

# Monitoraggio e Valutazione dell'Esposizione e dei Rischi da Suoli contaminati da Hg – Il Progetto MOVERS Hg di ISPRA

Antonella Vecchio, Chiara Maggi, Maria Teresa Berducci, Giulio Sesta,  
Maria Gabriella Andrisani, Federico Silvestri, Gianluca Pirani, Nicoletta Calace

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Il Mercurio da elemento «ricercato» a elemento «bandito»

Abbadia San Salvatore, 8 settembre 2025

# La Convenzione di Minamata



La Legge n.134 del 8/10/2020 ha previsto la ratifica da parte dell'Italia della Convenzione di Minamata. Il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) è responsabile dell'attuazione delle disposizioni stabilite dalla Convenzione

Tra le disposizioni da attuare vi sono le seguenti:

- l'identificazione e la gestione dei siti contaminati e **mediante azioni volte a ridurre i rischi per la salute umana e l'ambiente derivanti dal mercurio o composti di mercurio** presenti in tali siti (Art. 12)
- lo scambio di informazioni scientifiche, tecniche ed economiche relative al mercurio e ai suoi composti, comprese **informazioni tossicologiche, ecotossicologiche e di sicurezza** (Art. 17)
- la definizione di strategie e programmi per individuare e proteggere le popolazioni a rischio, anche mediante linee guida relative al **monitoraggio** delle emissioni e **dei rilasci nell'ambiente e alla valutazione dell'esposizione al mercurio** e la programmazione di attività di educazione, formazione e prevenzione (Artt. 16 e 18)
- la comunicazione al Segretariato della Convenzione delle disposizioni previste dalla Convenzione (Art.21)

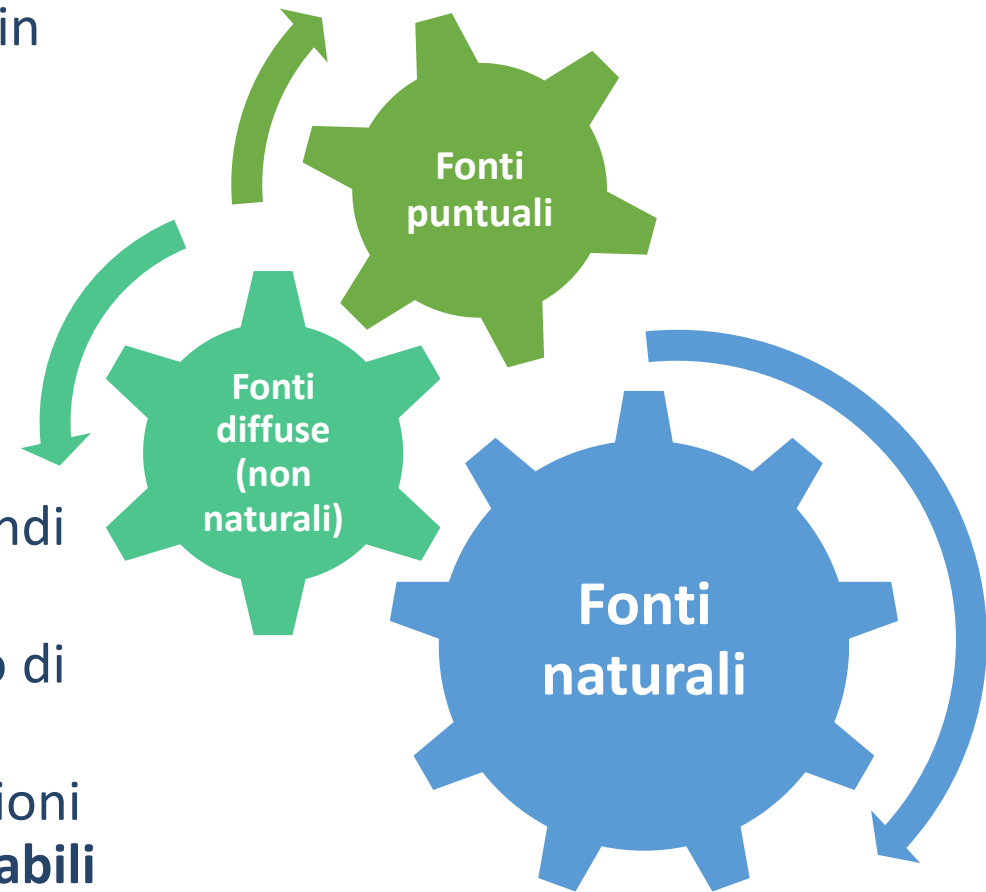
# Profilo del Hg negli ambienti terrestri

Le alte concentrazioni di metalli pesanti (incluso il mercurio) in nel suolo hanno origine da:

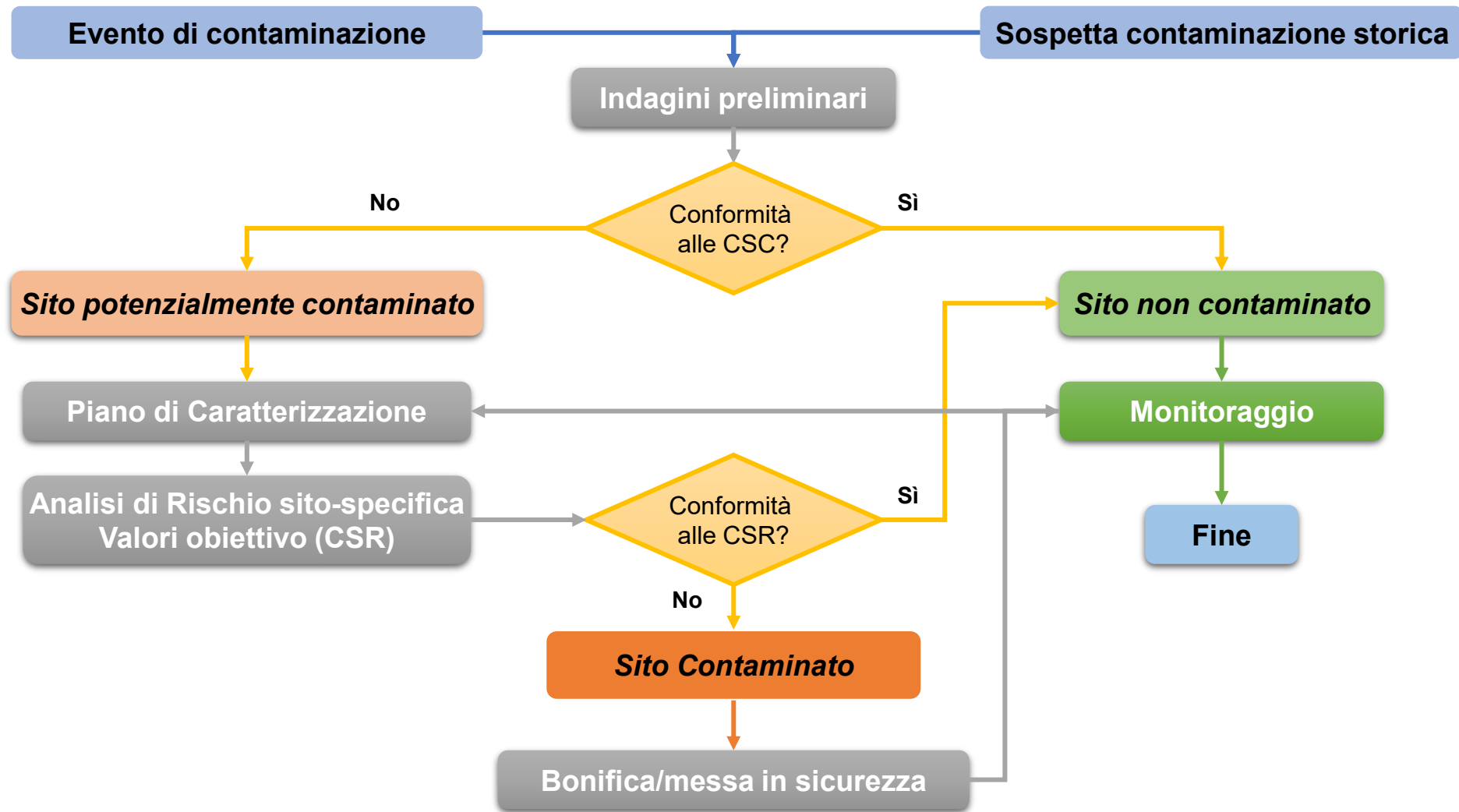
- fonti naturali (apporti geochimici)
- fonti diffuse non naturali (es. deposizione atmosferica, processi di combustione e pratiche agricole)
- fonti puntuali antropiche (attività inquinanti, comprese le attività minerarie)

La gestione della contaminazione dei suoli da mercurio è quindi particolarmente complessa in quanto:

- le **fonti puntuali** (siti contaminati) possono essere oggetto di interventi mirati (es. bonifica)
- alcuni apporti (naturali ed antropici) di tipo diffuso (emissioni geogeniche e deposizione atmosferica) **non sono controllabili**
- per la gestione delle aree vaste contaminate in cui interventi estensivi non sono sostenibili, è preferibile **prioritizzare le zone maggiormente a rischio** per l'esposizione della popolazione



# La gestione dei siti contaminati in Italia

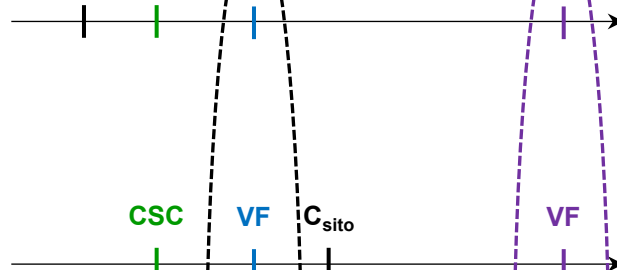


# Valutazione della contaminazione dei suoli

## Indagini preliminari



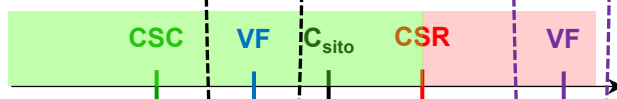
- Non sono necessarie ulteriori indagini
- Il sito è **non contaminato**



- Il sito è **potenzialmente contaminato**
- Sono necessarie ulteriori indagini (caratterizzazione)
- Si valutano i *“rischi per la salute”* associati alle concentrazioni presenti sul sito

## Caratterizzazione e Analisi di Rischio

rischio accettabile      rischio non accettabile



- Il sito è **non contaminato**
- Non vi sono rischi per la salute associati alle concentrazioni in sito

rischio accettabile      rischio non accettabile



- Il sito è **contaminato**
- Sono necessari interventi di risanamento che portino i tenori di inquinanti al di sotto delle **Concentrazioni Soglia di Rischio** o nella **regione di accettabilità**

# I valori di riferimento per il mercurio nei suoli (CSC)

Uso del suolo	Valore di screening (CSC) [mg/Kg ss]	Riferimento
Residenziale	1	Decreto Legislativo n. 152/2006 – Parte IV, Titolo V
Verde	1	
Industriale/Commerciale	5	
Agricolo	1	Decreto Ministeriale n. 46/2019 Le CSC si riferiscono solo alle aree agricole effettivamente utilizzate per produzione agro-alimentare

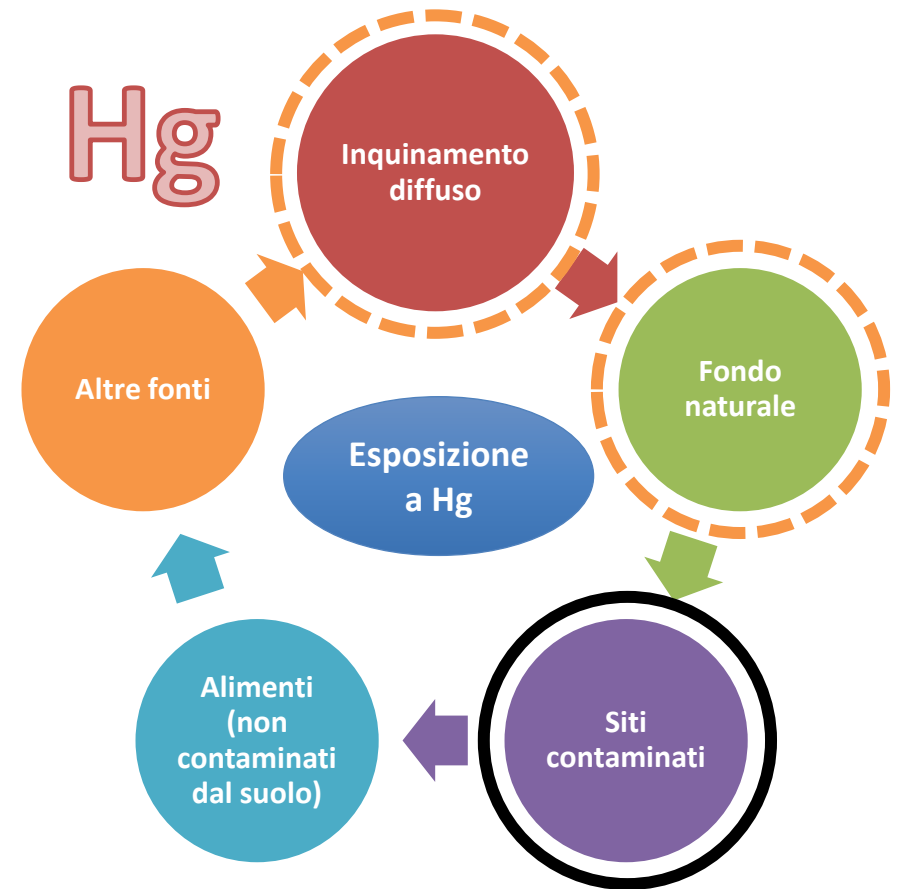
- Sono utilizzati non solo in ambito bonifiche, ma anche per la gestione delle terre e rocce da scavo (come obiettivi di qualità)
- Fanno riferimento esclusivamente alla potenziale esposizione umana alla contaminazione del suolo (tutela sanitaria)
- Ciò vale anche per il potenziale apporto verso le risorse idriche sotterranee (tutela dell'uso potabile della risorsa)
- Non vengono considerati né gli effetti biologici sulle comunità del suolo né il potenziale impatto sui corpi idrici superficiali (ecosistemi fluviali)

# L'Analisi di Rischio sito-specifica nelle bonifiche

- **Analisi di rischio sanitario e ambientale sito specifica (D. Lgs. 152/06)**: analisi sito specifica degli effetti sulla salute umana derivanti dall'esposizione prolungata all'azione delle sostanze presenti nelle matrici ambientali contaminate
- **Analisi assoluta di rischio sanitario ambientale di siti contaminati**
  - **Analisi assoluta**: processo sistematico di valutazione **quantitativa** del rischio;
  - **Rischio sanitario**: probabilità di effetti negativi a **lungo termine** (effetti cronici) sulla salute umana provocati dall'esposizione a sostanze inquinanti;
  - **Ambientale**: la fonte di esposizione alle sostanze inquinanti è rappresentata **unicamente** dalle matrici ambientali (suolo, sottosuolo, *materiali di riporto*, acque sotterranee)
  - **Siti contaminati**: la presenza di inquinanti nelle matrici ambientali è legata a **fonti** (es. attività industriali, sversamento incontrollato di materiali tossici) chiaramente individuabili e circoscritte ad **aree ben localizzate** e definite (siti).

# Considerazioni sull'esposizione

- L'esposizione al **Hg presente nel suolo** rappresenta solo una parte dell'esposizione complessiva
- In casi complessi (es. aree minerarie) nei suoli possono coesistere sorgenti chiaramente identificabili (aree contaminate), inquinamento diffuso e presenza naturale
- Tutte queste componenti contribuiscono all'esposizione della popolazione
- Tuttavia solo siti contaminati hanno un chiaro percorso normativo e tecnico (inclusa la definizione delle CSC) per la valutazione della contaminazione



**La sola gestione dei rischi associati alle fonti puntuali (siti contaminati), in alcuni casi, potrebbe non essere sufficiente a garantire la tutela della popolazione esposta alla contaminazione del suolo. Occorre tener conto di tutti i contributi al fine di mettere in campo strategie per una adeguata «protezione della popolazione a rischio»**

# Contaminazione locale e inquinamento diffuso

## Siti contaminati

### Identificazione della sorgente

- Indagini preliminari/Caratterizzazione di dettaglio
- Delimitazione delle sorgenti di contaminazione nei terreni e nelle acque sotterranee
- Le aree interessate generalmente non sono estese

### Analisi di rischio

- Stabilisce se i rischi (sanitari) associati alle sorgenti presenti nei terreni/acque sotterranee sono inaccettabili/significativi

### Intervento

- Gli interventi sono mirati alla rimozione/riduzione della sorgente (bonifica) o alla interruzione/mitigazione dei percorsi di migrazione (riduzione del rischio)

## Inquinamento diffuso

### Presenza diffusa di contaminanti

- Le sorgenti non sono identificabili o sono «diffuse»
- Le aree interessate sono generalmente ampie

### Valutazione dell'esposizione

- Valutazione dell'esposizione umana ai livelli di contaminazione nelle diverse matrici ambientali/vie di esposizione (inclusi suoli e acque, ma non solo)
- Non possono essere pre-definiti livelli di accettabilità del rischio

### Gestione

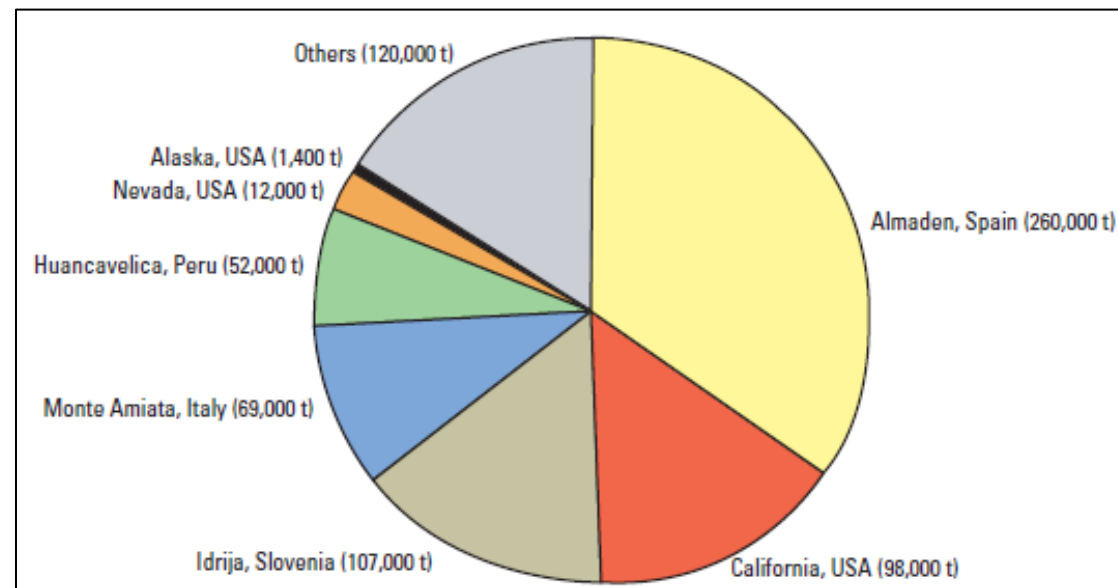
- L'azione sulle fonti (quando note) è la prevenzione della contaminazione del suolo e/o delle acque sotterranee
- Gestione/riduzione dei livelli di esposizione più elevati (es. limitazioni d'uso)

# Le aree minerarie da Hg in Europa

I giacimenti di mercurio sono distribuiti a livello globale in cinture minerali, composte da depositi di mercurio, aree di roccia alterata con elevate concentrazioni e presenze in traccia. Tra queste per rilevanza spicca la **cintura mediterranea**, che ha prodotto oltre il 60% di mercurio estratto nel mondo



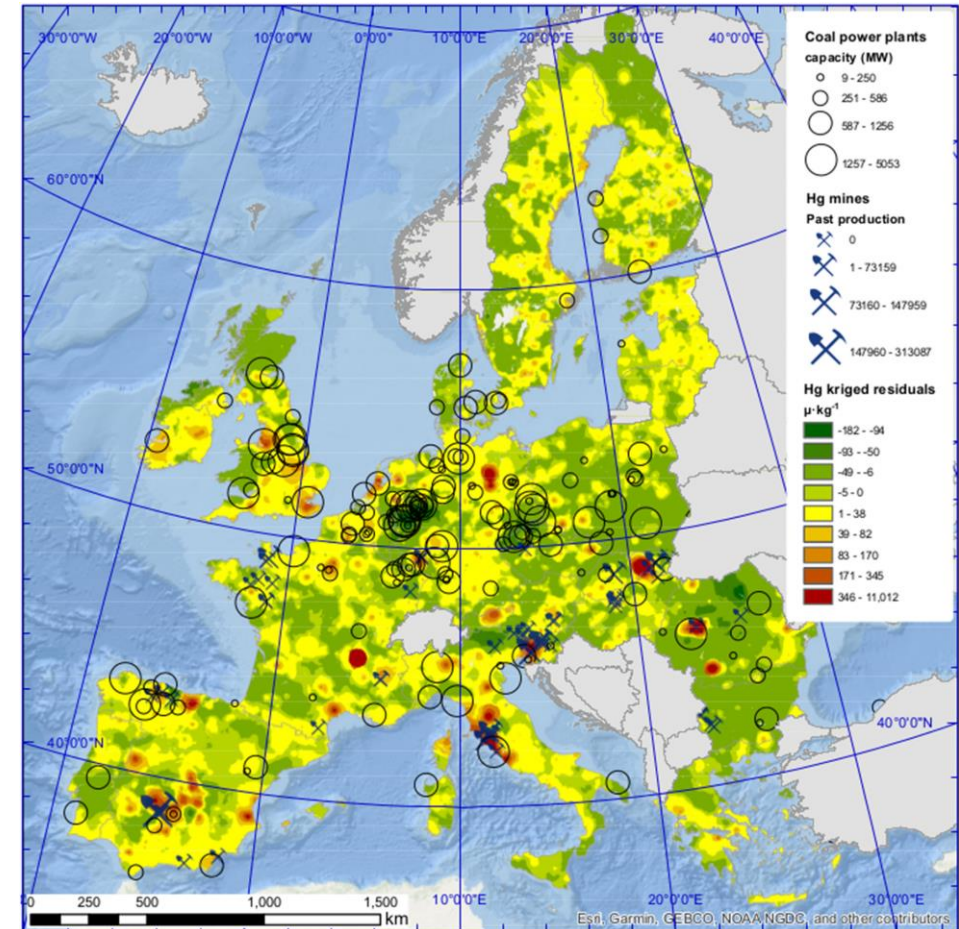
Cintura mediterranea di mercurio e distretti minerari principali. Fonte: elaborazione AdT da Pattelli et alii, Minerals (2014).



Produzione di mercurio dalle principali miniere di mercurio nel mondo. La produzione proveniente da Cina, ex Unione Sovietica, Algeria, Messico e Turchia è classificata come altri. Fonte "Geologic Studies of Mercury by the U.S. Geological Survey, U.S." 2003.

# Identificazione degli “hot spots” di Hg nei suoli europei

- Studio del JRC su 21591 campioni di suolo (0-20 cm) in 26 Paesi UE:  
Media  $\pm$  SD =  $55,4 \pm 4,9 \mu\text{g}/\text{kg}$  (0,054-49,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )  
Mediana = 23,3  $\mu\text{g}/\text{kg}$
- **Il 10% dell’area investigata presenta tenori di Hg > 84,7  $\mu\text{g}/\text{kg}$  e sono stati identificati 209 hotspots (> 429  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )**
- **Il 42% degli hotspots può essere associato ai siti minerari.** I più importanti sono Idrija in Slovenia, Almadén in Spagna e Monte Amiata in Italia (vedi figura con la mappa dei residui)
- Associazione con la presenza di centrali elettriche a carbone non abbastanza efficace vista la risoluzione del campionamento (1 campione ogni 200 Km<sup>2</sup>)



Identificazione degli “hot spot” di mercurio nei top soil (0-20 cm) della UE. Mappa dei “kriged residuals” con sovrapposizione delle miniere di mercurio (simboli proporzionali alla produzione passata) e degli impianti di combustione (da Ballabio et al., 2021).

# Le aree contaminate da mercurio in Italia

- Non esiste un **inventario nazionale dei siti contaminati da mercurio e dai composti del mercurio** come richiesto dall'Art. 15 del Regolamento UE 2017/852
- Le informazioni possono essere acquisite dai due database nazionali, entrambi gestiti da ISPRA e redatti ai sensi di normative distinte:
  - l'inventario nazionale delle strutture di deposito dei rifiuti estrattivi che, ai sensi dell'Art. 20 del DLgs 117/2008, riporta le strutture che hanno gravi ripercussioni negative sull'ambiente o che, a breve o medio termine, possono rappresentare una grave minaccia per la salute umana o l'ambiente
  - il database nazionale MOSAICO che, ai sensi dell'Art. 251 D. Lgs.152/06, censisce i siti oggetto di procedimento di bonifica e compresi nelle anagrafi regionali
- A causa delle loro peculiarità le aree vaste di contaminazione da Hg derivanti dalle attività minerarie **sono solo in parte censite nei due database gestiti da ISPRA** e quindi non sono state sinora **completamente incluse nel reporting** richiesto dalla UE

# I siti contaminati da Hg in Italia (Reporting UE del 2021)

Region/Autonomous Province	potentially contaminated (ii)	contaminated (iii)	remediated (iv)	Notes
	n.			
Piemonte	32	15	14	12 over 15 contaminated sites have measures completed waiting for the final certification
Valle d'Aosta	0	0	0	
Lombardia	29	32	62	
Bolzano-Bozen	0	0	0	
Trento	0	2	1	
Veneto	10	14	14	
Friuli-Venezia Giulia	3	3	3	
Liguria	4	4	0	
Emilia-Romagna	17	36	35	
Toscana	0	51	8	
Umbria	0	0	0	
Marche	4	4	1	
Lazio	11	4	1	data not complete
Abruzzo	6	1	1	
Molise	0	2	1	
Campania	1	17	0	
Puglia	0	8	1	
Basilicata	1	1	0	
Calabria	0	2	0	
Sicilia	0	0	0	
Sardegna	0	5	0	
<b>Italy</b>	<b>118</b>	<b>201</b>	<b>142</b>	

- I dati si riferiscono alle anagrafi regionali dei siti oggetto di procedimento di bonifica
- I dati non comprendono le aree incluse nei Siti di Interesse Nazionale

# Gli effetti tossici e le vie di esposizione da Hg nei suoli

- Gli effetti tossici del mercurio per l'uomo dipendono strettamente dalla forma chimica in cui è presente nella matrice

Forma di mercurio	Assorbimento principale	Bersaglio	Tossicità principale
Metilmercurio (MeHg)	Gastrointestinale (~95 %)	Cervello, sistema nervoso, feto	Altamente neurotossico, danni sviluppo fetale
Dimetilmercurio	Cutaneo/Inalazione (altamente rapido)	Sistema nervoso centrale	Estremamente letale
Elementare (Hg <sup>0</sup> , vapori)	Inalazione (75–85 %)	Cervello, reni	Tremori, deficit cognitivi, danni cronici
Inorganico (sali)	Gastrointestinale (7–15 %)	Reni, tratto gastrointestinale	Corrosivo, nefrotossico

# I parametri tossicologici di Hg usati per l'AdR dei suoli

- I parametri tossicologici per via inalatoria e ingestione utilizzati per l'AdR dei suoli sono riportati nella «**Banca dati nazionale delle proprietà fisiche, chimiche e tossicologiche dei contaminanti per la valutazione del rischio sito-specifico dei siti contaminati**» (2018) dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e dell'Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (INAIL). L'USEPA è il riferimento principale
- I parametri tossicologici per il consumo di vegetali sono definiti dall'Istituto Superiore di Sanità. I valori di tossicità dell'UE sono il riferimento principale, seguiti da quelli dell'USEPA
- Per la lisciviazione in falda si fa riferimento alla conformità con le CSC delle acque sotterranee e il composto di riferimento è il mercurio inorganico (sali di mercurio rappresentati dal Cloruro di mercurio)

Via di esposizione	Effetti tossici			Note
	RfD [mg/Kg-d]	RfC [mg/m <sup>3</sup> ]	TWI [mg/Kg-w]	
Ingestione e contatto dermico (composto di riferimento Metilmercurio)	1,00E-04	non appl.	-	Per i percorsi di ingestione ed inalazione di polveri si potrebbe far riferimento anche al Mercurio inorganico (sali di Mercurio)
Inalazione (composto di riferimento Mercurio metallico)	-	3,00E-04	-	
Consumo di vegetali	1,00E-04	non appl.	1,6E-03	Non vi sono valori di rischio accettabile definiti dal Decreto aree agricole

# Criticità connesse alla valutazione del rischio da Hg in Italia (1)

- Pur assumendo come riferimento i dati di tossicità delle specifiche forme più rilevanti per ciascun percorso/via di esposizione, **il calcolo del rischio viene comunque condotto a partire dal contenuto pseudo-totale**
- Questo approccio impedisce di individuare le reali criticità ambientali (e quindi le aree effettivamente contaminate) ostacolando l'adozione di strategie di gestione sostenibili e inducendo spesso all'attuazione di interventi drastici e immediati, quali la rimozione e lo smaltimento dei suoli, con potenziali ripercussioni ambientali rilevanti
- Tale impostazione risulta particolarmente problematica quando l'area interessata dalla valutazione è di ampia estensione e rilevante è la popolazione potenzialmente esposta

# Criticità connesse alla valutazione del rischio da Hg in Italia (2)

- Nella valutazione dell'esposizione umana alla contaminazione dei suoli, vengono generalmente considerati i seguenti percorsi:
  - i percorsi diretti (ingestione e contatto dermico)
  - la volatilizzazione
  - la lisciviazione verso le acque sotterranee
- Negli studi di letteratura disponibili, il trasporto suolo-pianta si è dimostrato non essere particolarmente critico, a parte per alcune colture particolari (es. riso) che risentono dei fenomeni di formazione di mercurio organico
- Viceversa l'accumulo sui vegetali derivanti dalla ricaduta al suolo **può determinare una presenza importante di Hg nei prodotti agroalimentari** e quindi l'esposizione della popolazione
- Non vengono considerati **gli apporti potenziali verso i corpi idrici superficiali** (erosione e ruscellamento) che possono determinare bioaccumulo in catena trofica e potenziale esposizione umana

# Focus sull'esposizione a polveri contaminate

- L'esposizione alla polvere proveniente dal suolo contaminato spesso non è una via rilevante per la valutazione del rischio nei siti contaminati
- L'esposizione umana alle polveri contaminate viene generalmente valutata **sulla sorgente (ovvero on-site)** ed è considerata principalmente in **ambiente outdoor**



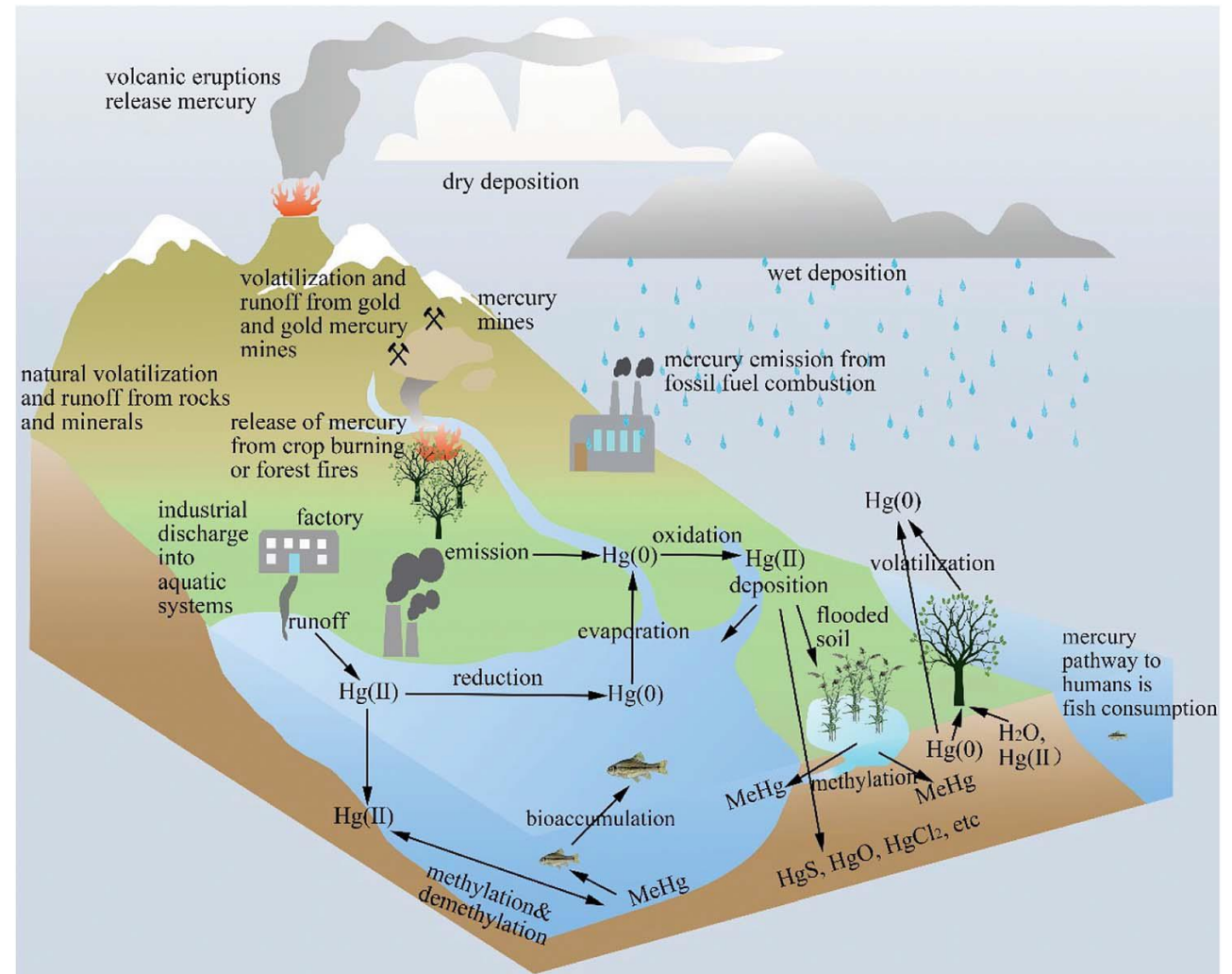
- Gli ambienti indoor possono essere una fonte di esposizione a contaminanti organici persistenti, metalli, ma anche inquinanti emergenti che possono accumularsi nella polvere depositata negli spazi interni
- L'esposizione alla polvere indoor e outdoor off-site è quindi un percorso di esposizione **comune ma spesso sottovalutato nella gestione dei siti contaminati**, soprattutto in ambienti residenziali e per le aree agricole

**Necessità di un nuovo approccio per una valutazione più realistica dell'esposizione e dei rischi**

# Apporti di Hg al suolo

- Da letteratura si evince che la maggior parte di Hg nei terreni superficiali (circa l'80%) proviene da apporti atmosferici tramite deposizione umida e secca, direttamente sui terreni o indirettamente per ricaduta da vegetali
- Pertanto l'emissione di vapori e polveri contaminate determinano effetti importanti sulla distribuzione di Hg nei terreni e sull'esposizione dei recettori

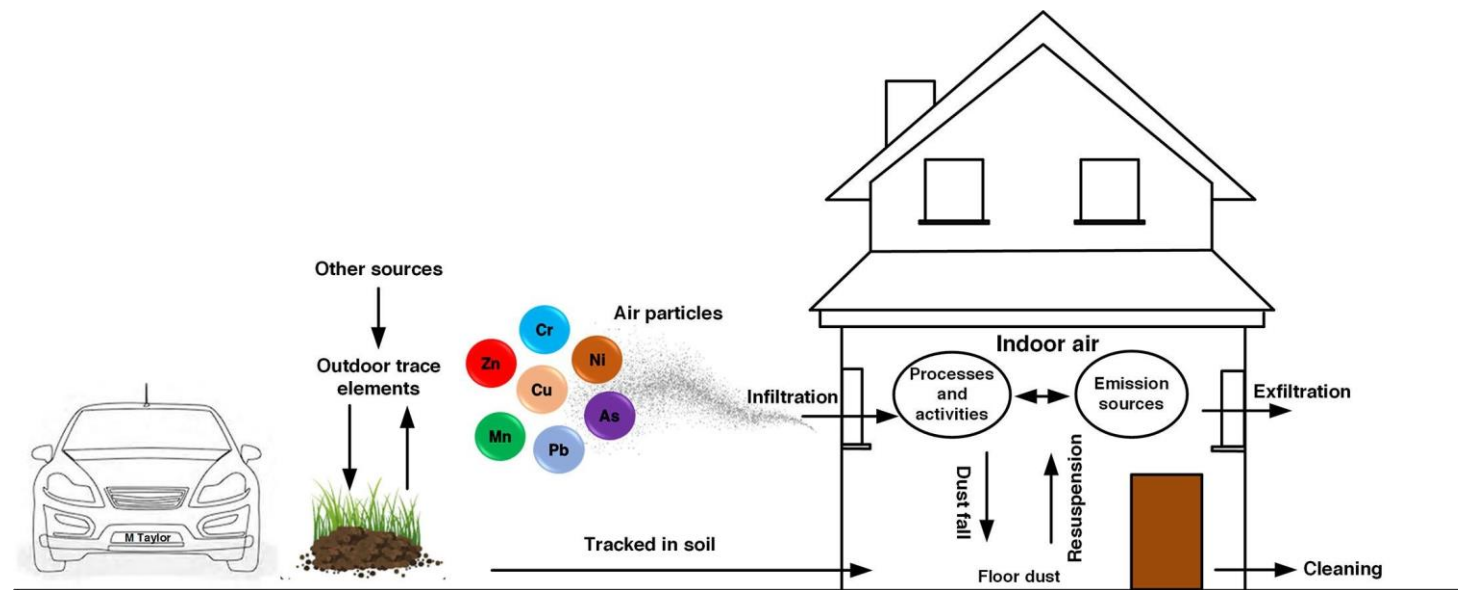
**Mentre i modelli di volatilizzazione da suolo spesso sovrastimano le emissioni dal suolo per le polveri la modellistica utilizzata, invece, probabilmente sottostima il fenomeno**



Schema semplificato del ciclo geochimico di Hg (da Teng et al., 2020).

# Modello Concettuale per l'esposizione a polveri da suolo contaminato

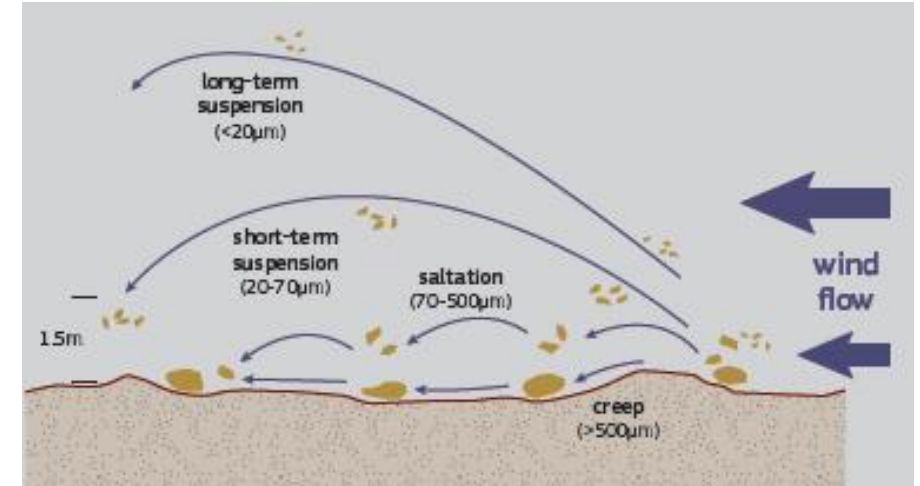
- Le polveri contaminate possono essere trasportate dal vento (particelle di polvere) e dai veicoli al di fuori dell'area contaminata e poi depositate negli sia in ambienti outdoor che indoor
- L'esposizione indoor è rilevante per la salute poiché le persone trascorrono la maggior parte del loro tempo in ambienti chiusi



Fonte: Doyi et al., 2019

# L'emissione e il trasporto delle polveri

- La polvere atmosferica può essere generata da processi naturali associati all'erosione eolica, come l'abrasione e la deposizione
- Il trasporto di contaminanti da parte di particolato atmosferico è notevole a causa della potenziale velocità, distanza ed estensione aerea in cui i contaminanti possono essere trasportati (JRC, 2018)
- Nonostante la riconosciuta importanza di questo meccanismo, è **scarsamente probabile** che il percorso di inalazione delle polveri **determini una criticità nella valutazione del rischio dei siti contaminati** in Italia
- Ciò è probabilmente causato **da una sottostima delle emissioni di particolato dal suolo** da parte degli attuali modelli utilizzati in Italia



Source: WAD3-JRC, 2018

**Questo aspetto è particolarmente critico per la valutazione ambientale della contaminazione da Hg nei suoli**

# Ingestione di suolo e polveri

- I default dei tassi di ingestione USEPA (95° percentile) per lo scenario residenziale, utilizzati anche in Italia, potrebbero essere molto conservativi, soprattutto nel contesto **di aree urbane con elevata densità edilizia** (minore rilevanza dell'esposizione esterna). Al contrario, l'esposizione specifica **indoor alle polveri depositate non è ancora considerata**
- E' utile **differenziare i valori dei tassi di ingestione del suolo e della polvere**, rapportandoli alle fasce di età dei recettori, alle diverse attività indoor/outdoor e ai tempi di residenza

## Esposizione indoor a polveri



## Esposizione outdoor a suolo e polveri



# Criticità connesse alla valutazione del rischio da Hg in Italia (3)

- Nella stragrande maggioranza dei casi gli esiti dell'AdR in ambito bonifiche per Hg mostrano che per i suoli vi è quasi sempre un rischio non accettabile per lievi superamenti delle CSC, ma anche per valori inferiori alle stesse
- Negli anni quindi vi è stato un utilizzo crescente di misure di aeriformi nei siti contaminati e nel 2018 sono state emanate da SNPA Linee Guida dedicate
- Tuttavia le misure di aeriformi sono complesse, necessitano di numerosi presidi in campo (misure puntuali) e sono fortemente influenzate dalle condizioni atmosferiche
- Necessitano di un elevato numero di campagne per affidabilità dei risultati con tempistiche lunghe per arrivare ad una decisione
- Soprattutto nel caso di aree vaste contaminate da Hg **l'applicazione di queste misure potrebbe essere onerosa e poco sostenibile**

# Il Progetto MOVERS - Hg di ISPRA

- Il progetto MOVERS-Hg, finanziato dal MASE per il periodo 2025-2027, è finalizzato a definire metodologie di screening per la stima delle diverse forme di mercurio nei suoli e relativa valutazione dei rischi per la salute e per l'ambiente ai fini dell'identificazione delle aree contaminate e della loro gestione sostenibile
- Le attività del progetto, oltre che rispondere alle richieste della Convenzione di Minamata, si inquadrano nel solco di altre norme nazionali (Strategia Nazionale per la Biodiversità adottata con il Decreto n. 252 del Ministro dell'ambiente e della sicurezza energetica il 3 agosto 2023) e comunitarie (Strategia per il Suolo per il 2030 e Proposta di Direttiva per il Monitoraggio del Suolo e la Resilienza del 2023) sulla protezione dei suoli, sia in termini di **definizione di adeguate strategie di monitoraggio** specifiche per il mercurio sia per una **affidabile valutazione dei rischi per la salute e per l'ambiente**
- Il progetto prevederà la partecipazione di ARPA Toscana, ARPA Friuli-Venezia Giulia, Università di Firenze, Università di Trieste, Istituto Superiore di Sanità
- Sarà inoltre coinvolta l'intera Rete SNPA dei Laboratori

# Le attività del Progetto

- Identificazione delle metodologie di campionamento ed analisi delle diverse frazioni di mercurio nei suoli con particolare riferimento alla mobilizzabile in fase liquida, alla volatile, e a quella direttamente accessibile per l'uomo.
- Sperimentazione in due aree di studio afferenti rispettivamente ai sistemi fluviali Paglia-Tevere (Toscana) e Isonzo (Friuli-Venezia Giulia)
- Messa a punto di una procedura di estrazione sequenziale in ambito SNPA (ISPRA e ARPA), per lo studio del frazionamento chimico del mercurio finalizzato alla valutazione della sua mobilità ambientale, condotta su campioni di suolo prelevati dalle due aree di studio
- Applicazione di protocolli di monitoraggio specifici per la determinazione delle forme volatili del mercurio attraverso il desorbimento termico
- Definizione di modelli innovativi di valutazione dell'esposizione e del rischio, specifici per le diverse frazioni di mercurio ed applicazione alle aree di studio
- Divulgazione dei risultati e organizzazione di workshop tecnico/scientifici

# Risultati attesi

- Gli esiti del progetto contribuiranno al miglioramento ed alla sostenibilità degli interventi in aree vaste contaminate da mercurio e, più in generale, alla gestione della contaminazione dei suoli
- Infatti, una valutazione più realistica dei rischi per la salute in aree industriali e minerarie interessate in passato dalla presenza di Hg, utilizzato principalmente nei processi industriali (es. celle al mercurio per la produzione della soda), consentirà di ottimizzare le strategie di intervento, riducendo l'impiego di risorse economiche ed ambientali e garantendo al contempo una maggiore tutela della salute e dell'ambiente

## Ringraziamenti

**Elisa Mariani (Università di Tor Vergata/ISPRA)**  
**Eleonora Beccaloni, Federica Scaini (ISS)**



# Grazie dell'attenzione!

[antonella.vecchio@isprambiente.it](mailto:antonella.vecchio@isprambiente.it)

*In teoria fra la teoria e la pratica non c'è differenza, in pratica sì.  
La teoria è quando si sa tutto e niente funziona. La pratica è quando  
tutto funziona e nessuno sa il perché.  
(Albert Einstein)*