

Definizione di mappe georeferenziate di dose da esposizioni per contaminazione da radionuclidi rilasciati nell'ambiente atmosferico in seguito ad un ipotetico evento incidentale

Mariarosa Giardina, Elio Tomarchio, Salvatore Basile

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, viale delle Scienze, 6, 90128 Palermo, Italia

e-mail: mariarosa.giardina@unipa.it

Riassunto

Il sistema di calcolo CALMET-CALPUFF è stato utilizzato per lo studio del trasporto a lunga distanza e la deposizione di diverse specie radioattive a seguito di un ipotetico incidente nella centrale nucleare di Gösgen, situata presso il Canton Soletta, Svizzera. CALPUFF è un modello gaussiano a puff in grado di descrivere la dispersione atmosferica di inquinanti multi-specie su scale che vanno dalla decina alle centinaia di chilometri dalla sorgente. I dati meteorologici sono stati simulati con il codice di calcolo 3D CALMET. I risultati in termini di concentrazioni dell'inquinante radioattivo in aria e deposizione al suolo sono stati elaborati con il software GRADO (GRid_in Air of specific effective DOse), messo a punto dal gruppo di ricerca per la definizione di mappe georeferenziate di dose da esposizione utilizzando i coefficienti di conversione riportati nelle pubblicazioni ICRP. L'analisi dei risultati mostra che il pacchetto software integrato CALMET-CALPUFF-GRADO può risultare uno strumento utile nelle strategie di gestione dell'emergenza in caso di eventi incidentali come quello oggetto di studio.

INTRODUZIONE

Il piano nazionale per la gestione delle emergenze radiologiche e nucleari, redatto in ottemperanza a quanto disposto dall'art. 182 del D.Lgs. 101/2020, individua le misure necessarie a fronteggiare le conseguenze di incidenti in impianti nucleari di potenza ubicati "oltre frontiera". Il piano prevede anche l'impiego di modelli di calcolo di dispersione di inquinanti in atmosfera per la valutazione della dose da esposizione della popolazione.

In questo contesto, nel presente lavoro vengono riportati i risultati ottenuti dalle analisi di trasporto a lunga distanza di diverse specie radioattive emesse in atmosfera a seguito di un ipotetico incidente, di tipo severo, nella centrale nucleare di Gösgen, situata presso il Canton Soletta, Svizzera. Le analisi sono state svolte tenendo in considerazione alcune delle condizioni al contorno utilizzate negli scenari incidentali esaminanti nel (D.P.C.M., 14 marzo 2022) e in (Guglielmelli e Rocchi, 2017).

Per lo studio è stato impiegato il sistema di calcolo costituito dai codici CALPUFF (CALifornia PUFF Model) e CALMET (CALifornia METeorological Model) (Scire et al., 2000a; 2000b). I due codici fanno parte di un sistema di modellazione integrata, riconosciuto ed adottato dall'Environmental Protection Agency (EPA), per lo studio della dispersione e trasporto degli inquinanti su micro o macro-scala.

In particolare, CALPUFF è un modello di dispersione atmosferica non stazionario, multi-specie, che simula il trasporto e la rimozione degli inquinanti su scale anche di centinaia di chilometri dalla sorgente emissiva. Inoltre, fornisce informazioni riguardanti la concentrazione oraria e la deposizione secca ed umida per ogni specie inquinante simulata.

La versione del codice CALPUFF impiegato in questo lavoro è stata modificata utilizzando un nuovo modello per la velocità di deposizione secca delle particelle. Tale modello si basa sul concetto di resistenza aerodinamica che tiene in considerazione le caratteristiche orografiche locali e l'influenza reciproca dell'impatto inerziale delle particelle con i processi turbolenti che si verificano in atmosfera (Giardina et al., 2023).

I dati meteorologici di input sono stati simulati con il codice 3D CALMET, che consente di generare campi di vento sia diagnostici che prognostici per il dominio di interesse.

Il software GRADO (GRid_in Air of specific effective Dose) elabora gli output di CALPUFF relativi alle concentrazioni degli inquinanti in aria e deposizione al suolo, per ogni step temporale di calcolo, e definisce mappe georeferenziate di dosi effettive di esposizione orarie, oppure giornaliere, e dosi efficaci cumulative, computate con i coefficienti di dose riportati in (ICRP, 2012, 2020) per i diversi gruppi della popolazione.

L'analisi dei risultati mostra che sistema il sistema di modellazione integrata CALMET-CALPUFF-GRADO può risultare uno strumento appropriato per condurre valutazioni del trasporto a lunga distanza di inquinanti radioattivi in contesti di terreni complessi e supportare la gestione dell'emergenza tramite la creazione di mappe georeferenziate di dose da esposizione.

SIMULAZIONE CALMET-CALPUFF E CALCOLO DELLA DOSE CON GRADO

CALMET è un modello diagnostico che produce campi tridimensionali di parametri meteorologici, a partire da misure di stazioni meteo al suolo ed in quota, sulla base delle caratteristiche orografiche del sito e degli eventuali vincoli fisici del territorio in esame.

Il modulo del campo di vento diagnostico usa un approccio a due step per ricostruire il campo di vento finale:

step 1. nel primo step di calcolo si procede con la valutazione di un campo di vento iniziale (*guess wind field*), corretto introducendo gli effetti cinematici del terreno, i venti di pendenza ed eventuali effetti di ostruzione del suolo;

step 2. nel secondo step, viene utilizzata una procedura di analisi oggettiva che consente di introdurre, nei risultati del *guess wind field*, i dati osservativi di misurazioni da stazioni meteo di superficie e in quota, specificati dall'utente in input.

In questo lavoro, il dominio di calcolo utilizzato da CALMET copre un'area di 1.341.900 km², tra Svizzera e Italia, con una risoluzione di cella della griglia di calcolo di 15x15 km.

Le condizioni meteorologiche, con passo temporale di 1 ora, sono state valutate utilizzando i dati meteorologici provenienti da 94 stazioni di misura di superficie e 10 stazioni di rilevazione dei parametri atmosferici in quota. La posizione geografica delle stazioni di superficie e in quota utilizzate nello studio è riportata in (fig. 1).

La simulazione CALMET ha inizio il 16/12/2011 alle ore 01:00 fino al 22/12/2011 alle ore 20:00 (circa 6 giorni). La scelta del periodo temporale si basa su uno studio preliminarmente svolto per definire le condizioni meteorologiche più sfavorevoli.

Vale la pena sottolineare che, per l'intervallo temporale in studio, sono stati scaricati i dati meteorologici di rianalisi del Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECWMF) che fornisce periodicamente una rianalisi dei dati climatici prodotta combinando modelli previsionali con le osservazioni sul territorio. Tali dati sono stati rielaborati con il software di pre-processamento FORCAL (Martorana et al., 2021), sviluppato da ricercatori del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Palermo per l'uso, come primo campo del vento (step 1), nella simulazione CALMET. Questo approccio ha consentito di ridurre l'incertezza delle previsioni meteorologiche che sono soggette ad errori legati ai dati iniziali.

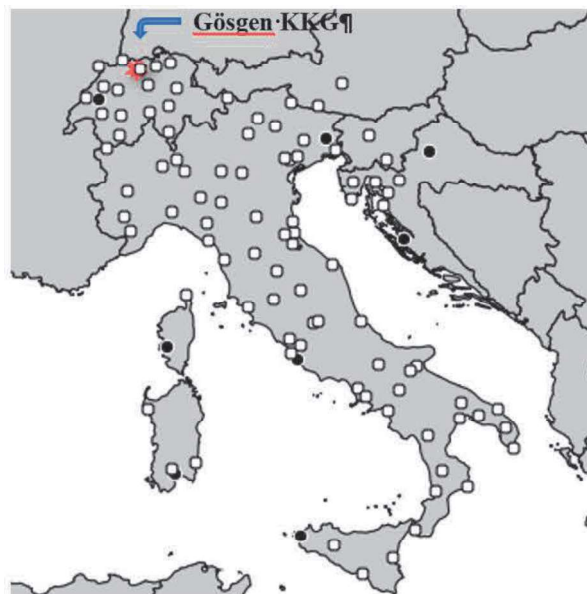
I risultati di CALPUFF ottenuti in termini di concentrazioni dell'inquinante radioattivo sono stati elaborati con il software denominato GRADO, messo a punto dal gruppo di ricerca per la definizione di mappe georeferenziate di dose da esposizione utilizzando, come già detto, i coefficienti di conversione riportati in (ICRP, 2012, 2020).

In particolare, GRADO, in linguaggio di programmazione R-CRAN, elabora, per ogni inquinante, gli outputs relativi alla concentrazione oraria in aria (Bq h⁻¹m⁻³) e quella cumulativa (Bq m⁻³), valutate per lo strato limite atmosferico a confine con il terreno, e gli outputs della deposizione al suolo oraria (Bq h⁻¹m⁻²) e cumulativa (Bq m⁻²), al fine di costruire mappe georeferenziate di dosi efficaci di esposizione orarie, oppure giornaliere, e dosi efficaci cumulative, computate con i coefficienti di dose riportati in (ICRP, 2012, 2020). Tali elaborazioni possono essere svolte per i diversi gruppi della popolazione definite dall'utente.

Per brevità, nel paragrafo successivo verranno riportati i risultati per il solo gruppo della popolazione “Adulti”.

Le mappe create con GRADO possono essere gestite da altri softwares quali il Qgis (Qgis,2023) ampiamente utilizzato per organizzare, analizzare e rappresentare dati spaziali.

Figura 1 – Distribuzione geografica delle stazioni di misura meteo-climatiche di superficie (simbolo vuoto) e delle stazioni per la rilevazione dei parametri atmosferici in quota (simbolo pieno) utilizzate per la simulazione CALMET.



ANALISI DEI RISULTATI

Il Kernkraftwerk Gösgen (KKG) è una centrale nucleare ad acqua pressurizzata, situata in Svizzera, vicino al villaggio di Däniken, nel cantone di Solothurn.

Il sistema di raffreddamento del core del reattore è costituito da tre circuiti di circolazione identici e il refrigerante primario viene trasferito ai tre generatori di vapore (SG), con scambiatori di calore con tubi a U, in cui il calore viene trasferito al circuito secondario che produce il vapore poi diretto alle turbine.

Il vapore di scarico delle turbine viene condensato nel condensatore per poi ripetere un nuovo ciclo. L'acqua calda che esce dal condensatore viene refrigerata all'interno di una torre di raffreddamento del tipo ad umido con tiraggio naturale, con struttura iperbolica in cemento armato, alta circa 140 m. All'interno della torre, l'acqua calda scende attraverso griglie, mentre l'aria aspirata dalla parte bassa della torre sale verso l'alto. L'acqua calda cede calore all'aria che a sua volta si satura di umidità. Questo scambio termico fa sì che l'acqua si raffreddi e l'aria, divenuta calda, esca dalla parte superiore della torre, disperdendosi nell'atmosfera.

Per la simulazione dell'evento incidentale, si è ipotizzato un evento severo che causa l'emissione di inquinanti radioattivi all'uscita della torre di raffreddamento, come suggerito in (Guglielmelli e Rocchi, 2017). Le analisi con il codice CALPUFF sono state eseguite utilizzando, come dati di inputs, i risultati meteorologici tridimensionali del codice CALMET e i dati riportati nella (tab.1) per la schematizzazione della sorgente.

La (tab.2) riporta, per le specie radioattive simulate nel presente studio, le attività immesse in atmosfera all'uscita della torre di raffreddamento per la durata di 2 ore (emissione a sbuffo), così come indicato in Appendice 9 “Presupposti tecnici del Piano nazionale per la gestione delle

emergenze radiologiche e nucleari” del (DPCM 14 marzo 2022).

Per l'emissione del particolato radioattivo, si è ipotizzato un diametro delle particelle di 1 μm . La caratterizzazione della composizione e dei tempi di emissione sono state tratte dal (D.P.C.M., 14 marzo 2022) che riporta studi effettuati prevalentemente negli Stati Uniti per la normativa attualmente applicata per il termine sorgente da assumere a riferimento nella scelta dei siti e la progettazione degli impianti.

Tabella 1 – Dati di input impiegati nella simulazione CALPUFF per il termine sorgente

Data e orario di emissione	16/12/2011; 19:30
Durata emissione	2 ore
Temperatura di emissione	423 K
Altezza torre di refrigerazione (altezza sorgente)	140 m
Diametro torre di refrigerazione (diametro sorgente)	70 m

Tabella 2 – Dati di input impiegati nella simulazione CALPUFF per l'inventario degli inquinanti emessi dalla sorgente

Isotopo radioattivo	Gruppo	Rilascio [Bq]
^{88}Kr	Gas nobile	10^{18}
^{89}Sr	Metallo alcalino-terroso	10^{16}
^{90}Sr	Metallo alcalino-terroso	10^{15}
^{103}Ru	Metallo di transizione	10^{15}
^{106}Ru	Metallo di transizione	10^{14}
^{131}I	Alogeno	10^{17}
^{132}Te	Semimetallo	10^{17}
^{133}Xe	Gas nobile	10^{18}
^{134}Cs	Metallo alcalino	10^{16}
^{137}Cs	Metallo alcalino	10^{16}
^{144}Ce	Metallo terre rare	10^{15}

Durante le prime cinque ore dall'immissione in atmosfera degli inquinanti, a causa dei venti che spirano da ovest verso est, la nube radioattiva inizialmente si espande verso i Cantoni di Zurigo e Argovia. Nelle ore successive il campo di vento si modifica e i venti iniziano a spirare da nord verso sud, spingendo la nube verso l'Italia. I tempi di percorrenza della nube nel raggiungimento del territorio italiano è di circa 10 ore.

Superate le Alpi, nel secondo giorno dopo l'incidente, la nube si espande nelle regioni di Lombardia, Trentino e Veneto per poi estendersi sull'intero territorio italiano nei giorni successivi. Per brevità, di seguito, vengono illustrate, per il dominio di calcolo, le elaborazioni di GRADO per i radionuclidi che CALPUFF simula con maggiore concentrazione in aria e deposizione al suolo (i.e. ^{132}Te , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{88}Kr , ^{133}Xe) oltre il radionuclide di riferimento ^{137}Cs .

In particolare, le (figg. 2-6) riportano le mappe di distribuzione di dose per inalazione cumulative (intero periodo di simulazione) per i radionuclidi ^{137}Cs (fig. 2), ^{134}Cs (fig. 3), ^{132}Te (fig. 4), ^{88}Kr (fig. 5) e ^{133}Xe (fig. 6).

I coefficienti di dose impiegati per i calcoli sono quelli riportati nella Tabella G.1. “Effective dose coefficients and for inhalation (activity median aerodynamic, diameter = 1 micron)”, mentre per i gas inerti i coefficienti sono riportati in Annex C “Effective dose rates for exposure of workers or adult members of the public to inert gases” della pubblicazione ICRP 119 (2012). Per il fattore Breathing Rate (BR) si è presupposto una frequenza respiratoria di 23 m^3/g come raccomandato in (ICRP, 2002) per un lavoratore con modesto carico di lavoro.

Le (figg. 7-11) mostrano le distribuzioni di dose efficace cumulativa (intero periodo di simulazione) da sommersione in aria valutate per i radionuclidi ^{132}Te (fig. 7), ^{131}I (fig. 8), ^{134}Cs (fig. 9), ^{88}Kr (fig. 10) e ^{133}Xe (fig. 11) e per il gruppo di riferimento "Adulti". Sono stati utilizzati i coefficienti di dose in ($\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$) raccomandati in (ICRP, 2020).

Le (figg. 12 e 13) riportano le distribuzioni di dose efficace cumulativa (intero periodo di simulazione) per la deposizione al suolo valutate per il gruppo di riferimento "Adulti". Sono stati utilizzati i coefficienti di dose in ($\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^2$) raccomandati in (ICRP, 2020).

I valori delle dosi efficaci da inalazione per i vari inquinanti (figg. 2-6) risultano ricadere nell'intervallo di 0.1-1 mSv e coinvolgono le aree del territorio italiano a confine tra le regioni Lombardia, Trentino, Veneto ed Emilia-Romagna.

Per la distribuzione di dose efficace cumulativa da sommersione in aria, i dati di (figg. 7-11) mostrano un intervallo di dose 0.01-0.1 mSv. Vale la pena notare che sono i gas inerti ^{88}Kr e ^{133}Xe (figg. 10 e 11) a fornire il maggiore contributo; risultato che era da attendersi in quanto la nube, con il trascorre dei giorni, viene man mano depauperata dalle componenti particellari che si depositano al suolo. Inoltre, dal confronto delle figure (fig. 10) e (fig. 11) si nota in che il territorio caratterizzato da una più elevata esposizione è causata dal ^{88}Kr , rispetto al ^{133}Xe , coinvolgendo le isole maggiori Sardegna e Sicilia. Tale differenza è ovviamente attesa se si confrontano i valori dei "Nuclide-specific effective dose rate coefficient" riportati in (tab. 3) per i due radionuclidi (ICRP, 2020). La differenza di circa due decadi dei coefficienti giustifica il maggiore valore di esposizione in aria del ^{88}Kr se confrontato con lo ^{133}Xe .

Tabella 3 – Valore del "Nuclide-specific effective dose rate coefficient" per i radionuclidi ^{88}Kr e ^{133}Xe

Nuclide	Coefficiente ($\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$)
^{88}Kr	3.45E-01
^{133}Xe	4.03E-03

Figura 2 - Dose efficace cumulativa da inalazione per il radionuclide ^{137}Cs .

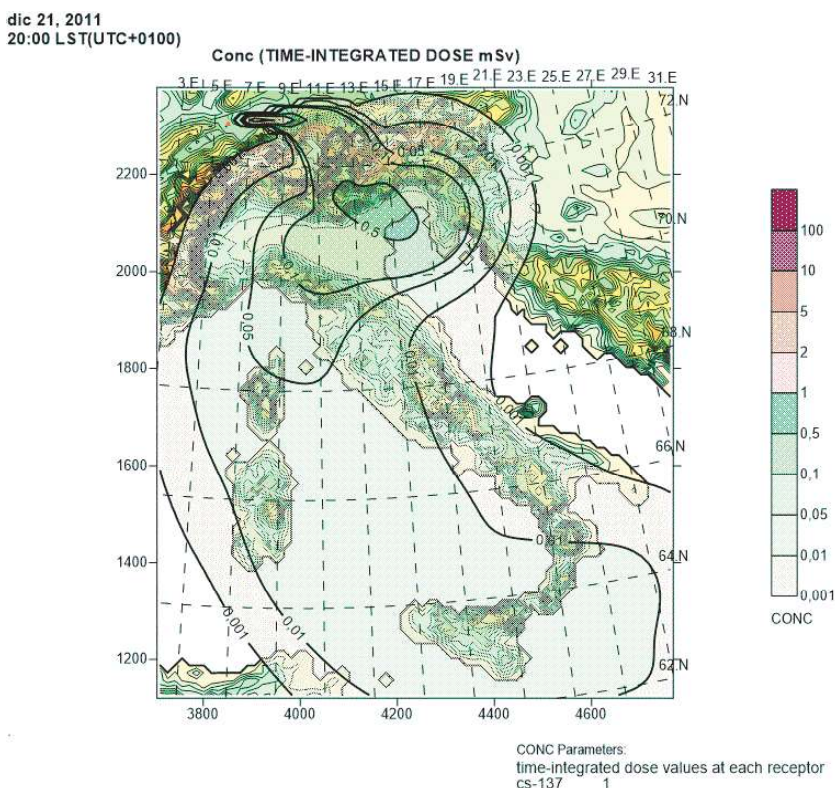


Figura 3 – Dose efficace cumulativa da inalazione per il radionuclide ^{134}Cs .

dic 21, 2011
20:00 LST(UTC+0100)

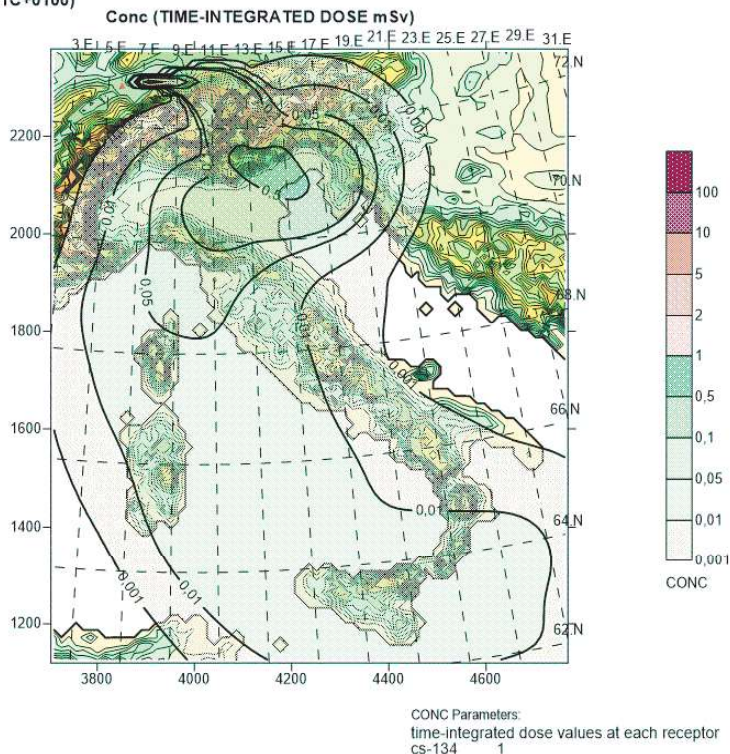


Figura 4 – Dose efficace cumulativa da inalazione per il radionuclide ^{132}Te .

dic 21, 2011
20:00 LST(UTC+0100)

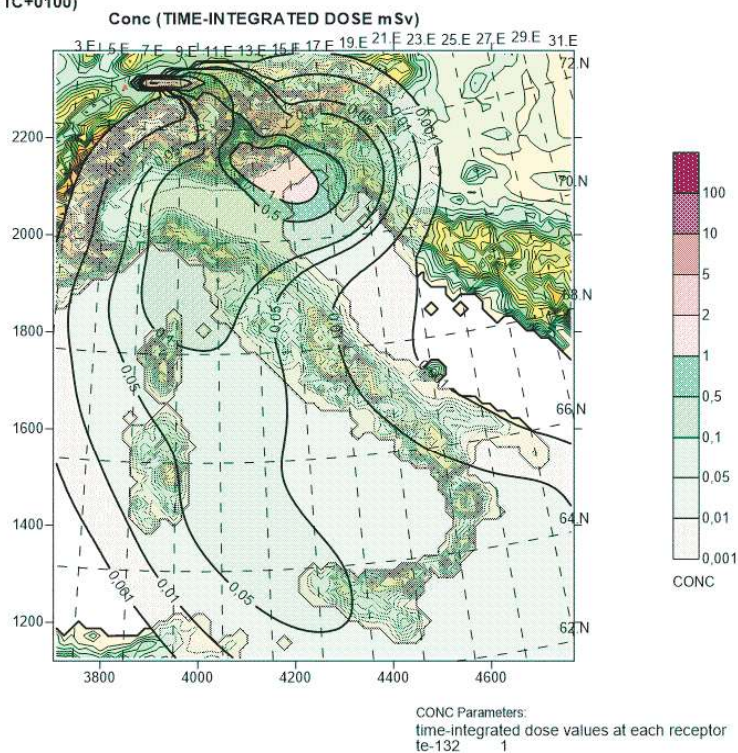


Figura 5 – Dose efficaci cumulative da inalazione per il radionuclide, gas inerte, ^{88}Kr

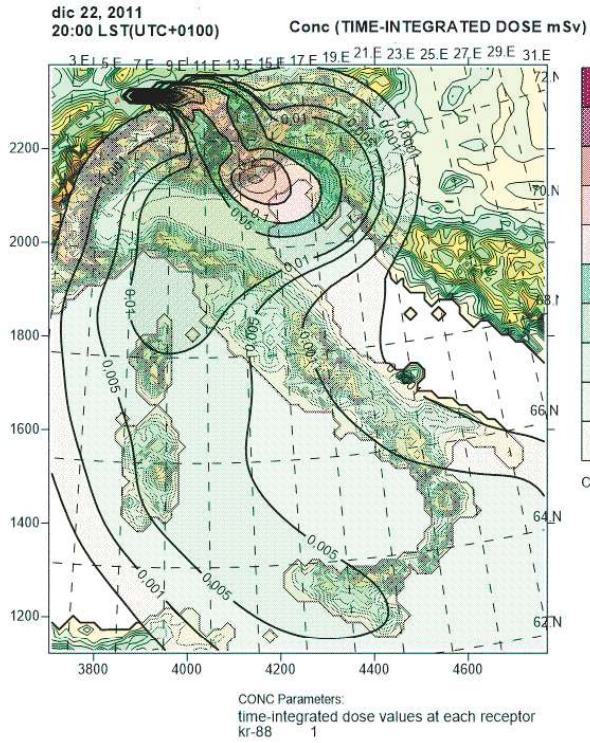


Figura 6 – Dose efficaci cumulative da inalazione per il radionuclide, gas inerte, ^{133}Xe

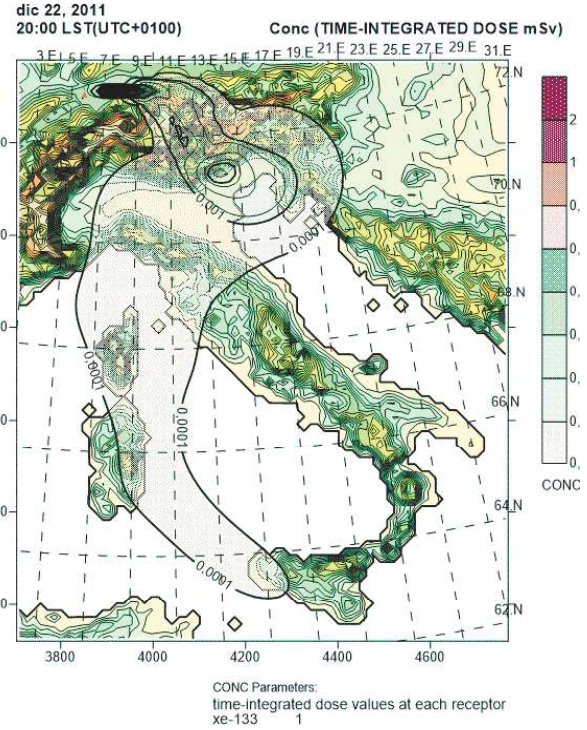


Figura 7 – Dose efficaci cumulative da sommersione in aria per il radionuclide ^{132}Te e il gruppo popolazione adulti

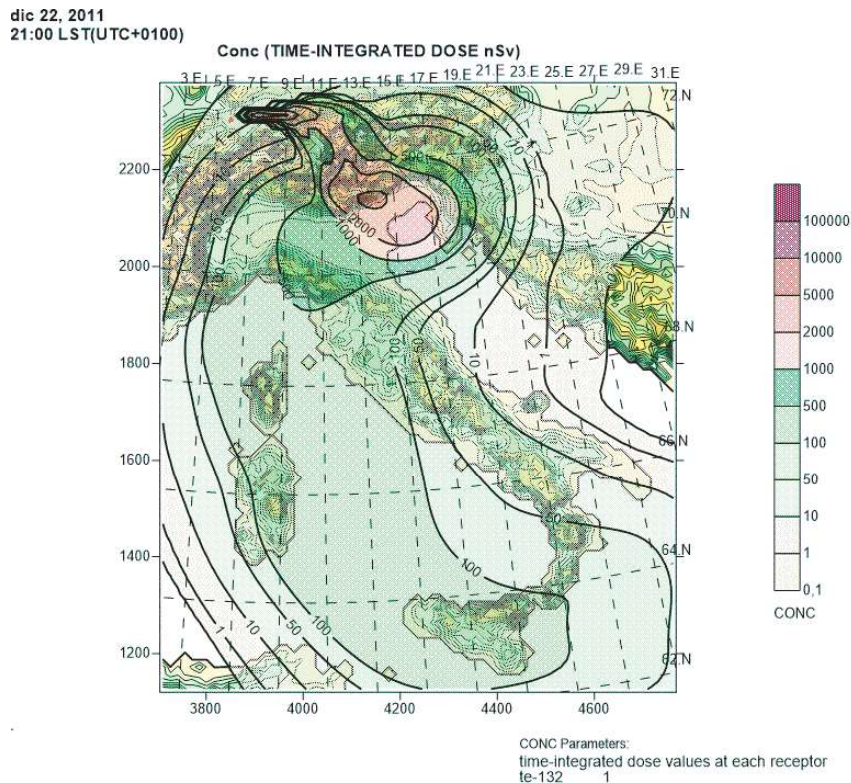


Figura 8 – Dose efficaci cumulative da sommersione in aria per il radionuclide ^{131}I e il gruppo popolazione adulti

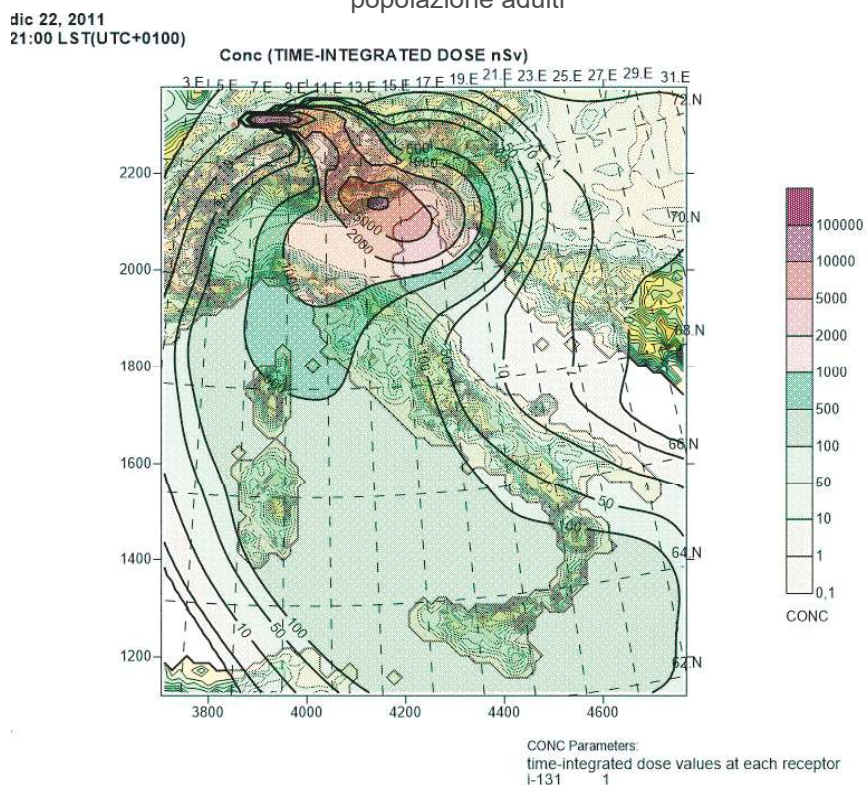
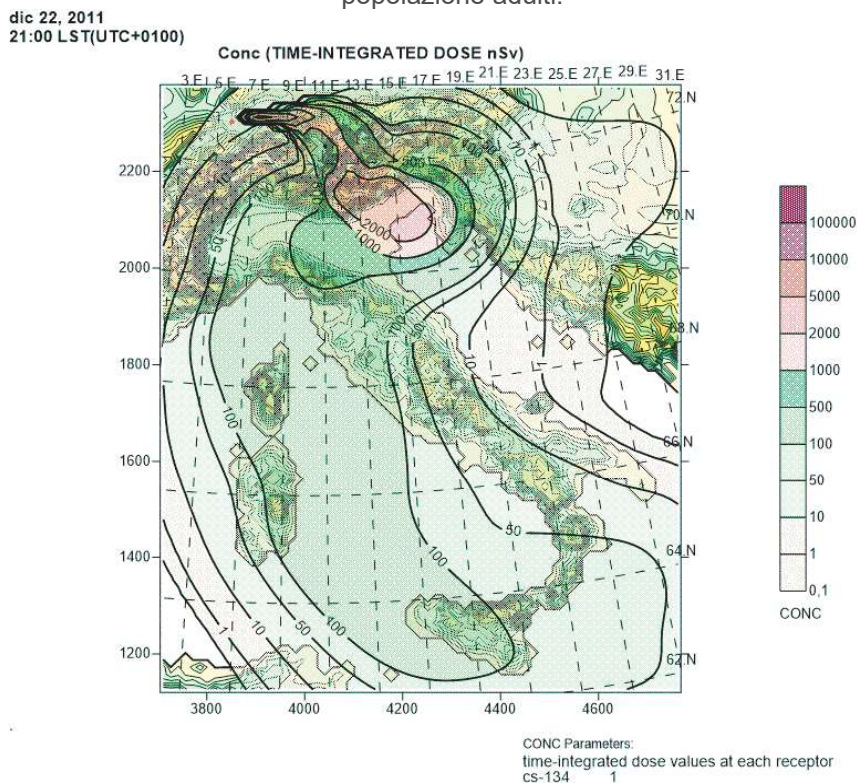


Figura 9 – Dose efficaci cumulative da sommersione in aria per il radionuclide ^{134}Cs e il gruppo popolazione adulti.



I dati relativi alla dose efficace cumulativa da deposizione al suolo per ^{131}I (fig. 12) e ^{132}Te (fig. 13), mostrano i valori più elevati ad est della centrale nucleare e distribuzioni sul territorio italiano non uniformi.

Figura 10 – Dose efficaci cumulative da sommersione in aria per il radionuclide ^{88}Kr

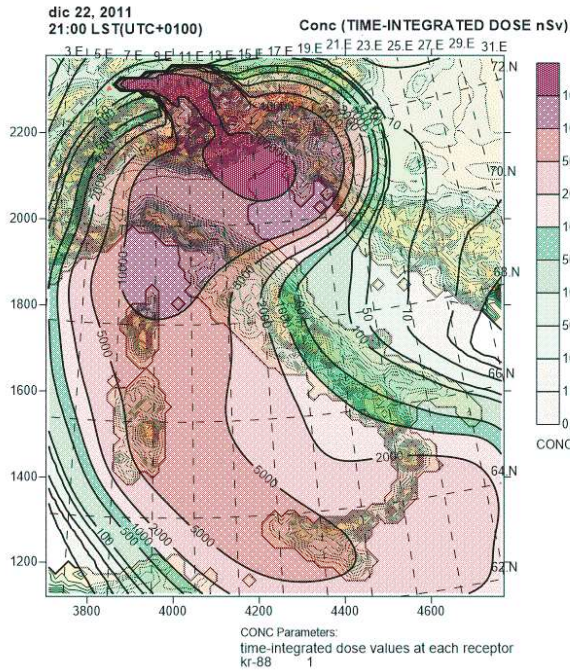


Figura 11 – Dose efficaci cumulative da sommersione in aria per il radionuclide ^{133}Xe

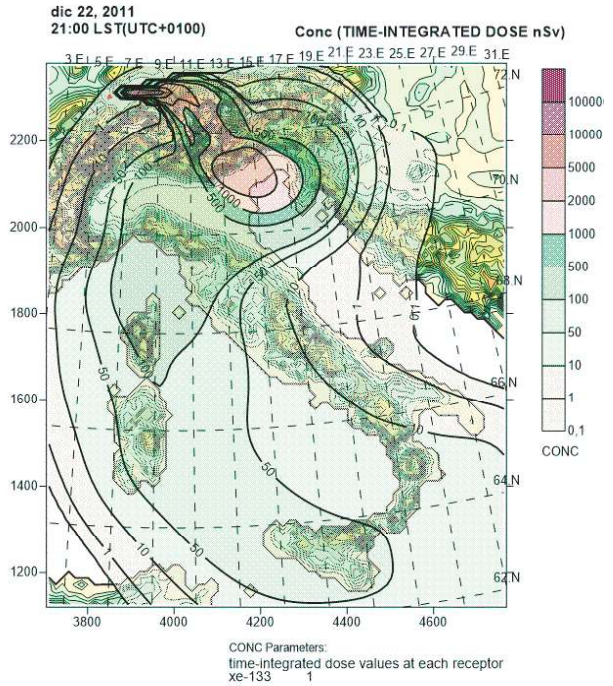


Figura 12 – Dose efficaci cumulative da deposizione al suolo per il radionuclide ^{131}I ed il gruppo popolazione adulti

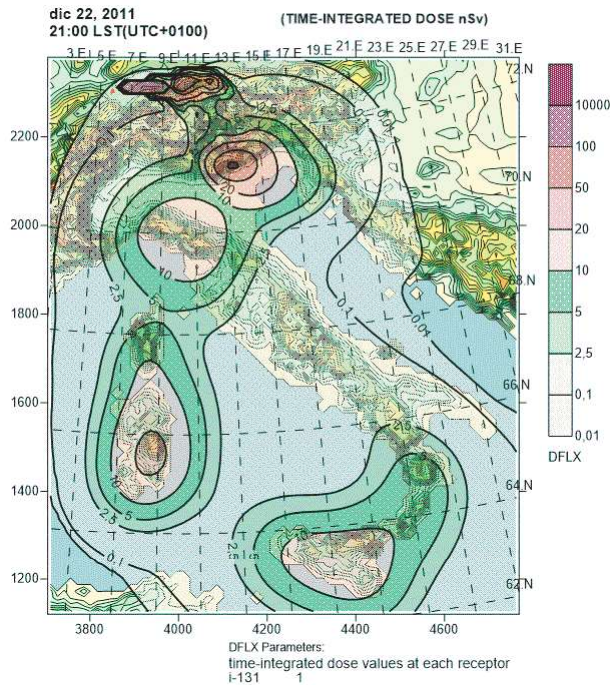
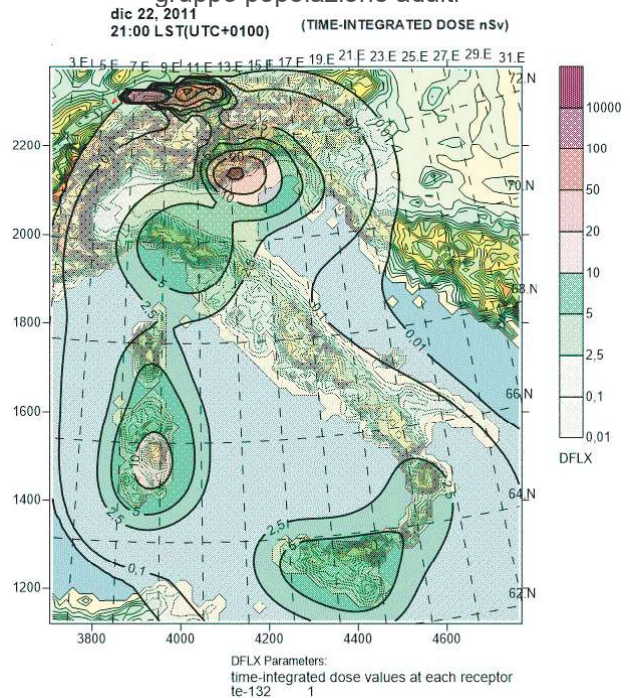


Figura 13 – Dose efficaci cumulative da deposizione al suolo per il radionuclide ^{132}Te ed il gruppo popolazione adulti



I risultati ottenuti in termini di aree geografiche oggetto di maggiore impatto nonché l'ordine di grandezza delle dosi per inalazione sono risultati congruenti con quanto valutato nel Piano nazionale per la gestione delle emergenze radiologiche e nucleari [DPCM 14/3/2022]. Infatti, nell'Appendice 10 del Piano sono riportate diverse analisi di distribuzione di dosi per inalazione a causa di incidenti severi nelle centrali nucleari confinanti prese in considerazione, compreso l'impianto di Goesgen.

Tuttavia, questo confronto deve essere effettuato tendo in considerazione il diverso periodo temporale in esame, alcune differenze per la schematizzazione della sorgente che nel (DPCM 14/3/2022) viene assunta come puntiforme con emissione al suolo e, infine, la risoluzione spaziale del dominio di calcolo di circa 30 km.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro vengono riportati alcuni risultati ottenuti dalle analisi di trasporto a lunga distanza di diverse specie radioattive emesse in atmosfera a seguito di un ipotetico incidente severo nella centrale nucleare di Gösgen, situata presso il Canton Soletta, Svizzera.

I risultati di concentrazioni di attività in aria [Bq/m^3] e deposizioni al suolo in [Bq/m^2], simulati utilizzando il pacchetto software CALMET-CALPUFF, sono stati elaborati dal software denominato GRADO (GRid_in Air of specific effective Dose), messo a punto dal gruppo di ricerca per la definizione di mappe georeferenziate di dosi da esposizioni secondo i coefficienti di conversione riportate in (ICRP 2012, 2020).

L'analisi dei dati mostrano che il sistema di modellazione integrata CALMET-CALPUFF-GRADO può risultare uno strumento utile per condurre valutazioni sul trasporto a lunga distanza in contesti di terreni complessi e, quindi, supportare la gestione dell'emergenza tramite la creazione di mappe di dosi georeferenziate.

Bibliografia

- DPCM 14 marzo 2022, *Adozione del Piano Nazionale per la gestione delle emergenze radiologiche e nucleari, Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 112 del 14 maggio 2022*, <https://www.protezionecivile.gov.it/it/normativa/decreto-del-presidente-del-consiglio-dei-ministri-n-898-del-14-marzo-2022/>
- Giardina, M, Buffa P, Cervone A, Lombardo C, Giaiotti D, Oshurok D, Skrynyk O. *A new dry deposition model implemented in CALPUFF code to simulate contamination of radionuclides released into atmospheric environment post-nuclear accidental event*, 40th International Heat Transfer Conference, JUNE 26-28 2023, ASSISI
- ICRP, 2002. *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values*. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32 (3-4).
- ICRP, 2012, *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60*. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
- ICRP, 2020. *Dose coefficients for external exposures to environmental sources*. ICRP Publication 144. Ann. ICRP 49(2).
- Martorana F, Giardina M, Buffa P, Beccali M, Zammuto C. *A new tool to process forecast meteorological data for atmospheric pollution dispersion simulations of accident scenarios: A Sicily-based case study*, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Open Access, Volume 9, Issue 3 (2021), Article number 1080377.
- Qgis, 2023, *Manuale utente di QGIS 3.22* (https://docs.qgis.org/3.22/it/docs/user_manual/index.html)
- Scire JS, Robe FR, Fernau ME, Yamartino RJ (2000a) *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5)*, Earth Tech: Concord, MA, USA, 2000.
- Scire JS, Strimaitis DG, Yamartino RJ. (2000b) *A user's guide for the CALPUFF dispersion model*, Earth Tech, Concord MA, USA, 2000.
- Guglielmelli A., Rocchi F. (2017) *Evaluation of the radiological impact on the Italian territory of a severe nuclear accident at Krško NPP by means of a statistical methodology*. Proceedings of the 26th International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE-2017). Bled (SLO), Sept. 11-14, 2017.