

Métodos de modelización del radón en recintos cerrados.

Ll. Font

Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Spain

UAB
Universitat Autònoma de Barcelona



CONTENIDO

Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización.

Técnicas para la modelización/simulación de los niveles de radón en interiores.

Ejemplos.

Conclusiones y perspectivas.

Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización

¿Qué sabemos de la generación, transporte, entrada y acumulación de radón en recintos cerrados?:

- Se genera por la desintegración del Ra-226 presente en la corteza terrestre. ➡ Emanación al espacio poroso (aire, agua)
- Transporte a través de un medio poroso por 2 mecanismos:

Difusión (Ley de Fick)

$$\Phi_d = -D_e \nabla C_{Rn}$$

Advección (Ley de Darcy)

$$\Phi_a = \frac{v}{\epsilon} C_{Rn} = -\frac{C_{Rn} k}{\epsilon \mu} \nabla P$$



Ecuación de transporte

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial (C_{Rn,a} \epsilon_a + C_{Rn,w} \epsilon_w)}{\partial t} = D_e \nabla^2 C_{Rn,a} - \nabla C_{Rn,a} \frac{v'}{\epsilon_a} + f' \rho_{gr} \frac{1-\epsilon}{\epsilon} A_{Ra} \lambda_{Rn} - \frac{1}{\epsilon} \lambda_{Rn} (C_{Rn,a} \epsilon_a + C_{Rn,w} \epsilon_w)$$



$$\frac{\partial C_{Rn,a}}{\partial t} = D_e \nabla^2 C_{Rn,a} - \frac{k}{\epsilon \mu} \nabla P \nabla C_{Rn,a} + f \rho_{gr} \frac{1-\epsilon}{\epsilon} A_{Ra} \lambda_{Rn} - \lambda_{Rn} C_{Rn,a}$$



En esta expresión el contenido de agua en el medio poroso no está considerado

Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización

¿Qué sabemos de la generación, transporte, entrada y acumulación de radón en recintos cerrados?:

- ✓ Penetra al interior de recintos cerrados a través de juntas, grietas, conductos sanitarios, etc.
- ✓ Origen del gradiente de concentración: $C_{Rn,suelo} \sim 10^4 - 10^5 \frac{Bq}{m^3} \gg C_{Rn,interiores} \sim 10 - 10^3 \frac{Bq}{m^3}$
- ✓ Origen del gradiente de presión (despresurización del edificio respecto del suelo adyacente):

- Diferencias de temperatura interior-exterior.
- Viento incidiendo en las paredes del edificio.
- Uso de sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning).
- Caídas bruscas de la presión atmosférica.
- Lluvia intensa (efecto pistón).

$$\left. \begin{array}{l} \Delta P \sim (5 - 10) Pa \quad \sim \text{Sostenida} \\ P_{atm} \sim 10^5 Pa \\ \Delta P \sim 10^2 Pa \quad \text{Transitorias} \end{array} \right\}$$

- ✓ Cuando los niveles de radón son elevados, la fuente principal **suele** ser el suelo adyacente y el mecanismo principal de entrada la advección.
- ✓ El radón proveniente del suelo puede ser generado localmente (pocos metros) o en sistemas fracturados provenir de varios km de distancia.



No siempre es así.

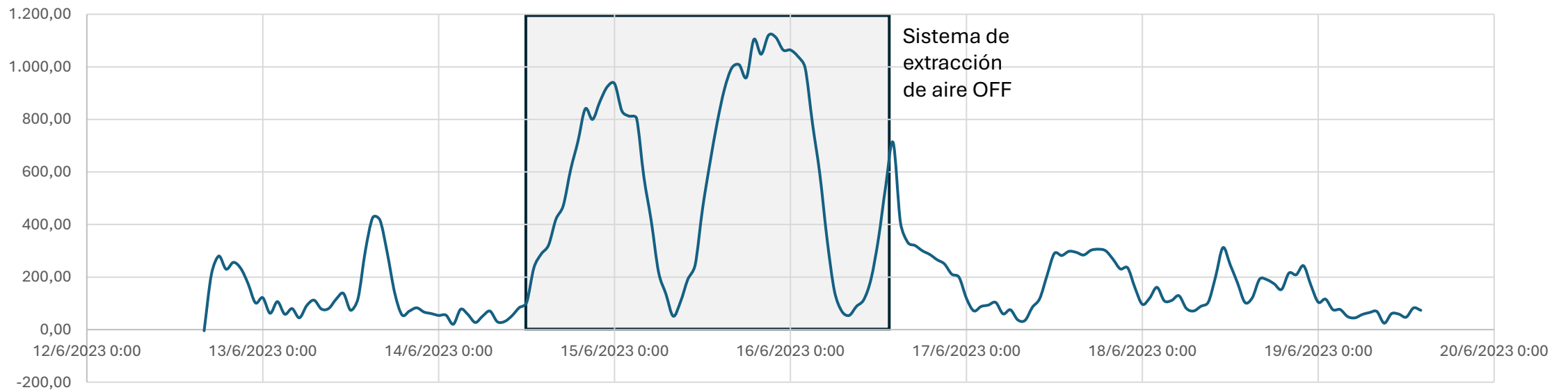
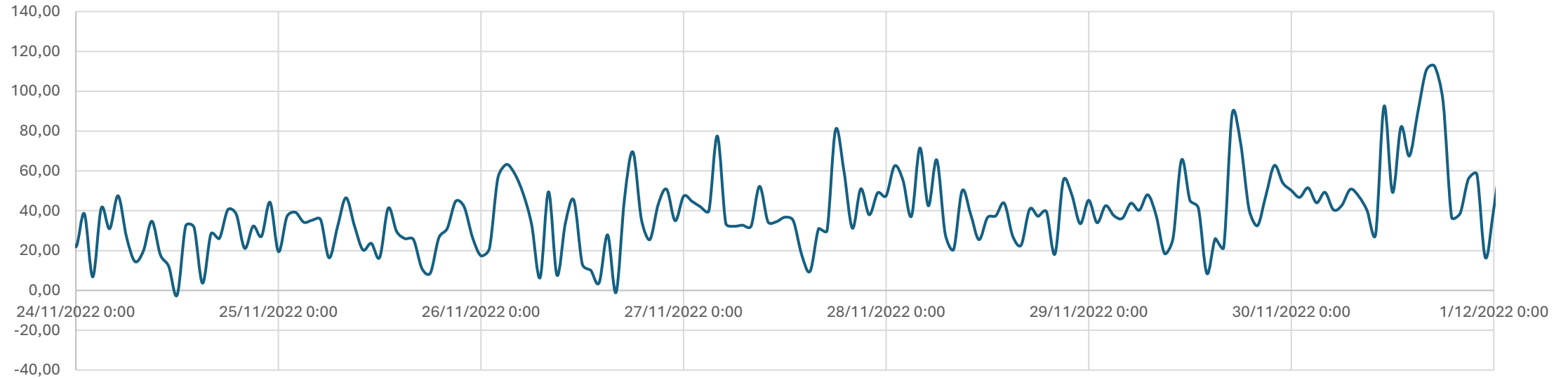
Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización

¿Qué sabemos de la generación, transporte, entrada y acumulación de radón en recintos cerrados?:

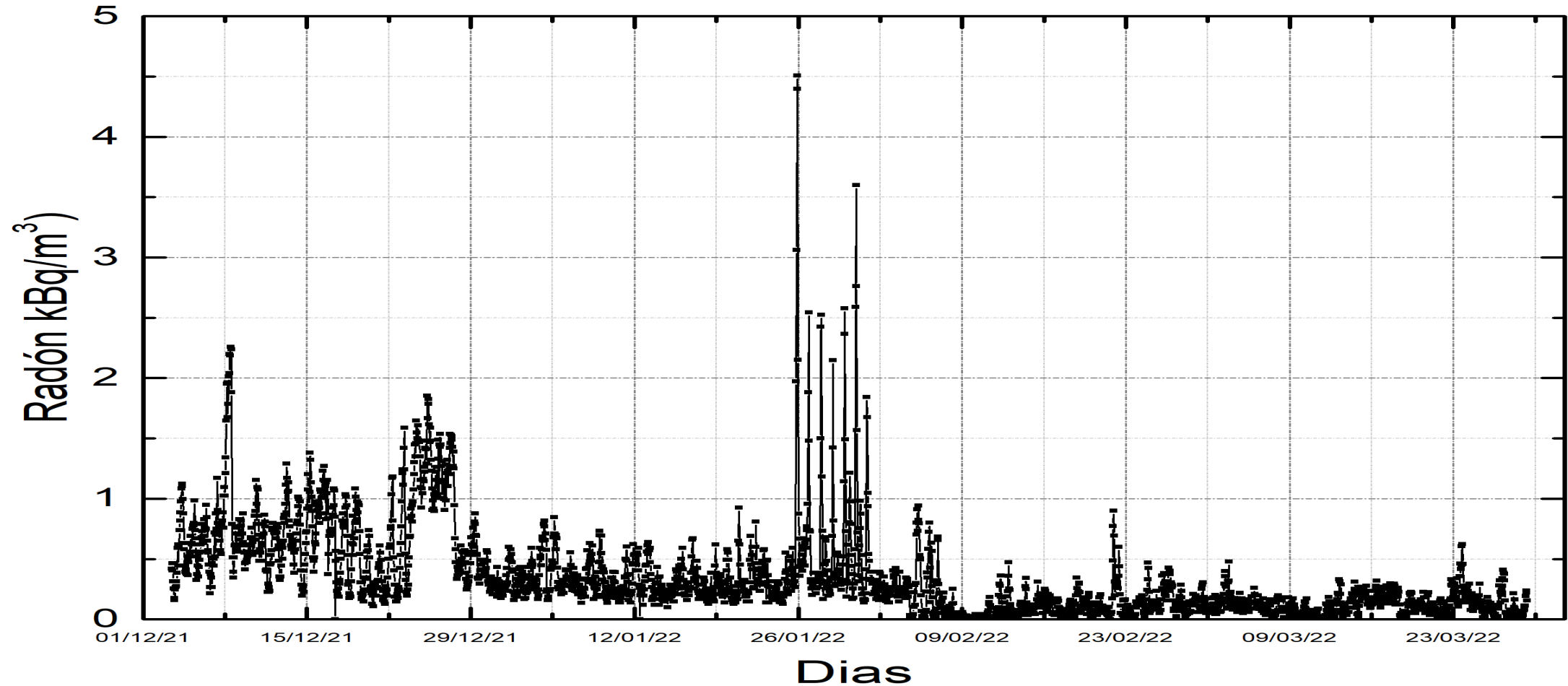
- ✓ El suelo adyacente al edificio no suele ser ni homogéneo ni isotrópico respecto a los parámetros relacionados con el radón (contenido en Ra, permeabilidad, coeficiente de difusión, etc.)
- ✓ Variaciones en el contenido de agua (lluvia, nivel freático, riego) influyen enormemente en el coeficiente de emanación y en los parámetros de transporte (coeficiente de difusión y permeabilidad).
- ✓ La exhalación desde los materiales de construcción puede ser relevante en algunos casos.
- ✓ El uso de agua de origen subterráneo (pozo) o de gas natural "cercano" a la zona de extracción pueden ser relevantes.
- ✓ Una vez en el interior de un edificio, es transportado entre las distintas habitaciones de acuerdo con los caudales de aire internos y sale al exterior por puertas y ventanas (ventilación). La concentración de radón en una sala es "razonablemente" homogénea.
- ✓ Las variaciones espaciales y temporales de los niveles de radón pueden ser muy complicadas.

Niveles de radón en un lugar de trabajo subterráneo de zona I

Rn222(Bq/m3)



Niveles de radón en un dormitorio de una casa habitada en un municipio zona II (planta baja)



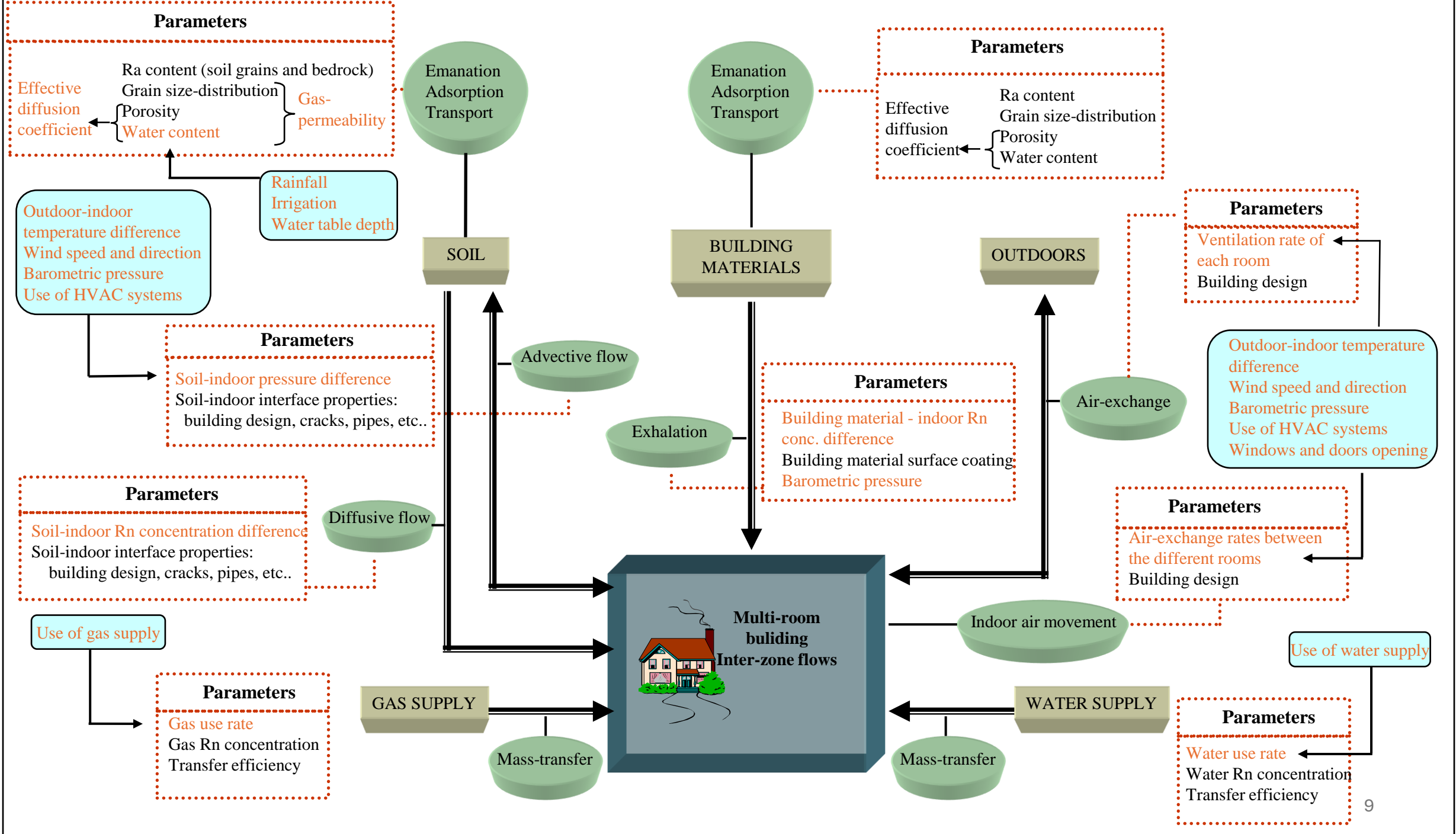
Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización



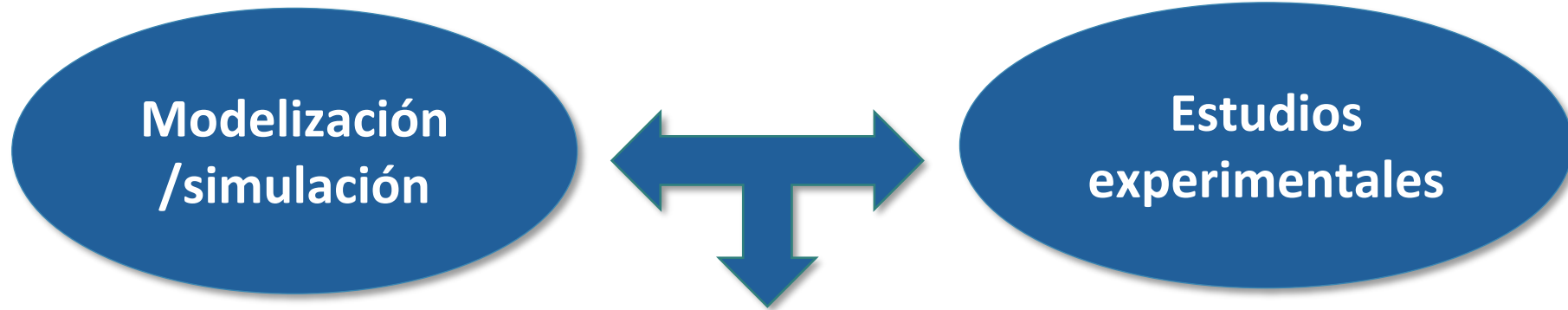
COURTESY MINNESOTA DEPARTMENT OF HEALTH

Radon can enter your home via a number of entry points or pathways

- A** Cracks in concrete slabs
- B** Spaces behind brick veneer walls that rest on uncapped hollow-block foundations
- C** Pores and cracks in concrete blocks
- D** Floor-wall joints
- E** Exposed soil, as in a sump or crawl space
- F** Weeping (drain) tile, if drained to an open sump
- G** Mortar joints
- H** Loose fitting pipe penetrations
- I** Open tops of block walls
- J** Building materials: brick, concrete, rock
- K** Well water (not commonly a major source in Minnesota homes)



Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización



Identificación de las vías de entrada en un lugar concreto

Identificación de los (principales) mecanismos de entrada (difusión, advección)



Establecimiento de métodos de mitigación eficientes (optimización)

Desarrollo de guías de descontaminación en áreas contaminadas.

Comprensión del problema

No olvidemos: modelizar siempre implica asumir aproximaciones que simplifican el sistema.

Técnicas para la modelización/simulación de los niveles de radón en interiores

Distributed-parameter model

- Las variables de interés son función de 1 o más coordenadas espaciales y también pueden ser función del tiempo.
- Las variables se pueden indexar de forma continua o discreta tanto en el espacio como en el tiempo.
- En general, se resuelve un conjunto de Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales. **Requieren potencia computacional.**
- Se precisa tener un conocimiento detallado del sistema (interfase suelo-edificio). **¿Cómo obtenerlo/simularlo?**
- Ejemplo: modelos basados en Computational Fluid Dynamics (CFD).

Lumped-parameter model

- Las variables de interés son función únicamente del tiempo. **Sin resolución espacial.**
- El valor de una variable se asume como cte. en un cierto volumen (homogeneidad, valor efectivo). **¿Cómo obtener valores efectivos que sean representativos?**
- En general, se resuelve un conjunto de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDOs) de primer orden. Simplicidad.
- Ejemplos: modelos compartimentales (de cajas); analogía con un circuito eléctrico.

Ejemplo 1: Distributed-parameter model basado en CFD utilizando COMSOL Multiphysics

La ecuación de transporte dependiente del tiempo se resuelve numéricamente en una malla 3-dimensional mediante elementos finitos teniendo en cuenta tanto difusión como advección.

$$\frac{\partial \varepsilon C}{\partial t} = D \nabla^2 C + \frac{k}{\mu} C \nabla P - \lambda \varepsilon C + \varepsilon G$$

La interfase de usuario de COMSOL permite la modelización de los niveles de radón en el interior mediante 5 pasos:

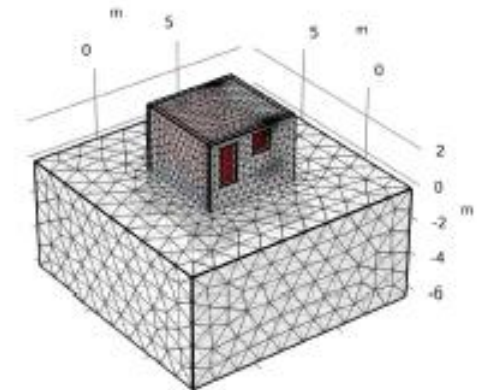
Definición de la geometría

Introducción de los materiales y procesos

Definición de los procesos de transporte y de las condiciones de contorno

Mallado

Estudio estacionario y/o dinámico



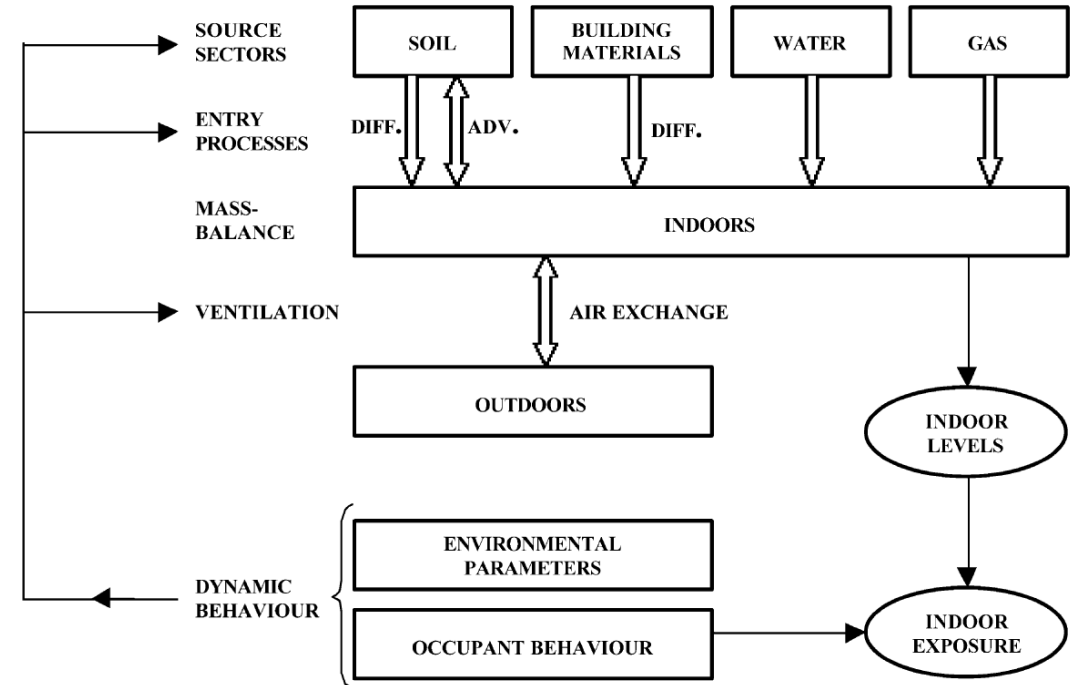
*Ver charla Jesús García-Rubiano et al. en el marco del proyecto **RADSIM***

Definition and sensitivity analysis of a CFD model for the study of radon immission in buildings. B. Frutos, I. Sicilia et al. 10th RAD. International Conference on Radiation in various field of research. 2022.

<https://doi.org/10.21175/rad.spr.abstr.book.2022.37.1>

Ejemplo 2: El modelo de cajas RAGENA utilizando el software STELLA

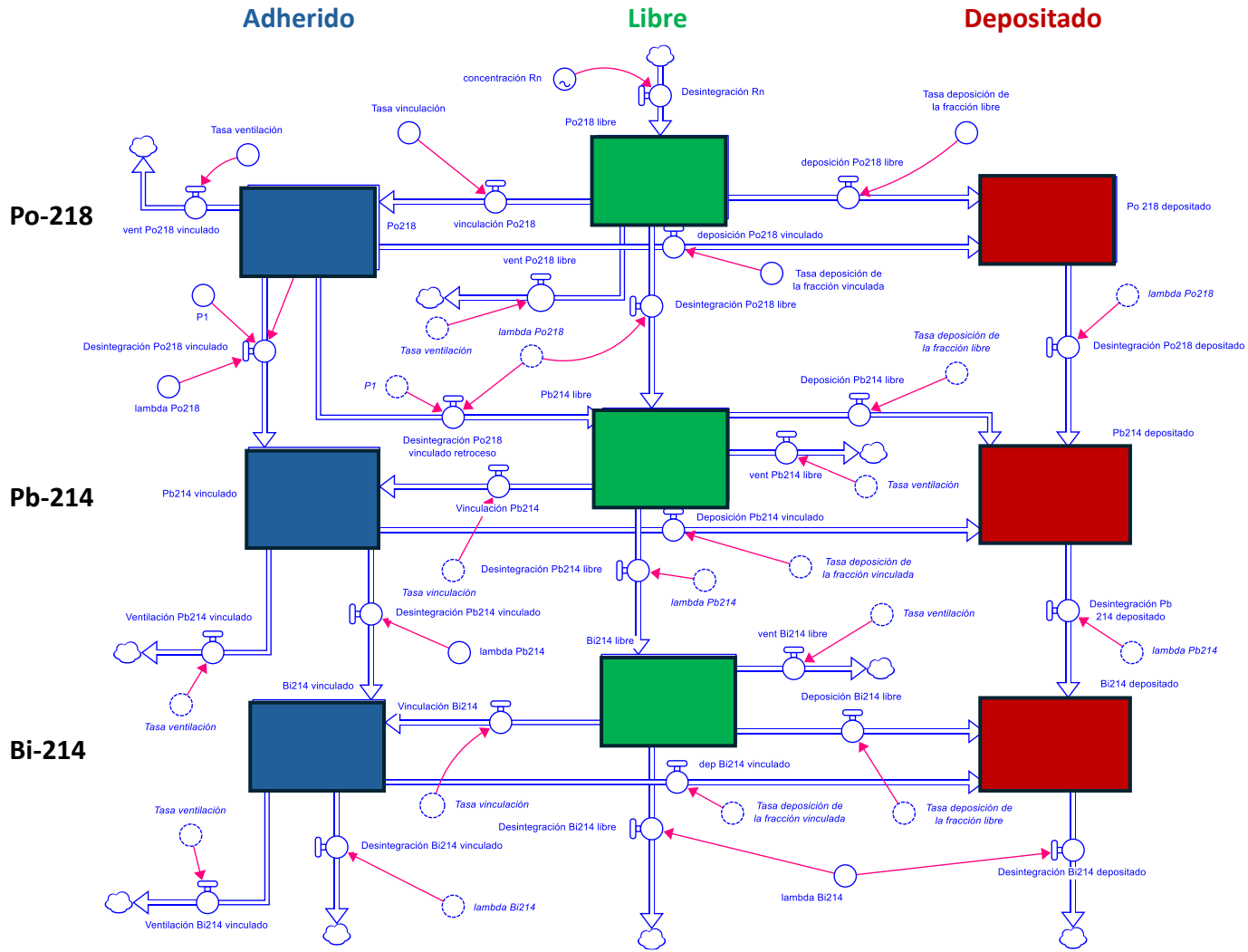
- ✓ Estructurado en sectores.
- ✓ Considera todos los parámetros y procesos que intervienen desde la generación del radón en el medio hasta su acumulación en distintas habitaciones (de una manera sencilla). Primera versión de un modelo dinámico global de radón (GDRM)
- ✓ Los coeficientes de transferencia entre compartimentos están asociados a las leyes físicas en la medida de lo posible.
- ✓ Los inputs se pueden definir como valores ctes, una serie temporal de datos, o una distribución de probabilidad.
- ✓ Outputs: : $C_{soil}(t)$, $C_{BM,l}(t)$, $C_{in,j}(t)$, ER(Bq/s) para cada fuente.
- ✓ Permite la incorporación del patrón de ocupación de los habitantes para estimar la exposición.
- ✓ En el marco del proyecto **RADOSIS** se ha incorporado la simulación de los descendientes.



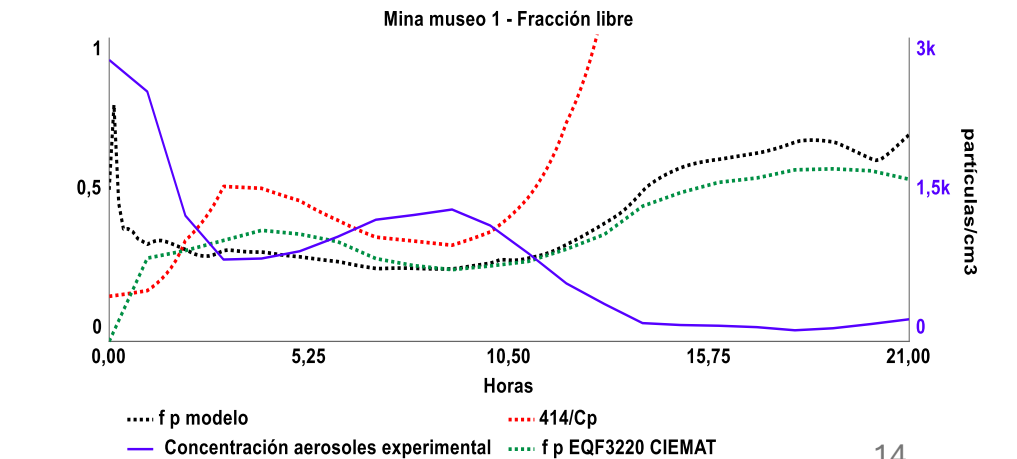
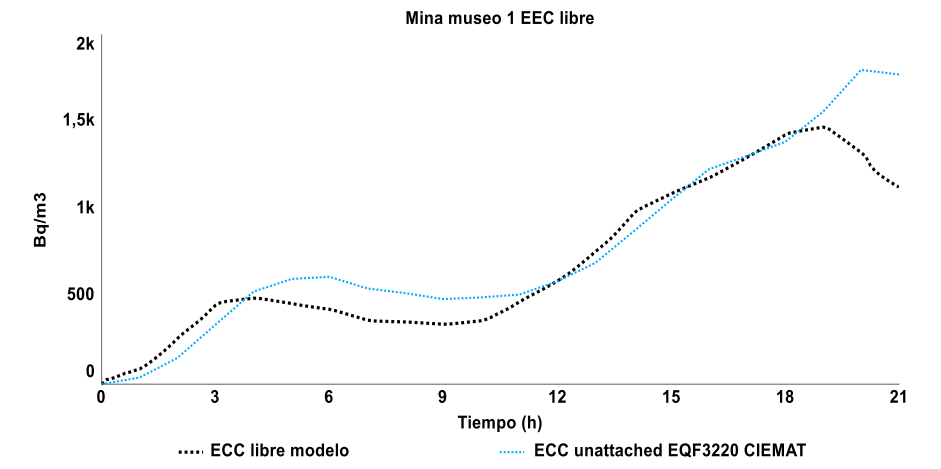
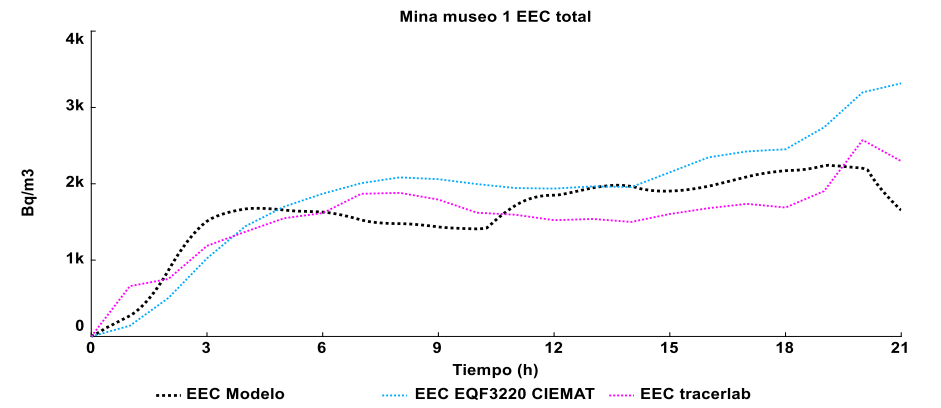
*Ver charla Jesús García-Rubiano et al. en el marco del proyecto **RADSIM***

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{k_d}{\lambda_{Rn}} (C_{ds} - C_i) + \frac{k_a}{\lambda_{Rn}} C_{ds} \Delta P_{s-i} + \sum_{l=1}^n \frac{k_{d,bm}^l}{\lambda_{Rn}} (C_{bm}^l - C_i) + \frac{C_w U_w t_w}{\lambda_{Rn}} + \frac{C_g U_g t_g}{\lambda_{Rn}} - \sum_{j=0}^p \left(q_{ij} \frac{C_i}{\lambda_{Rn}} - q_{ji} \frac{C_j}{\lambda_{Rn}} \right) - \lambda_{Rn} N_i$$

Modelización descendientes en RAGENA (modelo Jacobi mejorado)



Proyecto RADOSIS. Arturo Vargas, Lluís Font, Claudia Grossi, Victoria Moreno



Conclusiones y perspectivas

		LUMPED-PARAMETER MODEL		DISTRIBUTED-PARAMETER MODEL
Entrada desde el suelo	✘	C_{Rn} no está distribuida uniformemente. No pensado para resolución espacial.	✓	Resolución ecuación transporte. Estudio detallado. Resolución espacial.
Entrada desde materiales de construcción	✘	C_{Rn} no está distribuida uniformemente. No pensado para resolución espacial.	✓	Resolución ecuación transporte. Estudio detallado. Resolución espacial.
Entrada por consumo agua y gas natural	✓	Se incluye muy fácilmente.	✓	Normalmente no se incluye, pero no debería ser un problema.
Distribución Rn en distintas salas	✓	EDOs describen bien el balance en una sala. La C_{Rn} sí que suele ser uniforme	✘	Requiere recursos computacionales.
Dinámica del Rn	✓	Sencillo incluir parámetros con variaciones temporales	✘	Requiere recursos computacionales. Normalmente únicamente estado estacionario.
Descendientes del Rn	✓	Sencillo incluir el modelo de Jacobi	✘	Requiere recursos computacionales.
Simulación medidas remedio	✓	Contemplar todos los procesos, pero de forma sencilla.	✓	Estudio detallado en condiciones estacionarias

Conclusiones y perspectivas

Utilizaremos una técnica u otra en función de los objetivos de nuestro estudio. En gral. para un estudio más detallado queremos resolver la ecuación de transporte. Para un estudio más global en el que se tengan en cuenta todas las posibles fuentes de radón y, especialmente, la distribución de radón en distintas salas de un edificio, probablemente sea más adecuado un modelo compartimental.

La extensión del modelo RAGENA que simula los descendientes ha sido probado con éxito en la cámara de radón del INTE y estamos obteniendo resultados prometedores en los emplazamientos reales.

Perspectivas

Acoplamiento de modelos basados en CFD a modelos compartimentales.

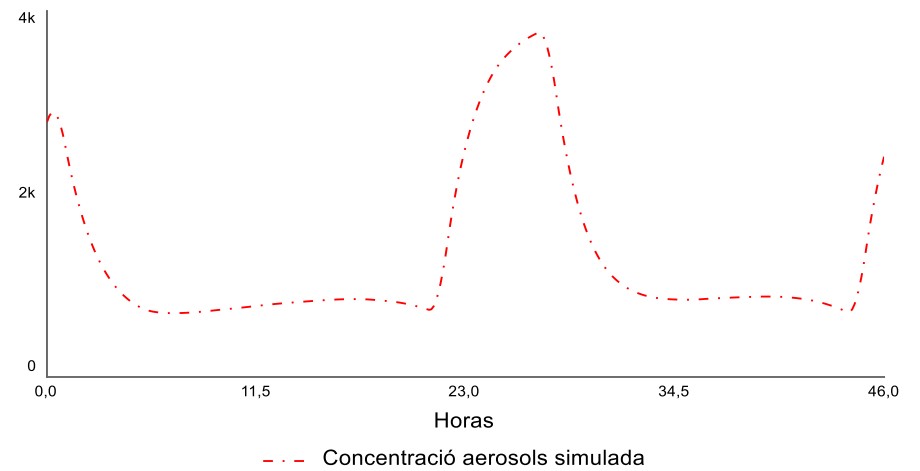
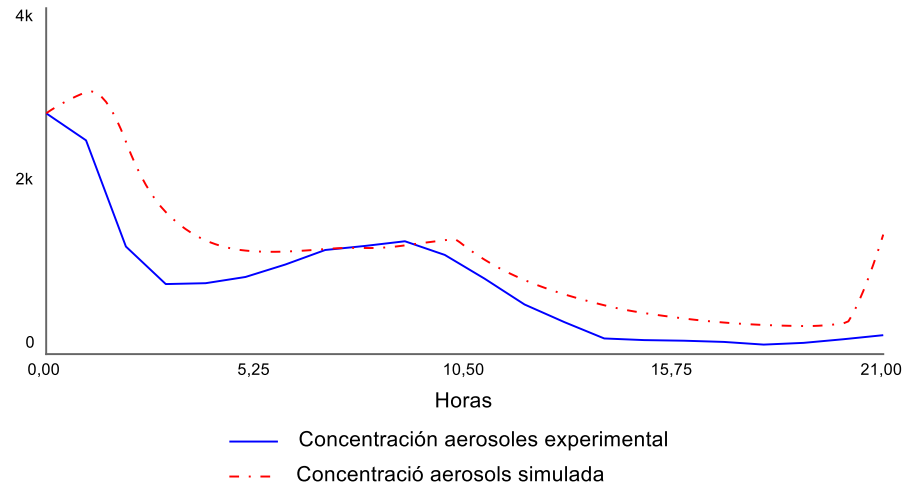
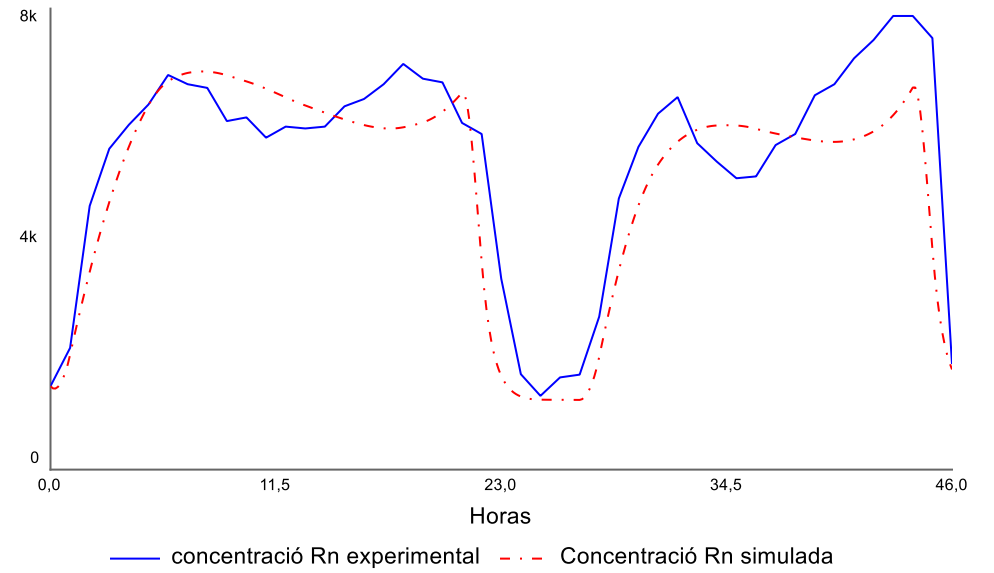
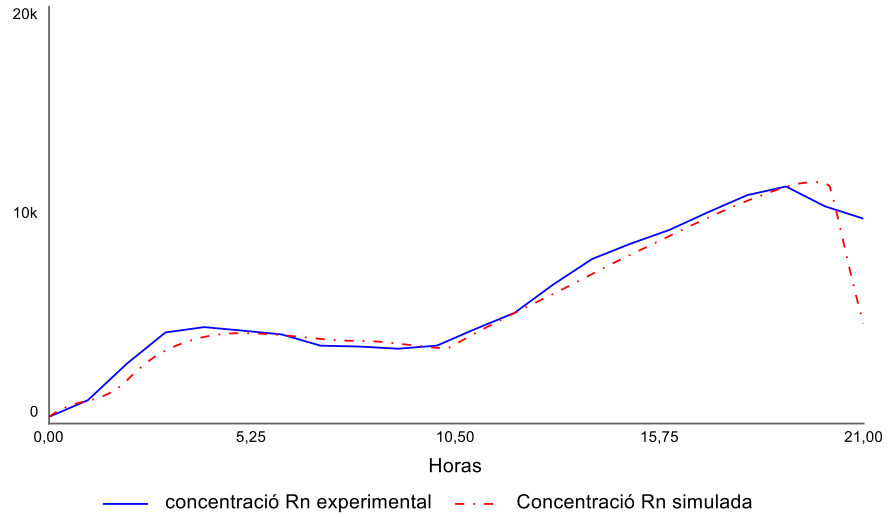
Incorporación del conocimiento generado en modelos parciales a un Modelo Dinámico Global de Radón compartimental (GDRM)

RAGENA extendido con los descendientes será una buena herramienta de ayuda para la optimización del cálculo dosimétrico.

La simulación dinámica permitirá estimar la dosis teniendo en cuenta el horario de trabajo de los trabajadores.

Muchas gracias por vuestra atención!

BACKUPS



Técnicas para la modelización/simulación de los niveles de radón en interiores

Distributed-parameter models

- Resolución numérica de la ecuación de transporte en un medio poroso (suelo, materiales de construcción) y de la entrada del radón en un edificio.

Mallado adecuado a la geometría del edificio y definición de las condiciones de contorno

Resolución de la ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 P = 0$$

Introducción del campo de presiones y resolución de la ecuación de transporte (C_{Rn})

Estudio estacionario y/o dinámico

Conocer o considerar de alguna forma la geometría de las grietas y juntas en el edificio.

Si no hay información acerca de distintas capas del suelo, se considera homogéneo respecto a contenido en R_a , coeficiente de emanación, porosidad, permeabilidad, coeficiente de difusión y contenido en agua.

Añadir a la simulación edificios con varias habitaciones y con una dinámica de caudales de ventilación compleja aumenta el tiempo de cálculo.

Existen paquetes de software comerciales que permiten modelizar en ordenadores personales.

Técnicas para la modelización/simulación de los niveles de radón en interiores

Lumped-parameter models

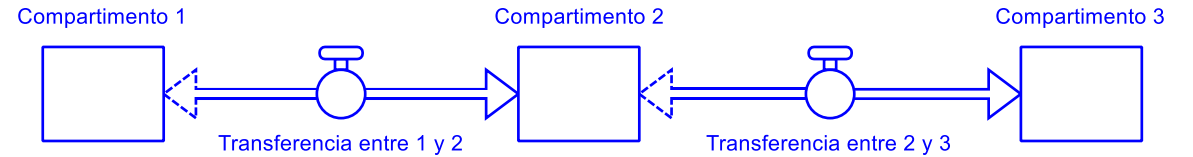
- Modelos compartimentales

Definición de los compartimentos

Establecimiento de los mecanismos de transferencia y de los coeficientes de transferencia K_{ij} .

Resolución (numérica) de las ecuaciones de balance (EDOs)

Estudio estacionario y/o dinámico



$$\frac{dC_{Rn,1}}{dt} = -K_{1,2}(C_{Rn,1} - C_{Rn,2})$$

$$\frac{dC_{Rn,2}}{dt} = K_{1,2}(C_{Rn,1} - C_{Rn,2}) - K_{2,3}(C_{Rn,2} - C_{Rn,3})$$

$$\frac{dC_{Rn,3}}{dt} = K_{2,3}(C_{Rn,2} - C_{Rn,3})$$

Asignar valores representativos o efectivos en cada compartimento. Homogeneidad.

El aumento de compartimentos no aumenta significativamente la complejidad de cálculo, a menos que se quiera introducir una dependencia espacial detallada.

Ejemplo 2: El modelo de cajas RAGENA utilizando el software STELLA

Ejemplo: ecuación de balance para la habitación i , en contacto directo con el suelo, construida con n tipos de materiales de construcción, que intercambia aire con el exterior y con p habitaciones y que dispone de suministro de agua y gas. *(en azul: las variables con dependencia temporal)*

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{k_d}{\lambda_{Rn}} (C_{ds} - C_i) + \frac{k_a}{\lambda_{Rn}} C_{ds} \Delta P_{s-i} + \sum_{l=1}^n \frac{k_{d,bm}^l}{\lambda_{Rn}} (C_{bm}^l - C_i) + \frac{C_w U_w t_w}{\lambda_{Rn}} + \frac{C_g U_g t_g}{\lambda_{Rn}} - \sum_{j=0}^p \left(q_{ij} \frac{C_i}{\lambda_{Rn}} - q_{ji} \frac{C_j}{\lambda_{Rn}} \right) - \lambda_{Rn} N_i$$

Flujo difusivo de entrada desde el suelo. Se asume que tiene lugar únicamente a través de la sección abierta de la interfase entre el suelo y la habitación y que es proporcional a la diferencia de concentraciones de radón entre el suelo y la habitación.

k_d Coeficiente de transferencia por difusión

$$k_d = \frac{D_{e,s} S_{i,s} \sigma}{\omega_f}$$

C_{ds} Concentración de radon en el suelo perturbado

$D_{e,s}$ Coeficiente efectivo de difusión del suelo

C_i Concentración de radon en la habitación i

$S_{i,s}$ Superficie de la habitación i en contacto con el suelo

σ Fracción abierta de la superficie $S_{i,s}$

La presencia de una solera o losa de cimentación es necesaria

ω_f Altura de la losa de cimentación.

Ejemplo 2: El modelo de cajas RAGENA utilizando el software STELLA

Ejemplo: ecuación de balance para la habitación i , en contacto directo con el suelo, construida con n tipos de materiales de construcción, que intercambia aire con el exterior y con p habitaciones y que dispone de suministro de agua y gas. *(en azul: las variables con dependencia temporal)*

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{k_d}{\lambda_{Rn}} (C_{ds} - C_i) + \frac{k_a}{\lambda_{Rn}} C_{ds} \Delta P_{s-i} + \sum_{l=1}^n \frac{k_{d,bm}^l}{\lambda_{Rn}} (C_{bm}^l - C_i) + \frac{C_w U_w t_w}{\lambda_{Rn}} + \frac{C_g U_g t_g}{\lambda_{Rn}} - \sum_{j=0}^p \left(q_{ij} \frac{C_i}{\lambda_{Rn}} - q_{ji} \frac{C_j}{\lambda_{Rn}} \right) - \lambda_{Rn} N_i$$

Flujo advectivo de entrada desde el suelo. Se asume que tiene lugar únicamente a través de la sección abierta de la interfase entre el suelo y la habitación y que es proporcional a la diferencia de presión entre el suelo y la habitación, y a la concentración de radón en el suelo perturbado.

k_a	Coeficiente de transferencia por advección
C_{ds}	Concentración de radon en el suelo perturbado: valor medio.
$\Delta P_{s-i} = P_s - P_i$	Diferencia de presión perturbativa entre el suelo y la habitación i
$k_a = \frac{k S_{i,s} \sigma}{\mu \varepsilon_g \omega_f}$	

k	Permeabilidad del suelo
$S_{i,s}$	Superficie de la habitación i en contacto con el suelo
σ	Fracción abierta de la superficie $S_{i,s}$
ω_f	Altura de la losa de cimentación.
μ	Coeficiente dinámico de viscosidad del suelo
ε_g	Porosidad gaseosa del suelo

La presencia de una solera o losa de cimentación es necesaria

Ejemplo 2: El modelo de cajas RAGENA utilizando el software STELLA

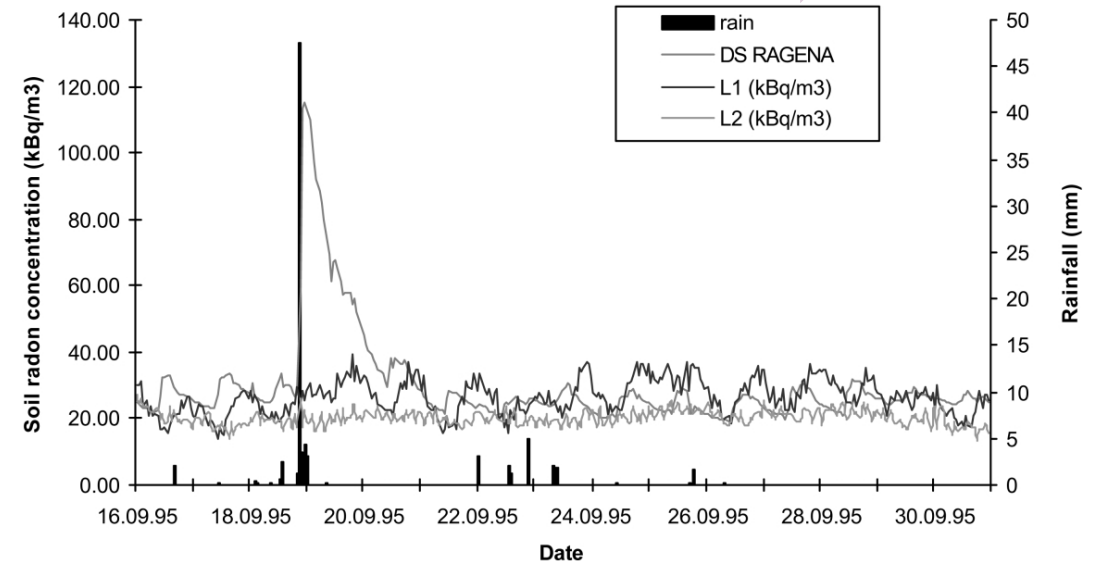
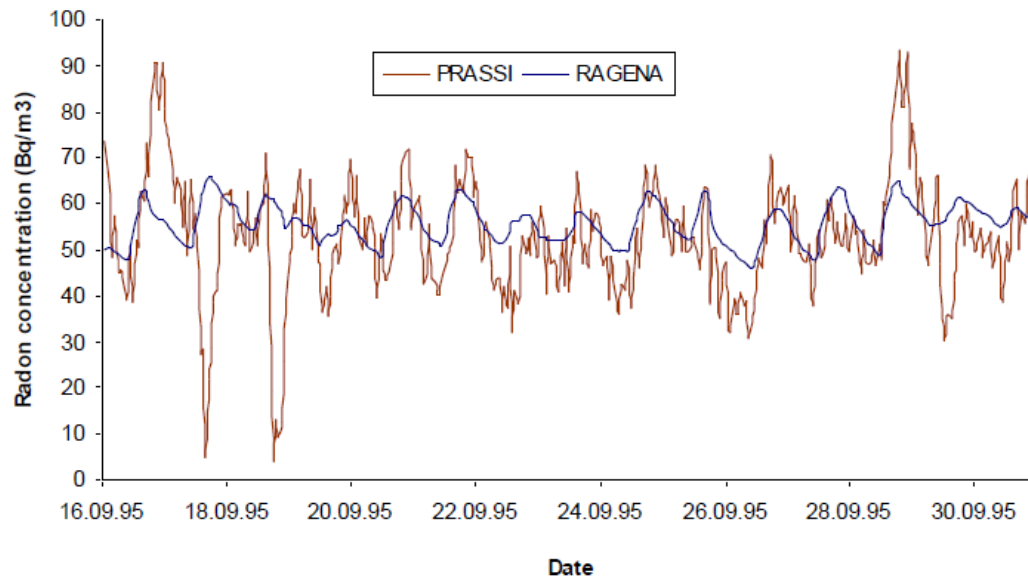
Se ha aplicado a distintos sitios siguiendo un procedimiento bien establecido:

Measured (A)

Indirect info (B)

Reference configuration (C)

Casa unifamiliar habitada en el litoral mediterráneo español.



Ll. Font, C. Baixeras, C. Domingo and F. Fernández. Experimental and theoretical study of radon levels and entry mechanisms in a Mediterranean climate house. Radiat. Meas. 31 (1999) 277.

Ll. Font and C. Baixeras. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors. The Sci. of the Total Env. 307 (2003) 55.

Principal mecanismo de entrada: difusión (exhalación) de los materiales de construcción. Dinámica dirigida por la tasa de ventilación (debida a diferencias de presión *i-o*).

Los niveles de radón en interiores y su dinámica: un reto para la modelización

- Podemos medir los niveles medios de radón
- Sabemos razonablemente bien cómo reducirlos.
- Los (pocos) modelos de simulación no han sido muy exitosos en casos reales (años 90)
- Es prácticamente imposible disponer de toda la información necesaria en un lugar concreto ya construido (p.ej.: el suelo justo debajo de una vivienda en muchas ocasiones ha sido traído de otra obra, y no corresponde con el de ningún mapa; la ventilación influye mucho).



¿Por qué queremos simular/modelizar?