



# EL RADÓN: EXPOSICIÓN DE RIESGO PARA LA SALUD. SOLUCIONES PARA SU REDUCCIÓN.

**El radón: gas noble radiactivo**

**Carlos Sainz Fernández  
Universidad de Cantabria**

## Esquema general

Características del radón y sus descendientes

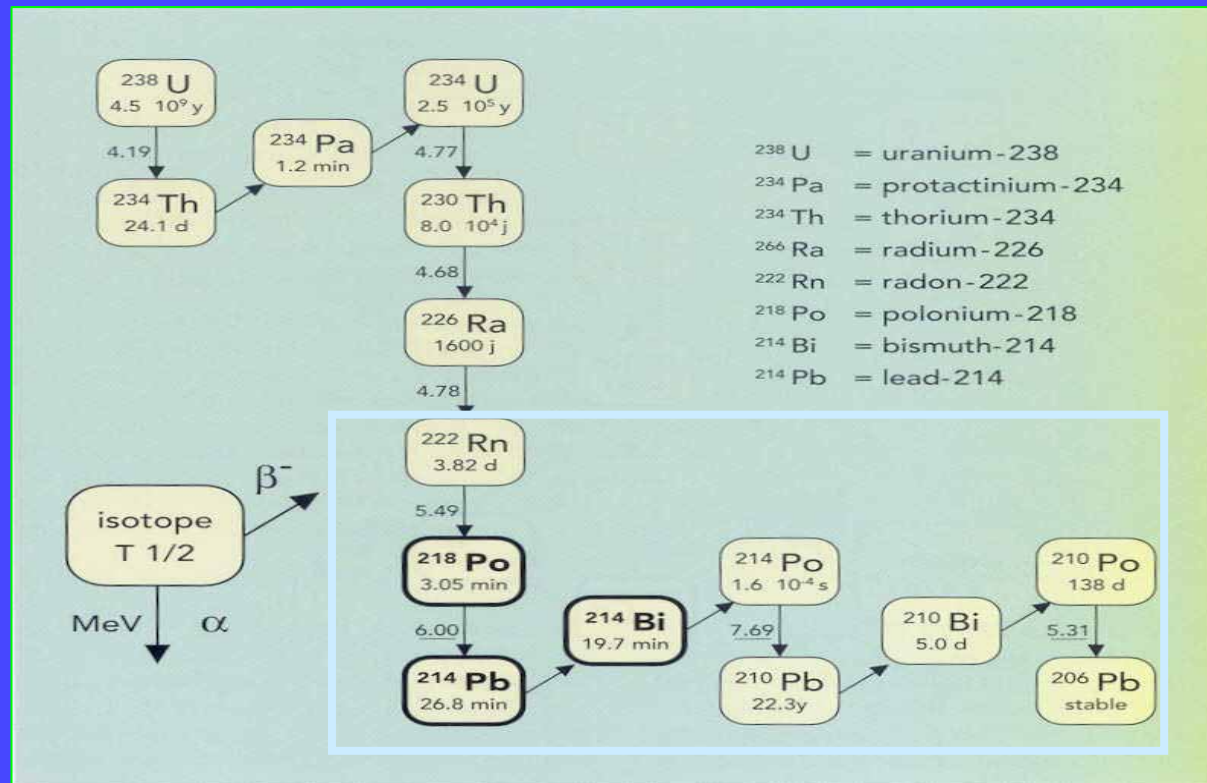
Fuentes de radón y transporte

Comportamiento de descendientes

Riesgos para la salud

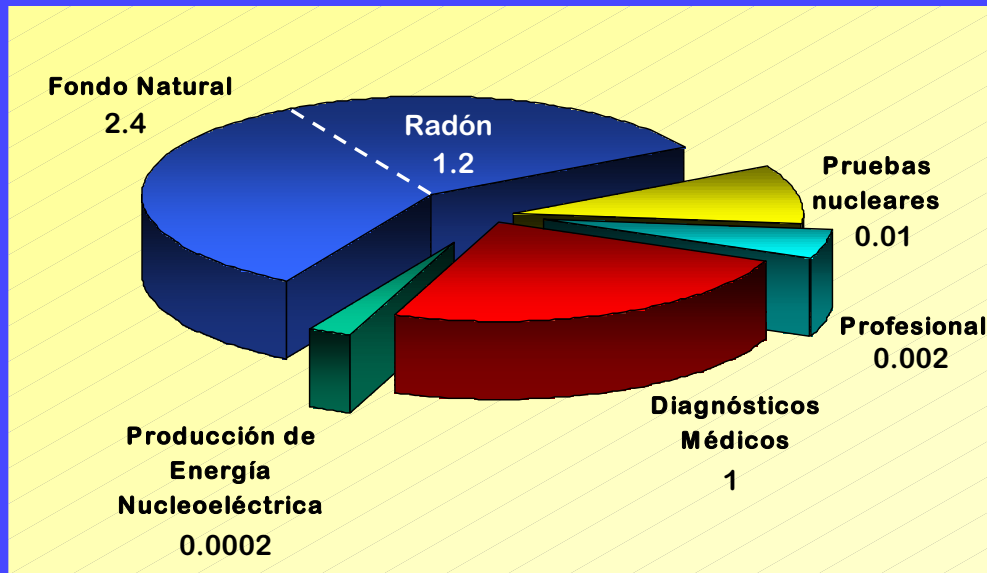
# Introducción

## Serie del $^{238}\text{U}$



$^{238}\text{U}$  presente en toda la corteza terrestre  
Media mundial en suelos 33 Bq Kg<sup>-1</sup> (UNSCEAR 2008)

# Radón



$^{222}\text{Rn}$

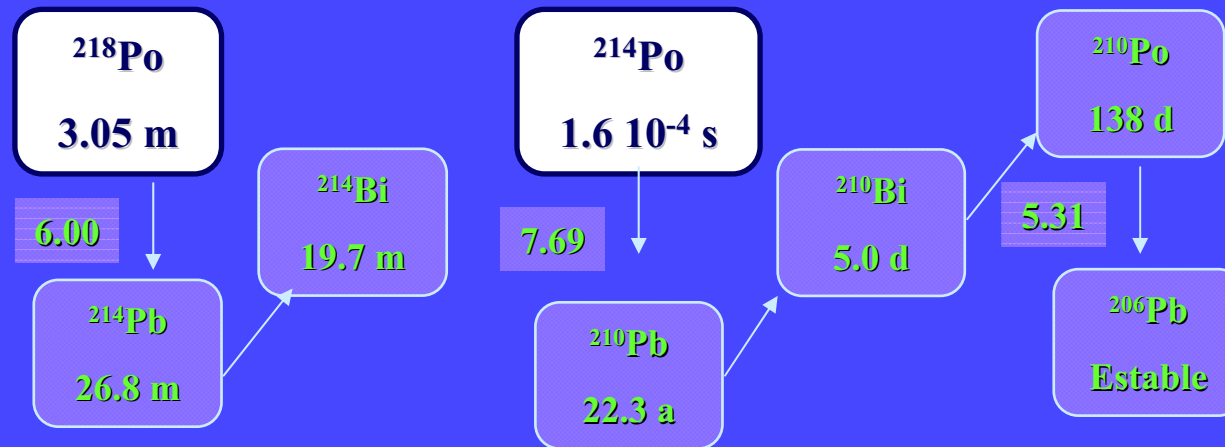
Gas noble

$T_{1/2} = 3.82 \text{ d}$

Emisor alfa (5.49 MeV)

Posibilidad de desplazamiento macroscópico

# Descendientes



Sólidos

Activos químicamente

Periodos de semidesintegración < 30 min

Comportamiento complejo  
Importancia radiológica

# Factores que influyen en la $C_{222Rn}$ en interiores

Tasa de producción por diversas fuentes

Tasa de ventilación

~~Tasa de transformación/eliminación  
fisicoquímica~~

¡ Más factores para descendientes!  
(concentración de partículas, presencia de superficies, etc...)

# Fuentes de radón y transporte



Suelos



Materiales de construcción



Agua

## Transporte

### Difusión

Por diferencias de **concentración**  
Movimiento relativo del gas en el seno del material que lo contiene

### Convección

Por diferencias de **presión/temperatura**  
El fluido que contiene al gas actúa como vehículo de transporte

# Suelo



**Generación de radón**  
(desintegración de  $^{226}\text{Ra}$ )

Emanación

**Radón en los poros**

**Disponibilidad de radon**

Humedad  
Temperatura  
Tamaño de grano  
Posición de átomos en el grano

Permeabilidad

Difusión  
Convección

Humedad  
Tamaño de grano  
porosidad

**Transporte**

Diferencias  
Temperatura  
Presión atmosférica  
Precipitaciones  
Salida al exterior

Tipo de construcción  
Subestructura

**Entrada en Espacio cerrado**

**Migración de radon**



# Suelo

## Contenido en $^{226}\text{Ra}$ de suelos españoles

Comunidad Autónoma	Número de medidas	Valor medio (Bq/Kg)	Rango
ANDALUCÍA	126	29.0	8-82
ARAGÓN	44	35.8	48-72
ASTURIAS	17	43.7	20-167
BALEARES (MALLORCA)	11	34.5	23-70
CANARIAS (TENERIFE)	30	51.2	21-136
CANTABRIA	94	44.3	10-141
CASTILLA-LA MANCHA	119	29.4	9-65
CASTILLA Y LEÓN	144	38.8	9-300
CATALUÑA	45	39.5	13-138
EXTREMADURA	73	49.5	11-240
GALICIA	71	93.9	18-310
MADRID	37	48.6	12-158
MURCIA	16	31.5	18-63
NAVARRA	15	33.5	19-80
LA RIOJA	12	42.2	16-69
PAÍS VASCO	45	45.1	9-93
COMUNIDAD VALENCIANA	32	28.1	8-61
ESPAÑA	952	38.9	8-310

# Suelo

## Ejemplo

$$C_{226\text{Ra}} = 25 \text{ Bq Kg}^{-1}$$

$$\rho_{\text{suelo}} = 1600 \text{ Kg m}^{-3}$$

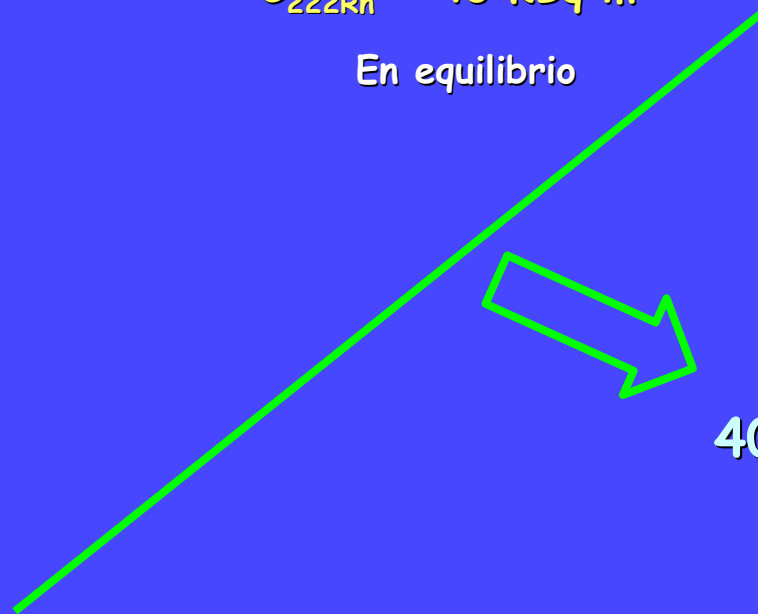


Porosidad 20 %  
Factor de emanación 0.2  
Flujo de gas  $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$



$$C_{222\text{Rn}} = 40 \text{ KBq m}^{-3}$$

En equilibrio



Exhalación

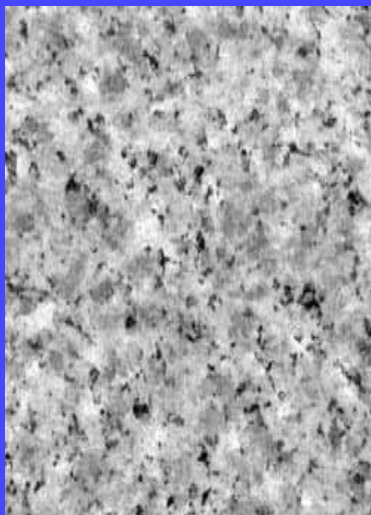
$$40 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Meteorología  
Ventilación  
Tipo de cobertura  
Etc...

# Materiales de construcción

Pueden ser una fuente importante de radon en edificios elevados

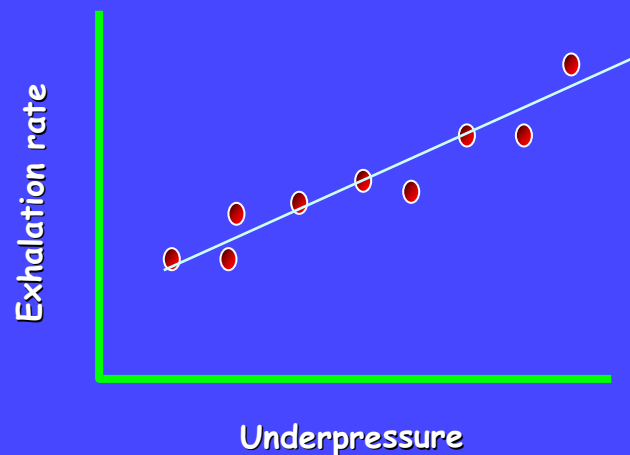
Baja permeabilidad → Difusión principal mecanismo



Ejemplo granito

Elevado contenido en  $^{226}\text{Ra}$   
Exhalación dependiente de fisuras, grietas, etc...

Presión atmosférica  
Humedad



# Materiales de construcción

Contenido en  $^{226}\text{Ra}$  de granitos españoles

Provincia	Número de muestras	Concentración Ra-226 (Bq/kg)
Ávila	2	86.1
Badajoz	23	66.3
Cáceres	10	78.2
La Coruña	3	92.0
Huelva	1	32.6
Huesca	1	282.1
Lugo	6	93.1
Madrid	13	90.9
Orense	5	78.4
Pontevedra	12	112.0
Salamanca	3	61.3
Segovia	3	126.7
Sevilla	1	30.3
Toledo	1	191.2
Zamora	3	73.9

# Suelo

## Contenido de $^{226}\text{Ra}$ de algunos materiales de construcción

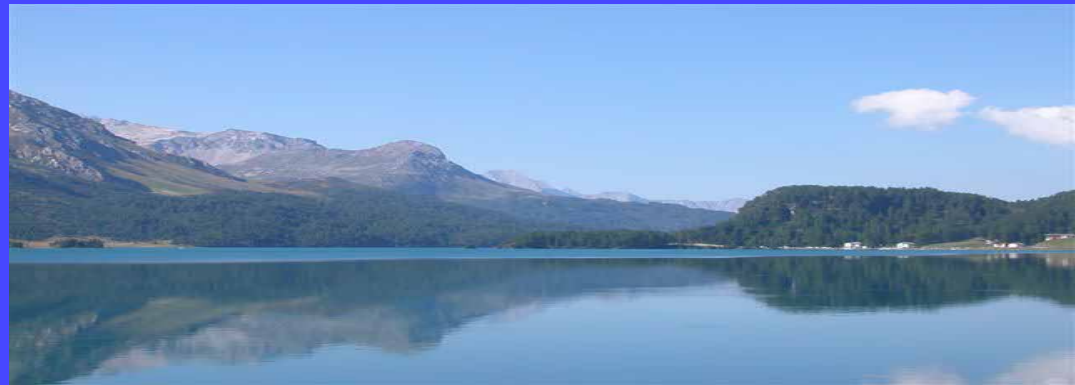
Tipo material	Nº muestras	Ra-226 (Bq/Kg)
Arenas de playa	6	5.9
Arena I	4	30.3
Arena II	7	7.0
Ladrillo I	3	55.1
Ladrillo II	8	73.2
Cemento I	3	25.1
Cemento II	7	421.8
Cemento III	5	94.7
Cemento IV	4	23.3
Cemento V	5	51.8
Cemento VI	6	35.5
Cemento VII	7	53.6
Yeso I	3	9.6
Yeso II	5	35.9
Yeso III	7	50.7
Yeso IV	5	11.1
Estuco	4	8.1
Hormigón	24	29.9
Suelo	12	14.8

# Agua

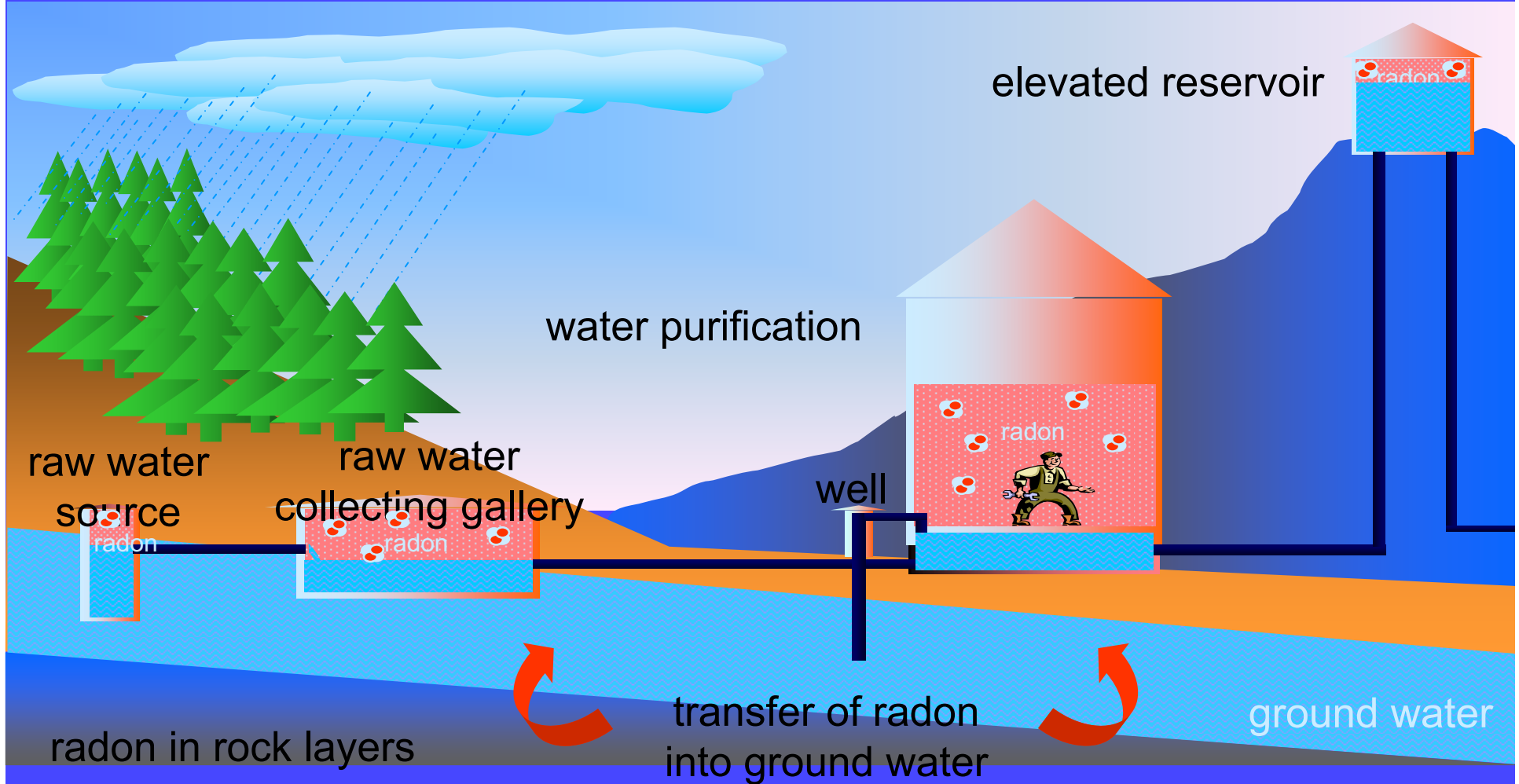


El contenido de  $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$  depende

Aguas superficiales (lagos, rios...)  
Aguas profundas (pozos, manantiales...)  
Agitación  
Temperatura



# Agua

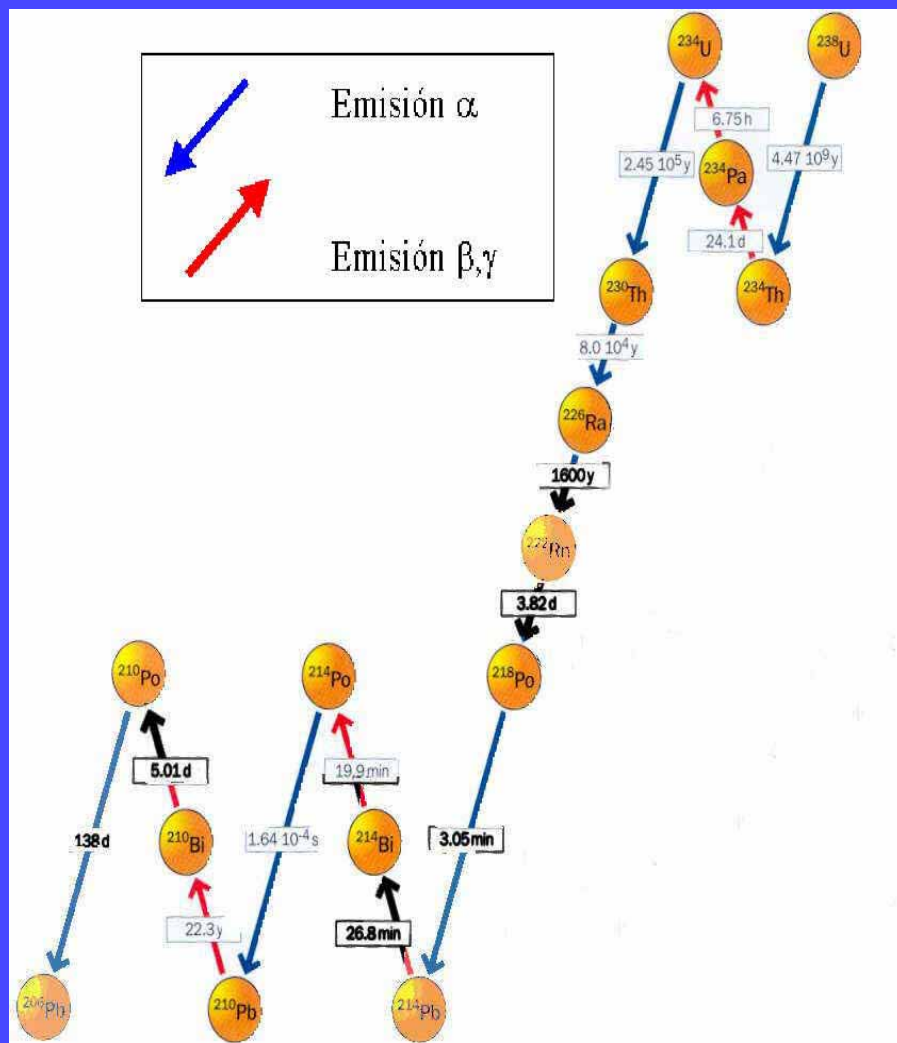


Relación  $C_{air}/C_w$

$$C_{air} = f C_w$$

$$f = 10^{-4}$$

# Descendientes del radón



Radón químicamente inerte/vida media larga

Bajo nivel de retención

Descendientes químicamente activos/vida media corta

Mayor nivel de retención (hasta 24 h)



# Descendientes del radón

Tamaño (nm)



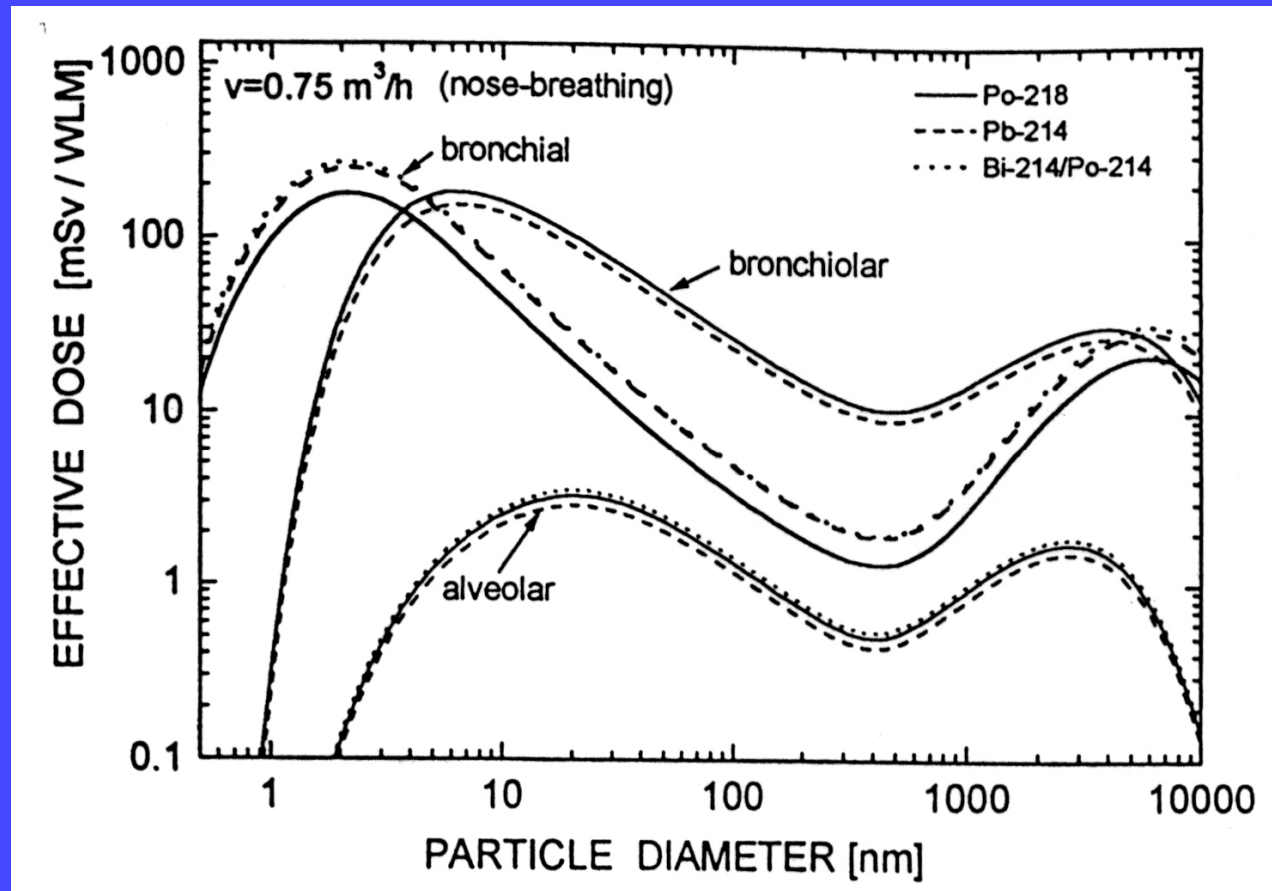
0.5 - 1

10 - 1000



Vargas 2004  
Porstendorfer 1994

# Descendientes del radón



Ref: Porstendorfer and Reinninger, 1998

# Descendientes del radón

## Mecanismos de desaparición de descendientes

Desintegración  $\lambda = 1.6 - 14 \text{ h}^{-1}$

Ventilación  $\lambda = 0.5 \text{ h}^{-1}$

$\lambda = 0.1 \text{ h}^{-1}$  (aerosoles)

Deposición en superficies  $\lambda = 20 \text{ h}^{-1}$  (libres)

**Mecanismo predominante**

Velocidad de deposición inversa al tamaño

Causa desequilibrio radón/descendientes

Deposición tanto mayor cuanto mayor es  $S/V$

# Magnitudes y unidades

(ICRP 32)

Para caracterizar la presencia de descendientes no basta con conocer la concentración de gas radón

● Energía potencial alfa 

Energía alfa emitida por la desintegración de todos los átomos hasta alcanzar el  $^{210}\text{Pb}$


● Concentración en energía potencial alfa (PAEC) 

$$\text{PAEC}(\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) = \sum_j E_{aj} \cdot C_j$$

Unidad tradicional: WL (working level): Concentración en energía potencial alfa de una mezcla de descendientes que se encuentra en equilibrio con una concentración de radón de  $3700 \text{ Bq m}^{-3}$

$$1 \text{ WL} = 2.08 \cdot 10^{-5} \text{ J m}^{-3}$$

## Magnitudes y unidades

- Concentración equivalente en equilibrio de una mezcla de descendientes  Concentración de radón en equilibrio con sus descendientes que tiene la misma PAEC que la mezcla en desequilibrio  
(Bq m<sup>-3</sup>)

$$C_{eq} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}) = 0.105 \cdot C_{218\text{Po}} + 0.516 \cdot C_{214\text{Pb}} + 0.379 \cdot C_{214\text{Bi}} + 6 \cdot 10^{-8} \cdot C_{214\text{Po}}$$

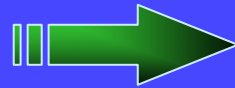
### Relación con la PAEC

$$PAEC(WL) = \frac{C_{eq} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})}{3700}$$

# Magnitudes y unidades



Factor de equilibrio




Relación entre concentración equivalente en equilibrio y concentración real de gas radón

$$F = \frac{C_{eq}}{C}$$

En términos de PAEC

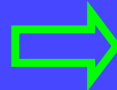
$$F = \frac{WL \cdot 3700}{C(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})}$$

# Magnitudes y unidades

- **Exposición**  Producto de la concentración de descendientes de radón por el tiempo de inhalación de dicha mezcla

En actividad ( $\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$ )

En PAEC ( $\text{J m}^{-3} \text{ h}$ )



Unidad tradicional WLM (working level month):  
Exposición de 1 WL durante un periodo de trabajo de un mes (170 h)

$$1 \text{ WLM} = 6.29 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$$

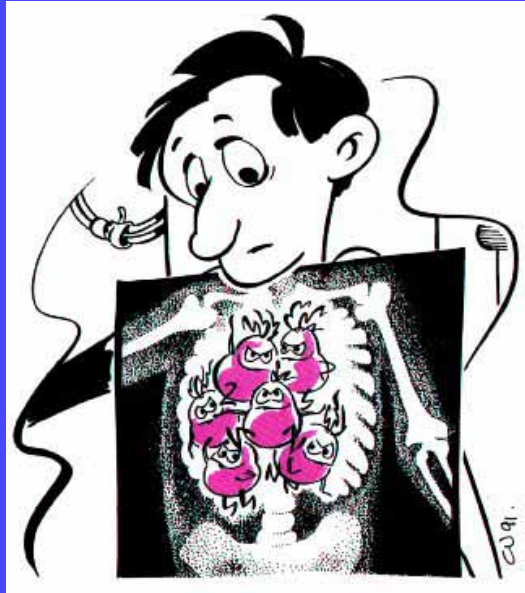
- **Fracción libre**



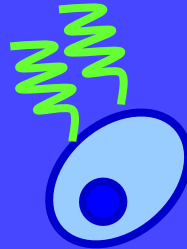
Proporción de descendientes de radón no vinculados a partículas de aerosol

$$f_p = \frac{C_p}{C_{eq}}$$

## Riesgos para la salud



La inhalación de radón (y descendientes) provoca irradiación alfa en las células del tracto respiratorio



Mutaciones, transformación maligna  
Riesgo de cáncer de pulmón

Dos vías de estimación de riesgos

- Epidemiológica
- Dosimétrica





# Riesgos para la salud

## Estudios epidemiológicos

### Estudios en poblaciones de mineros

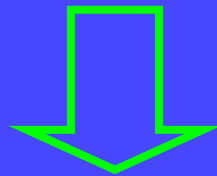
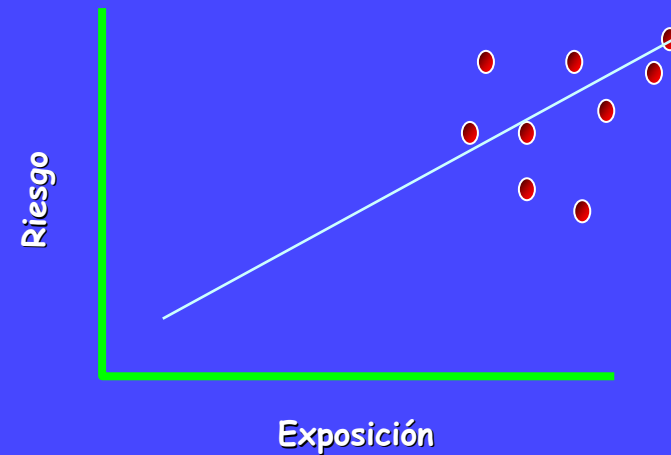
Tasas de exposición altas

Influencia del tabaco

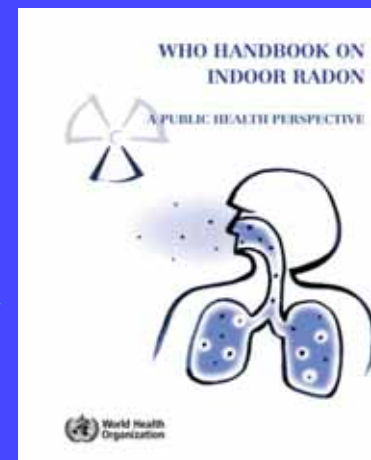
Presencia de otros contaminantes

Condiciones de exposición específicas

(tasas de respiración, variedad concentración de partículas, etc)



Difícil extrapolación al riesgo  
por exposición en viviendas



Próxima  
incorporación  
ICRP

# Riesgos para la salud

## Estimación de riesgos

Datos casos/controles  
Sin resultados concluyentes



ICRP estimación de riesgos por  
extrapolación de estudios  
en población minera

ICRP 65 (1993) cálculo de coeficiente de conversión de exposición a dosis efectiva

$$\text{mSv WLM}^{-1} = \frac{\text{Detrimento por exposición a radón (A)}}{\text{Detrimento por u. de dosis efectiva (B)}}$$

## Riesgos para la salud

Detrimento por exposición a radón (A) → Datos población minera

$$3 \cdot 10^{-4} \text{ WLM}^{-1}$$

Detrimento por unidad de dosis efectiva (B) → Datos Hiroshima Nagasaki  
Experimentos en animales

$$\text{Público } 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$$

$$\text{Trabajadores } 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$$

**Coefficientes de conversión a dosis efectiva**

Público	$3.88 \text{ mSv WLM}^{-1} = 6.09 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$
Trabajadores	$5.06 \text{ mSv WLM}^{-1} = 7.95 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$

Para convertir a exposición a gas radón hay que conocer F (medida/bibliografía)

$$\text{Ej. } F = 0.4 \quad 2.4 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h (público)}$$

# Riesgos para la salud

## Modelo dosimétrico

### Estimación de la dosis por unidad de exposición a partir de modelo de las vías respiratorias

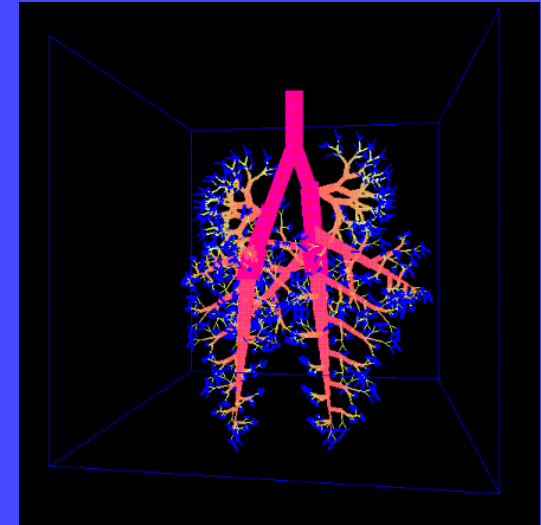
Periodo de retención de descendientes

Factor de ponderación de la radiación alfa

Sensibilidad tejido pulmonar

Factores de ponderación de cada región

Funciones de probabilidad



Aplicado a las condiciones de mineros (Birchall 1994)  $15 \text{ mSv WLM}^{-1}$

Aplicado a las condiciones de viviendas (Marsh 2002)  $12 \text{ mSv WLM}^{-1}$

## Riesgos para la salud

### Influencia de fracción libre y factor de equilibrio

A partir de medidas de aerosoles en viviendas (Marsh y Birchall 1998)

$$\text{mSv WLM}^{-1} = 11.3 + 43 f_p \text{ o también}$$

$$\text{nSv por Bq m}^{-3} \text{ h} = F (17.82 + 67.51 f_p)$$

Para valores típicos  $f_p = 0.08$  y  $F = 0.4$



$$14 \text{ mSv WLM}^{-1} = 9 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$$

El factor de equilibrio  $F$  es determinante  
y se relaciona inversamente con la fracción libre  $f_p$

# Riesgos para la salud

Aproximación  
epidemiológica



Aproximación  
dosimétrica

Factor < 3

Modificar algunos factores de ponderación usados por ICRP

- Pulmón (0.12 a 0.04)
- Partículas alfa (20 a 7)
- Regiones pulmonares

Cambios significativos en la  
dosimetría de otros radionucleidos

