



Junta de Andalucía
Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible



Valoración del método RBCA aplicado al análisis de riesgos de los suelos contaminados por elementos traza



- Dr. Antonio J. Romero Baena
- Dpto. Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola
- Universidad de Sevilla
- aromero@us.es



INDICE

- 1. Introducción**
- 2. Análisis de riesgos**
 1. Cuantificación de la exposición: la dosis
 2. Parámetros de exposición
 3. Valoración del riesgo
 - Parámetros toxicológicos
 - Efectos tóxicos y carcinogénicos
- 3. Análisis de riesgos en un escenario residencial**
 1. Ingestión accidental del suelo
 2. Ingestión de vegetales
- 4. Análisis de riesgos con el programa RBCA Tool Kit**
- 5. Conclusiones y recomendaciones**

INTRODUCCIÓN

SUELOS POTENCIALMENTE
CONTAMINADOS POR ELEMENTOS TRAZA

Concentración > Nivel Genérico de
Referencia (NGR)

ANÁLISIS DE
RIESGOS

Estimar la severidad y la probabilidad de que la **exposición** a uno o varios contaminantes presentes en el medio ambiente puedan producir, bajo unas circunstancias determinadas, **efectos adversos en la salud humana** y los ecosistemas.

MÉTODO RBCA
(*Risk-Based Corrective
Action*)

Cálculo de los riesgos específicos por **exposición directa e indirecta** aplicando **modelos de transporte** de los contaminantes.

Desarrollado por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2015) sobre las bases y guías para el análisis de riesgos de la *Environmental Protection Agency* (USEPA, 1989)

DOSIS
LÍMITE

Modificado de Zartarian et al. (2007)

DOSIS

ZONA DE CONTACTO

EXPOSICIÓN

AGENTE
CONTEMINANTE

MODELO DE TRANSPORTE

Foco
contaminante

ANÁLISIS DE RIESGOS

En todo análisis de riesgos puede definirse:

- La fuente de contaminación
- El sitio de exposición
- El medio de exposición y mecanismo de transporte (*exposure pathway*)
- Escenario de exposición y el tipo de receptor
- La ruta de exposición (*exposure route*):
 - Ingestión
 - Inhalación
 - Contacto dérmico



CUANTIFICACIÓN DE LA EXPOSICIÓN: LA DOSIS

- **Exposición:** contacto de un agente químico o físico con un organismo (“ingestión”).
- Normalmente se expresa normalizada por el peso corporal (BW)
- Si la exposición ocurre durante un periodo de tiempo, se normaliza dividiendo por el tiempo total de exposición (AT)
- Se obtiene así, **dosis media diaria (ADD)**

EXPOSICIÓN

Depende de:

Cantidad de
sustancia en contacto

Tiempo de contacto

**FÓRMULA GENERAL PARA CALCULAR
LA DOSIS MEDIA DIARIA**

$$ADD = \frac{\text{Exposición}}{BW \times AT}$$

- ADD (*average daily dose*): dosis media diaria (mg/kg-día)
- Exposición: dosis ingerida o absorbida (mg)
- AT (*average time*): tiempo total de la exposición (días)
- BW (*body weight*): peso corporal (kg)

$$EXPOSICIÓN = \frac{C \times CR \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

- C: concentración del contaminante (p.e.: mg/kg)
- CR (*contact rate*): tasa de contacto (p.e.: $\text{mg}_{\text{suelo}}/\text{día}$)
- EF (*exposure frequency*): frecuencia de exposición (días/año)
- ED (*exposure duration*): duración de la exposición (años)
- CF (*conversion factor*): factor de conversión de unidades (p.e.: 10^{-6}kg/mg)

$$ADD = \frac{C \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

DOSIS MEDIA POR CADA RUTA DE EXPOSICIÓN

DOSIS MEDIA DIARIA POR INGESTIÓN ACCIDENTAL DE SUELO

$$ADD_{ing} \equiv C_S \times IR_S \times CF \times \frac{EF \times ED}{BW \times AT}$$

DOSIS MEDIA DIARIA POR INGESTIÓN DE VEGETALES

$$ADD_{veg} \equiv (C_S \times T) \times IR_{veg} \times \frac{EF \times ED}{BW \times AT}$$

DOSIS MEDIA DIARIA POR CONTACTO DÉRMICO

$$ADD_{der} \equiv C_S \times (SA \times AF) \times CF \times \frac{EF \times ED}{BW \times AT}$$

DOSIS MEDIA DIARIA POR INHALACIÓN

$$ADD_{inh} \equiv C_{Air} \times IR_{Air} \times \frac{EF \times ED}{BW \times AT}$$

- ADD_{ing} , ADD_{veg} , ADD_{der} , ADD_{inh} : dosis media diaria por ingestión de suelo accidental, ingestión de vegetales, contacto dérmico, inhalación, respectivamente (mg/kg-día)
- C_S : concentración del contaminante en el suelo (mg/kg_{suelo})
- IR_S (*ingestion rate*): tasa de ingestión de suelo (mg_{suelo}/día)
- CF (*conversion factor*): factor de conversión (10⁻⁶ kg/mg)
- T : transferencia del suelo a la planta (mg/kg_{veg})/(mg/kg_{suelo})
- IR_{veg} : tasa de ingestión de vegetales (kg_{veg}/día)
- SA (*surface area*): area superficial de piel expuesta (cm²)
- AF (*adherence factor*): factor de adherencia suelo-piel (mg_{suelo}/cm²)
- C_{Air} : concentración del contaminante en el aire (mg/m³)
- IR_{Air} : tasa de inhalación (m³/día)
- EF (*exposure frequency*): frecuencia de exposición (días/año)
- ED (*exposure duration*): duración de la exposición (años)
- BW (*body weight*): peso corporal (kg)
- AT (*average time*): tiempo total de la exposición (días)

PARÁMETROS DE EXPOSICIÓN EN UN ESCENARIO RESIDENCIAL

Parámetros de exposición		Unidad	Escenario de exposición RESIDENCIAL	
			Tipo de receptor	
			Niño	Adulto
IR_s : Tasa de ingestión accidental del suelo		mg/kg	200	100
IR_{veg} : Ingestión de vegetales	Hojas	kg/día	0,002	0,006
	Raíces y tubérculos	kg/día	0,001	0,002
Otros parámetros de exposición		Unidad		
EF : frecuencia de exposición		días/año	350	350
ED : duración de la exposición		años	6	30
BW : peso corporal		kg	15	70
AT : tiempo medio	No Carcinogénico	días	2.190 (6 años)	10.950 (30 años)
	Carcinogénico	días	25.550 (70 años)	25.550 (70 años)

VALORACIÓN DEL RIESGO

Valorar el riesgo significa valorar la **toxicidad**, es decir, estimar la **probabilidad o severidad** con la que un contaminante puede provocar **efectos adversos**, siempre en función de la **dosis suministrada**.



PARÁMETROS TOXICOLÓGICOS DE LOS CONTAMINANTES

- Se estiman a partir de la **relaciones dosis/respuesta**.
- En general, se obtienen de los datos publicados por la EPA en la **base de datos IRIS** (*Integrated Risk Information System*)

USEPA (2011)



VALORACIÓN DEL RIESGO

EFFECTOS NO CARCINOGENICOS

- Existe un umbral por debajo del cual no se producen efectos nocivos.
- La **dosis de referencia crónica** (R_fD , *Reference Dose*) estima la dosis (mg/kg-día) por debajo del cual no se espera que se produzcan efectos adversos durante el transcurso de una vida.
- No deben considerarse valores estrictos, ya que tienen una incertidumbre de al menos un orden de magnitud.

$$HQ = \frac{ADD}{R_fD}$$

- HQ (*hazard quotient*): cociente de riesgo
- ADD: dosis media diaria
- R_fD : dosis de referencia crónica

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i$$

- HI (*hazard index*): índice de riesgo
- Expresa la suma de los riesgos derivados de cada contaminante

$$HI > 1$$



Hay riesgo de que se produzcan efectos tóxicos no cancerígenos.

EFFECTOS CARCINOGENICOS

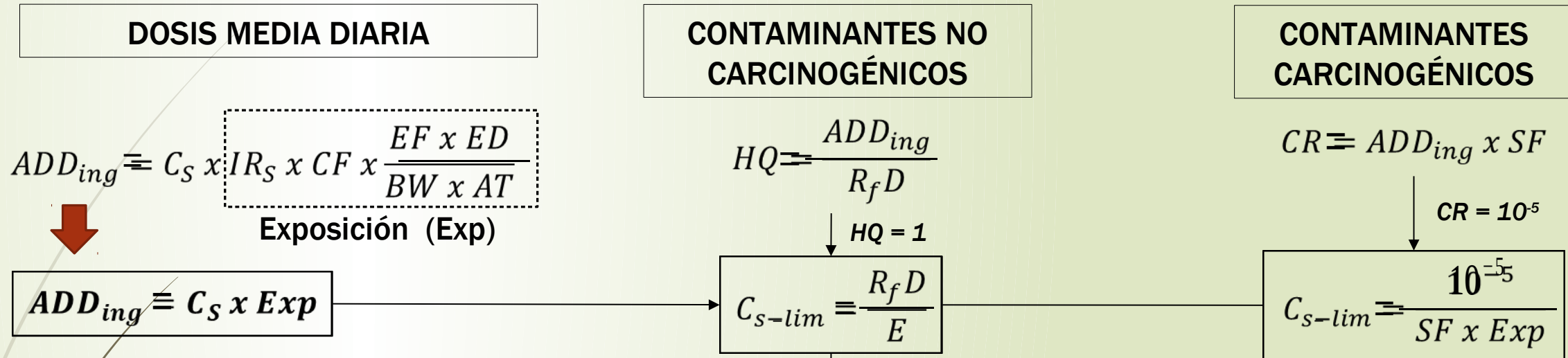
- No existe un umbral que no tenga una probabilidad (aunque pequeña) de generar una respuesta carcinogénica, es decir, no hay una dosis libre de riesgo.
- El **factor de pendiente** (SF, *slope factor*) es un valor ($[\text{mg/kg-día}]^{-1}$) que expresa la **máxima probabilidad** de que ocurra **una respuesta carcinogénica por unidad de ingesta** del agente contaminante en el transcurso de una vida.

$$CR = \frac{ADD \times SF}{10^{-5}}$$

- CR (*cancer risk*): riesgo de cáncer
 - ADD: dosis media diaria
 - SF: factor de pendiente
- CR expresa la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer para una dosis concreta.
 - $CR = 10^{-5}$ indica la probabilidad de un caso por cada 100.000 habitantes.

VALORACIÓN DEL RIESGO

INGESTIÓN ACCIDENTAL DE SUELO



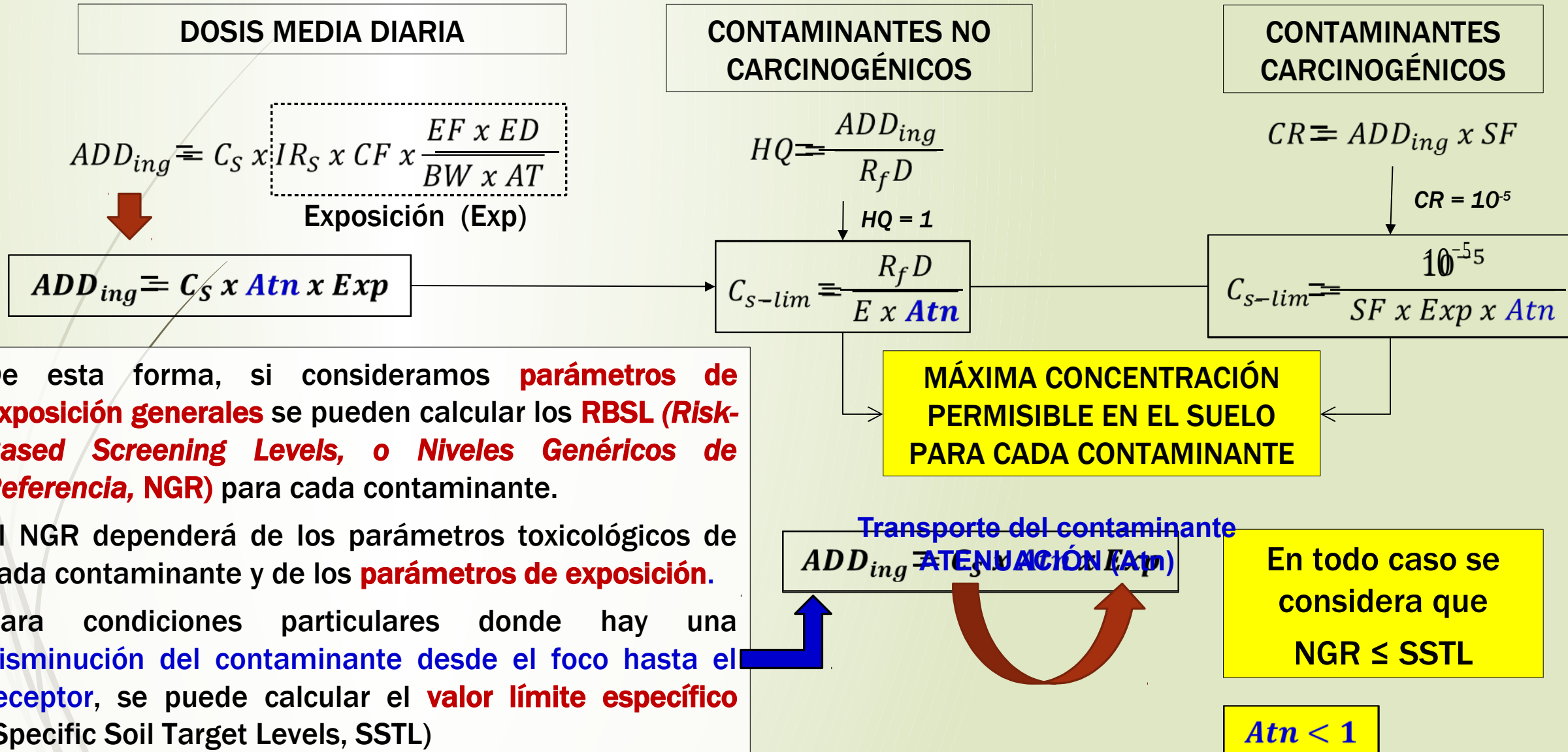
- De esta forma, si consideramos **parámetros de exposición generales** se pueden calcular los **RBSL (Risk-Based Screening Levels, o Niveles Genéricos de Referencia, NGR)** para cada contaminante.
- El NGR dependerá de los parámetros toxicológicos de cada contaminante y de los **parámetros de exposición**.
- Para condiciones particulares donde hay una **disminución del contaminante desde el foco hasta el receptor**, se puede calcular el **valor límite específico** (Specific Soil Target Levels, SSTL)

Transporte del contaminante
ATENUACIÓN (At)

$$ADD_{ing} \equiv C_S \times \frac{1}{At} \times Exp$$

VALORACIÓN DEL RIESGO

INGESTIÓN ACCIDENTAL DE SUELO



ANÁLISIS DE RIESGOS EN UN ESCENARIO RESIDENCIAL

INGESTIÓN ACCIDENTAL DE SUELO



$$C_{s-lim} \equiv \frac{R_f D}{E}$$

$$C_{s-lim} \equiv \frac{10^{-55}}{SF \times Exp}$$

	Valores SSTL teóricos para cada caso			
	Efecto tóxico		Efecto carcinogén.	
	Niño	Adulto	Niño	Adulto
As (mg/kg)	23,5	219	6,1	11,4
Cu (mg/kg)	3130	29200	-	-
Pb (mg/kg)	282	2630	-	-
Zn (mg/kg)	23500	2,2·10 ⁵	-	-

Rutas y parámetros de exposición		Unidad	Residencial	
			Niño	Adulto
IR _s : Tasa de ingestión accidental del suelo		mg/kg	200	100
IR _{veg} : Ingestión de vegetales	Hojas	kg/día	0,002	0,006
	Raíces y tubérculos	kg/día	0,001	0,002
Otros parámetros de exposición		Unidad		
EF: frecuencia de exposición		días/año	350	350
ED: duración de la exposición		años	6	30
BW: peso corporal		kg	15	70
AT: tiempo medio	No Carcinogénico	días	2.190	10.950
	Carcinogénico	días	25.550	25.550

Parámetros toxicológicos	As	Cu	Pb	Zn
Efecto tóxico (RfD)	3,0·10 ⁻⁴	4,0·10 ⁻²	3,6·10 ⁻³	3,0·10 ⁻¹
Efecto carcinogénico (SF)	1,5	-	-	-

ANÁLISIS DE RIESGOS EN UN ESCENARIO RESIDENCIAL

INGESTIÓN DE VEGETALES

$$C_{s-lim} \equiv \frac{R_f D}{E}$$



$$C_{s-lim} \equiv \frac{10^{-55}}{SF \times Exp}$$

	Valores SSTL teóricos para cada caso			
	Efecto tóxico		Efecto carcinogén.	
	Niño	Adulto	Niño	Adulto
As (mg/kg)	1,6	2,74	0,4	0,14
Cu (mg/kg)	209	365	-	-
Pb (mg/kg)	18,8	32,9	-	-
Zn (mg/kg)	1560	2740	-	-

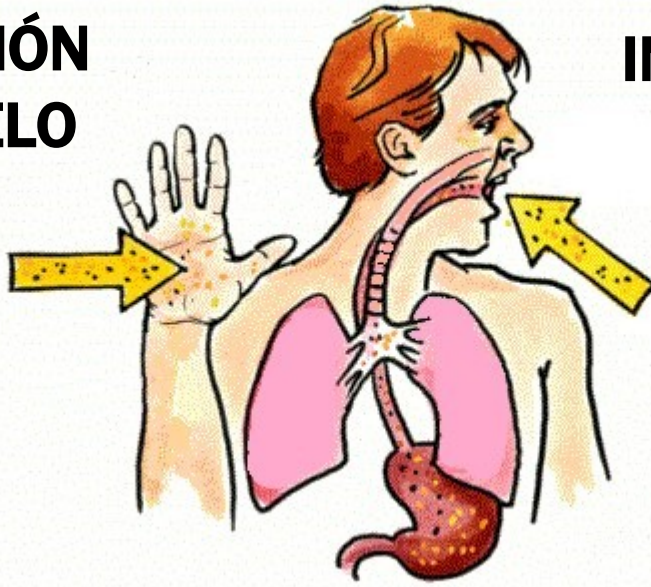
Rutas y parámetros de exposición		Unidad	Residencial	
			Niño	Adulto
IR _s : Tasa de ingestión accidental del suelo		mg/kg	200	100
IR _{veg} : Ingestión de vegetales	Hojas	kg/día	0,002	0,006
	Raíces y tubérculos	kg/día	0,001	0,002
Otros parámetros de exposición		Unidad		
EF: frecuencia de exposición		días/año	350	350
ED: duración de la exposición		años	6	30
BW: peso corporal		kg	15	70
AT: tiempo medio	No Carcinogénico	días	2.190	10.950
	Carcinogénico	días	25.550	25.550

Parámetros toxicológicos	As	Cu	Pb	Zn
Efecto tóxico (RfD)	3,0·10 ⁻⁴	4,0·10 ⁻²	3,6·10 ⁻³	3,0·10 ⁻¹
Efecto carcinogénico (SF)	1,5	-	-	-

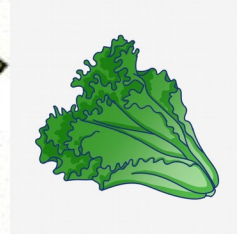
ANÁLISIS DE RIESGOS EN UN ESCENARIO RESIDENCIAL

Aunque la exposición al suelo se considera directa, se pueden definir valores de atenuación como la **Bioaccesibilidad** o la **trasferencia a la planta**.

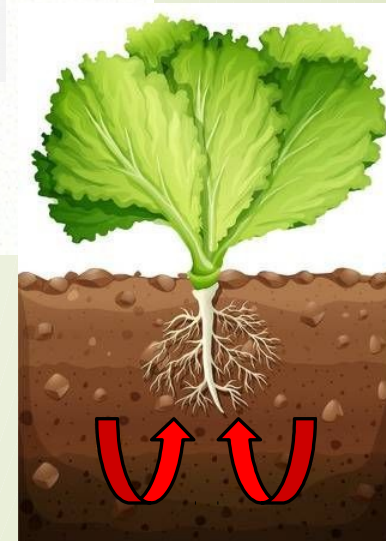
INGESTIÓN
DE SUELO



INGESTIÓN DE
VEGETALES



BIOACCESIBILIDAD



PLANTA

TRANSFERENCIA

SUELO

Transporte del contaminante
 ADD_{ing} ADD_{veg} ADD_{exp}
ATENUACIÓN (atn)
Parámetros de suelo
Biodisponibilidad
Transferencia a la planta
Bioaccesibilidad

ANÁLISIS DE RIESGOS CON EL PROGRAMA RBCA TOOL KIT

- El programa “**RBCA Tool Kit for Chemical Releases**” es un software integral de modelaje y caracterización de riesgos diseñado según la norma “ASTM-RBCA”
- Actualmente se comercializan las versiones 2.6 (en inglés) y la 2.6e (en español)
- Tiene una **interfaz sencilla** y permite realizar **multitud de cálculos** combinando los **modelos de transporte** de los contaminantes (tanto orgánicos como inorgánicos) con la **evaluación de riesgos**.

Conor et al., 2007

Pantalla principal RBCA Tool Kit for Chemical Releases
Versión 2.5e © 2009

1. Información sobre el proyecto

Nombre del sitio: Ejemplo
Lugar: Houston, Texas
Realizado por: GSI Environmental Inc.
Fecha: 12-Feb-09 Nombre de trabajo: S-2274-1029

2. Tipo de análisis de RBCA

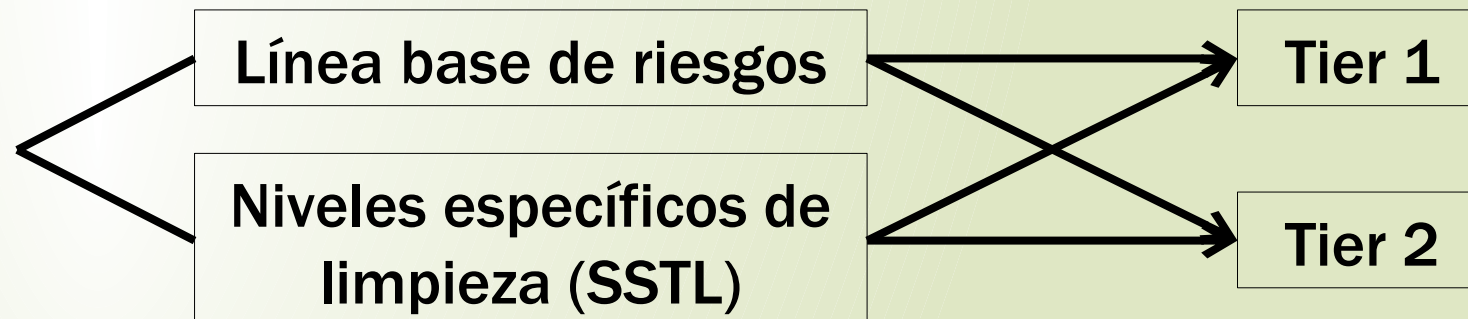
☐ **Tier 1**
Evaluación genérica

☒ **Tier 2/3**
Evaluación específica al sitio

3. Opciones de cálculo
Señala cuáles son los datos requeridos

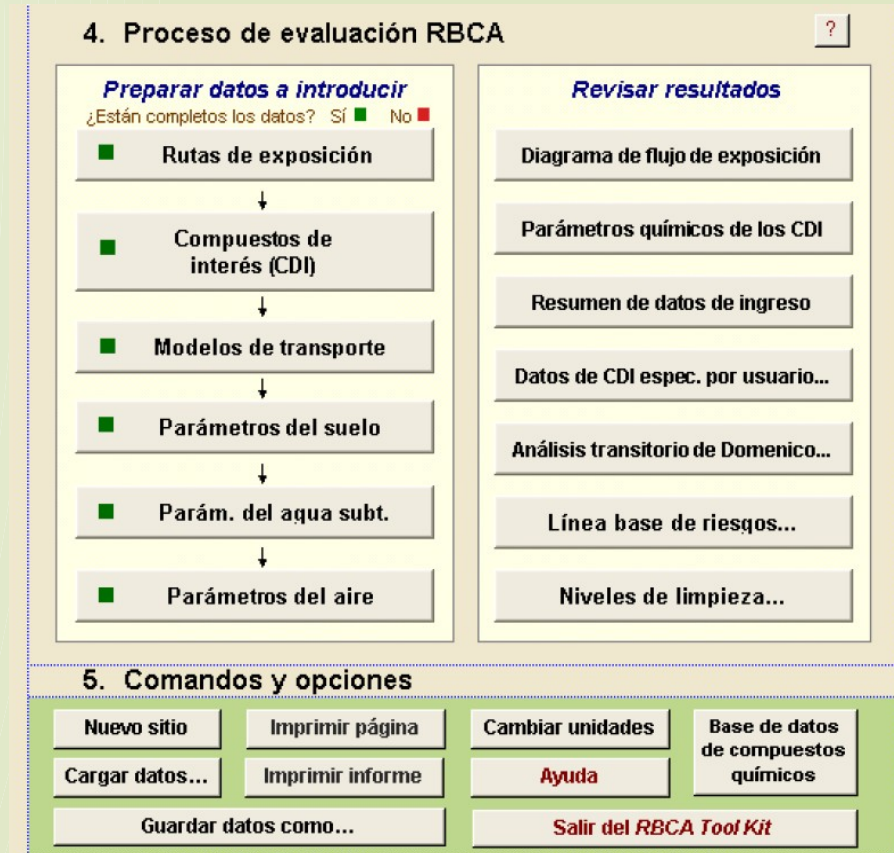
☒ Línea base de riesgos (cálculo directo)
☒ Niveles de limpieza del RBCA (cálculo inverso)
☐ Sólo riesgos aceptables para compuestos individuales
☒ Riesgos individuales y acumulativos aceptables
☒ Aplicar el algoritmo de agotamiento del foco:
Lapso para exposición a futuro 5 (año)

Permite
determinar



ANÁLISIS DE RIESGOS CON EL PROGRAMA RBCA TOOL KIT

- El proceso de evaluación de riesgos se hace paso a paso:
 - Se introducen el **medio** (pathways: aguas subterráneas, suelos o aire) y las **rutas de exposición** (ingestión, inhalación y contacto dérmico)
 - **Concentración de los compuestos contaminantes**
 - **Modelos de transporte** (sólo en agua o aire)
 - **Parámetros** del suelo, del agua y del aire
- Contiene unos **parámetros de exposición** preestablecidos (que se pueden modificar)
- Por defecto carga los **parámetros toxicológicos** de la base de datos americana, pero también se pueden seleccionar las bases de datos inglesa y holandesa.



ANÁLISIS DE RIESGOS CON EL PROGRAMA RBCA TOOL KIT

ESCENARIO RESIDENCIAL

INGESTIÓN ACCIDENTAL DE SUELO



INGESTIÓN DE VEGETALES



	Valores SSTL	
	RBCA Tool Kit	Fórmula
	Niño	Niño
As (mg/kg)	3,8	6,1
Cu (mg/kg)	3100	3130
Pb (mg/kg)	280	282
Zn (mg/kg)	23000	23500

	Valores SSTL	
	RBCA Tool Kit	Fórmula
	Niño	Niño
As (mg/kg)	0,041	0,4
Cu (mg/kg)	750	209
Pb (mg/kg)	-	18,8
Zn (mg/kg)	21000	1560

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El **análisis de riesgos por el método RBCA es una potente herramienta** para valorar los posibles riesgos de toxicidad por exposición a contaminantes en suelos potencialmente contaminados.
- No obstante, **los resultados NO deben tomarse estrictamente** sino como orientativos, especialmente si no se tienen datos específicos de los parámetros de exposición.
- En el caso de **ingestión del suelo**, se recomienda usar valores de **bioaccesibilidad** específicos para cada caso.
- En caso de **ingestión de vegetales**, se recomienda hacer estudios específicos de **transferencia** a distintas plantas de la zona afectada, o usar las concentraciones de las plantas.
- El **uso de programas informáticos** como RBCA Tool Kit debe hacerse con cautela ya que puede llevar a resultados alarmistas. Se recomienda un conocimiento profundo del programa y su manejo por personal experto y cualificado.
- En los **emplazamientos potencialmente contaminados** por elementos traza donde se prevea una alta exposición a los contaminantes sería **MUY RECOMENDABLE** realizar **estudios epidemiológicos** en la población afectada para conocer el **verdadero efecto de la exposición**.



¡Muchas
gracias por su
ión!



AGRADECIMIENTOS

FINANCIACIÓN:

Proyecto 1476/0149: Desarrollo de nuevos procedimientos para la tramitación de estudios de la calidad del suelo de emplazamientos potencialmente contaminados por metales pesados. Consejería de Medio Ambiente (Dirección General de Prevención Calidad y Ambiental. Junta de Andalucía.

EQUIPO INVESTIGADOR:

Prof. Dr. Emilio Galán Huertos † (Coordinador)
Prof. Dra. Isabel González Díez
Dra. Patricia Aparicio Fernández.