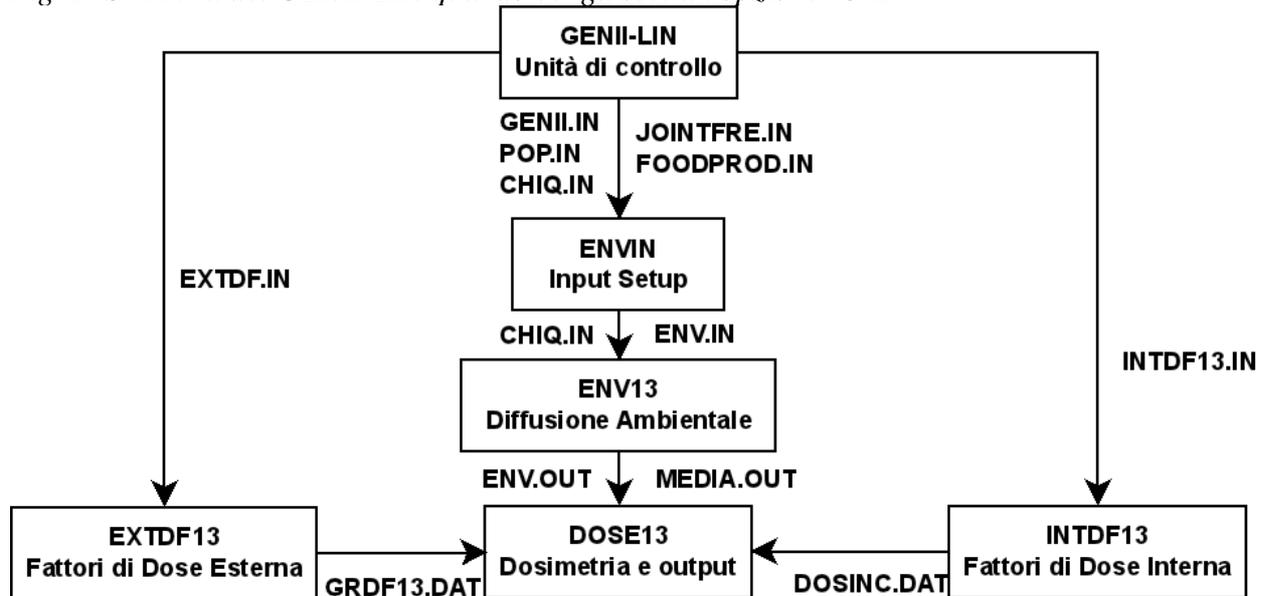


Fig. 2: Struttura del GENII-LIN, quando venga scelta l'opzione FGR13

Al momento il GENII-LIN non incorpora il modulo DITTY, in quanto è stato pensato per calcolare dose e rischio nel breve termine (approssimativamente fino a 100 anni). La struttura del GENII-LIN è schematicamente riportata nelle figure 1 e 2.

Il GENII-1.485 esegue i calcoli secondo i modelli di dosimetria interna della International Commission on Radiological Protection (ICRP) 26, 30 e 48, incorporate nel Federal Guidance Report 11 (FGR11). Il GENII-LIN, dalla release 2.0 in poi, utilizza anche i più recenti modelli di dosimetria interna consigliati dalla ICRP 72 e le procedure di stima di rischio previste dal FGR13. Per dare al codice queste nuove capacità sono stati aggiunti nuovi moduli, indicati col suffisso 13, e nuove librerie dati (figura 2). Alcuni di questi moduli sono una completa riscrittura dei moduli originali, altri sono una rielaborazione. L'utente ha la responsabilità e la facoltà di scegliere il modello di dosimetria da usare prima di iniziare i calcoli. Fatto ciò, l'unità di controllo chiama i moduli appropriati e dispone l'accesso alle corrispondenti librerie dati. In questa sezione diamo una descrizione delle funzioni e capacità di ciascun modulo. Prima di procedere, diciamo che ognuno di essi:

- è indipendente dagli altri componenti; ciascun componente è da intendersi come autonomo, le interazioni e i collegamenti sono stabiliti attraverso funzioni di interfaccia e file di trasferimento dati;
- importa i dati necessari per l'esecuzione; i dati possono provenire da file di trasferimento interni al GENII-LIN o direttamente dall'utilizzatore; ciascun modulo è in grado di individuare e raccogliere correttamente tutti i dati necessari all'esecuzione;
- esegue i calcoli correttamente, applicando il modello sulla base dei dati raccolti;
- trasmette i dati ai file di trasferimento;
- non ha dati ridondanti; la sovrapposizione di dati conduce a sistemi meno efficienti.

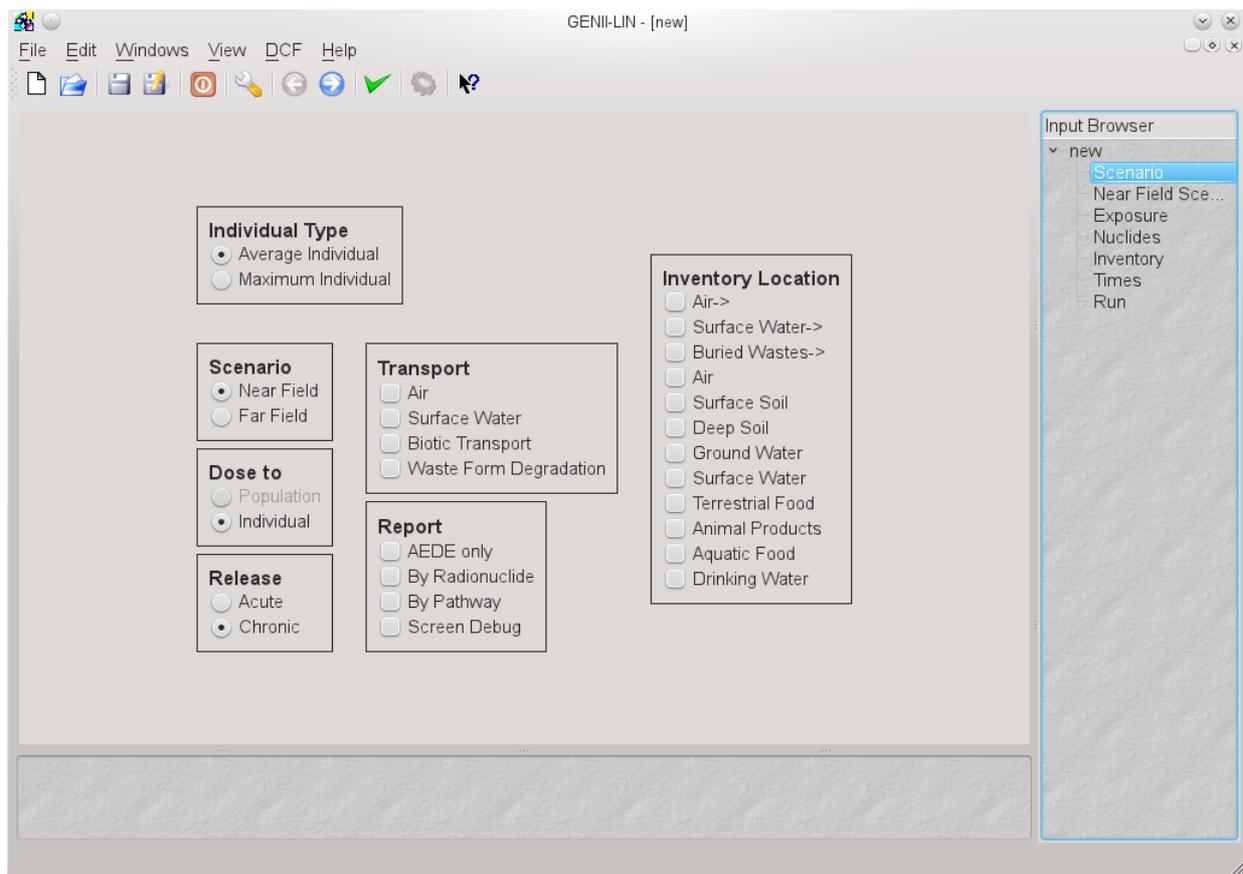


Fig. 3: Prima pagina del wizard

4.2.1 ENVIN

Il modulo ENVIN, controlla la lettura dei file di input e genera, organizza e ottimizza un nuovo input, che possa essere acquisito ed utilizzato dai moduli di trasporto ambientale, ENV ed ENV13. In dettaglio, il programma ENVIN acquisisce il file di input primario, legge le librerie dati e gli altri file di input opzionali e genera un file di trasferimento dati organizzato in sezioni

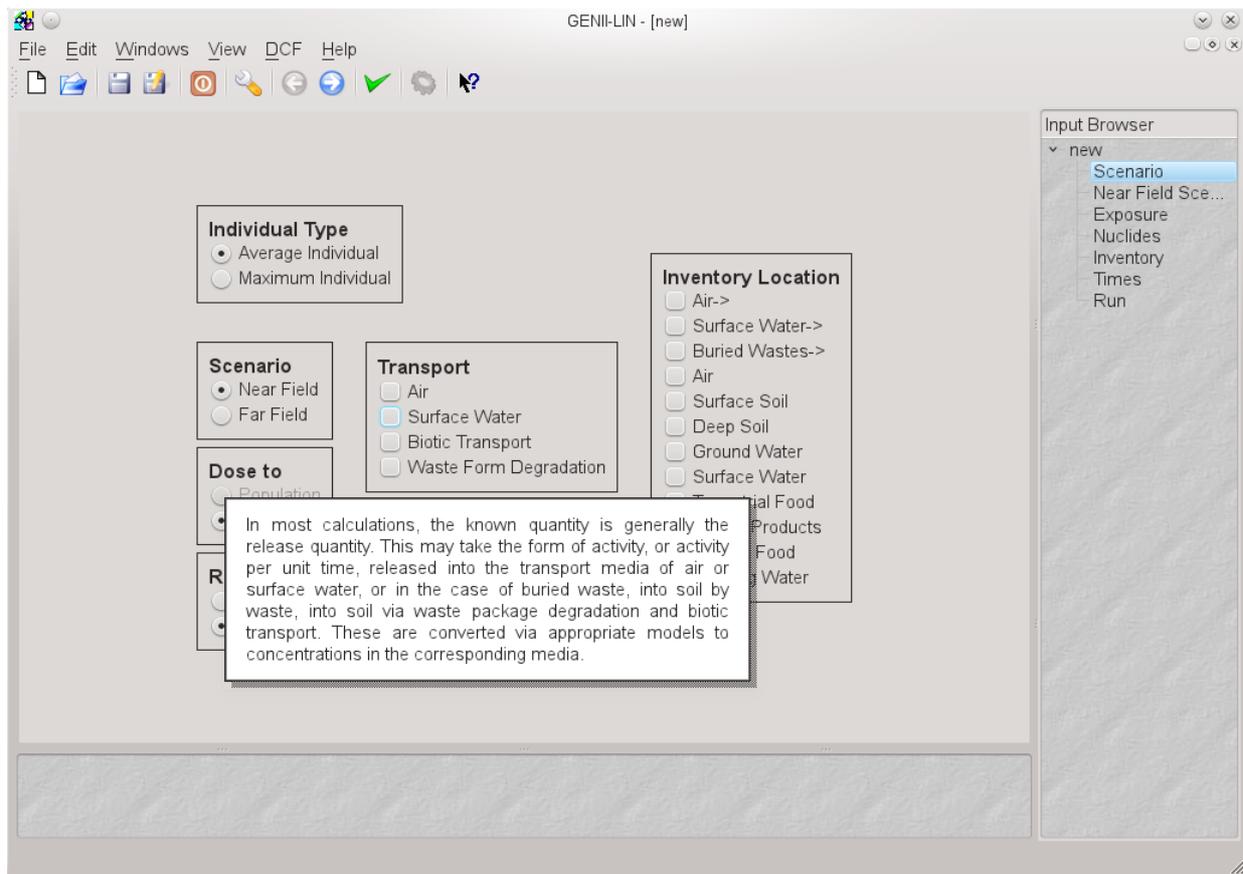


Fig. 4: Help on line

sequenziali basate sulle catene di decadimento radioattivo. L'input da fornire ad ENVIN è un file ascii standardizzato, che contiene i parametri per la definizione dello scenario, i parametri di controllo e l'inventario di radionuclidi. Quest'ultimo può essere espresso in termini di tasso di rilascio in aria o acqua, concentrazioni nelle matrici ambientali (aria, suolo, o acqua), o concentrazioni nelle matrici alimentari. Quando siano selezionate opportune opzioni trasporto, ENVIN può generare tabelle di parametri di dispersione atmosferica (χ/Q), che sono usate in successivi calcoli. Se l'opzione di immersione in nube finita è attiva, vengono generati anche i fattori di dose preliminari da nube finita in funzione dell'energia. Oltre a preparare i file di trasferimento dati, che andranno ad alimentare i moduli ENV ed ENV13, ENVIN prepara la prima parte del rapporto di documentazione dei calcoli: *l'input parameters report*.

4.2.2 ENV ed ENV13

I moduli ENV ed ENV13 calcolano il trasporto in ambiente, l'uptake e l'esposizione ai radionuclidi quali risultino dallo scenario e dai termini di sorgente.

I moduli ricevono l'input da ENVIN e, per ogni catena di decadimento, eseguono calcoli per stabilire le condizioni all'inizio del periodo di esposizione. Le concentrazioni ambientali dei

radionuclidi, sono stabilite all'inizio dello scenario, assumendo il decadimento delle sorgenti

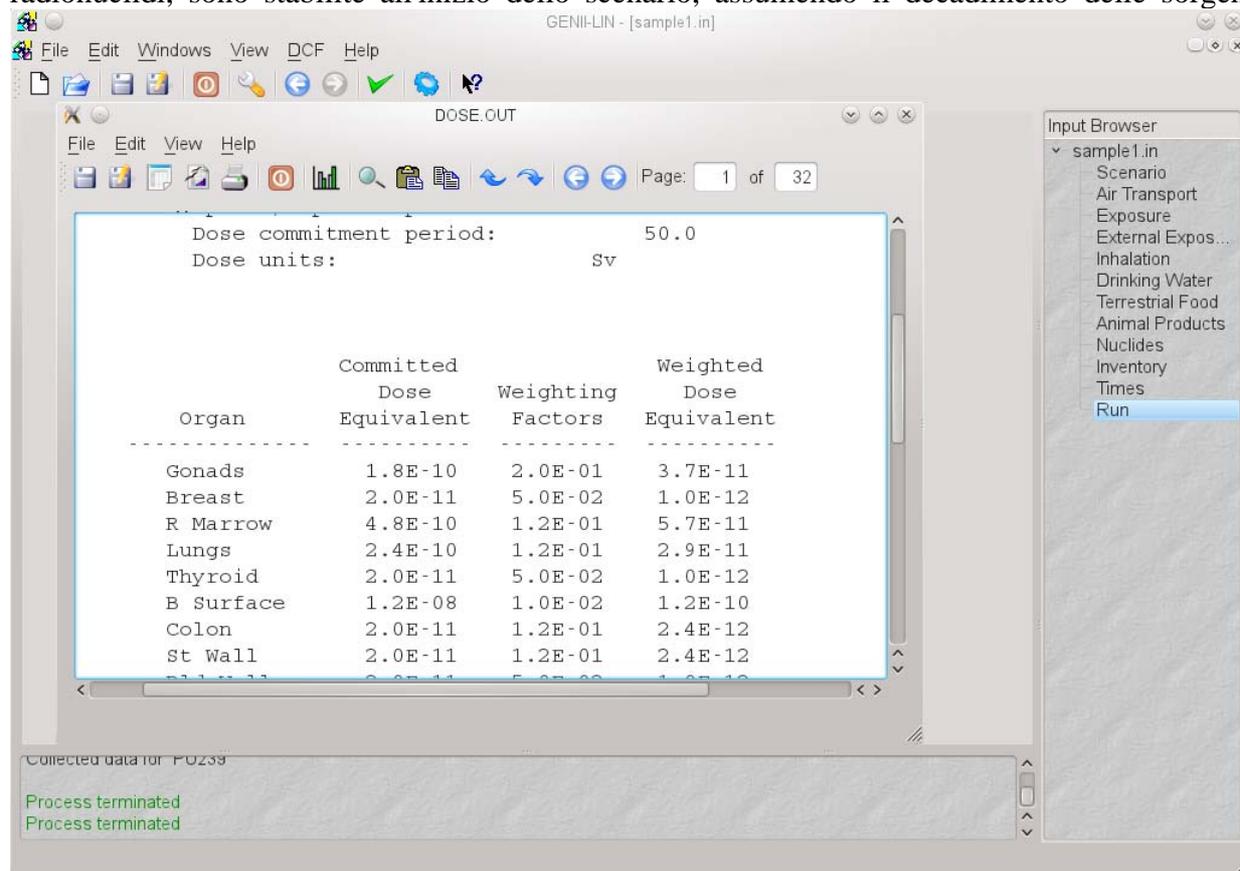


Fig. 5: Visualizzatore ascii dell'output. Dal numero di pagine (32) dell'esempio, si può capire l'elevato dettaglio dell'output.

preesistenti, considerando il trasporto biologico dei contaminanti presenti nel sottosuolo e

definendo la contaminazione del suolo da deposizione atmosferica o per irrigazione. Poi, per ogni anno di esposizione, i moduli stimano le concentrazioni di ogni nuclide della catena in aria, superficie e substrati del suolo, acqua di superficie e di falda. L'esposizione umana e l'assunzione di ciascun radionuclide sono calcolati per le seguenti vie di contaminazione:

- esposizione esterna da nubi finite o infinite ;
- inalazione da immersione nella nube, risospensione di materiale depositato e sospensione di particolato da suolo precontaminato;
- esposizione esterna a suolo contaminato, sedimenti e acqua;
- esposizione esterna a geometrie speciali;
- esposizione interna per consumo di prodotti agricoli, prodotti ittici, acqua, prodotti di origine animale, ingestione accidentale di suolo.

Le informazioni intermedie sul tasso di assunzione e le concentrazioni medie annuali nelle matrici ambientali e nelle matrici alimentari sono scritte su file di trasferimento dati. Questi possono essere consultati direttamente dall'utilizzatore e costituiscono l'input per il modulo DOSE.

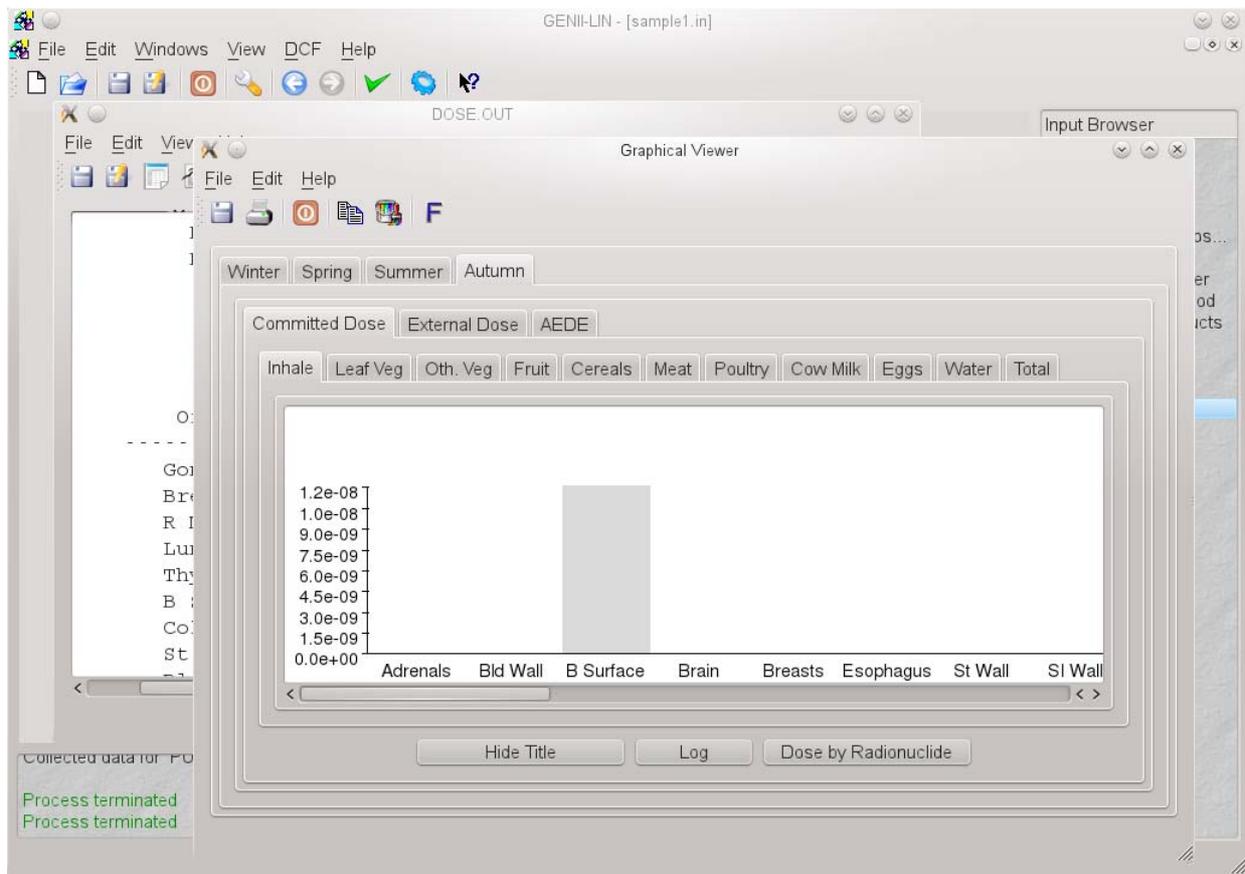


Fig. 6: Visualizzatore grafico dell'output. La complessità del visualizzatore, aiuta a comprendere meglio come l'output possa essere molto dettagliato.

4.2.3 DOSE e DOSE13

I moduli DOSE e DOSE13 leggono i tassi annuali di esposizione e di assunzione definiti dai moduli ENV ed ENV13, rispettivamente, e converte questi in dose, sia dose efficace che dose equivalente a singoli organi e tessuti.

DOSE segue le indicazioni della ICRP 26, 30 e 48, come raccolte nella FGR11: i calcoli di dose esterna sono eseguiti con fattori calcolati dal modulo EXTDF e i calcoli di dose interna sono eseguiti con fattori di dose calcolati dal modulo INTDF.

DOSE13 segue le indicazioni della ICRP72 incorporate nella FGR13: i calcoli di dose interna sono effettuati con fattori di dose precalcolati dal modulo EXTDF13 e i calcoli di dose interna sono eseguiti con i fattori di dose precalcolati dal modulo INTDF13

I tipi di dose calcolati da entrambi i moduli DOSE e DOSE13 includono:

- *Dose annuale*: la dose all'individuo o alla popolazione, che risulti dalla somma di un anno di esposizione esterna più la dose interna assorbita in quello stesso anno dovuta all'ingestione e all'inalazione.
- *Dose impegnata*: la dose all'individuo o alla popolazione che risulti da un anno di esposizione esterna più la dose interna, che risulti da quel primo anno di ingestione e

inalazione, estesa ad un'intervallo di tempo specificato a partire dall'inizio dell'intake. Ai fini della radioprotezione, l'intervallo di tempo specificato di integrazione della dose è a raggiungere i 70 anni di età: normalmente si sceglie un intervallo di 50 anni, per la popolazione adulta, e il complemento ai 70 anni per bambini e adolescenti.

- *Dose cumulata*: la dose all'individuo o alla popolazione per periodi di esposizione di molti anni fino a coprire l'intero arco del periodo di integrazione per la dose impegnata. Questo include la dose da radionuclidi che si accumulano e decadono nell'ambiente durante il periodo di esposizione. Questa quantità può tornare utile per valutare il reale impatto di attività che prevedano il rilascio cronico di radionuclidi per diversi anni o l'impatto della deposizione significativa di nuclidi quale conseguenza di un incidente.
- *Massima Dose Annuale* – il maggior rateo annuale di dose che occorre durante uno specifico periodo (ad esempio nell'arco di 50 o 70 anni). Questo calcolo tiene in considerazione, per ogni anno, l'esposizione esterna più la dose interna da radionuclidi assunti nel corso dell'anno di interesse e di tutti gli anni precedenti. La massima dose annuale è da intendersi come dose efficace. La massima dose annuale può essere calcolata per scenari che prevedano esposizione a lungo termine a rifiuti stoccati, per studi di impatto ambientale e per possibili livelli di contaminazione residua che segua operazioni di dismissione. La massima dose annuale viene calcolata, assumendo una concentrazione iniziale di radionuclidi nelle matrici ambientali, le concentrazioni dei quali poi muteranno per decadimento e fenomeni di trasporto. Il rateo annuo di dose interna cresce fin quando la concentrazione di radionuclidi nell'organismo non raggiunga l'equilibrio con le concentrazioni nell'ambiente esterno. L'anno nel quale si raggiunge l'equilibrio corrisponde in genere all'anno di massimo rateo. Il massimo rateo annuale di dose può anche occorrere dopo molti anni dall'inizio dell'esposizione.

DOSE e DOSE13 preparano il rapporto di output, il dettaglio del quale viene scelto dall'utente, prima di iniziare i calcoli. Si ha la possibilità di avere in uscita la dose per percorso di contaminazione e per radionuclide. DOSE13 fornisce output, che dipendono dall'età degli individui o delle popolazioni esposte.

Per calcolare dose e rischio alla popolazione occorre fornire un file, POP.IN, preparato dall'utente, che descriva la distribuzione degli individui nell'area di interesse. Se si tiene conto dell'ingestione, può essere richiesto anche un file, che descriva la produzione di alimenti nella regione (FOODPROD.IN). L'output può essere richiesto per l'intera popolazione o per ciascun settore della griglia.

E' responsabilità dell'utente evitare aggregazioni inappropriate quando si costruisca la griglia della popolazione. Occorre fare attenzione al range di dose, alla distribuzione in età e all'intervallo di tempo.

4.2.4 INTDF e INTDF13

Poiché sono richiesti ratei di dose annuali, i fattori di dose forniti dalla ICRP 30 e dalla ICRP 72 non sono utilizzabili dal codice: essi forniscono dose impegnata su un periodo di tempo di 50 anni o esteso a raggiungere l'età di 70 anni, a partire da un intake iniziale. I fattori di dose non possono essere divisi per l'intervallo di tempo considerato per produrre un rateo di dose annuale. Per questo motivo, il GENII-LIN ha i propri generatori di fattori di dose interna che forniscono gli incrementi annuali di dose ai tessuti, per ciascun anno a seguire un intake iniziale.

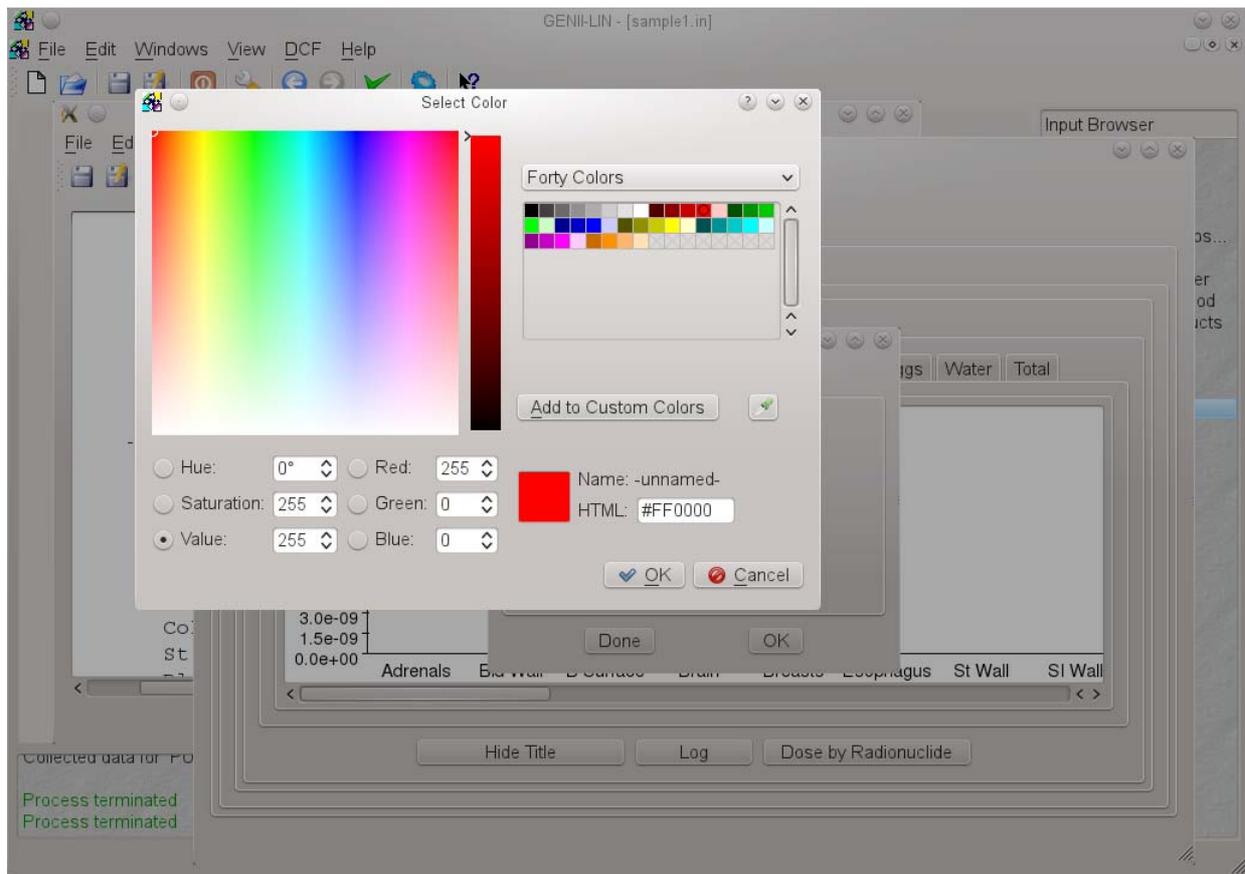


Fig. 7: I grafici possono essere personalizzati, cambiando colori e fonts. Possono inoltre essere esportati in tutti i formati supportati dal sistema

Se l'utente sceglie di seguire le raccomandazioni della ICRP 30, partendo da un intake acuto iniziale, INTDF stima l'attività negli organi sorgente sulla base dei modelli e dei parametri biocinetici della ICRP 30 per il trasporto e accumulo di radionuclidi nell'organismo. Per ciascun tipo di radiazione, i contributi alla dose equivalente agli organi bersaglio sono il prodotto di due fattori:

- il numero totale di trasmutazioni dei radionuclidi nell'organo sorgente durante il periodo di interesse che segue l'assunzione;
- l'energia assorbita nell'unità di massa nell'organo bersaglio, modificata con gli opportuni fattori di qualità, per ciascun tipo di radiazione, per trasmutazione del radionuclide nell'organo sorgente.

Si tratta di un problema ai valori iniziali, che viene risolto usando un sistema di equazioni differenziali. L'output sono le dosi incrementali ad ogni organo, che sono poi usate dal modulo DOSE per assemblare dose impegnata e dose cumulata. Se l'utente sceglie di seguire le raccomandazioni della FGR13, viene chiamato il modulo INTDF13, il quale fa riferimento ai più recenti modelli di dosimetria interna della ICRP72. L'approccio al problema è diverso. La FGR13 fornisce essa stessa librerie di ratei di dose, le quali contengono i ratei di dose assorbita in organi e tessuti per istanti di tempo, che seguano l'intake da individui per ciascuna di sei età rappresentative. Il codice accede a quelle librerie e, dopo aver raccolto dati per ciascun nuclide

specificato nel file di input, esegue una interpolazione con spline in tensione attraverso le sequenze di dati e integra sul tempo la curva specificata dalla spline, calcolando la dose equivalente incrementale per ciascun anno che segua l'intake. Per ciascuna classe di età viene generata una libreria che contiene gli incrementi annuali di dose per 29 organi e tessuti. Queste librerie sono poi usate dal modulo DOSE13 per calcolare dosi annuali, dosi impegnate e dosi cumulate, che dipendono dall'età del soggetto interessato.

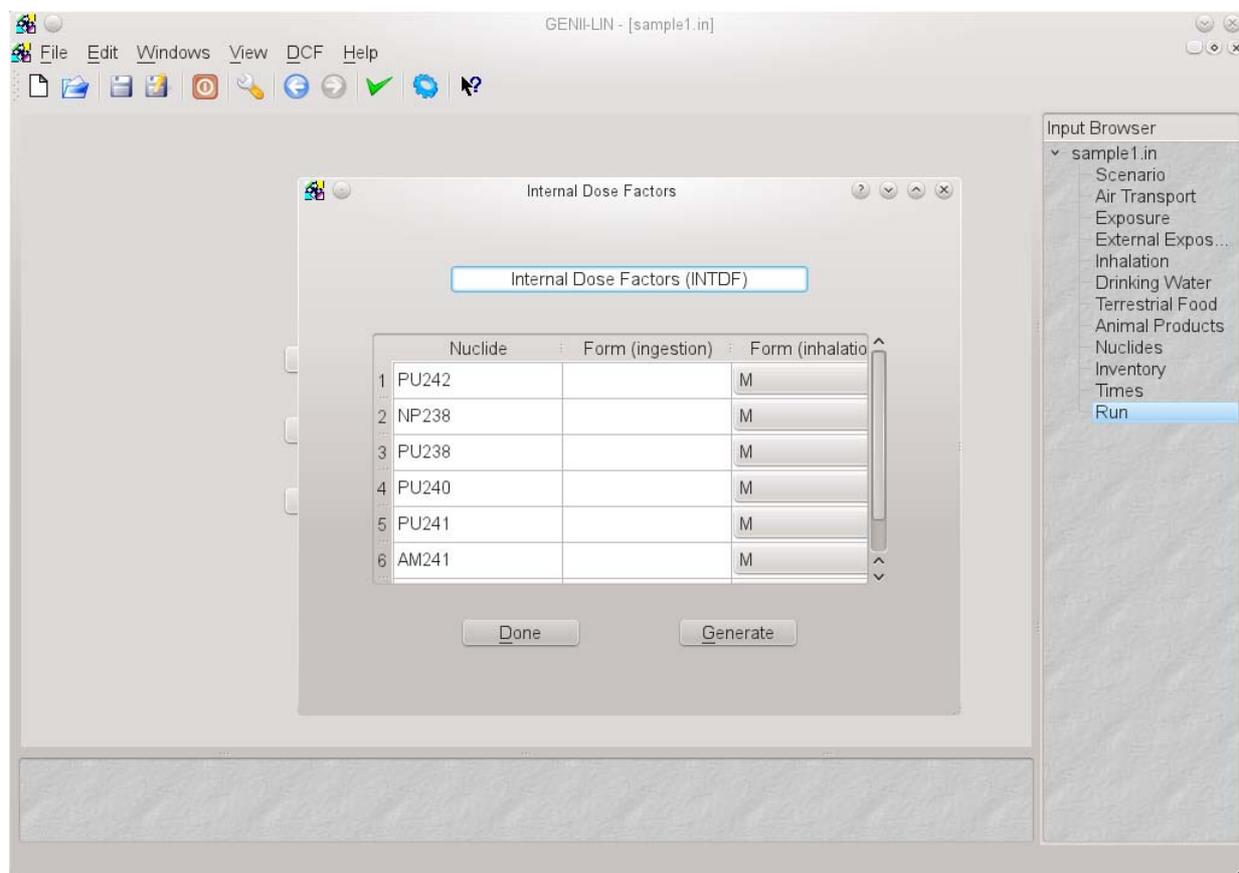


Fig. 8: Il GENII-LIN ha i propri generatori di fattori di dose interna.

4.2.5 EXTDF e EXTDF13

Non è pensabile sviluppare una metodologia dosimetrica esterna, che sia applicabile ad arbitrarie distribuzioni di radionuclidi nei media. In radioprotezione ambientale, è pratica comune considerare geometrie di esposizione semplificate ed idealizzate: solitamente, immersione in una nube semi-infinita, esposizione a superficie del suolo contaminata, esposizione al suolo contaminato a profondità infinita. In questa linea, il GENII-LIN offre librerie di fattori di rateo dose esterna per geometrie standard comunemente usate:

- immersione in una nube semi-infinita di materiale radioattivo;
- immersione in acqua contaminata;
- esposizione diretta a superficie del suolo contaminata;
- esposizione diretta al suolo contaminato a profondità infinita.

Per tutte quelle situazioni nelle quali queste geometrie siano da considerarsi inadeguate, il GENII-LIN fornisce i propri generatori di fattori di dose esterna, che permettono la creazione di fattori di rateo di dose esterna “specializzati”, per sorgenti di geometria arbitraria. Questa capacità può essere importante, ad esempio, quando la contaminazione del suolo profondo è dovuta alla presenza di rifiuti radioattivi stoccati.

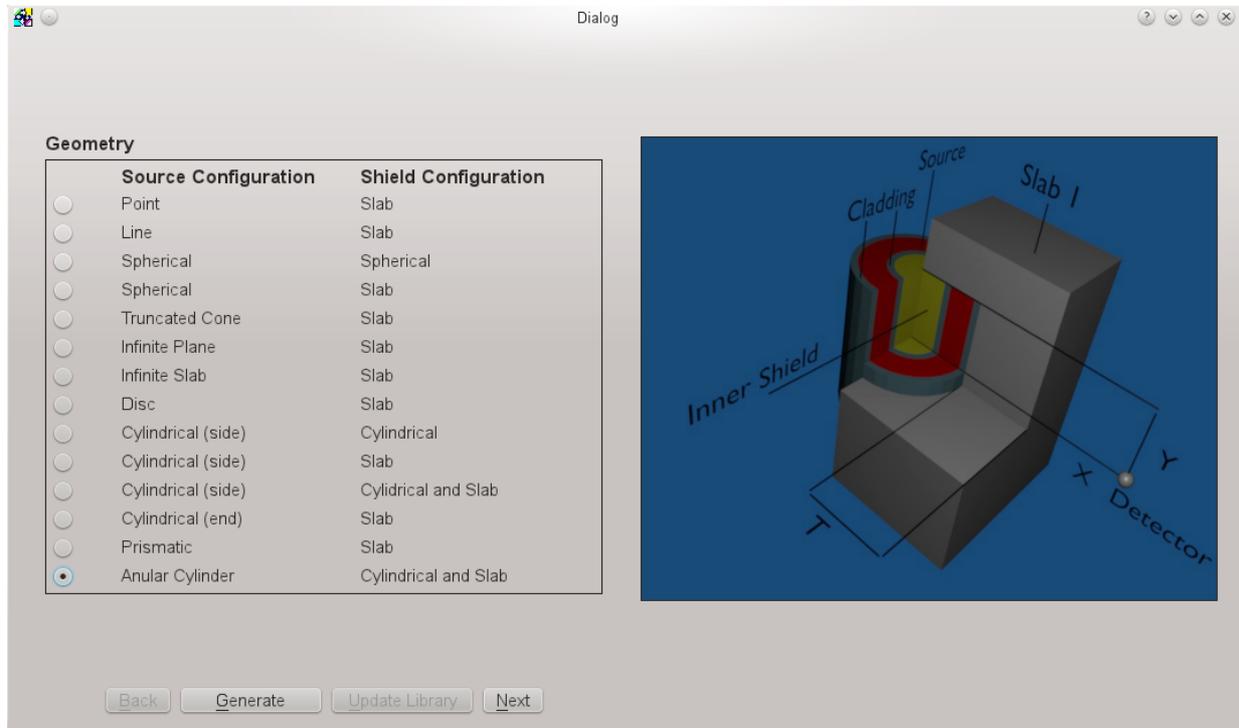


Fig. 9: Il GENII-LIN ha generatori di fattori di rateo dose esterna, i quali permettono di tener conto della reale geometria della sorgente

I generatori di fattori di dose esterna sono una versione adattata e migliorata del noto codice ISOSHLD (Engel, Greenberg, and Hendrickson 1966). La porzione dell'ISOSHLD utile a calcolare l'intensità di sorgente da elementi di combustibile di reattori a fissione (la routine RIBD) è stata eliminata. Le librerie dati relative al decadimento dei nuclidi e agli yield dei gamma e dei beta sono state aggiornate dalla DRALIST di Kocher (31). L'ISOSHLD usa la “point kernel integration technique”; ossia, la dose al punto di esposizione è il contributo di un gran numero di sorgenti puntiformi individuali. Per ottenere la dose totale, viene eseguita un'integrazione numerica sul volume della sorgente. Per un limitato numero di geometrie l'integrazione è eseguita analiticamente. Le geometrie trattabili dall'EXTDF sono le 14 standard disponibili in ISOSHLD.

Se l'utente sceglie di seguire le indicazioni della ICRP 30, viene chiamato il modulo EXTDF, il quale utilizza le librerie dati fornite da Kocher (34), in altre parole, le stesse librerie usate in origine dal GENII-1.485, e fornisce fattori di rateo di dose per l'intero organismo.

Se si sceglie di seguire le raccomandazioni della FGR13, viene chiamato il modulo EXTDF13, il quale il quale usa librerie più recenti e dettagliate (35). Esso calcola fattori di dose per ciascun organo e predispone i dati per il calcolo di rischio.

EXTDF ed EXTDF13 possono solo calcolare fattori di dose normalizzati. Non possono essere usati per calcolare dosi esterne da sorgenti di geometria arbitraria senza rielaborazione dell'output, in quanto, automaticamente leggono e calcolano fattori di rateo di dose per unità di attività, per tutti i radionuclidi nella "Master Nuclide Library".

4.3 Unità di Controllo Centrale

L'Unità di Controllo Centrale, è un sistema di gestione generale, che offre all'utilizzatore il completo controllo sulla definizione dello scenario e sul processo di calcolo e ha il compito di

- rendere relativamente facile l'inclusione di nuovi modelli e moduli;
- promuovere l'accesso a file dati eterni;
- minimizzare e ottimizzare le richieste di scambio dati all'interno del GENII-LIN;
- permettere accesso illimitato ai dati;
- gestire l'accesso a programmi esterni e a librerie di sistema.

L'utente interagisce con l'Unità di Controllo Centrale attraverso un'interfaccia grafica organizzata come un wizard, costruita sulle librerie Qt (36), pagina iniziale della quale è mostrata in figura 3. Attraverso l'interfaccia, l'utente può inserire i dati richiesti per la generazione dello scenario e la generazione dell'input, per i generatori dei fattori di dose interna ed esterna (figure 8 e 9) e per i programmi di dosimetria ambientale. Schermate ben ordinate guidano l'utente passo passo attraverso il processo di definizione del problema con selezione delle opzioni per costruire i file di input per i moduli di dosimetria ambientale e i generatori di fattori di dose. L'interfaccia:

- è ampiamente documentata per mezzo un sistema di aiuto in linea (figura 4); descrizioni dettagliate delle varie opzioni disponibili sono accessibili all'utente mentre utilizza il codice;
- verifica la compatibilità delle opzioni e avverte l'utente, quando questa venga meno;
- richiede solo dati di input strettamente pertinenti allo scenario in esame;
- verifica che i dati di input cadano entro intervalli ragionevoli;
- testa la presenza dei necessari file ausiliari e permette all'utente di leggerli ed editarli e crearne nuovi.

L'interfaccia permette inoltre di accedere ai file di output, che possono essere visualizzati, sia attraverso visualizzatori testuali (figura 5), che attraverso visualizzatori grafici integrati (figure 6 e 7). L'output può essere esportato in formato CSV o in forma di foglio elettronico LibreOffice.

5 Conclusioni

Nel panorama internazionale, c'è un rinnovato interesse nello sviluppo e l'applicazione di codici per la radioprotezione finalizzati al calcolo della dose del rischio a individui e popolazioni per esposizione ad ambienti contaminati.

Ciascuno di questi codici ha proprie peculiarità, propri punti di forza e propri limiti, che nell'insieme lo rendono adatto, potremmo dire specializzato, ad affrontare particolari situazioni.

A partire dal 2003, la nostra unità di ricerca ha iniziato a sviluppare un proprio software di radioprotezione ambientale, le cui release stabili vengono regolarmente pubblicate e rese disponibili dai database della NEA e del RSICC. Il GENII-LIN è in grado di stimare dosi potenziali a individui e popolazioni da rilasci sia acuti che cronici di radionuclidi in ambiente e da contaminazione residua da attività di dismissione. Il codice ha la capacità di

- calcolare dosi per rilasci acuti e cronici, con opzioni per dose annuale, dose impegnata e dose cumulata;
- valutare un ampio spettro di vie di esposizione, che includono esposizione diretta all'acqua (nuoto, navigazione, pesca...), al suolo (sorgenti sepolte e superficiali) e all'aria (modello a nube finita e infinita), ingestione e inalazione.

Le concentrazioni di radionuclidi in ambiente sono calcolate per ciascun anno di esposizione postulato, tenendo conto del decadimento e di appropriati fenomeni di trasporto attraverso l'aria, il suolo, l'acqua di superficie, l'acqua di falda e del trasporto biotico. Le vie di esposizione considerate sono: esposizione esterna all'aria, con possibilità di scegliere il modello a nube finita o semi-infinita; esposizione diretta al suolo, ai sedimenti e all'acqua; esposizione esterna a sorgenti di geometrie speciali; ingestione di prodotti agricoli, prodotti ittici, prodotti animali, acqua e ingestione accidentale di suolo. Il GENII-LIN ha un'interfaccia grafica intuitiva ed esaustiva, che guida l'utente all'inserimento dei dati e alla definizione dello scenario.

Per quanto nessuna nozione di programmazione sia richiesta per usare il codice, esso è completamente open source, ossia trasparente all'utilizzatore, che può direttamente controllare la corretta implementazione dei modelli. La struttura modulare e flessibile del codice e il disegno strettamente orientato agli oggetti permettono un relativamente facile sviluppo e una facile correzione dei bug: altri moduli possono essere aggiunti e i presenti modificati con minimo sforzo.

Nel capitolo 2 abbiamo voluto sintetizzare quelle che sono le caratteristiche che uno strumento di calcolo debba possedere, per essere adeguato alla radioprotezione ambientale. Ora ripercorriamo punto per punto quello schema, evidenziando quanto il GENII-LIN soddisfi quei requisiti, in modo da mostrare capacità, limiti e potenziali sviluppi..

5.1 Il GENII-LIN e i requisiti necessari

- **Trasporto in generale**
- Il GENII-LIN ha la capacità di modellare rilasci annuali di contaminanti.

- E' capace di utilizzare parametri di trasporto, che siano specifici del sito in esame, in luogo di parametri di default di carattere più generale, che pure vengono forniti.
- Il codice è perfettamente in grado di modellare rilasci cronici di contaminanti sul lungo periodo.
- Il codice è in grado di modellare il trasporto in ambiente e la conseguente esposizione, che seguano rilasci impulsivi di breve durata, di qualche ora o di qualche giorno
- Per i vari percorsi di trasporto ed esposizione, il codice è in grado di interrelare sequenzialmente i vari moduli di calcolo, in modo che le concentrazioni calcolate, che siano output di ciascun modulo, siano input dei moduli a seguire.
- **Trasporto in acqua superficiale**
- Il codice presenta un semplice modello di diluizione per simulare il trasporto in acqua di superficie e in acqua di falda.
- Il codice non è al momento in grado di usare valori annuali di flusso variabili. Stiamo lavorando al modello in questa direzione. Al momento, per modellare flussi annuali variabili, occorre eseguire diversi run del codice
- **Trasporto nei sedimenti**
- Il codice è capace di simulare il trasporto nei sedimenti, ossia, il trasferimento di contaminazione dall'acqua ai sedimenti, il susseguente trasferimento di questa contaminazione alle altre matrici e l'esposizione diretta di individui ai sedimenti
- **Trasporto in aria**
- Il modello di trasporto e diluizione del contaminante in aria, implementato nel GENII-LIN, è in grado di fornire valori medi dei diversi parametri per ciascuno dei 16 settori angolari, nei quali viene suddivisa la rosa dei venti.
- Il codice contiene un modulo per calcolare il trasferimento di contaminante dall'aria al suolo.
- **Trasporto nelle catene alimentari**
- Il codice usa formulazioni consolidate, per modellare il trasferimento e l'accumulo di contaminate nelle catene alimentari.
- Il codice permette l'uso di parametri tipici del sito in esame, per calcolare il trasporto e l'accumulo di contaminanti nelle catene alimentari
- **Esposizione**
- Nel modellare il trasporto di contaminante attraverso le catene alimentari, il codice è in grado di distinguere e modellare simultaneamente le diverse categorie alimentari (carne, grano, vegetali a foglia larga...) ciascuna con i propri parametri di consumo e uptake.
- Il codice è in grado di modellare tutte le cinque vie di esposizione necessarie (inalazione, ingestione, immersione, esposizione diretta al suolo, esposizione diretta ai sedimenti)
- **Dose e rischio**
- Il codice deve fare proprie le raccomandazioni del Federal Guidance Report 13, per i fattori di dose e per le procedure di valutazione del rischio, pur lasciando all'utente l'opzione di adottare le raccomandazioni della FGR 11
- Le dosi possono essere calcolate usando fattori di dose, che varino con l'età dei soggetti interessati, quando si scelgano le raccomandazioni della FGR13.
- **Dati di input e output**
- Il codice fornisce output con livello di dettaglio scelto dall'utente, con la possibilità di fornire le dosi e il rischio specificamente per pathway, radionuclide, tipo di esposizione e per anno.
- I risultati sono presentati in una forma trasparente, che li rende agevolmente verificabili e utilizzabili. Il codice ha visualizzatori testuali e grafici e permette di esportare i risultati in forma di foglio elettronico, per facilitare successive elaborazioni dei dati.
- **Altro**

- Il GENII-LIN ha modelli speciali per C₁₄ e H₃, in quanto il comportamento di questi contaminanti nell'ambiente è diverso da quello di altri contaminanti. Il modello è stato perfezionato in modo da superare alcune limitazioni, indotte da un bug presente nella originaria implementazione del GENII-1.485
- I modelli tengono conto del decadimento dei radionuclidi durante il trasporto, considerando anche l'accumulo dei prodotti di decadimento.

5.2 Il GENII-LIN e i requisiti altamente desiderabili

- **Trasporto in acqua di superficie**
- Il codice non possiede al momento addizionali capacità per simulare diversi fenomeni di trasporto, che possano interessare l'acqua di superficie, ad esempio la formazione di bacini per infiltrazione. Stiamo lavorando al modello per conferire ad esso queste capacità
- **Trasporto in aria**
- Il codice non ha la capacità di utilizzare serie meteorologiche annuali, in forma diretta. Queste devono essere elaborate a costruire una Joint Frequency.
- **Trasporto nelle catene alimentari**
- Il codice è in grado di tener conto della risospensione del suolo contaminato e della successiva deposizione sui raccolti.
- Il codice è in grado di considerare il buildup nel tempo della contaminazione del suolo, nel caso di deposizione a lungo termine.
- **Esposizione**
- Il codice ha la capacità di elaborare parametri di esposizione imposti dall'utente.
- **Dati di input e output**
- Il codice ha un'interfaccia grafica che agevola l'inserimento dati, e guida l'utente alla costruzione del file di input.
- I moduli di calcolo producono risultati intermedi che possono essere visionati; ad esempio è possibile visionare la concentrazione di attività nei vegetali per ciascuna matrice alimentare
- **Altro**
- Il codice dovrebbe permettere di considerare rilasci di durata pluriennale, tuttavia non permette di usare tassi di rilascio variabili di anno in anno. Per rilasci di questo tipo occorre eseguire diversi run del codice. Il nuovo modello di trasporto in aria al quale stiamo lavorando, conferirà questa capacità.
- Il codice non permette analisi di sensitività e di incertezza, usando distribuzioni probabilistiche dei parametri di input.

5.3 Il GENII-LIN e i requisiti discrezionali

- **Dose e rischio**
- Il GENII-LIN ha propri generatori di fattori di dose interna i quali forniscono incrementi annuali di dose equivalenti ai diversi organi e tessuti, per ogni anno a seguire un intake iniziale, in funzione dell'età dei soggetti interessati. Le librerie generate sono poi usate per costruire dose impegnata, dose cumulata e dose annuale.
- Pur presentando librerie di fattori di rateo di dose esterna, per le geometrie standard comunemente usate in radioprotezione ambientale, il GENII-LIN ha propri generatori di fattori di rateo di dose esterna, da usare in tutte quelle situazioni, nelle quali ricorrere a quelle geometrie standard sia un'approssimazione troppo forte.
- **Altro**

- Stiamo lavorando all'integrazione del GENII-LIN con i sistemi geografici territoriali. Questa linea di sviluppo è strettamente legata alla stesura del nuovo modello di trasporto in aria. E' in programma di sostituire il modello "straight line gaussian plume", con un modello a puff, che tenga conto della reale orografia del territorio e di come questa influenzi il campo di vento. L'integrazione dei sistemi GIS diventa così un valido ausilio alla costruzione dell'input per il preprocessore meteorologico.

A riassumere

Il GENII-LIN è uno strumento di analisi maturo, che si è rivelato molto stabile e affidabile. Tuttavia c'è ancora del lavoro da fare per raggiungere la perfetta aderenza con le specifiche, che il codice "ideale" deve avere. Si deve migliorare il modello di trasporto in aria e a questo stiamo lavorando, puntando a sostituire il modello gaussiano a plume, con un modello a puff, con l'ambizione di tener conto dell'effetto dell'orografia del suolo sul campo di vento e sulla diffusione degli inquinanti.

In secondo luogo, i modelli sui quali si basa, conferiscono al codice capacità di calcolare dose e rischio per tempi dell'ordine di 0-100 anni, dall'inizio del rilascio dei radionuclidi in ambiente. Questo lo rende utilizzabile per la maggior parte delle installazioni nucleari, non per i depositi di rifiuti nucleari, che possono avere impatti su scale di tempi molto più lunghe. Per conferire al codice questa capacità, assume grande importanza lo studio dei fenomeni che regolano il trasporto di contaminanti e la messa a punto di modelli per la descrizione dei processi di migrazione attraverso sia i mezzi porosi artificiali e naturali, che costituiscono le barriere di contenimento, che le barriere porose reattive impiegate per la bonifica di siti contaminati.

6 Bibliografia

1. U.S. Department of Energy, 1996, Guidance for a Composite Analysis of the Impact of Interacting Source Terms on the Radiological Protection of the Public from Department of Energy Low-Level Waste Disposal Facilities, Richland, Wash., April.
2. U.S. Department of Energy, 1998, Radioactive Waste Management Manual, "Chapter IV: Low Level Waste Requirements", DOE M 435.1, Draft, Washington, D.C., July 31.
3. U.S. Department of Energy, 1999b, Revised Draft Hanford Remedial Action Environmental Impact Statement and Comprehensive Land-Use Plan, DOE/EIS-0222D, Richland, Wash., April.
4. Harris, S., and B. Harper, 1998, "Using Eco-Cultural Risk in Risk-Based Decision Making," Proceedings of the American Nuclear Society Environmental Sciences Topical Meeting, Richland, Wash., April 4.
5. Idaho National Engineering Laboratory (INEL) 1998, DOE Complex-Wide Maintenance Program Plan for Low-Level Waste Performance Assessment and Composite Analysis, INEL/EXT-98-00719, Draft, Idaho Falls, Idaho, July
6. U.S. Environmental Protection Agency, 1989b, Risk Assessment Methodology, Environmental Impact Statement for NESHAPs Radionuclides, Volume I, Background

- Information Document, EPA/520/1-89- 005, Office of Radiation Programs, Washington, D.C., Sept.
7. National Research Council, 1994, Building Consensus through Risk Assessment and Management of the Department of Energy's Environmental Remediation Program, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
 8. M. Sumini, F. Teodori, Linee Guida alla Valutazione del Rischio da Installazioni Nucleari, CERSE-UNIBO RL 1304/2010, Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP5 punto B1 - AdP ENEA MSE del 21/06/07 Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fissione”
 9. A. L. Sjoreen, G. F. Athey, J. V. Ramsdell, Jr., and T. McKenna, RASCAL Version 2.2 User's Guide, NUREG/CR-5247, Vol. 1, Rev. 2, Supp. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1994).
 10. Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2006, August). Phase III of the SRS dose reconstruction project.
 11. C. Yu et. al: RESRAD-BUILD: A Computer Model for Analyzing the Radiological Doses Resulting from the Remediation and Occupancy of Buildings Contaminated with Radioactive Material. ANL/EAD/LD-3 (November 1994)
 12. C. Yu et al.: Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines Using RESRAD, Version 5.0 ANL/EAD/LD-2 (1993)
 13. S.G. Homann: HOTSPOT Health Physics Codes for the PC, UCRL-MA-106315 (March 1994)
 14. C. Yu, E. Gnanapragasam, B. Biwer, J.-J. Cheng, S. Kamboj, T. Klett, A. Zielen, W. A. Williams, S. Domotor and A. Wallo, RESRAD-OFFSITE – A new member of the RESRAD family of codes Radioprotection 44 (5) 659-664 (2009) DOI: 10.1051/radiopro/20095121
 15. Cheng, Jing-Jy; Kassas, Bassel; Yu, Charley; Arnish, John; LePoire, Dave; Chen, Shih-Yew; Williams, W A.; Wallo, A; Peterson, H; Resrad-Recycle: A Computer Model for Analyzing Radiation Exposures Resulting From Recycling Radioactively Contaminated Scrap Metals or Reusing Radioactively Surface-Contaminated Materials and Equipment, Health Physics. 87(5):517-531, November 2004
 16. Napier BA. 2004. GENII Version 2 Users' Guide. PNNL-14583, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA
 17. F. Teodori, M. Sumini, GENII-LIN-2.1 an open source software system for calculating radiation dose and risk from radionuclides released to the environment, J. Radiol. Prot. 28 (2008) 589-601
 18. Sumini, M., Teodori, F., Cantoro, N., 2005 GENII-LIN: a new object oriented interface for the GENII Code, Radiation Protection Dosimetry, 116 1-4 597-600
 19. Sumini, M., Teodori, F., 2005 GENII-LIN: a Multipurpose Health Physics Code Built on GENII-1.485, Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, 4 5 36-42.
 20. Teodori, F., Sumini, M., 2008 GENII-LIN-2.1 an open source software system for calculating radiation dose and risk from radionuclides released to the environment Journal of Radiological Protection, 27 465-470
 21. Napier B A, Peloquin R A, Strenge D L and Ramsdell J V 1988 GENII -The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System, Vol. 1: Conceptual Representation, PNL-6584.
 22. Napier B A, Peloquin R A, Strenge D L and Ramsdell V J 1988 GENII - The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System, Vol. 2: Users' Manual, PNL-6584.
 23. DOE 2003 Software Quality Assurance Plan and Criteria for the Safety Analysis Toolbox Codes, Defense Nuclear Facilities Safety Board Recommendation 2002-1 Software

- Quality Assurance Improvement Plan Commitment 4.2.1.2, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
24. DOE 2004 Defense Nuclear Facilities Safety Board Recommendation 2002-1, Software Quality Assurance Improvement Plan, Commitment 4.2.1.3: Software Quality Assurance Improvement Plan: GENII Gap Analysis. DOE-EH-4.2.1.3-GENII-Gap Analysis U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
 25. International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1977 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Pergamon Press, New York, New York.
 26. International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1979/1982 Limits for intakes of radionuclides by workers ICRP Publication 30 (New York: Pergamon)
 27. International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1986 The metabolism of plutonium and related elements ICRP Publication 48 (New York: Pergamon).
 28. Eckerman K F, Wolbarst A B and Richardson A C B 1988 Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion, Federal Guidance Report No. 11, (U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC).
 29. International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1996 Age Dependent Doses to the Member of the Public From the intake of Radionuclides, Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 72, Pergamon Press, Oxford.
 30. Engel R L, Greenberg J and Hendrickson M M 1966 ISOSHLD – A Computer Code for General Purpose Isotope Shielding Analysis, BNWL-236, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
 31. Kocher D C 1981 Radioactive Decay Data Tables: A Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessments, DOE/TIC-11026, (U. S. Department of Energy, Washington, D.C.)
 32. U.S. Environmental Protection Agency 1988 Federal Guidance Report 13 Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides: CD Supplement, EPA 402-C-99-001, Rev. 1 (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC)
 33. International Commission on Radiological Protection (ICRP) 2007 Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 103, Pergamon Press, Oxford.
 34. Kocher, D. C., 1981 Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to Photons and Electrons, NUREG/CR-1918 (ORNL/NUREG-79)
 35. Zankl, M., Petoussi-Henb, N., Drexler, G., Saito, K., 1997 The calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods Part VII: Organ Doses due to Parallel and Environmental Exposure Geometries. GSF-Report 8/97 (Munich-Neuherberg: Institut für Strahlenschutz, GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit)
 36. Molkentin 2007, The Book of Qt 4: The Art of Building Qt Applications (1st ed.), No Starch Press, pp. 440, ISBN 978-1593271473