

Impianti nucleari in aree di guerra: oltre il paradigma della radioprotezione civile

Alessandro Rizzo¹, Enrico Borra¹, Andrea Malizia², Silvio Mastrolitti¹, Ignazio Vilardi¹

¹ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Istituto di Radioprotezione (IRP), Centro Ricerche Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Roma, Italia

²Dipartimento di Biomedicina e Prevenzione, Facoltà di Medicina e Chirurgia, Università degli Studi di Roma Tor Vergata. Via Montpellier 1, 00133 Roma

DOMANDA: In un'emergenza nucleare in area di conflitto, un'azione protettiva definita secondo i principi della radioprotezione civile resta ammissibile anche quando modifica l'esposizione ad altri rischi?

➡ **NO**

CASO STUDIO: Emergenza nucleare presso Zaporizhzhia NPP

Descrizione: un missile colpisce un cask dell'SFDSF, causando un rilascio radioattivo in un'area di conflitto attivo. [1] Rizzo A. et al. *Eur. Phys. J. Plus* **140**, 718 (2025)

Risultato radiologico: in alcune aree: $E_{proj}(7 \text{ giorni}) \geq 100 \text{ mSv}$

L'evacuazione riduce il rischio radiologico, ma espone la popolazione al rischio cinetico. Quale azione protettiva adottare tra evacuazione e riparo al chiuso?

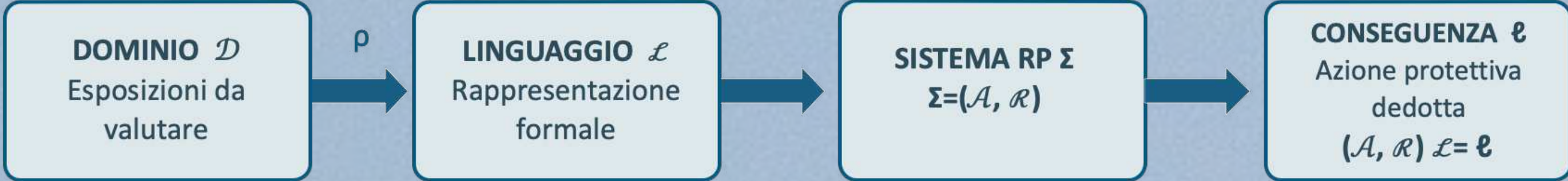


DUE LIVELLI DI ANALISI

LOGICA MATEMATICA

Analisi della Radioprotezione con la Teoria dei Sistemi Formali (FST)

La FST distingue ciò che la **radioprotezione assume**, ciò che **deduce** e ciò che **riesce a valutare**.

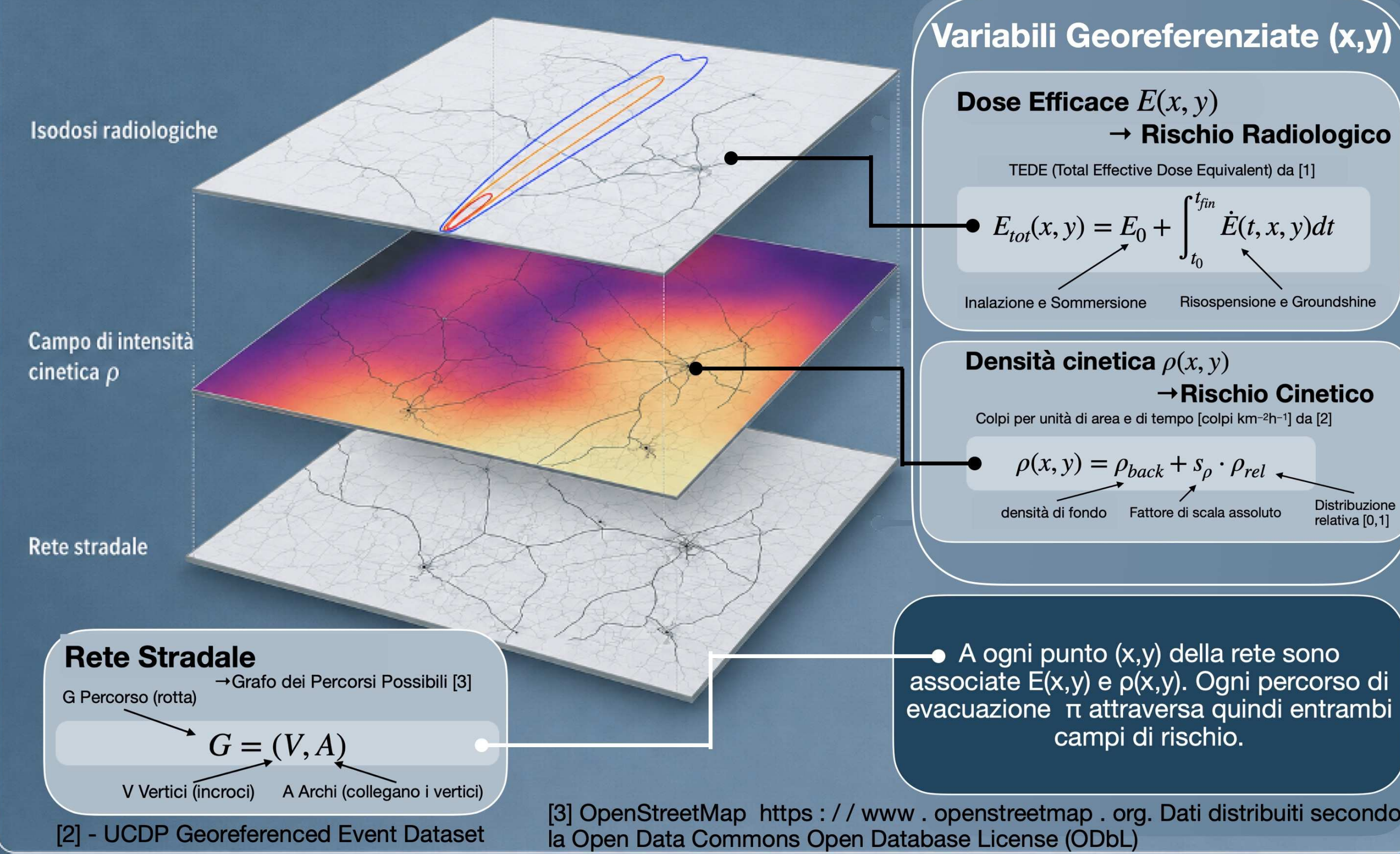


A Assiomi: enunciati assunti come veri **R** Regole di inferenza: regole per derivare nuovi enunciati

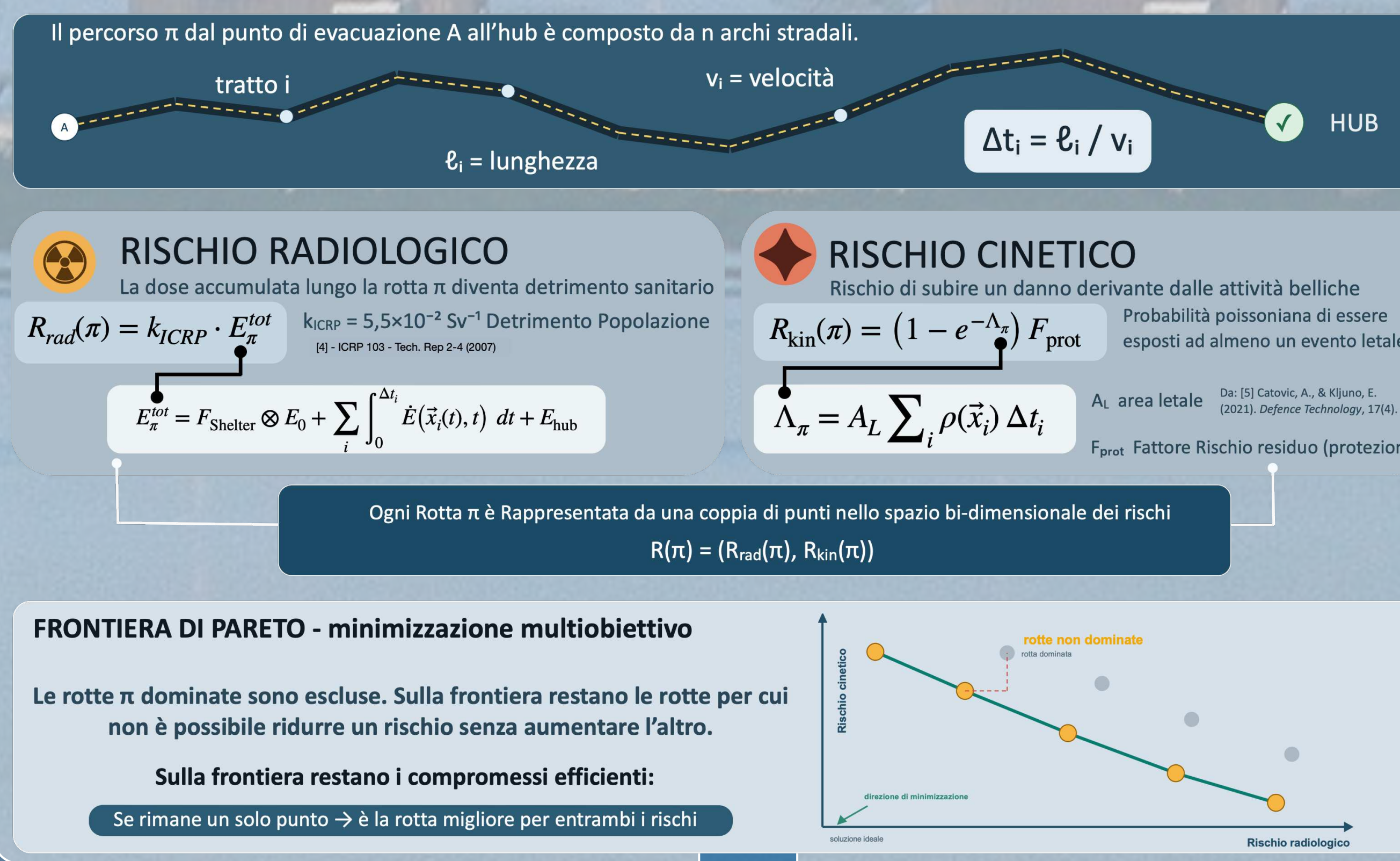
Nel dominio civile, ogni azione protettiva derivata dal sistema può essere valutata come **ammissibile o non ammissibile**: in termini FST la RP conserva **CHIUSURA SEMANTICA**.

MODELLO MULTIRISCHIO

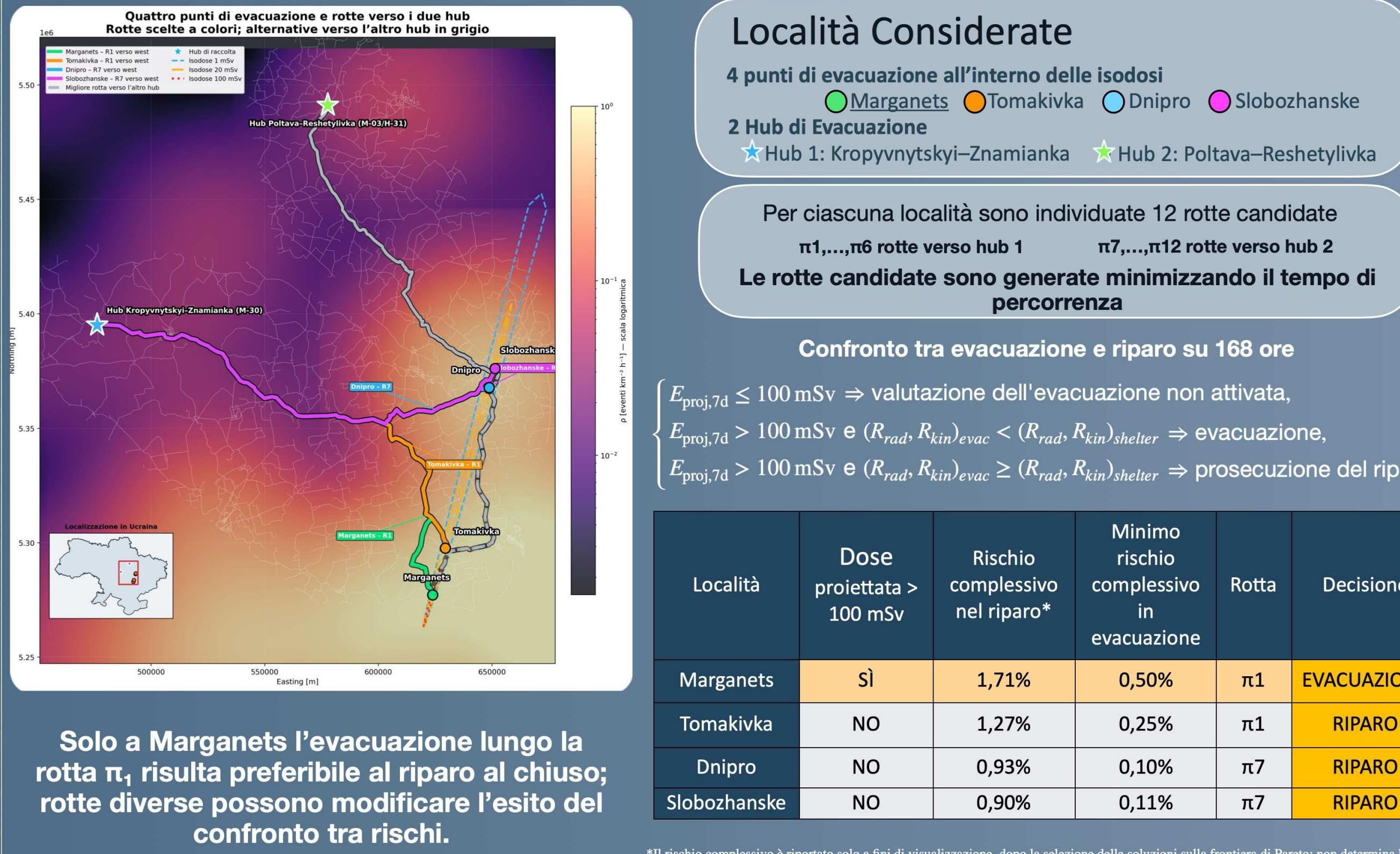
Geografia delle variabili di rischio



Dalle Variabili ai Rischi lungo i percorsi di evacuazione



Applicazione del Modello: Evacuazione o Riparo?



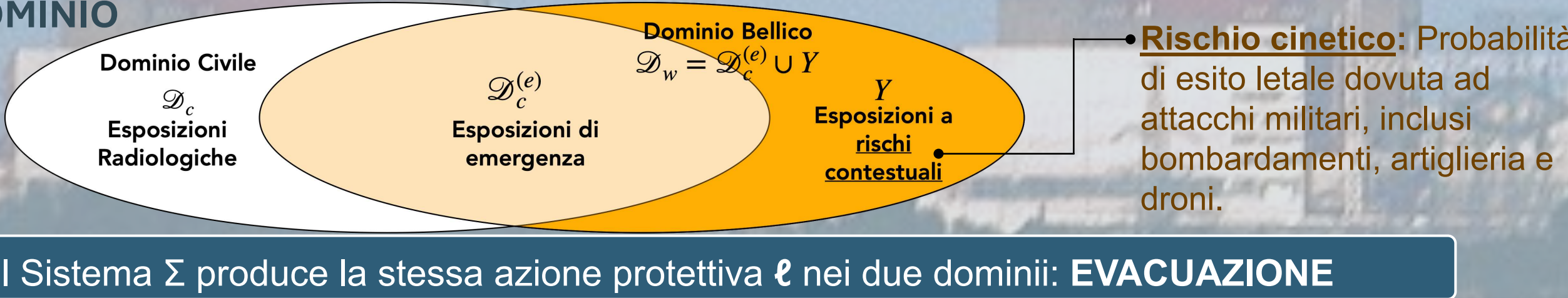
La Radioprotezione oltre il Dominio Civile

Base Civile della RP: Σ

A { $\mathcal{A}_1$ — Ogni esposizione implica un rischio. $\mathcal{A}_2$ — Alcune esposizioni producono benefici. $\mathcal{A}_3$ — L'esposizione naturale è ineliminabile. $\mathcal{A}_4$ — Il rischio può essere ridotto, non eliminato. }

R - Criteri normativi e tecnico-scientifici per derivare le azioni protettive.

CAMBIO DI DOMINIO



Il Sistema Σ produce la stessa azione protettiva **E** nei due domini: **EVACUAZIONE**

NEL DOMINIO CIVILE

rischio radiologico ↓
 $\mathcal{A}_1$ – $\mathcal{A}_4$ contengono i criteri necessari

PROPOSIZIONE DECIDIBILE
chiusura conservata

NEL DOMINIO BELLICO

e.g. **rischio radiologico** ↓ **rischio cinetico** ↑
 $\mathcal{A}_1$ – $\mathcal{A}_4$ non qualificano i rischi contestuali

PROPOSIZIONE NON DECIDIBILE
chiusura perduta

Estensione assiomatica e Principio di Qualificazione

Definizione di un sistema esteso per rendere valutabile il contesto bellico

Assiomi aggiunti ad $\mathcal{A}_1$ – $\mathcal{A}_4$

$\mathcal{A}_5$ - Nel dominio bellico coesistono rischi di natura diversa.

$\mathcal{A}_6$ - Mitigare un rischio può modificare gli altri rischi presenti.

PRINCIPIO DI QUALIFICAZIONE P_Q

Ogni esposizione deve essere qualificata anche rispetto ai rischi contestuali che, insieme al rischio radiologico, concorrono al detrimento complessivo per la vita e la salute.

VALUTAZIONE MULTIRISCHIO

$R(\pi) = (R_{rad}(\pi), R_{kin}(\pi))$
Confronto tra soluzioni π non dominate

Sistema esteso $\Sigma^* = (\mathcal{A}^*, \mathcal{R}^*)$
Anche le regole $\mathcal{R}$ devono essere estese

CHIUSURA RIPRISTINATA
nei domini civile e bellico

Il P_Q legittima la valutazione congiunta dei rischi; il modello (vedi a destra) individua le soluzioni non dominate.

CONCLUSIONI – Contributo Teorico

- Nel **dominio bellico**, gli assiomi $\mathcal{A}_1$ – $\mathcal{A}_4$ **non qualificano i rischi contestuali** che possono essere **modificati dalle azioni protettive**.
- **Senza chiusura semantica**, l'ammissibilità delle azioni non è determinabile nel sistema e **dipende** da criteri esterni, quindi **dal valutatore (soggettività)**.
- L'estensione con $\mathcal{A}_5$ – $\mathcal{A}_6$ costruisce un **sistema Σ^* semanticamente chiuso** nei domini civile e bellico.
- Il P_Q **legittima la valutazione congiunta dei rischi**, resa operativa dal modello multirischio.

CONCLUSIONI – Modello Multirischio

- La frontiera di Pareto seleziona le **rotte non dominate**; tra le soluzioni efficienti si **preferisce** quella con **minore rischio cinetico (morte immediata)**.
- La **soluzione** dipende dai **rischi locali** - alcune rotte prevedono rientri nelle isodosi.
- **Rotte diverse** possono **modificare l'esito del confronto** tra i rischi. Rispetto un percorso potrebbe essere preferibile evacuare, rispetto un altro no.
- **Risultati robusti** nelle **25 configurazioni analizzate per sito** negli studi di sensibilità condotti.