

# INTERVENTI FORMATIVI IN MATERIA DI ECOREATI E DELITTI CONTRO L'AMBIENTE EX L. 68/2015 - CIG 9050193785 - CUP H31H16000030008 - 2021/D.01028

---

MODULO 10 - LE POSSIBILI CAUSE DI INQUINAMENTO AMBIENTALE  
– FOCUS SU “INQUINAMENTO DEL SUOLO E BONIFICA”

- DOTT.SSA GIUSEPPINA OLIVA -

**LE POSSIBILI CAUSE DI INQUINAMENTO AMBIENTALE  
FOCUS SU “INQUINAMENTO DEL SUOLO E BONIFICA”**



**L' Analisi di Rischio**

**Dott.ing. G. Oliva**  
**[goliva@unisa.it](mailto:goliva@unisa.it)**

# Il Rischio

Il **rischio** è la probabilità di insorgenza di effetti non desiderati nei confronti di persone o beni materiali in conseguenza al verificarsi di determinati eventi.

$$R = P \cdot D$$

**P** = Pericolosità (probabilità di accadimento dell'evento)

**D** = Danno atteso

## Tipologie di rischio

- ✓ naturale (terremoti, eruzioni, idrogeologico..);
- ✓ industriale (sui lavoratori di una comunità);
- ✓ ambientale (rischio indotto dalla presenza di un agente inquinante), a sua volta classificabile in ecologico o sanitario.

# Il rischio sanitario-ambientale

In relazione al *rischio sanitario-ambientale* , si distinguono:

- ✓ **rischio di background o di fondo**: rischio a cui la popolazione è esposta in assenza della causa di rischio oggetto di studio;
- ✓ **rischio incrementale**: rischio causato dalla causa oggetto di studio;
- ✓ **rischio totale**: somma del rischio di fondo e del rischio incrementale.

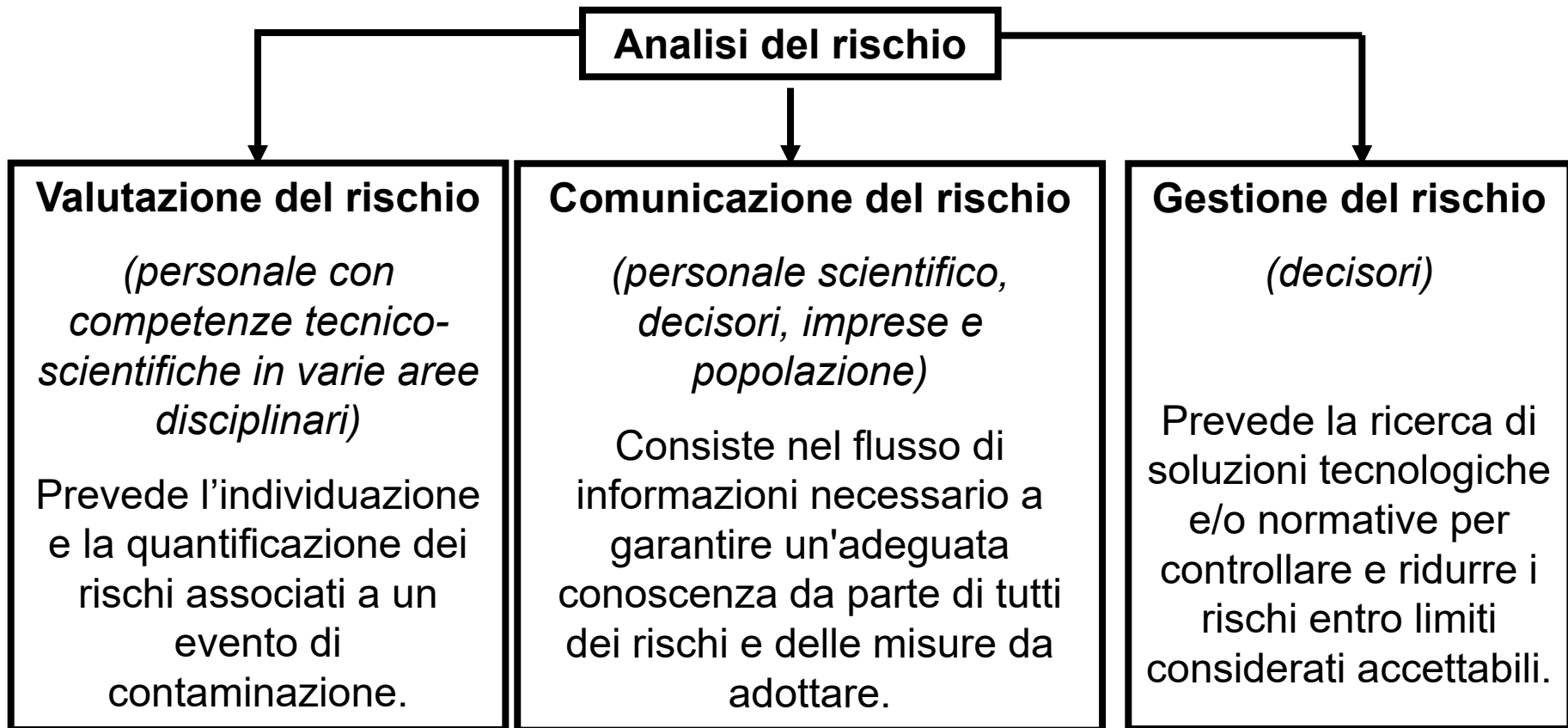
Sulla base dei risultati degli studi eco-tossicologici, è possibile parlare di:

- ✓ **rischio relativo**, cioè il rapporto fra la frazione degli esposti colpiti e la frazione degli esposti non colpiti
- ✓ **rischio attribuibile**, dato dalla differenza tra le probabilità di essere colpiti a seguito dell'esposizione e quella di essere colpiti senza essere esposti.

**Gli interventi possono agire esclusivamente sul *rischio incrementale* e *attribuibile*, al fine di riportare il rischio totale a livelli accettabili.**

# L'Analisi di Rischio

Strumento di supporto decisionale per razionalizzare gli interventi di bonifica, sia da un punto di vista tecnico che economico, è una procedura che consente la valutazione numerica del rischio al fine di definirne l'accettabilità.



# La Valutazione del Rischio

L'analisi di rischio prevede la definizione del Modello Concettuale del Sito (MCS), attraverso l'identificazione dei seguenti elementi:

- ✓ **Sorgente del rischio**, costituita dal sito potenzialmente contaminato, che è necessario descrivere in funzione della natura e dell'intensità della contaminazione e dei pericoli che rappresenta.
- ✓ **Vie di migrazione** degli agenti contaminanti, ovvero i percorsi nei diversi comparti ambientali a seguito dei quali l'agente contaminante è trasferito al bersaglio. Durante tali percorsi gli agenti chimici sono soggetti a fenomeni di rilascio, trasporto, trasferimento e trasformazione: è fondamentale una loro caratterizzazione per poter valutare la concentrazione del contaminante presente al punto di esposizione.
- ✓ **Bersagli** o ricettori, rappresentati dall'uomo o dai sistemi ambientali, e da rappresentare in base agli scenari di esposizione.

# La Valutazione del Rischio

## *Metodologie*

- ✓ **Qualitative**, in cui la valutazione del rischio si basa sull'esperienza del valutatore ed sul confronto con liste di concentrazioni massime ammissibili o con l'obiettivo di bonifica.
- ✓ **Semi-quantitative**, che hanno come obiettivo il raggiungimento di un valore numerico che indichi un livello di pericolosità sulla base di una caratterizzazione preliminare del sito contaminato. Sono metodologie particolarmente utili per la valutazione comparativa di siti differenti.
- ✓ **Quantitative**, basate su procedure numeriche applicate al singolo sito contaminato, con un'analisi di dettaglio degli scenari di esposizione e per le quali i risultati sono espressi come un aumento del rischio di mortalità per la popolazione esposta.

# La Valutazione del Rischio

## *Metodologie qualitative: il criterio della concentrazione limite*

Utili per definire l'opportunità dell'intervento di bonifica, comportano i seguenti **vantaggi**:

- ✓ uniformità del processo decisionale sulla qualità dei suoli;
- ✓ possibilità di tradurre le concentrazioni limite predefinite in standard ufficiali, attraverso leggi, decreti, delibere;
- ✓ ridotte pressioni socio-politiche locali sul processo decisionale, non essendovi margine di negoziabilità al riguardo;
- ✓ utilità ai fini della valutazione dell'efficienza delle tecniche di trattamento dei terreni inquinati nella rimozione dei contaminanti.

Il principale **svantaggio** consiste nell'impossibilità di tener conto delle specifiche condizioni di contaminazione ed esposizione del sito in esame.



# La Valutazione del Rischio

## *Metodologie semi-quantitative: l'analisi relativa di rischio*

- ✓ Si tratta di metodologie utili a definire un **ordine di priorità tra interventi** di bonifica, mediante l'utilizzo di **modelli a punteggio**.
  - Tali modelli prevedono l'individuazione di diverse categorie di fattori - relative a sorgente, vie di migrazione e relativi bersagli per ognuno dei contaminanti individuati - a ognuno dei quali si associa un punteggio.
  - I punteggi vengono variamente combinati fino ad ottenere un indice aggregato di rischio
  - Per ridurre al minimo l'arbitrarietà della valutazione esistono diverse metodologie di assegnazione dei punteggi (HRS, AGAPE, Lombardia Risorse, CSSM, SP SNAMPROGETTI)
- ✓ Il principale vantaggio è legato alla possibilità di **contenere i costi** di analisi.

# La Valutazione del Rischio

## *Metodologie semi-quantitative: Hazard Ranking Systems (HRS)*

L' **Hazard Ranking System** è un criterio proposto dall'EPA con struttura moltiplicativa e punteggi calcolati sulla base di una differenziazione delle vie di migrazione.

Il punteggio del sito (0-100) deriva dai punteggi risultanti dall'analisi dei rischi associati alle diverse vie di migrazione:

$$S = \sqrt{\frac{S^2_{acque\ superficiali} + S^2_{acque\ profonde} + S^2_{suolo} + S^2_{aria}}{4}}$$

Per  $S = 28,5$  il sito viene inserito nella NPL (*National Priority List*) che prevede l'attuazione di specifiche indagini.

# La Valutazione del Rischio

## *Metodologie quantitative: l'analisi assoluta del rischio*

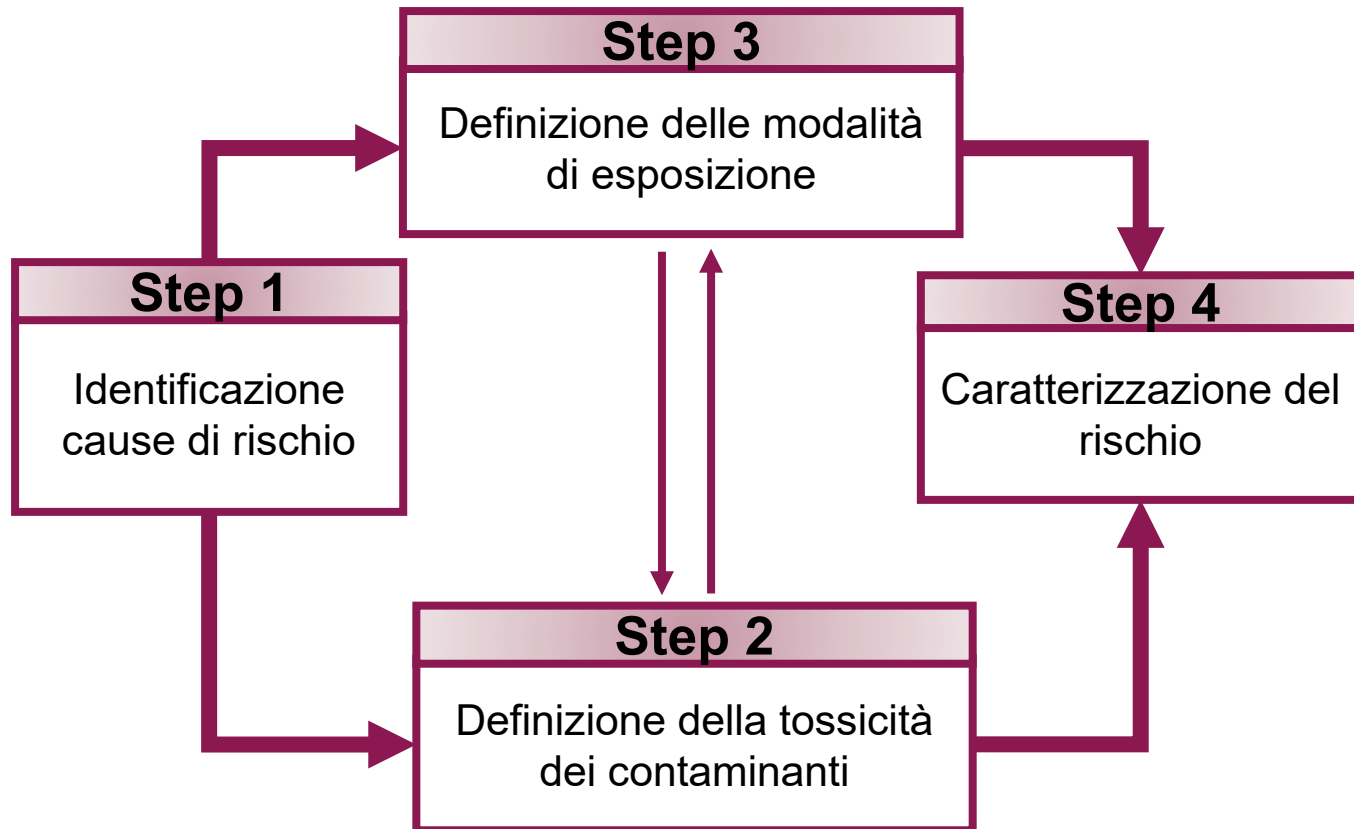
- ✓ Le metodologie quantitative sono **procedure numeriche** che prevedono l'analisi di dettaglio degli scenari di esposizione relativi al singolo sito contaminato (**analisi assoluta del rischio**).
- ✓ Attraverso l'analisi di dettaglio degli scenari di esposizione si arriva ad esprimere i risultati come “*aumento del rischio di mortalità per la popolazione esposta*”.
- ✓ Consentono di determinare gli **obiettivi di risanamento** in relazione alle specifiche condizioni del sito.

Applicazione prevista dal *D.Lgs 152/2006* per la definizione delle  
**Concentrazioni soglia di rischio (Csr)**

# La Valutazione del Rischio

## *Procedura operativa*

La metodologia operativa proposta dall'US-EPA, comunemente accettata nell'ambito tecnico internazionale, suddivide la stima quantitativa del rischio in 4 fasi distinte



# La Valutazione del Rischio

## *Step 1: individuazione del rischio*

### ✓ **Obiettivo**

Definizione delle caratteristiche della contaminazione in termini di:

- tipologia di contaminanti;
- distribuzione spaziale;
- livelli di concentrazione.

### ✓ **Risultato.** Definizione dei contaminanti indice

### ✓ **Informazioni necessarie**

- attività passate e attuali che si svolgono sul sito;
- correlazione tra attività e tipo, localizzazione ed estensione della contaminazione;
- livelli di contaminazione nelle diverse matrici ambientali;
- caratteristiche ambientali del sito (idrogeologiche, atmosferiche, topografiche);
- popolazione potenzialmente esposta.

# La Valutazione del Rischio

## *Step 1: i contaminanti indice*

I contaminanti indice (COC - Chemical of Concern), sono le sostanze che costituiscono la maggior fonte di rischio in un sito e compongono il set di analiti individuati al fine di ridurre tempi e costi dell'analisi.

### ✓ **Criteri di scelta dei COC**

- tossicità, persistenza, mobilità;
- prevalenza (come distribuzione e concentrazione media e massima nello spazio);
- coinvolgimento nelle esposizioni più significative;
- frequenza di determinazione;
- legame con le attività che hanno interessato il sito;
- trattabilità.

- ✓ Il **Criterio USEPA (1989)** prevede di escludere le sostanze con una frequenza di determinazione minore o uguale al 5% e quelle il cui contributo al rischio totale, per ciascun comparto, risulta inferiore a un limite percentuale dell'1%.

# La Valutazione del Rischio

## *Step 2: definizione della pericolosità dei contaminanti*

### ✓ **Obiettivo**

Definizione della mortalità indotta sulla popolazione campione al variare delle dosi di contaminanti assunte.

### ✓ **Risultato**

Definizione dei parametri di pericolosità relativi alle sostanze indice

### ✓ **Informazioni necessarie**

- caratteristiche di esposizione (acuta, cronica)
- tipologia di contaminante (cancerogeno, non cancerogeno)



# La Valutazione del Rischio

## *Step 2: test tossicologici*

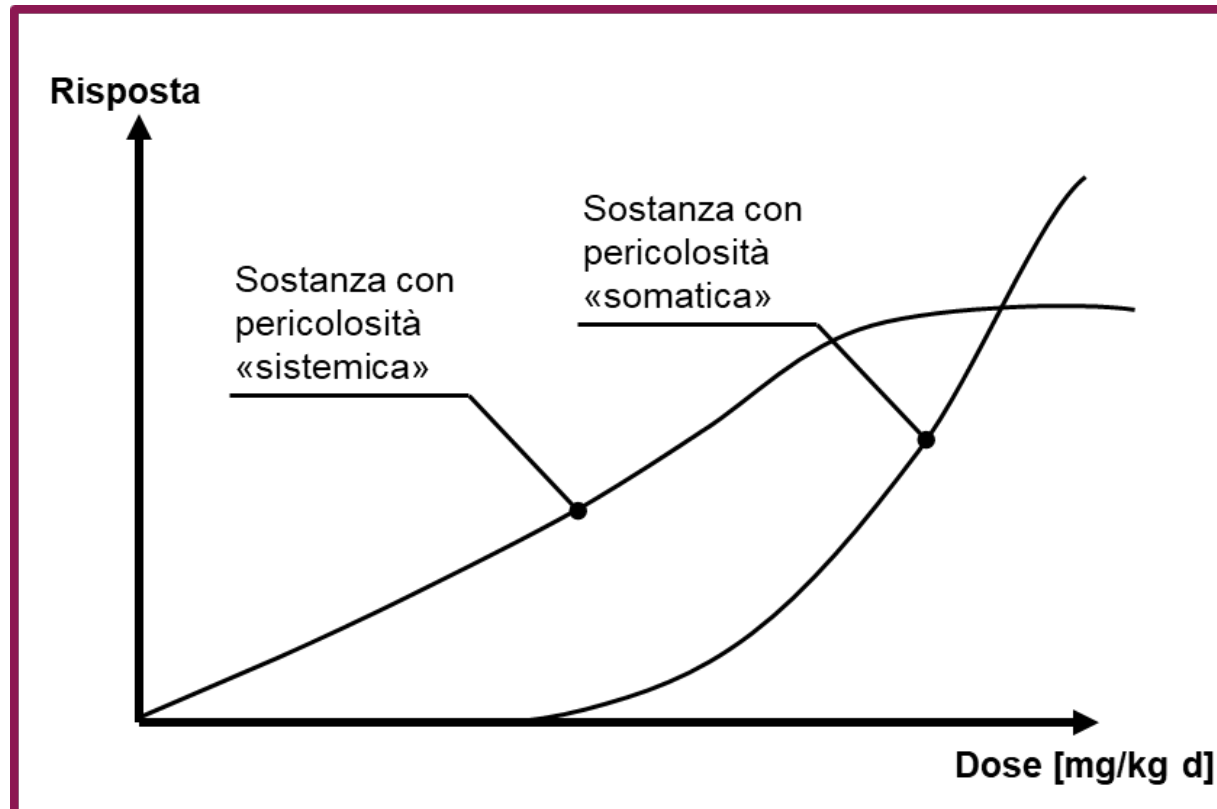
- ✓ La valutazione della pericolosità di una sostanza avviene mediante test tossicologici, in cui si studiano gli effetti indesiderati conseguenti all'esposizione, in condizioni controllate, a una sostanza.
- ✓ Tali test permettono di determinare la relazione fra l'esposizione e l'effetto di una sostanza sugli organismi esposti e caratterizzare, quindi, la pericolosità di un contaminante.
- ✓ A tale scopo occorre distinguere tra la valutazione della:
  - tossicità, espressa dalla dose letale mediana che può indurre mortalità nel 50% di una popolazione esposta (DL50), ma può anche essere riferita alla dose che non induce effetti avversi osservabili (NOAEL). Gli effetti tossici possono essere temporalmente suddivisi in acuti, subcronici e cronici;
  - cancerogenicità, che si sviluppa a partire dagli «end-point» identificati nell'ambito di studi di tossicità a lungo termine.



# La Valutazione del Rischio

## *Step 2: test tossicologici*

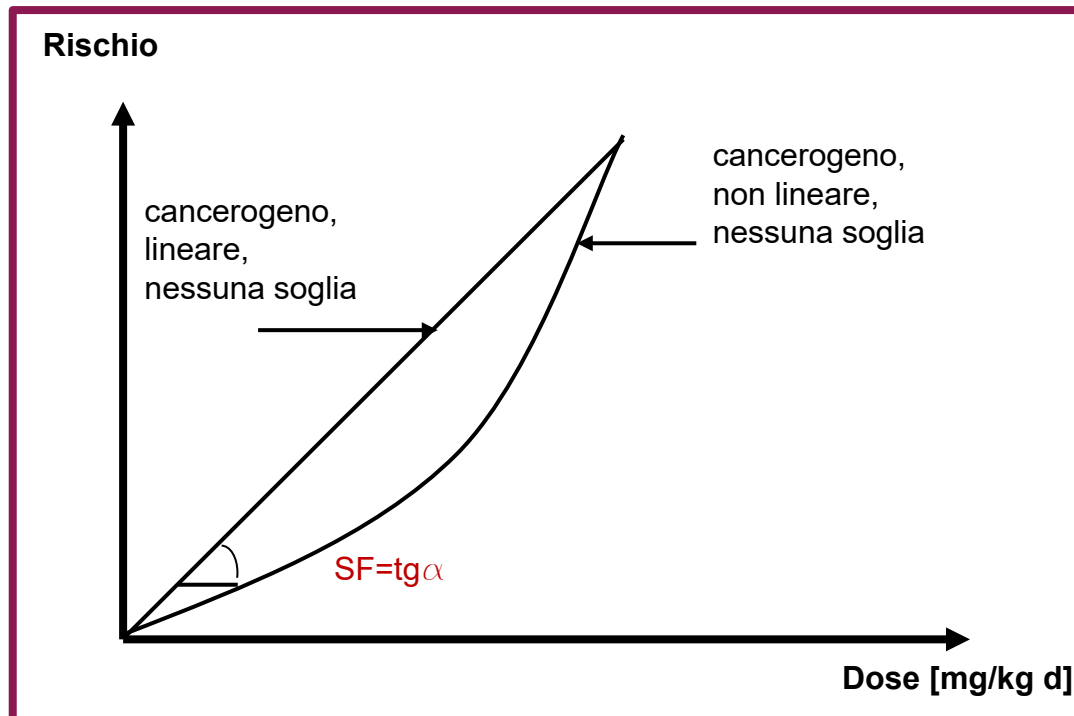
Per gli scopi dell'analisi di rischio sanitario-ambientale, si considerano gli effetti cronici (a lungo termine) associati alle sostanze considerate.



# La Valutazione del Rischio

## *Step 2: pericolosità dei contaminanti cancerogeni*

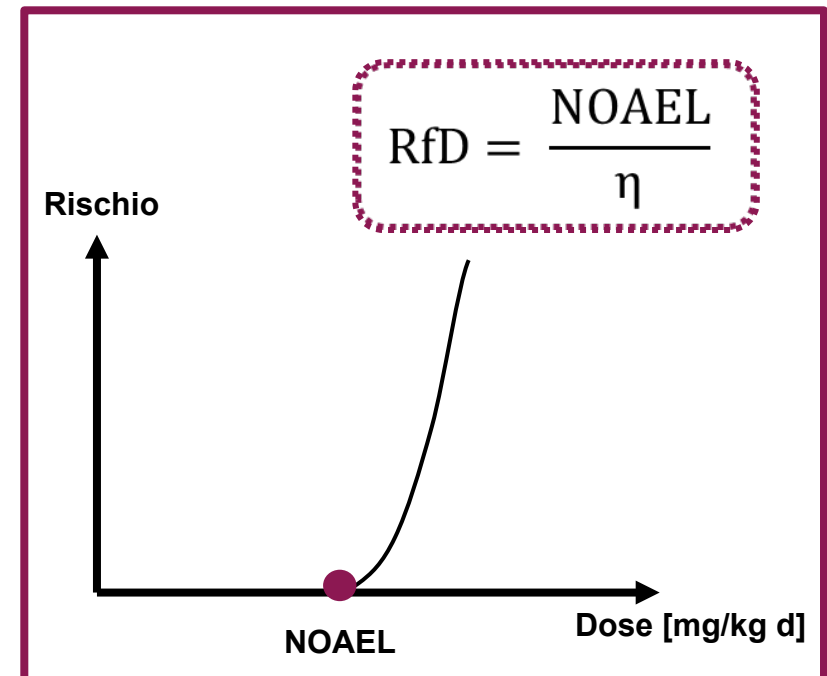
- ✓ La tossicità per sostanze con effetti sistemici viene espressa in termini di potenziale cancerogeno, assumendo che esse risultino ***nocive a qualunque valore di esposizione***.
- ✓ Il parametro tossicologico di interesse è, quindi, la pendenza del tratto rettilineo della curva dose-risposta: lo ***Slope Factor (SF)***.



# La Valutazione del Rischio

## **Step 2: pericolosità dei contaminanti non cancerogeni**

- ✓ I contaminanti con effetti tossici somatici risultano nocivi solo oltre un livello di esposizione giornaliero, al di sotto della quale l'esposizione non induce alcun rischio anche se subita per tutta la vita - **NOAEL** (*No Observed Adverse Effect Level*).
- ✓ Il parametro tossicologico di interesse è, dunque, la dose giornaliera di riferimento **RfD** (Reference Dose) e si ottiene dividendo il NOAEL per un opportuno fattore di sicurezza ( $\eta$ )
- ✓ L'US-EPA propone diversi **fattori di sicurezza**:
  - **10**, in caso di disponibilità di dati di tossicità che identificano il NOAEL sull'uomo;
  - **100**, in caso di disponibilità di dati sulla tossicità che identificano il NOAEL sugli animali e da cui si estrapolano i valori di tossicità per l'uomo;
  - **1000**, in presenza di dati incompleti o contrastanti.



# La Valutazione del Rischio

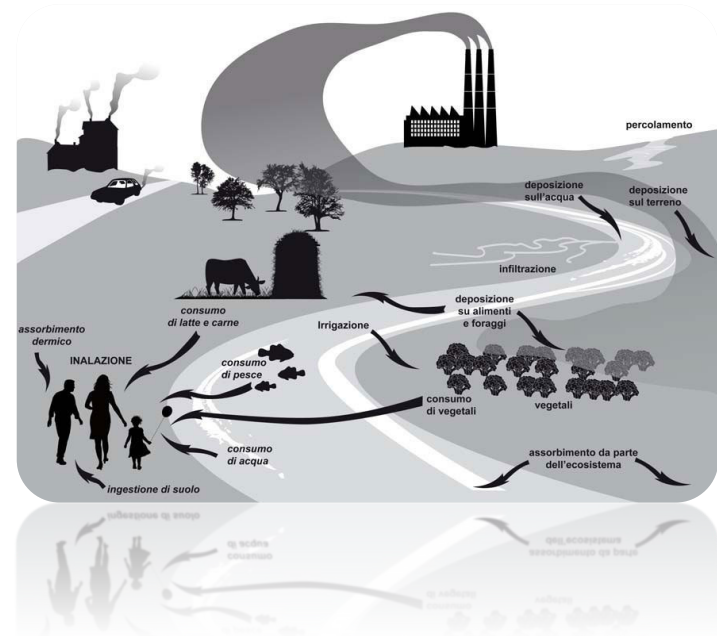
## Step 3: valutazione dell'esposizione

### ✓ **Obiettivo**

Stima dell'esposizione della popolazione potenzialmente a rischio rispetto al fenomeno di contaminazione

### ✓ **Risultati**

Definizione della concentrazione al **punto di esposizione** ( $C_{POE}$ );  
calcolo della dose dei contaminanti ai recettori (CDI).



# La Valutazione del Rischio

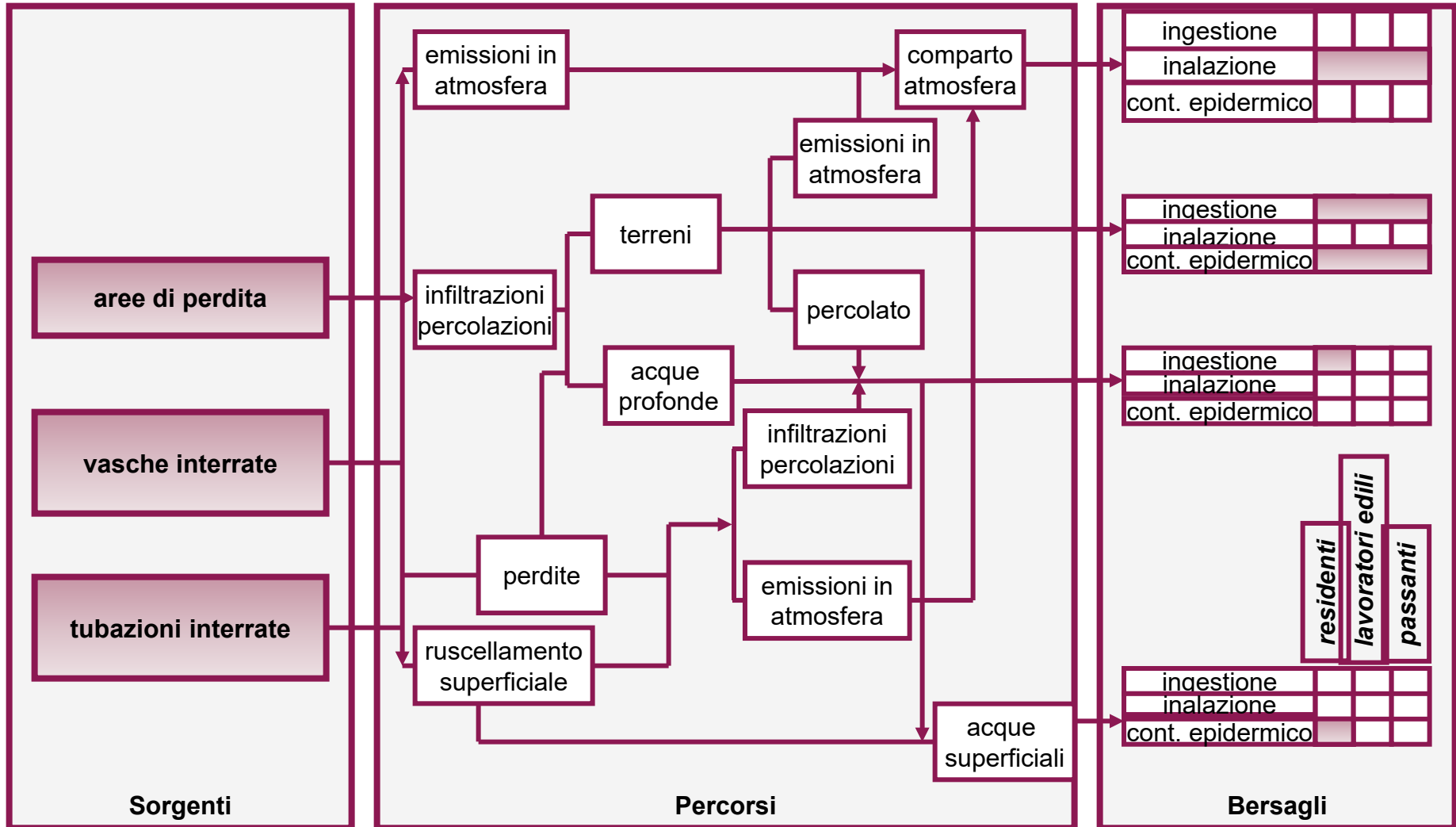
## *Step 3: quantificazione dell'esposizione*

- ✓ **Localizzazione e identificazione della popolazione esposta**
  - *popolazione residente*, comprensiva di eventuali sottoinsiemi a maggiore sensibilità quali ad esempio i bambini;
  - *popolazione di lavoratori*, ove il sito sia utilizzato o se ne preveda l'utilizzo come area industriale;
  - *popolazione di fruitori*, ove le caratteristiche del sito siano tali da poterne prevedere l'utilizzo a scopi ricreativi.
  
- ✓ **Caratterizzazione della popolazione esposta**, in termini:
  - anatomici (peso corporeo e superfici esposte)
  - di abitudini alimentari degli individui vicini, residenti nell'area contaminata e di quelli remoti, ma che possono entrare in contatto con l'area contaminata.
  
- ✓ **Identificazione dei percorsi di esposizione**

Descrizione dei meccanismi di trasferimento dalla sorgente (puntuale o areale) dei COC ai ricettori umani.

# La Valutazione del Rischio

## Step 3: il modello concettuale



# La Valutazione del Rischio

## *Step 3: dose di contaminante al ricettore*

Si definisce **assunzione cronica giornaliera (CDI)**, la quantità di contaminante assunta giornalmente da un individuo per inalazione, ingestione o contatto dermico

$$CDI = \frac{C_{POE} \cdot CR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$$

dove:

- **C<sub>POE</sub>** concentrazione di contaminante nel punto di esposizione;
- **CR** rappresenta la portata ingerita, inalata o a contatto;
- **EF** è la frequenza dell'esposizione (d/anno);
- **ED** rappresenta la durata dell'esposizione (anni);
- **BW** il peso corporeo (kg);
- **AT** è il periodo su cui è mediata l'esposizione (d)

Alcuni dei parametri più appropriati da inserire nelle espressioni definite possono essere trovati in letteratura; altri, tra cui la frequenza e la durata dell'esposizione, sono spesso basati su condizioni specifiche del sito o sull'esperienza professionale

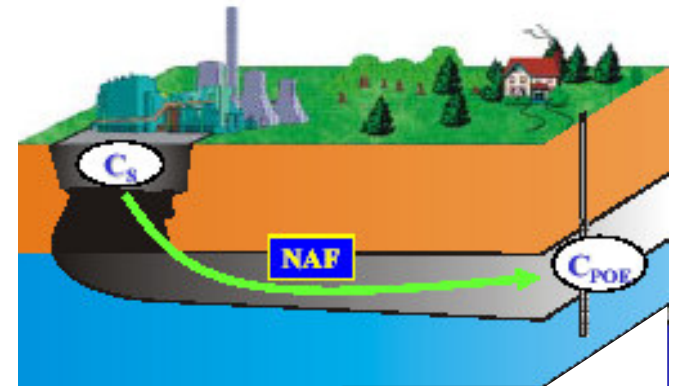
# La Valutazione del Rischio

## Step 3: concentrazione al punto di esposizione

I **punti di esposizione** (POE - *Point of Exposure*) definiscono le collocazioni dei ricettori nei vari scenari previsti, in corrispondenza dei quali la concentrazione del generico contaminante ( $C_{POE}$ ) è pari al rapporto tra la concentrazione alla sorgente ( $C_s$ ) e il coefficiente di attenuazione naturale (NAF – Natural Attenuation Factor), che tiene conto dei fenomeni che coinvolgono il contaminante nel passaggio da una matrice all'altra

$$C_{POE} = \frac{C_s}{NAF}$$

- ✓ NAF > 1 per esposizione indiretta (inalazioni di vapori e particolato, ingestione di acqua potabile);
- ✓ NAF = 1 per esposizione diretta (contatto dermico);
- ✓ NAF < 1 per particolari processi e particolari contaminanti (es. fenomeno della ripartizione).

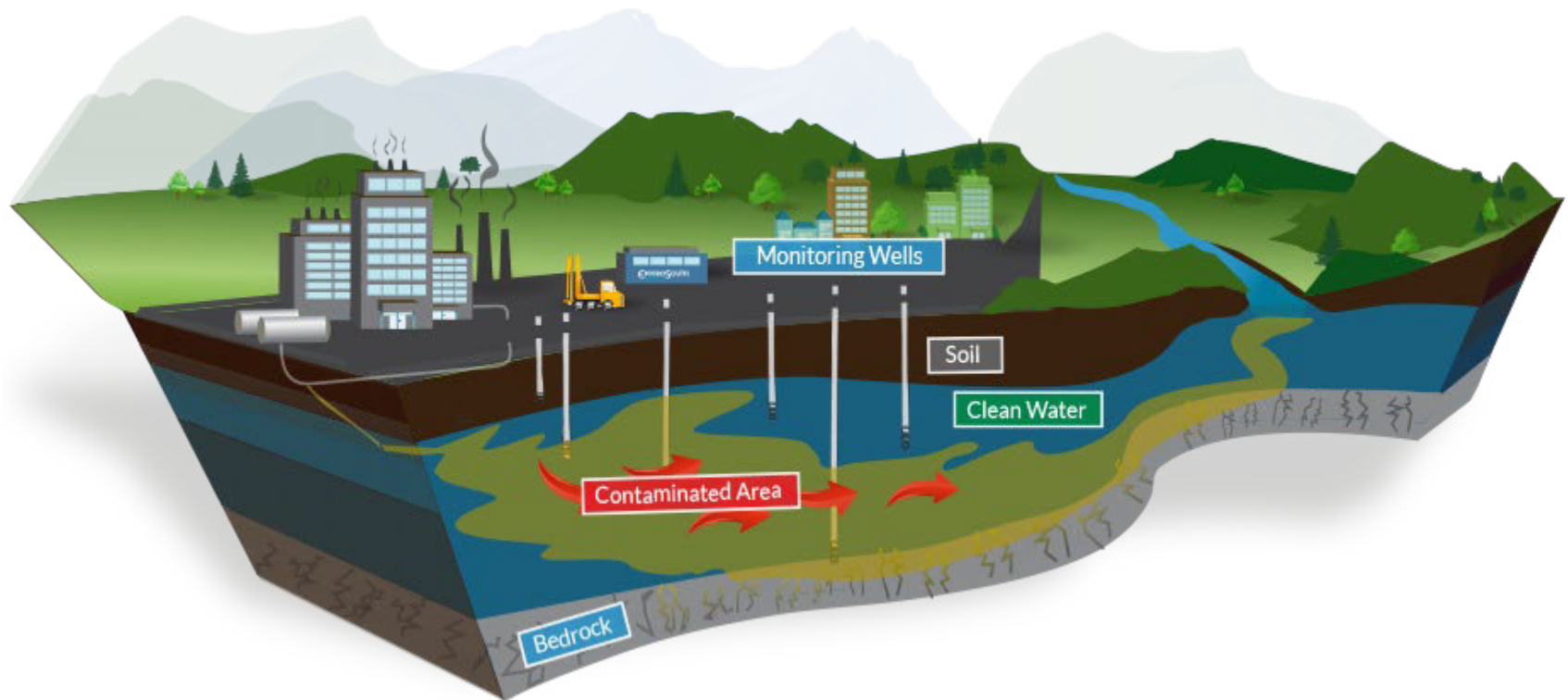




# La Valutazione del Rischio

## *Step 3: stima del fattore di attenuazione naturale*

La stima del Fattore di Attenuazione avviene attraverso **modelli matematici** che simulano i fenomeni di trasporto e degradazione degli inquinanti nelle diverse matrici ambientali (**modelli F&T**).



# La Valutazione del Rischio

## Step 3: caratterizzazione della popolazione esposta

Caratteristiche popolazione	Età popolazione		
	< 6 anni	6 - 12 anni	adulti
Peso [kg]	16	29	70
Superficie corporea [cm <sup>2</sup> ]	6.980	10.470	18.150
Vita media [anni]	70	70	70
Tasso di inalazione [m <sup>3</sup> /h]	0,25	0,46	0,83
Periodo di esposizione [anni]	5	6	58
Superficie corporea esposta per contatto dermico [%]	20	20	10
Dose terreno ingerito accidentalmente [mg/d]	200	100	50
Durata di inalazione polveri [h/d]			
➤ Residenti e passanti	12	12	12
➤ Lavoratori	-	-	8
Frequenza di contatto con il terreno [d/anno]			
➤ Residenti e passanti	330	330	330
➤ Lavoratori	-	-	260
Durata contatto con il terreno [h/d]			
➤ Residenti e passanti	12	8	8
➤ Lavoratori	-	-	8

# La Valutazione del Rischio

## Step 3: percorsi e durata dell'esposizione

Sorgente	Percorso	Destinazione d'uso dell'area		
		Residenziale	Commerciale o Industriale	Ricreativo
Acque sotterranee	Ingestione	L	-	-
Acque superficiali	Ingestione	L	-	L,C
	Contatto dermico	L	A	L,C
Sedimenti	Contatto dermico	C	A	L,C
Aria	Inalazione contaminanti in fase gassosa	L	A,L	L
	Inalazione di particolato	L	A,L	L
Terreno/Polveri	Ingestione	L,C	A	L,C
	Contatto dermico	L,C	A	L,C
Cibo	Ingestione	L	-	-

L: esposizione per tutta la vita

C: esposizione maggiore nei bambini

A: elevata esposizione possibile in attività lavorative

# Stima della dose di contaminante per diversi percorsi di esposizione

Inalazione di polveri contaminate o di contaminanti in fase vapore	$INH = \frac{C_a \cdot IR \cdot RR \cdot ABS_s \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$
Ingestione di acque destinate al consumo umano	$ING = \frac{C_w \cdot IR \cdot FI \cdot ABS_s \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$
Ingestione di acque balenabili	$ING = \frac{C_w \cdot CR \cdot ABS_s \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$
Ingestione di alimenti contaminati	$ING = \frac{C_f \cdot IR \cdot CF \cdot ABS_s \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$
Ingestione accidentale di terreno	$ING = \frac{C_s \cdot SIR \cdot CF \cdot ABS_s \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$
Contatto epidermico	$DEX = \frac{C_s \cdot CF \cdot SA \cdot AF \cdot ABS_s \cdot SM \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$

- INH, ING, DEX dose inalata, ingerita e assorbita mg/(kg·d);
- $C_a$ ,  $C_w$ ,  $C_s$ ,  $C_f$  concentrazione degli inquinanti nel particolato o in fase vapore, ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), nell'acqua ( $\text{mg}/\text{L}$ ), nel terreno ( $\text{mg}/\text{kg}$ ), negli alimenti ( $\text{mg}/\text{kg}$  oppure  $\text{mg}/\text{L}$ );
- IR tasso di inalazione ( $\text{m}^3/\text{ore}$ ) ovvero portata ingerita ( $\text{L}/\text{h}$ );
- CR, portata ingerita accidentalmente,  $\text{L}/\text{h}$ ;
- SIR, tasso di ingestione accidentale del terreno,  $\text{mg}/\text{d}$ ;
- RR, tasso di detenzione dell'aria inalata, %;
- ABS<sub>s</sub>, tasso di assorbimento nel sangue ovvero fattore di biodisponibilità gastrointestinale ovvero fattore di assorbimento della pelle per i contaminanti nel terreno (%);
- FI, frazione ingerita dalla sorgente contaminata (adimensionale);
- CF, fattore di conversione,  $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/\text{mg}$ .
- SA, superficie della pelle esposta al contatto,  $\text{cm}^2$ ;
- AF, fattore di aderenza alla pelle del terreno,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;
- SM, fattore di attenuazione della matrice solida (%).

# La Valutazione del Rischio

## Step 4: la caratterizzazione del rischio

### *Rischio indotto dall'assunzione di sostanze cancerogene*

$$TR = CDI \cdot SF$$

dove:

- ✓ CDI, è l'assunzione cronica giornaliera è espressa in mg/(kg·d);
- ✓ SF, *slope factor*, rappresenta la pendenza del tratto rettilineo della curva dose risposta.

Il rischio ritenuto accettabile è generalmente assunto pari a  $10^{-6}$ , corrispondente ad un evento negativo per milione di individui esposti.

### *Rischio indotto dall'assunzione di sostanze non cancerogene*

$$HI = CDI/Rfd$$

dove:

- ✓ CDI, è l'assunzione cronica giornaliera è espressa in mg/(kg·d);
- ✓ RfD, *reference dose*, è la concentrazione soglia di riferimento.

Il rischio è ritenuto accettabile se inferiore o uguale a **1**.

# La Valutazione del Rischio

## Step 4: la valutazione del rischio totale

La valutazione del rischio totale consente, oltre che di stimare il rischio associato alla presenza contemporanea di più contaminanti riferita a diverse vie di esposizione, di valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti in relazione alle approssimazioni effettuate nel corso dell'analisi.

$$TCR = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n (CDI_{ij} \cdot SF_{ij})$$

*contaminanti cancerogeni*

$$THI = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^m \left( \frac{CDI_{ij}}{RfD_{ij}} \right)$$

*contaminanti non cancerogeni*

dove:

- ✓ ***n*** numero complessivo di contaminanti cancerogeni;
- ✓ ***m*** numero complessivo di contaminanti non cancerogeni;
- ✓ ***p*** numero totale di percorsi di esposizione.

# La Valutazione del Rischio

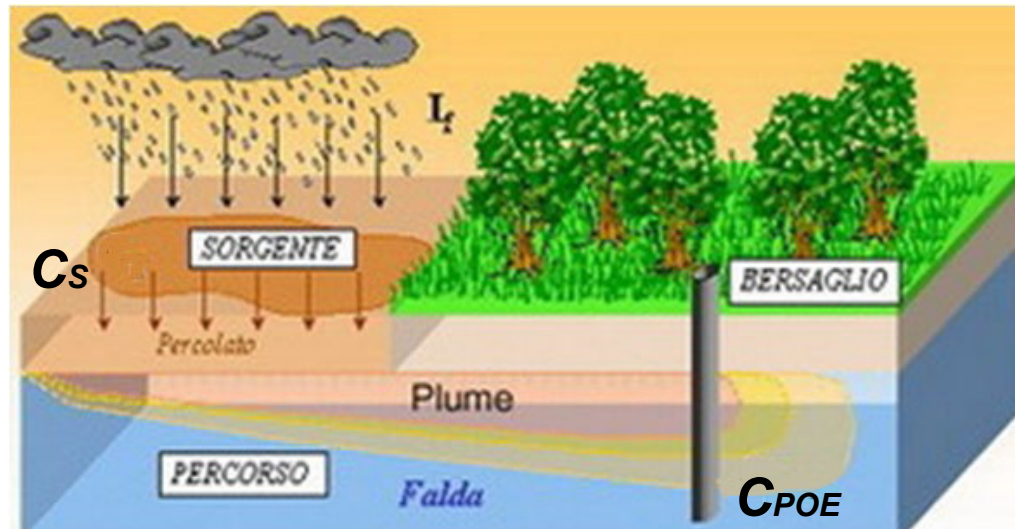
## *Step 4: analisi delle incertezze*

Fase	Fonte di incertezza
Identificazione del rischio	Scelta degli agenti chimici responsabili della contaminazione e/o loro incompleta caratterizzazione.
Valutazione dose-risposta	Definizione di SF e RfD per i contaminanti individuati.
Valutazione dell'esposizione	Valutazione dei rilasci degli agenti chimici nei diversi comparti ambientali e dei fattori di attenuazione conseguenti ai percorsi di esposizione (applicazione dei modelli F&T). Stima dei parametri per il calcolo dell'assunzione cronica giornaliera (CDI).
Caratterizzazione del rischio	Ipotesi di effetto additivo tra i contaminanti in presenza di miscele di inquinanti.

# L'applicazione dell'Analisi di Rischio

## *Modalità diretta (Forward mode)*

Stima del rischio sanitario a cui è esposto un potenziale bersaglio (sia on-site che off-site), conoscendo la concentrazione alla sorgente di contaminazione.





# L'applicazione dell'Analisi di Rischio

## *Modalità inversa (Backward mode)*

Stima della massima concentrazione ( $C_{max}$ ) alla sorgente compatibile con le condizioni di accettabilità del rischio al potenziale bersaglio esposto e, quindi, calcolo degli **obiettivi di bonifica sito-specifici**

$$C_{max} = \frac{CDI_{max} \cdot BW \cdot AT}{CR \cdot EF \cdot ED}$$

dove:

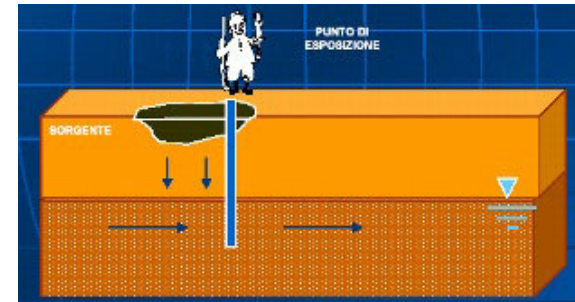
- ✓  $CDI_{max} = TR_{max}/SF$ , con  $TR_{max} = 10^{-6}$  per contaminanti cancerogeni
- ✓  $CDI_{max} = HI_{max}/RfD$ , con  $HI_{max} = 1$  per contaminanti non cancerogeni



# Livelli di analisi

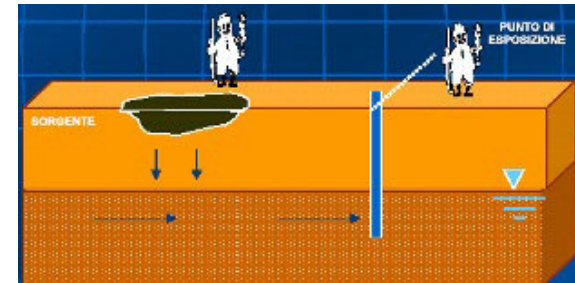
## LIVELLO (TIER) 1: estremamente conservativo

- stima del rischio generico per bersagli on-site;
- la posizione del punto di esposizione coincide con la sorgente di contaminazione;
- si utilizzano dati dei default per i parametri caratteristici del sito



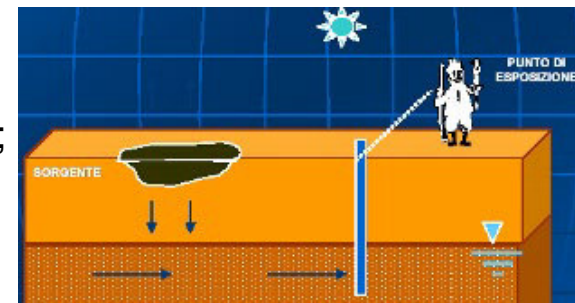
## LIVELLO (TIER) 2: conservativo

- stima del rischio sito-specifico per bersagli on-site e off-site;
- valore di concentrazione in corrispondenza del bersaglio (punto di esposizione);
- dati sito specifici e di esposizione;
- uso di modelli analitici per simulare i fenomeni di trasporto



## LIVELLO (TIER) 3: moderatamente conservativo

- stima del rischio sito-specifico per bersagli on-site e off-site
- valore di concentrazione in corrispondenza del bersaglio (POE);
- dettagliati dati sito specifici e di esposizione;
- uso di modelli numerici e/o statistici per simulare l'eterogeneità del sistema



# Livelli di analisi

**TIER 1**

**TIER 2**

**TIER 3**

**Grado di protezione della salute dell'uomo e dell'ambiente**

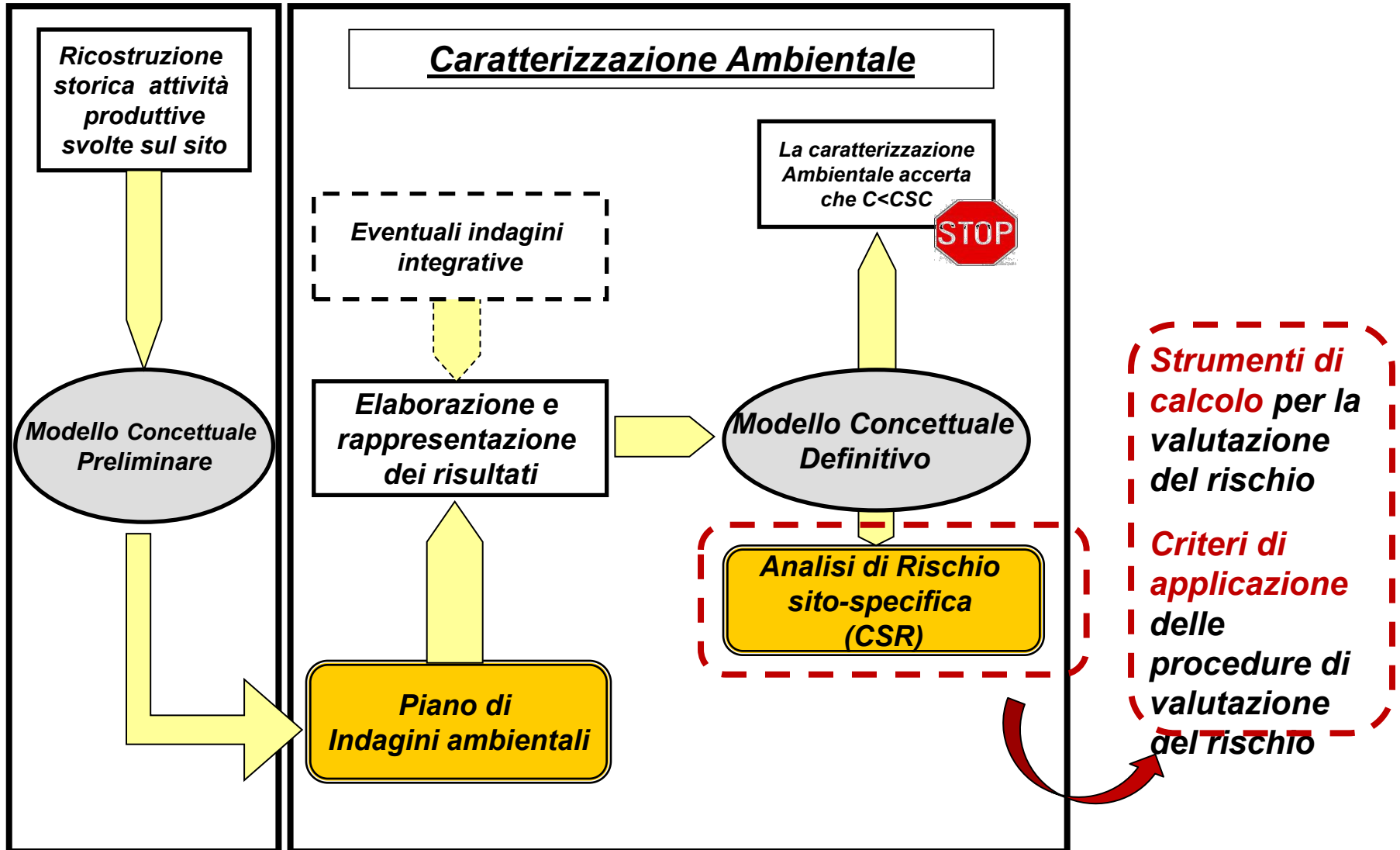
**Numerosità dei dati ed indagini richieste**

**Risorse necessarie**

**Assunzioni conservative**

**Efficacia economica**

# Gli strumenti di calcolo



# L'analisi di rischio ai sensi del D. Lgs. 152/2006

- ✓ L'AdR è lo strumento usato per stabilire se un sito è “**contaminato**” e, dunque tale da rendere necessarie attività di bonifica o di messa in sicurezza permanente. A tale scopo, l'AdR definisce gli **obiettivi di risanamento**
- ✓ È **sito-specifica** ed applicata in modalità **inversa**, imponendo come rischio incrementale accettabile:
  - 10<sup>-6</sup>** per le sostanze cancerogene
  - 1** per la sostanze non cancerogene.
- ✓ Il D.lgs 152/06 non indica una specifica procedura di AdR da utilizzare, limitandosi a definire i criteri secondo cui applicare la procedura di analisi.
- ✓ L'APAT ha pubblicato le linee guida per la predisposizione dell'AdR "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati"

# L'analisi di rischio ai sensi del D. Lgs. 152/2006

- ✓ Nell'allegato 1 al Titolo V, Parte IV, del D.Lgs. 152/2006 sono riportati i “***Criteri generali per l'analisi di rischio sanitario ambientale***”.
- ✓ Nel rispetto di tali criteri, l'analisi di rischio sanitario-ambientale:
  - considera la componente probabilistica del rischio.
  - si fonda su criteri di conservatività (principio di cautela intrinseco nella procedura di AdR).
  - richiede cura nella scelta dei parametri sito-specifici.
  - considera, ai fini dell'individuazione e dell'analisi dei possibili percorsi di esposizione, dei bersagli, nonché nella definizione degli obiettivi di bonifica, la destinazione d'uso (presente e futura) del sito.

# La valutazione del rischio

- ✓ La valutazione del rischio (o **Risk Assessment**) viene definita come “*processo sistematico per la stima di tutti i fattori di rischio significativi che intervengono in uno scenario di esposizione causato dalla presenza di pericoli*”.
- ✓ Il punto di partenza per l'applicazione dell'analisi di rischio è lo sviluppo del **Modello Concettuale del Sito** (MCS), basato sull'individuazione e parametrizzazione dei 3 elementi principali: sorgente, percorsi di migrazione degli inquinanti e bersagli.
- ✓ Infine, per il calcolo del rischio assoluto, si utilizzano degli **strumenti di calcolo**, basati su **modelli matematici** utilizzati per descrivere il comportamento di un contaminante e prevederne gli effetti indotti sul comparto ambientale di interesse.
- ✓ Qualsiasi sia il modello scelto, il primo requisito che dovrebbe garantire è l'adesione a **criteri scientificamente riconosciuti** a livello internazionale e **metodiche standardizzate**.

# Gli strumenti di calcolo

- ✓ In base al metodo usato per la risoluzione delle equazioni si distinguono:
  - **Modelli analitici:** sono più semplici da trattare ma presuppongono alcune semplificazioni del modello fisico per quanto concerne le caratteristiche del mezzo (considerato omogeneo e isotropo), la geometria della sorgente inquinante e le condizioni al contorno.
  - **Modelli numerici:** consentono di considerare l'eterogeneità del sistema e di generalizzare la geometria della sorgente inquinante e delle condizioni al contorno; per contro la loro applicazione richiede una maggiore conoscenza del sistema fisico e, conseguentemente, una fase di *site assessment* più approfondita.
- ✓ La **complessità** degli strumenti di calcolo può essere descritta, inoltre, sulla base dei seguenti fattori:
  - dimensioni del modello;
  - tipo di analisi e gestione delle incertezze;
  - possibilità di applicazione.





# Gli strumenti di calcolo

## *Dimensioni del modello*

Per ogni percorso di migrazione/esposizione sono disponibili modelli fate and transport (F&T) in 1,2,3 dimensioni.

### ✓ **Modelli 1D**

Ignorano gli effetti della dispersione laterale e verticale e possono facilmente indurre a una sovrastima dei livelli di esposizione e a una sottostima dei fattori di attenuazione naturale lungo il percorso.

### ✓ **Modelli 3D**

Possono fornire una valutazione più accurata e meno conservativa dei processi di migrazione, ma devono essere alimentati da una caratterizzazione tridimensionale dei parametri di trasporto.

# Gli strumenti di calcolo

## *Tipo di analisi*

### ✓ **Modelli stazionari**

Assumono una concentrazione costante della sorgente e delle condizioni di flusso nel tempo di tipo stazionario. Pertanto, forniscono una stima conservativa, corrispondente a condizioni croniche di massima esposizione.

### ✓ **Modelli transitori**

Simulano sia concentrazioni variabili della sorgente sia processi di trasporto variabili nel tempo.

### ✓ **Modelli deterministici**

Forniscono un solo valore di output per ogni set di dati in input e consentono di valutare l'incertezza mediante analisi di sensitività.

### ✓ **Modelli probabilistici**

Forniscono come risultato finale una distribuzione probabilistica che definisce il range dei risultati per le specifiche condizioni di sito. L'incertezza viene tenuta in conto mediante tecniche del tipo metodo Monte Carlo.

# Gli strumenti di calcolo

## *Possibilità di applicazione*

- ✓ I modelli di calcolo possono fornire una **valutazione diretta** (forward) per determinare il rischio associato a un determinato sito e/o una **valutazione inversa** (backward) per determinare gli obiettivi della bonifica.
- ✓ Generalmente **l'applicazione inversa** dei modelli viene utilizzata in modo diffuso in Europa secondo due modalità:
  - **modalità generica**, con percorsi di esposizione tipici e l'uso di valori generici, per la definizione dei cosiddetti valori di screening presenti nelle normative;
  - **modalità sito-specifica**, **prevista dalla normativa italiana**, per valutare l'accettabilità di concentrazioni residuali dei contaminanti ovvero per definire gli obiettivi della bonifica.

# Gli strumenti di calcolo

## *Software utilizzati in Italia*

In ambito nazionale ed internazionale esistono diversi software per la conduzione di analisi di rischio di livello 2. Quelli principalmente utilizzati in Italia sono:

- ✓ **RBCA** (Risk Based Corrective Actions ) Tool Kit for Chemical Releases;
- ✓ **RISC** (Risc Integrated Software for Clean-up);
- ✓ **ROME** (ReasOnable Maximum Exposure);
- ✓ **GIUDITTA** (Gestione Informatizzata di Tollerabilità Ambientale);
- ✓ **RISK-NET** , sviluppato su iniziativa dell'Università di Roma "Tor Vergata".

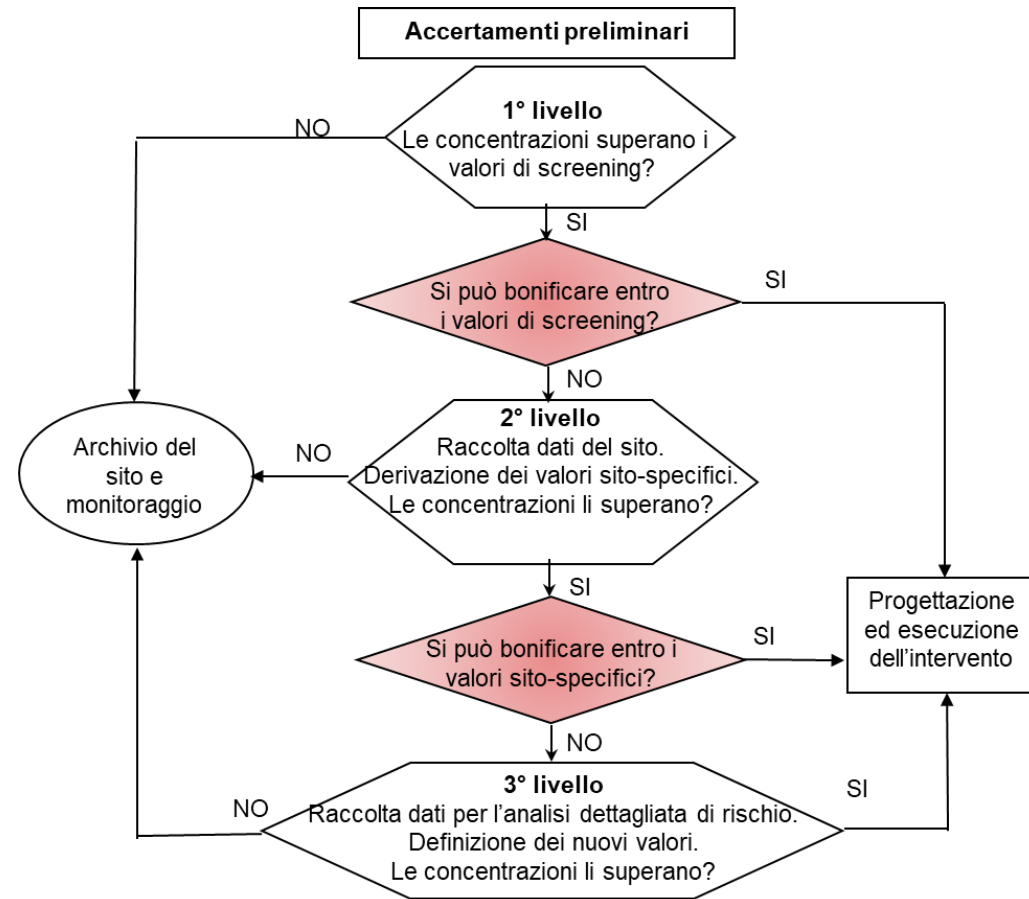
A tali modelli del tutto generici, vanno aggiunti quelli definiti per specifiche situazioni di contaminazione (es. *LandSim* e *GasSim* della Golder Associates per le discariche).

Le principali differenze tra i modelli descritti sono legate alle banche dati utilizzate e alla gestione di tali dati (per un fissato inquinante, possibilità di inserire solo un valore di concentrazione o tutti i dati analitici, anche ripartiti per aree, con la possibilità di effettuare elaborazioni statistiche degli stessi).

# Gli strumenti di calcolo

## RBCA

- ✓ Il codice RBCA, elaborato negli Stati Uniti da un gruppo di lavoro coordinato da ASTM e composto da rappresentanti dell'industria petrolifera, società bancarie ed ambientali, nasce come una guida tecnica per gli interventi di risanamento dei siti contaminati da idrocarburi.
- ✓ La nuova versione, aggiornata ed integrata, è riportata nella guida ASTM, PS104-98 e riguarda il rilascio di sostanze chimiche in generale.
- ✓ La **procedura** RBCA dell'ASTM è basata su di un approccio graduale (tiered) alla valutazione del rischio e dell'esposizione, nel quale ogni gradino (tier) corrisponde ad un diverso livello di complessità e di conservatività.



[ASTM PS 104-98]

# Gli strumenti di calcolo

## *I livelli di analisi nell'ambito della procedura RBCA*

### **LIVELLO 1**

- confronto tra le concentrazioni dei contaminanti (C) e gli RBSL (Risk Based Screening Level) determinati sulla base di valori disponibili in letteratura o di parametri standard;
- se  $C > \text{RBSL}$  e gli RBSL costituiscono obiettivi di bonifica non praticabili si passa al livello 2 ovvero si procede alla bonifica del sito per portare i valori di concentrazione al di sotto degli RBSL.

### **LIVELLO 2**

- calcolo delle concentrazioni residue ammissibili (tier 2 - SSTL - Site Specific Target Level);
- se  $C > \text{tier 2-SSTL}$  e i tier 2-SSTL costituiscono obiettivi di bonifica non praticabili si passa al livello 3 ovvero si procede alla bonifica del sito per portare i valori di concentrazione al di sotto degli SSTL.

### **LIVELLO 3**

- calcolo delle concentrazioni residue ammissibili (tier 3 - SSTL);
- se  $C > \text{tier 3-SSTL}$  si passa al progetto di bonifica.

# Gli strumenti di calcolo

## *Il software RISC*

- ✓ Il codice RISC è stato sviluppato dalla British Petroleum (BP Oil Europe) e deriva dallo standard RBCA, secondo un processo a più livelli.
- ✓ Tra gli *elementi peculiari* del modello vi sono:
  - presenza di diversi algoritmi di trasporto sia di tipo stazionario che transitorio;
  - uso di tecniche di analisi probabilistiche (metodo Monte Carlo);
  - possibilità di valutazione sia del rischio individuale che additivo dovuto a percorsi e composti multipli, ma anche a recettori multipli.

# Gli strumenti di calcolo

## *Il software ROME*

- ✓ Il codice ROME deriva da un progetto avviato dall'ANPA nel 1997 per l'elaborazione di una metodologia di analisi di rischio e limiti di accettabilità generici della contaminazione nei suoli e nelle acque sotterranee.
- ✓ Esso rappresenta un'edizione semplificata della procedura RBCA, di cui recepisce sia l'approccio graduale che diversi algoritmi di calcolo.
- ✓ Il processo decisionale per la valutazione dei siti contaminati si articola in due fasi:
  - **Analisi di rischio di I livello**, che prevede il confronto con i limiti tabellari o con i LAG (Limiti di Accettabilità Generici);
  - **Analisi di rischio di II livello**, con il calcolo degli obiettivi sito-specifici (LAS -Limiti di Accettabilità Specifici).



# Gli strumenti di calcolo

## *Il software ROME*

Tra gli ***elementi peculiari*** del modello vi sono:

- ✓ calcolo del rischio nel modo “forward” e degli obiettivi di bonifica nel modo “backward”;
- ✓ l’AdR e gli obiettivi di bonifica sono valutati per le destinazioni d’uso commerciale/industriale e residenziale/ricreativo;
- ✓ i LAG sono calcolati applicando la metodologia dell’analisi di rischio ad un modello concettuale generico e conservativo;
- ✓ il livello 2 è consecutivo al livello 1 e viene eseguito se la contaminazione osservata supera i valori del livello 1;
- ✓ la presenza di più percorsi di esposizione attivi sul sito viene considerata sommando l’esposizione dovuta a tutti i percorsi (algoritmo CONCAWE) e ricavando il limite che rende accettabile tale esposizione;
- ✓ in presenza di più sostanze si può calcolare sia il rischio cumulativo che gli obiettivi di bonifica.

# Gli strumenti di calcolo

## *Il software GIUDITTA*

- ✓ Il codice GIUDITTA (*Gestione Informatizzata DI Tollerabilità Ambientale*) rappresenta una metodologia informatizzata decisionale per l'applicazione di procedure di analisi di rischio a siti oggetto di contaminazione.
- ✓ Il codice, basato sugli standard ASTM, traduce il percorso del D.Lgs. 152/06 e, attraverso due livelli di approfondimento (tabellare ed analisi di rischio), permette di individuare con sufficiente semplicità ed in modo univoco, gli obiettivi di bonifica (CSR).
- ✓ Il **software** GIUDITTA© versione 3.2 è strutturato in modo da essere generalmente compatibile con le indicazioni operative di APAT e modificabile per l'assunzione dei parametri dei diversi database di riferimento (ISPESL/ISS/APAT, US/EPA (RAIS), Syracuse Research Corporation, Hazardous Substances Data Bank, GSI.NET, CAL EPA).

# Gli strumenti di calcolo

## *Il software Risk-net*

- ✓ La Rete Reconnet, ovvero la Rete Nazionale sulla gestione e la Bonifica dei Siti Contaminati, ha prodotto il software Risk-net, sviluppato su iniziativa del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica dell'Università di Roma "Tor Vergata".
- ✓ Tale strumento ricalca la procedura APAT-ISPRA di **Analisi di Rischio** di cui ai "**Criteria metodologici l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati**" (APAT, 2008) a sua volta coerente con gli indirizzi della normativa italiana vigente, D.Lgs. 152/06 che, all'All. 1 alla Parte IV, Titolo V, definisce i Criteri generali per l'applicazione dell'analisi di rischio sanitario-ambientale sito-specifica.

*[http://www.reconnet.net/Risknet\\_download.html](http://www.reconnet.net/Risknet_download.html)*

# Software a confronto

## *Le sorgenti*

RBCA	ROME	RISC	GIUDITTA	RISK-NET
- Terreno superficiale - Terreno profondo - Fase disciolta in falda - Fase separata (prodotto libero)	- Suolo superficiale - Suolo profondo - Falda - Prodotto libero	- Suolo - Falda - Acqua superficiale - Aria outdoor - Aria indoor	- Suolo superficiale - Suolo profondo - Falda - Prodotto libero	- Suolo superficiale - Suolo profondo - Falda

- ✓ Tutti i modelli considerano tra le sorgenti il suolo e la falda, anche se RISC non distingue tra suolo superficiale e profondo; ROME e GIUDITTA considerano anche la sorgente *prodotto libero*;
- ✓ RISC include tra le sorgenti l'aria indoor e l'aria outdoor; gli altri modelli, pur non avendo queste sorgenti, *considerano comunque nel trasporto l'inalazione di vapori indoor e outdoor*; nella versione più recente, Risk-net consente l'utilizzo di dati derivanti dal monitoraggio in campo dell'aria;
- ✓ RISC considera anche l'acqua superficiale come possibile sorgente.

# Software a confronto

## Le vie di esposizione

	RBCA	RISC	ROME	GIUDITTA	RISKNET
<b>Ingestione e contatto dermico con il suolo</b>	√	√	√	√	√
<b>Contatto dermico con acqua di falda</b>		√			√
<b>Contatto dermico con acqua superf.</b>	√	√			
<b>Inalazione indoor e outdoor</b>		di vapori	<ul style="list-style-type: none"> <li>• di polveri dal suolo</li> <li>• di vapori da suolo/falda/prodotto libero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• di polveri dal suolo</li> <li>• di vapori da suolo/falda/prodotto libero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• di polveri dal suolo</li> <li>• di vapori da suolo/falda</li> </ul>
<b>Dilavamento dal suolo verso la falda</b>	Per valutare il rischio di ingestione di acqua di falda		Per valutare il rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>• della falda;</li> <li>• per le acque superf.</li> </ul>	Per valutare il rischio della falda	√
<b>Ingestione acqua di falda</b>	√	√			√
<b>Ingestione di acqua superficiale</b>	√	√ (e inalazione tramite doccia di acqua di falda)			

# Software a confronto

## *I bersagli della contaminazione*

	RBCA	RISC	ROME	GIUDITTA	RISKNET
Uomo					
<i>Bambini/adulti/lavoratori</i>	√	√	√	√	√
Risorsa idrica					
<i>Superficiale</i>			√		
<i>Sotterranea</i>			√	√	√

RISC permette di considerare valori di esposizione stocastici oppure deterministici e, in quest'ultimo caso, di riferirsi a bersagli "RME" (Reasonable Maximum Exposure) o a bersagli "typical".

# Software a confronto

## *Il calcolo del rischio*

	RBCA	RISC	ROME	GIUDITTA	RISKNET
<b>Rischio per Sostanze Cancerogene</b>	√	√	√	√	√
<b>Rischio per Sostanze non Cancerogene</b>	√	√	√	√	√
<b>Rischio individuale (per singola sostanza e tutti i percorsi di esposizione)</b>	√	√	√	√	√
<b>Rischio cumulato (per tutte le sostanze e tutti i percorsi di esposizione )</b>	√	√	√	√	√
<b>Rischio per la risorsa idrica sotterranea</b>			√	√	√
<b>Rischio per la risorsa idrica superficiale</b>			√	√	

# Criteri di applicazione AdR

L'esigenza di ***standardizzare*** gli approcci utilizzati a livello nazionale ai fini della valutazione del rischio sanitario ambientale associato alla contaminazione delle matrici ambientali ha portato l'ISPRA (ex APAT) ad istituire un gruppo di lavoro "ad hoc" finalizzato ad elaborare le linee guida per:

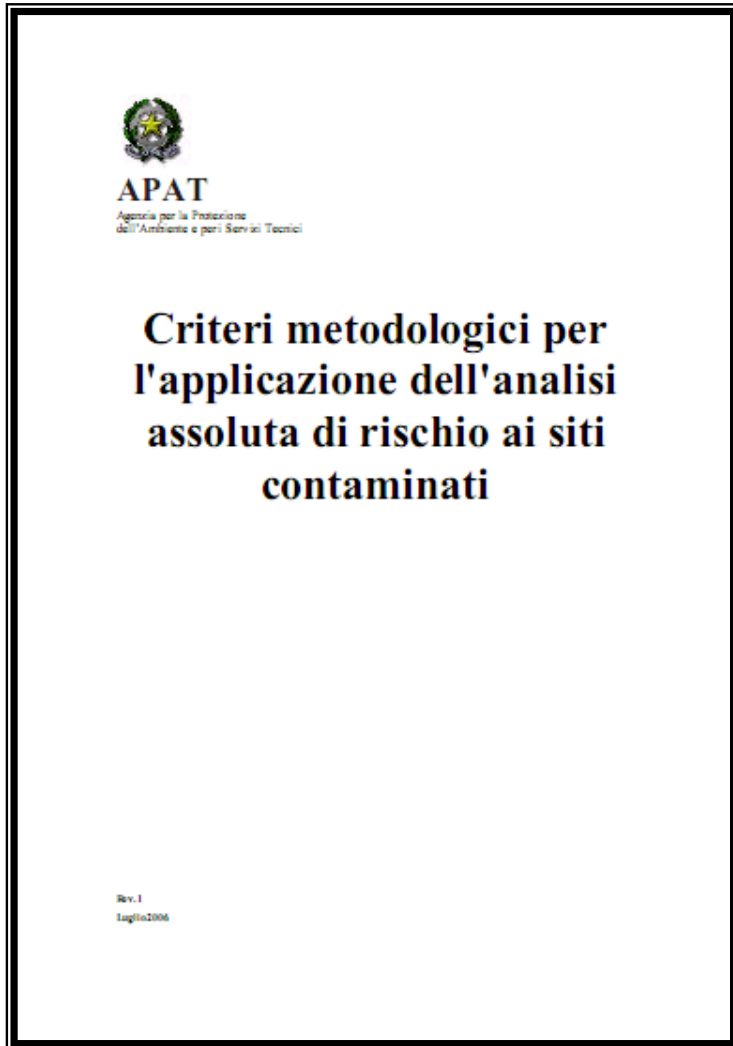
- ✓ *l'applicazione dell'Analisi del Rischio assoluta;*
- ✓ *validare i modelli e le procedure elaborate;*
- ✓ *produrre un documento di riferimento per tutti gli operatori del settore;*
- ✓ *favorire un approccio omogeneo su tutto il territorio nazionale.*



**ISPRA**  
Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale



# Criteri di applicazione AdR



- Il primo documento predisposto dal gruppo di lavoro è il manuale “***Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati***” pubblicato dall'APAT nel 2005.
- A seguito dell'entrata in vigore del D.Lgs. 152/2006 è stato necessario integrare ed aggiornare i contenuti del manuale. Nel marzo 2009 è stata pubblicata la revisione 2.

[www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it)

# Criteria di applicazione AdR

La metodologia ISPRA è riferita ad un'**analisi di livello II**, che consente la *stima del rischio sito-specifico per bersagli on-site e off-site*. In particolare, l'AdR di livello II utilizza *modelli analitici* per stimare il *valore di concentrazione al punto di esposizione* nell'ipotesi di mezzo omogeneo e isotropo.

## **Obiettivo**

Ridurre le numerose aleatorietà presenti nell'applicazione dell'AdR ai siti contaminati.

## **Gli elementi sostanziali del documento**

- ✓ Analisi dello stato dell'arte in materia;
- ✓ Indicazione delle equazioni da utilizzare in ogni fase della procedura;
- ✓ Definizione dei criteri di scelta dei parametri di input;
- ✓ Applicazione del principio del *reasonable worst case* (il peggiore scenario di rischio ragionevolmente possibile).

# Criteri di applicazione AdR

## *Modello concettuale del sito*

Il documento ISPRA fornisce i criteri per elaborare il *Modello Concettuale Sito-Specifico* (MCS) e definire, pertanto, ***sorgente di contaminazione, vie di migrazione e bersagli.***

Va sottolineato che:

- ✓ solo la presenza contemporanea di questi tre elementi determina la presenza di un rischio;
- ✓ la gestione/riduzione del rischio consiste nell'eliminazione/interruzione di uno o più dei tre elementi S-P-R.

I documenti inerenti l'applicazione dell'Analisi di Rischio per i siti contaminati devono riportare una chiara rappresentazione del MCS sulla base delle risultanze della caratterizzazione effettuata

# Criteria di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione*

- La sorgente di contaminazione si differenzia in:
  - **Sorgente primaria:** rappresentata dall'elemento che è causa di inquinamento (es. accumulo di rifiuti, sversamento di prodotti tossici).
  - **Sorgente secondaria:** viene identificata con il comparto ambientale oggetto di contaminazione (suolo, acqua, aria).
- In accordo agli standard di riferimento, la procedura di AdR si applica alla sola sorgente secondaria di contaminazione, di cui occorre schematizzare la **geometria**. A tal fine, occorre considerare che la sorgente secondaria di contaminazione può trovarsi a sua volta in:
  - **zona insatura**, classificabile come suolo superficiale (SS), compreso tra 0 e 1 m di profondità e suolo profondo (SP), con profondità superiore a 1 m dal piano campagna
  - **zona satura**, o acqua sotterranea.

# Criteria di applicazione AdR

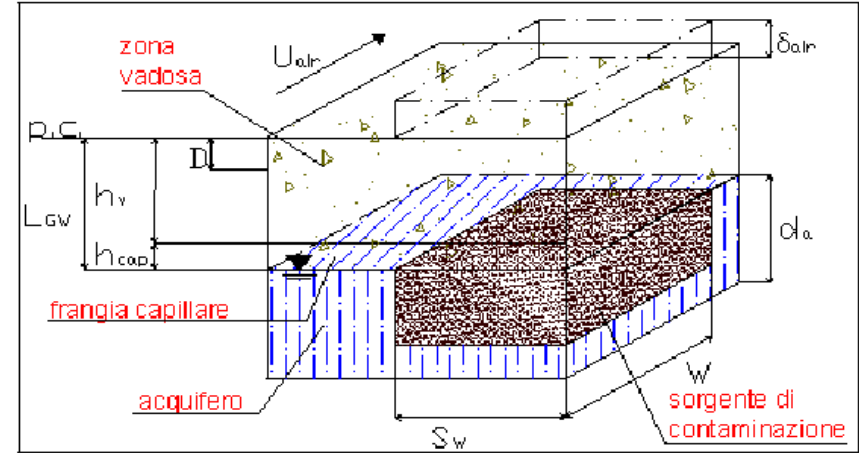
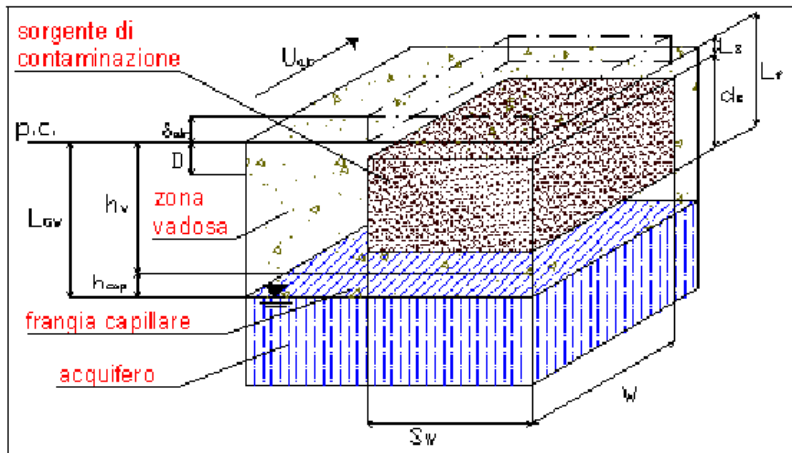
## *Sorgente di contaminazione*

La schematizzazione del sito e della sorgente di contaminazione ai fini dell'analisi di rischio comprende le seguenti informazioni minime:

- ✓ ubicazione (su apposita planimetria), dimensioni (parametri geometrici) e caratteristiche della/e sorgente/i (coordinate geo-riferite dei punti di campionamento e i relativi superamenti delle CSC)
- ✓ indicazione della tipologia di contaminazione (omogenea, puntiforme, a macchia di leopardo)
- ✓ dati analitici relativi alle caratteristiche della sorgente (concentrazioni di inquinanti misurate in tutti i punti di indagine relativi alla sorgente identificata, parametri chimico-fisici relativi alla sorgente, parametri geologici ed idrogeologici relativi alla sorgente, informazioni relative alla qualità dei dati misurati, risultati di eventuali controanalisi effettuate dagli Enti di Controllo)
- ✓ giustificazione della eventuale suddivisione in sub-aree di un sito di grandi dimensioni
- ✓ identificazione degli inquinanti indicatori e parametri chimico-fisici e tossicologici dei contaminanti
- ✓ procedura e calcoli relativi alla determinazione della concentrazione rappresentativa della sorgente

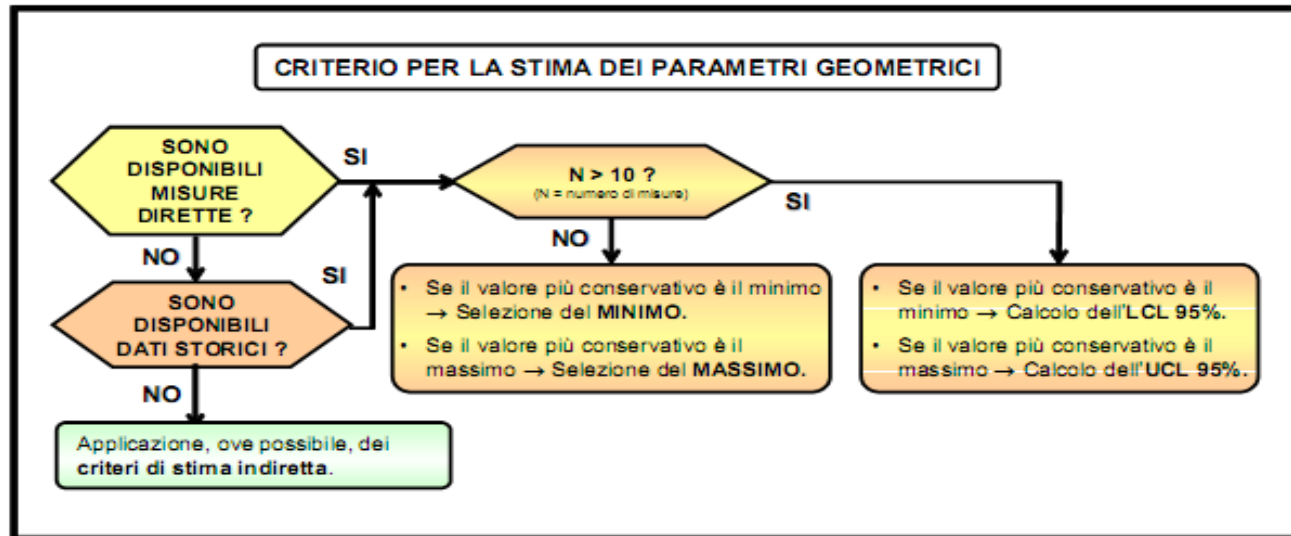
# Criteri di applicazione AdR

## Sorgente di contaminazione



Suolo insaturo (superficiale e profondo)

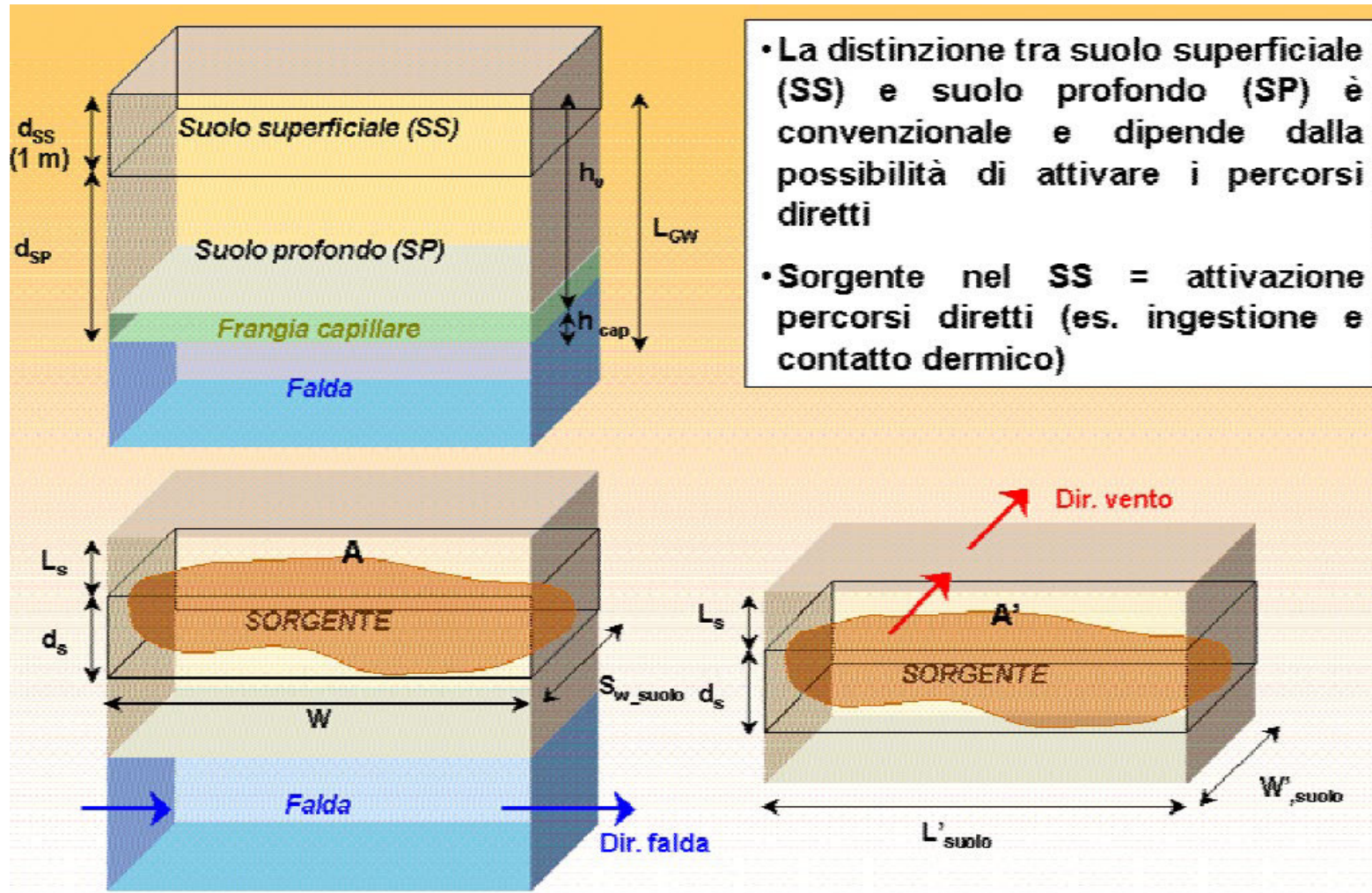
Suolo saturo (acqua di falda)





# Criteri di applicazione AdR

## Sorgente di contaminazione in zona insatura



# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione in zona insatura*

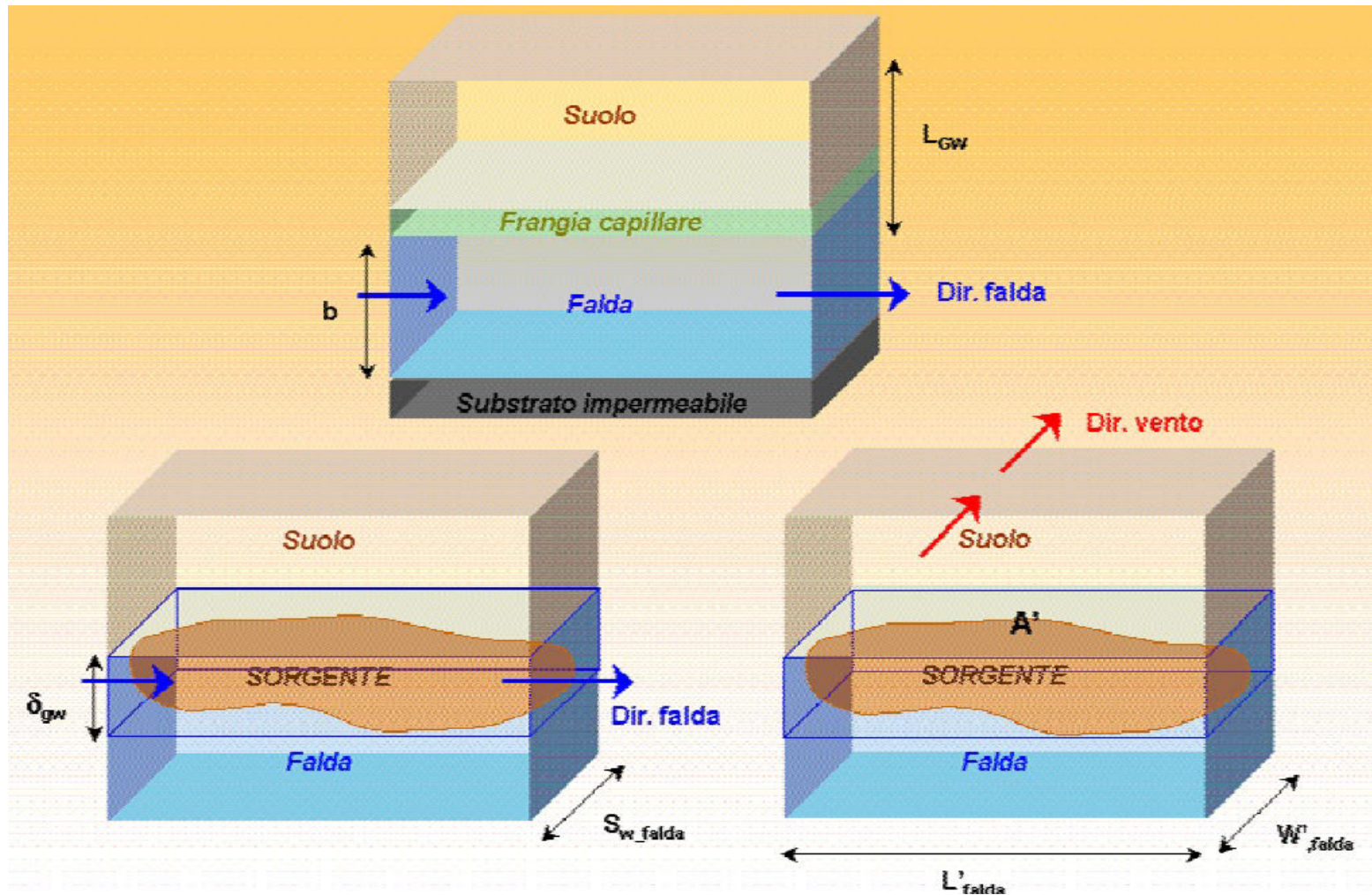
Simbolo	Parametro	Determinazione
<b>Parametri geometrici della sorgente di contaminazione nel suolo</b>		
<b>W (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo parallela al flusso di falda	<i>Stima sulla base della distribuzione spaziale della contaminazione e della direzione del flusso di falda</i>
<b>S<sub>w_suolo</sub> (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo perpendicolare al flusso di falda	
<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	Area della sorgente rispetto al flusso di falda	
<b>W'<sub>suolo</sub> (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo parallela al flusso del vento	<i>Stima sulla base della distribuzione spaziale della contaminazione e della direzione prevalente del vento</i>
<b>L'<sub>suolo</sub> (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo perpendicolare al flusso del vento	
<b>A' (cm<sup>2</sup>)</b>	Area della sorgente rispetto alla direzione del vento	
<b>L<sub>s_ss</sub>(cm)</b>	Profondità del top della contaminazione nel suolo superficiale rispetto al p.c.	<i>Stima sulla base della distribuzione verticale della contaminazione</i>
<b>L<sub>s_sp</sub>(cm)</b>	Profondità del top della contaminazione nel suolo profondo rispetto al p.c.	
<b>d<sub>s_ss</sub>(cm)</b>	Spessore di suolo contaminato nel suolo superficiale	
<b>d<sub>s_sp</sub>(cm)</b>	Spessore di suolo contaminato nel suolo profondo	

Simbolo	Parametro	Determinazione
<b>Parametri geometrici della zona insatura</b>		
<b>d<sub>ss</sub> (cm)</b>	Spessore del suolo superficiale	<i>Fissato pari ad 1 m</i>
<b>d<sub>sp</sub> (cm)</b>	Spessore del suolo profondo	<i>Stima sulla base della stratigrafia</i>
<b>h<sub>v</sub> (cm)</b>	Spessore della zona insatura	
<b>h<sub>cap</sub>(cm)</b>	Spessore della frangia capillare	
<b>L<sub>GW</sub>(cm)</b>	Profondità della falda superficiale dal piano campagna	



# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione in zona satura*



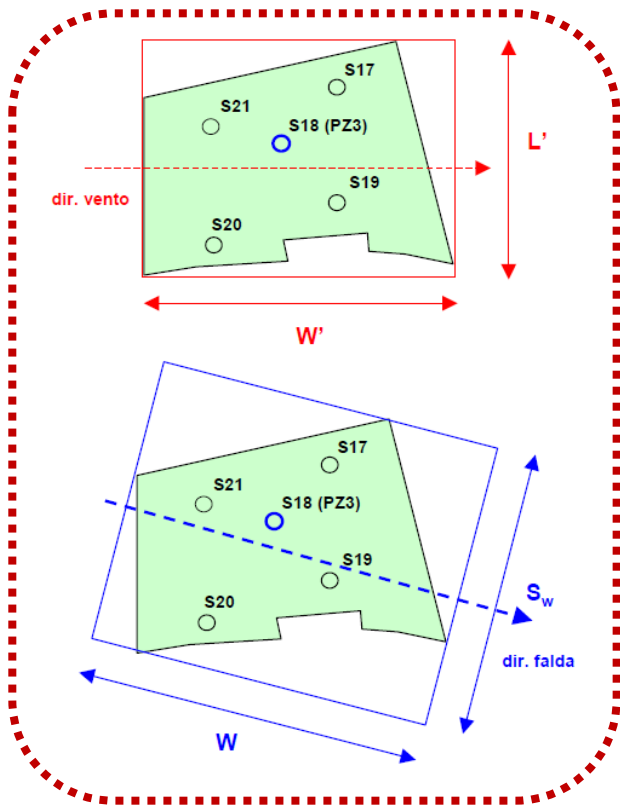
# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione in zona satura*

Simbolo	Parametro	Determinazione
<b>Parametri geometrici della zona satura</b>		
<b>b</b>	Spessore dell'acquifero	<i>Stima sulla base della stratigrafia</i>
<b>Parametri geometrici della sorgente di contaminazione in falda</b>		
<b>S<sub>w_falda</sub> (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo perpendicolare al flusso di falda	<i>Stima sulla base della distribuzione spaziale della contaminazione e della direzione del flusso di falda</i>
<b>W'<sub>falda</sub> (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo parallela al flusso del vento	<i>Stima sulla base della distribuzione spaziale della contaminazione e della direzione del vento</i>
<b>L'<sub>falda</sub> (cm)</b>	Lunghezza della sorgente di contaminazione nel suolo perpendicolare al flusso del vento	
<b>A' (cm<sup>2</sup>)</b>	Area della sorgente rispetto alla direzione del vento	
<b>d<sub>gw</sub> (cm)</b>	Spessore della zona di miscelazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Stima diretta nel caso di falda contaminata: distanza tra la superficie piezometrica ed il punto più basso della falda in cui si è riscontrata una contaminazione)</i></li> <li>• <i>Stima indiretta nel caso di falda non contaminata: utilizzo di un'equazione per simulare la lisciviazione dal suolo</i></li> </ul>

# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione: la delimitazione nel suolo*



### **Estensione superficiale (lunghezza e larghezza) della sorgente**

- Si identificano delle aree di influenza in relazione alla strategia di campionamento adottata in fase di indagine, nonché in riferimento a siti interi non suddivisibili in sub-aree oppure alle singole sub-aree di siti di grandi dimensioni.
- L'estensione superficiale è individuata dall'area delimitata dalle maglie più esterne contenenti almeno un punto di campionamento con concentrazione di almeno un contaminante superiore alle CSC.
- La procedura va implementata distintamente per suolo superficiale e profondo.

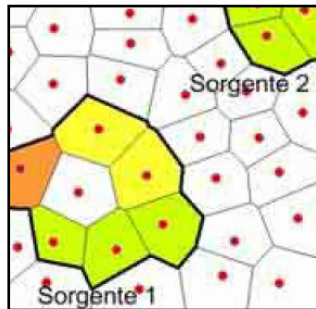
### **Estensione verticale della sorgente**

Si schematizza pari alla differenza tra la minima e massima quota, rispetto al piano campagna, alla quale è stata riscontrata concentrazione di almeno un contaminante superiore alla CSC.

# Criteri di applicazione AdR

## Sorgente di contaminazione: la delimitazione areale

### Campionamento ragionato



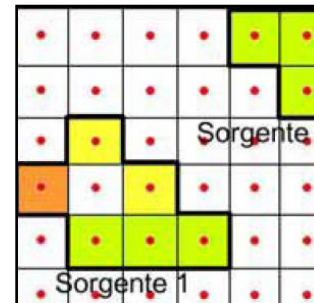
**Sorgenti  
spazialmente  
distinte**



**Tutto il sito  
sorgente**

**Metodo dei poligoni di Thiessen**

### Campionamento sistematico








**Sorgenti  
spazialmente  
distinte**



**Tutto il sito  
sorgente**

**Metodo delle celle a maglia regolare**

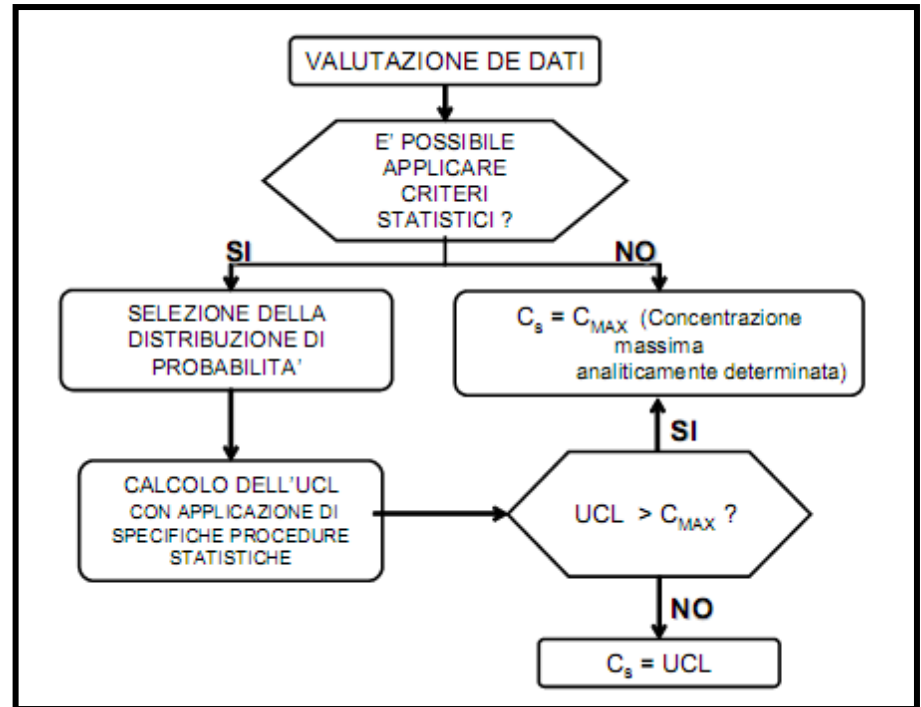
-  Aree con superamento CSC per il contaminante X
-  Aree con superamento CSC per il contaminante Y
-  Aree con superamento CSC per i contaminanti X e Y
-  Aree senza superamento CSC
-  Delimitazione delle sorgenti



# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione: definizione della concentrazione rappresentativa*

- L'applicazione di un *livello 2* di analisi di rischio richiede l'individuazione di un unico valore di concentrazione rappresentativa in corrispondenza di ogni sorgente secondaria di contaminazione, ossia suolo superficiale (SS) suolo profondo (SP) e falda (GW).
- Tale valore va selezionato sulla base di criteri e assunzioni variabili in relazione al grado di approssimazione richiesto.

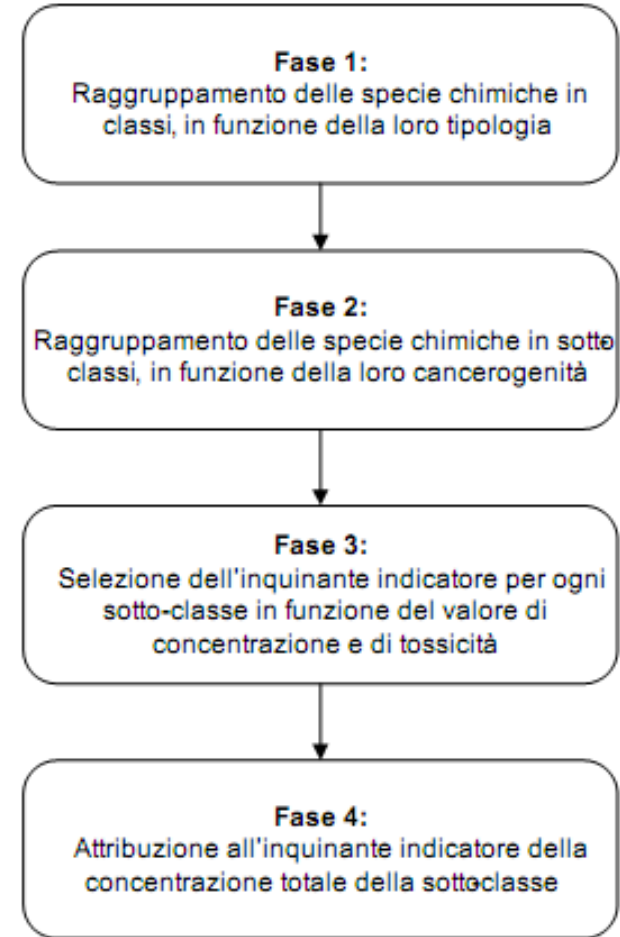


# Criteri di applicazione AdR

## ***Sorgente di contaminazione: selezione degli inquinanti indicatori***

In alcuni casi, può accadere che il numero di specie chimiche inquinanti indagate nell'ambito della campagna di indagine diretta, e/o aventi valori di concentrazione nel suolo o in falda superiori ai valori di riferimento indicati dalla normativa vigente, sia estremamente elevato.

Per evitare che ciò accada è necessario ridurre il numero di specie chimiche da inserire nella procedura di analisi, selezionando quelle più importanti, ossia quelle alle quali è associato un rischio maggiore per l'uomo; tali sostanze prendono il nome di ***“inquinanti indicatori”***.



# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione: definizione dei parametri sito-specifici*

- Tra tutti i parametri che entrano in gioco nelle equazioni per il calcolo dei fattori di trasporto, l'ISPRA ha definito **33 parametri** la cui determinazione deve essere effettuata esclusivamente mediante verifiche e/o indagini dirette.
- I 33 parametri sono stati determinati sulla base delle risultanze di un'analisi di sensitività con la quale sono stati individuati quei parametri che influenzano maggiormente le equazioni analitiche simulanti il trasporto del contaminante verso i bersagli.
- Tali parametri riguardano essenzialmente la geometria, le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche della sorgente di contaminazione, alcuni parametri chimico-fisici del sottosuolo ed alcuni dati meteorologici.

# Criteri di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione: definizione dei parametri sito-specifici*

<b>Geometria della sorgente di contaminazione in zona <u>insatura</u></b>	
Profondità del top della sorgente rispetto al piano campagna	$L_s$
<b>Caratteristiche fisiche del terreno in zona <u>insatura</u></b>	
Densità del suolo	$\rho_s$
pH del suolo	pH
Porosità totale del terreno	$\theta_T$
Contenuto volumetrico d'acqua	$\theta_w$
Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare	$\theta_{wca}$ p
Frazione di carbonio organico	foc
Infiltrazione efficace	Ief.
<b>Geometria della zona <u>insatura</u> di suolo</b>	
Profondità del piano di falda	$L_{GW}$
Spessore della frangia capillare	Hca p

<b>Geometria della sorgente di contaminazione in zona <u>saturo</u></b>	
Estensione della sorgente in direzione del flusso di falda	W
Estensione della sorgente in direzione ortogonale al flusso di falda	$S_w$
<b>Caratteristiche fisiche del terreno in zona <u>saturo</u></b>	
Conducibilità idraulica del terreno saturo	$K_{sat}$
Gradiente idraulico della falda	i
Dispersività longitudinale	$\alpha_x$
pH del suolo	pH
Porosità totale del terreno	$\theta_T$
<b>Geometria della zona <u>saturo</u> di suolo</b>	
Spessore della zona di miscelazione in falda	$\delta_{gw}$



# Criteria di applicazione AdR

## *Sorgente di contaminazione: definizione dei parametri sito-specifici*

<b>Caratteristiche degli ambienti aperti</b>	
Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione principale del vento	$W'$
Altezza del box di miscelazione	$\delta_{air}$
Velocità del vento	$U_{air}$
Tempo medio di durata del flusso di vapore	$\tau$
<b>Caratteristiche degli ambienti chiusi</b>	
Spessore delle fondazioni	$L_{crack}$
Rapporto tra volume indoor ed area d'infiltrazione	$L_b$
Frazione areale di fratture	$\eta$
Tasso di ricambio di aria	$ER$
Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	$\theta_{wcrack}$

# Criteri di applicazione AdR

## *Vie di migrazione: criteri di stima dei fattori di trasporto*

- I fattori di trasporto intervengono nella valutazione delle esposizioni indirette ovvero laddove eventuali contaminanti possono raggiungere i bersagli solo attraverso la migrazione dal comparto ambientale sorgente della contaminazione.
- Nell'analisi di rischio questo aspetto assume notevole rilevanza dovuta al fatto che una sottostima o sovrastima dei fattori di trasporto porta a valori del rischio e degli obiettivi di bonifica rispettivamente troppo bassi o troppo alti.

Simbolo	Fattore di trasporto
LF	fattore di lisciviazione in falda da suolo superficiale e/o profondo
DAF	fattore di attenuazione in falda
PEF	emissione di particolato outdoor da suolo superficiale
PEF <sub>in</sub>	emissione di particolato indoor da suolo superficiale
VF <sub>ss</sub>	fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale
VF <sub>samb</sub>	fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo
VF <sub>wamb</sub>	fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda
VF <sub>sest</sub>	fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo
VF <sub>wesp</sub>	fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda
RDF	fattore di migrazione dall'acqua di falda all'acqua superficiale

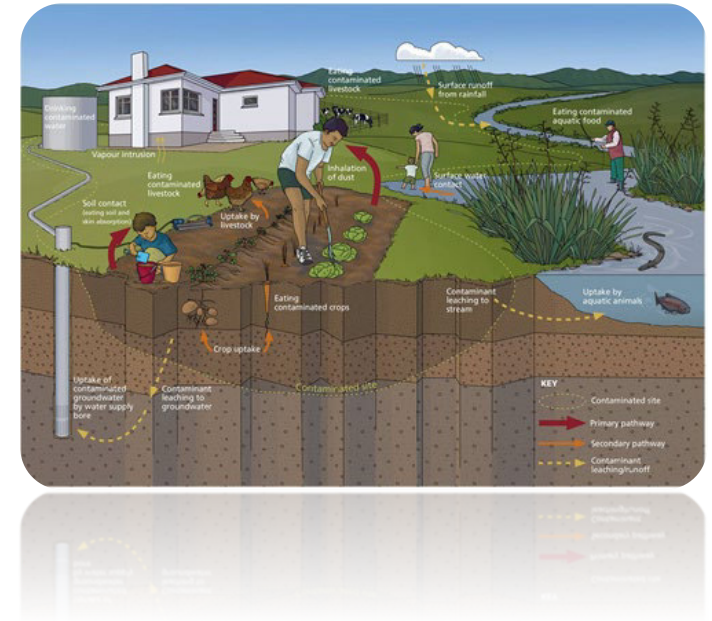
# Criteri di applicazione AdR

## Bersagli

I bersagli della contaminazione considerati sono esclusivamente umani.

Tali bersagli sono differenziati in funzione:

- della loro localizzazione, rispetto alla quale si definiscono bersagli **on-site** quelli posti in corrispondenza della sorgente di contaminazione; bersagli **off-site** quelli posti ad una certa distanza da questa;
- della **destinazione d'uso** del suolo, classificabile come:
  - residenziale (adulti e bambini);
  - ricreativo (adulti e bambini);
  - industriale/commerciale (esclusivamente adulti).



# Criteria di applicazione AdR

## *Bersagli: modalità di esposizione*

Le vie di esposizione sono i percorsi mediante le quali il potenziale bersaglio entra in contatto con le sostanze inquinanti.

Si ha una **esposizione diretta** se la via di esposizione coincide con la sorgente di contaminazione; si ha una **esposizione indiretta** nel caso in cui il contatto del recettore con la sostanza inquinante avviene a seguito della migrazione dello stesso e, quindi, avviene ad una certa distanza dalla sorgente.

### **Modalità di esposizione:**

- Ingestione di acqua potabile
- Ingestione di suolo
- Contatto dermico
- Inalazione di vapori e particolato

### **Vie principali di esposizione:**

- Suolo superficiale (SS)
- Suolo profondo (SP)
- Aria outdoor
- Aria indoor
- Acqua sotterranea

# Criteri di applicazione AdR

## *Bersagli: calcolo della portata di esposizione*

L'**esposizione** (E) è pari al prodotto tra la **concentrazione** del contaminante in una matrice ambientale, calcolata in corrispondenza del **bersaglio** ( $C_{POE}$ ) e la **portata effettiva di esposizione** (EM), definita come la quantità giornaliera di matrice contaminata alla quale il ricettore risulta esposto, per unità di peso corporeo.

$$E = C_{POE} \times EM$$

L'equazione generica per il calcolo di EM [ mg/kg/d] è:

$$EM = \frac{CR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

dove:

- CR è il tasso di contatto con il mezzo contaminato;
- EF è la frequenza di esposizione;
- ED è il periodo di esposizione;
- BW è il peso corporeo medio;
- AT è la durata media della vita, pari a ED nel caso di sostanze cancerogene.

# Criteri di applicazione AdR

## *Calcolo del rischio e degli obiettivi di bonifica sito-specifici*

**Modalità diretta (forward)** - Calcolo del rischio (R)

$$R = CRS \times FT \times EM \times T$$

con CRS: Concentrazione Rappresentativa alla Sorgente

FT: Fattore di Trasporto

T: tossicità

Il calcolo del rischio cumulato (RT) associato alla presenza di più specie inquinanti e a una o più modalità di esposizione è stimabile come:

$$R_T = \sum_{i=1}^n R_i$$

**Modalità inversa (backward)** - Calcolo delle concentrazioni soglia di rischio (Csr)

$$C_{sr} = \frac{C_{POE-acc}}{FT}$$

# Criteri di applicazione AdR

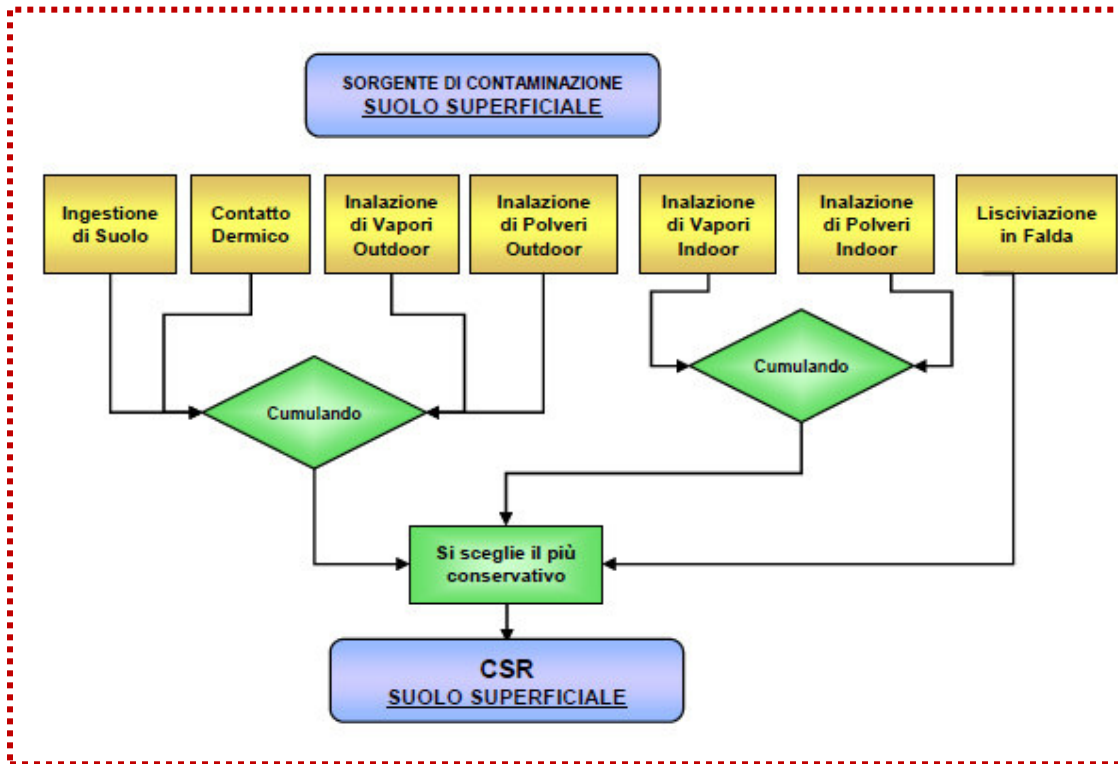
## Calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici (CSR)

### Sostanze non cancerogene, ambito residenziale e ricreativo

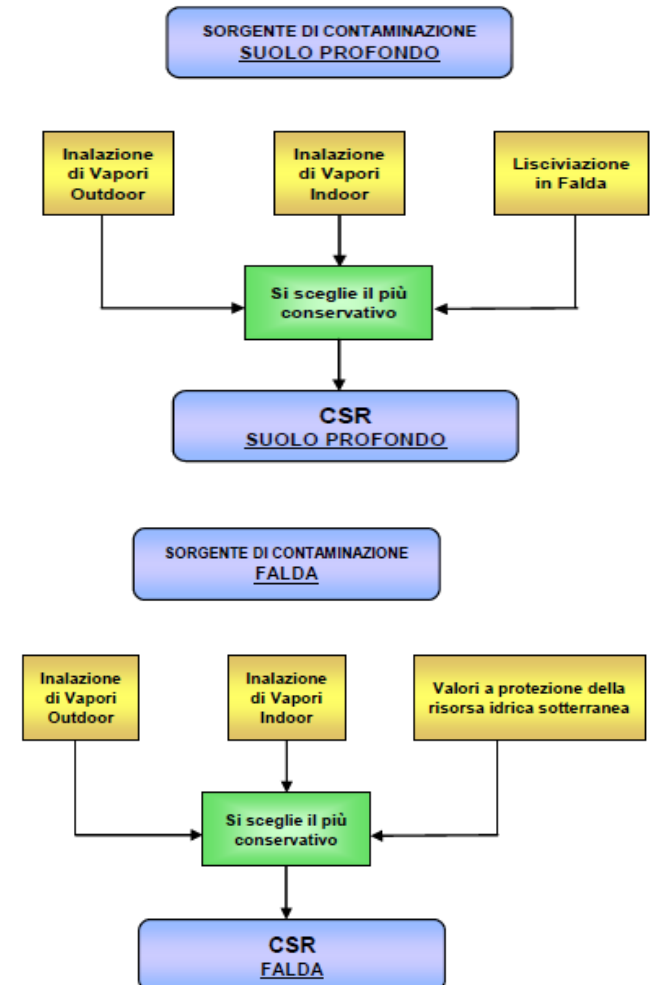
SORGENTE	TIPO DI ESPOSIZIONE	ON-SITE <sup>(*)</sup> E OFF-SITE
SUOLO SUPERFICIALE	Ingestione suolo	$CSR_{SuoloSupIngS} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ing}}{EM_{IngSBam} \cdot 10^{-6} \frac{Kg}{mg}}$
	Contatto dermico	$CSR_{SuoloSupConD} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ing}}{EM_{ConDBam} \cdot 10^{-6} \frac{Kg}{mg}}$
	Inalazione di vapori outdoor	$CSR_{SuoloSupInaO} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{EM_{InaOBam} \cdot VF_{zz} \cdot ADF}$
	Inalazione di vapori indoor	$CSR_{SuoloSupInaI} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{EM_{InaIBam} \cdot VF_{semp} \cdot ADF}$
	Inalazione particolato outdoor	$CSR_{SuoloSupInaOP} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{EM_{InaOBam} \cdot PEF \cdot ADF}$
SUOLO PROFONDO	Inalazione di vapori outdoor	$CSR_{SuoloProfInaO} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{VF_{zamb} \cdot EM_{InaOad} \cdot ADF}$
	Inalazione di vapori indoor	$CSR_{SuoloProfInaI} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{VF_{semp} \cdot EM_{InaIBam} \cdot ADF}$
FALDA	Inalazione di vapori indoor	$CSR_{FaldaInaI} \left[ \frac{mg}{L-H_2O} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{EM_{InaId} \cdot VF_{semp} \cdot ADF}$
	Inalazione di vapori outdoor	$CSR_{FaldaInaO} \left[ \frac{mg}{L-H_2O} \right] = \frac{THQ \cdot RfD_{Ina}}{EM_{InaOad} \cdot VF_{wamb} \cdot ADF}$

# Criteri di applicazione AdR

## Calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici (CSR)



Nel caso di più vie di esposizione si considera sempre il valore più conservativo.





# Criteri di applicazione AdR

## Calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici (CSR)

### Protezione della risorsa idrica

- ✓ Quando la falda è identificata come elemento potenzialmente esposto a rischio di contaminazione, allo scopo di consentire i possibili utilizzi della risorsa idrica sotterranea, in attuazione del principio generale di precauzione, ai sensi dell'art. 76 del della Parte III del D.Lgs. 152/2006 e dell'art. 300, Parte IV dello stesso decreto, l'All. I al Titolo V - Parte IV del D.Lgs. 152/2006 richiede il **ripristino dello stato originale del corpo idrico sotterraneo in corrispondenza del punto di conformità**.
- ✓ In questi casi il rischio per la risorsa idrica si calcola come il rapporto tra la concentrazione del contaminante in falda, in corrispondenza del punto di conformità ( $C_{POE}^{GW}$ ) e i corrispondenti valori di riferimento in falda ( $CSC_{GW}$ ) e, per essere accettabile, deve risultare inferiore all'unità.

RICETTORE	SORGENTE	VIA DI MIGRAZIONE	ON-SITE <sup>(s)</sup> E OFF-SITE
RISORSA IDRICA SOTTERANEA	SUOLO SUPERFICIALE	Lisciviazione in falda	$CSR_{SuoloSupLF} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{CSC_{Falda} \times DAF}{LF_{ss}} \times 10^{-3} \frac{mg}{\mu g}$
	SUOLO PROFONDO	Lisciviazione in falda	$CSR_{SuoloProfLF} \left[ \frac{mg}{Kg-suolo} \right] = \frac{CSC_{Falda} \times DAF}{LF_{sp}} \times 10^{-3} \frac{mg}{\mu g}$
	FALDA	Trasporto in falda	$CSR_{FaldaInqW} \left[ \frac{mg}{L-H_2O} \right] = CSC_{Falda} \times DAF \times 10^{-3} \frac{mg}{\mu g}$

# Criteri di applicazione AdR

## *Calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici (CSR)*

### **Protezione della risorsa idrica- Definizione punto di conformità Allegato 1 Parte IV Dlgs 152/2006**

- ✓ Il punto di conformità per le acque sotterranee rappresenta il punto a valle idrogeologico della sorgente al quale deve essere garantito il ripristino dello stato originale (ecologico, chimico e/o quantitativo) del corpo idrico sotterraneo, onde consentire tutti i suoi usi potenziali [...]
- ✓ Il punto di conformità deve essere di norma fissato non oltre i confini del sito contaminato oggetto di bonifica e la relativa CSR per ciascun contaminante deve essere fissata equivalente alle CSC di cui all'Allegato 5 della parte quarta del presente decreto. Valori superiori possono essere ammissibili solo in caso di fondo naturale più elevato o di modifiche allo stato originario dovute all'inquinamento diffuso, ove accertati o validati dalla Autorità pubblica competente, o in caso di specifici minori obiettivi di qualità per il corpo idrico sotterraneo o per altri corpi idrici recettori, ove stabiliti e indicati dall'Autorità pubblica competente, comunque compatibilmente con l'assenza di rischio igienico-sanitario per eventuali altri recettori a valle. A monte idrogeologico del punto di conformità così determinato e comunque limitatamente alle aree interne del sito in considerazione, la concentrazione dei contaminanti può risultare maggiore della CSR così determinata, purché compatibile con il rispetto della CSC al punto di conformità nonché compatibile con l'analisi del rischio igienico sanitario per ogni altro possibile recettore nell'area stessa.

# Criteri di applicazione AdR

## *Calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici*

### Protezione della risorsa idrica

