



# Diseño numérico de facilidad PGNAA

*Matías J. Valero*

*Coordinación BNCT, GAATeN, Centro Atómico Ezeiza  
Comisión Nacional de Energía Atómica*

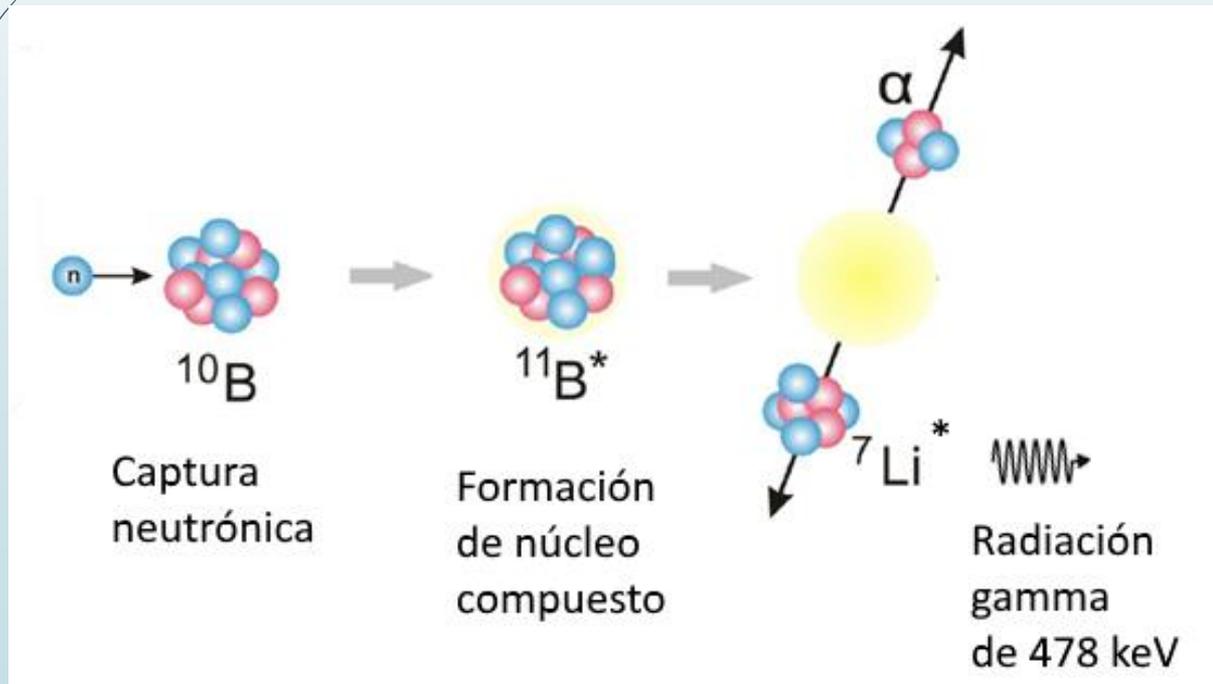
*Departamento de Física y Química. Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Favaloro*

[mvalero@cae.cnea.gov.ar](mailto:mvalero@cae.cnea.gov.ar)

# Análisis de Gamma Instantáneo por Activación Neutrónica

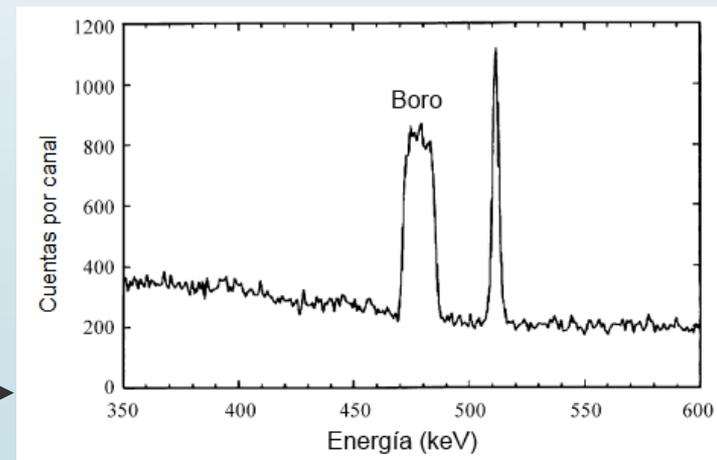
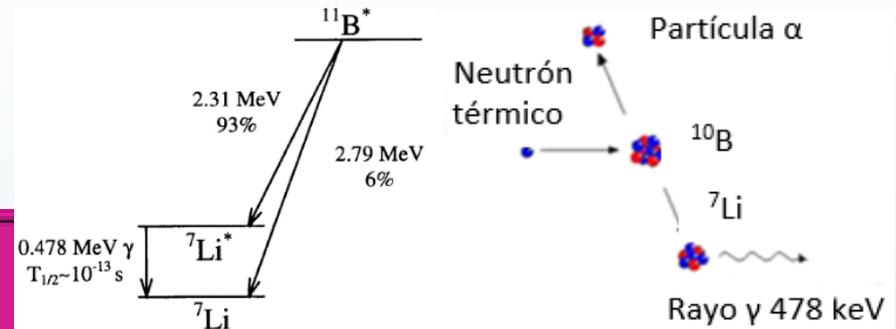
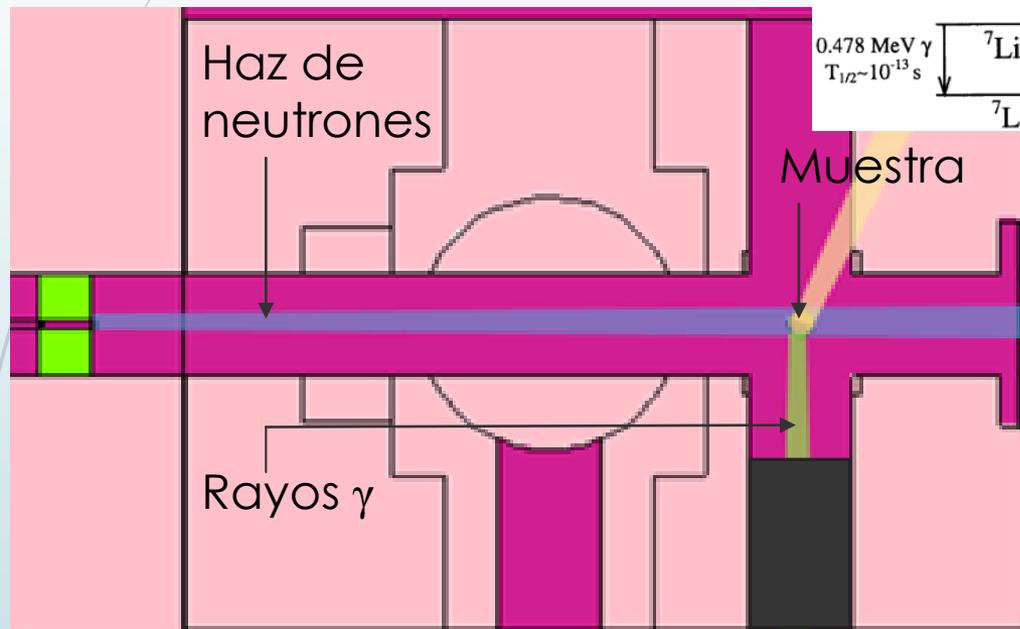
(Prompt-Gamma Neutron Activation Analysis, PGNA)

- Medir concentraciones de boro en muestras biológicas es esencial para BNCT debido a que está relacionado a la dosis terapéutica. Esta técnica permite realizar mediciones en tiempo real.



# Análisis de Gamma Instantáneo por Activación Neutrónica

## Esquema de medición



# Importancia de medición de concentración de boro

## Dosis mixta en BNCT

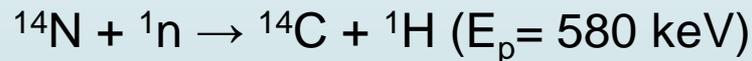
Los tejidos están compuestos en general mayormente por H, C, N y O.

Dosis terapéutica

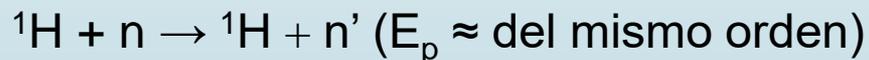
### Dosis boro



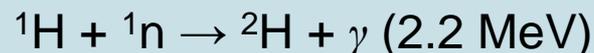
### Dosis por neutrones térmicos



### Dosis por neutrones rápidos

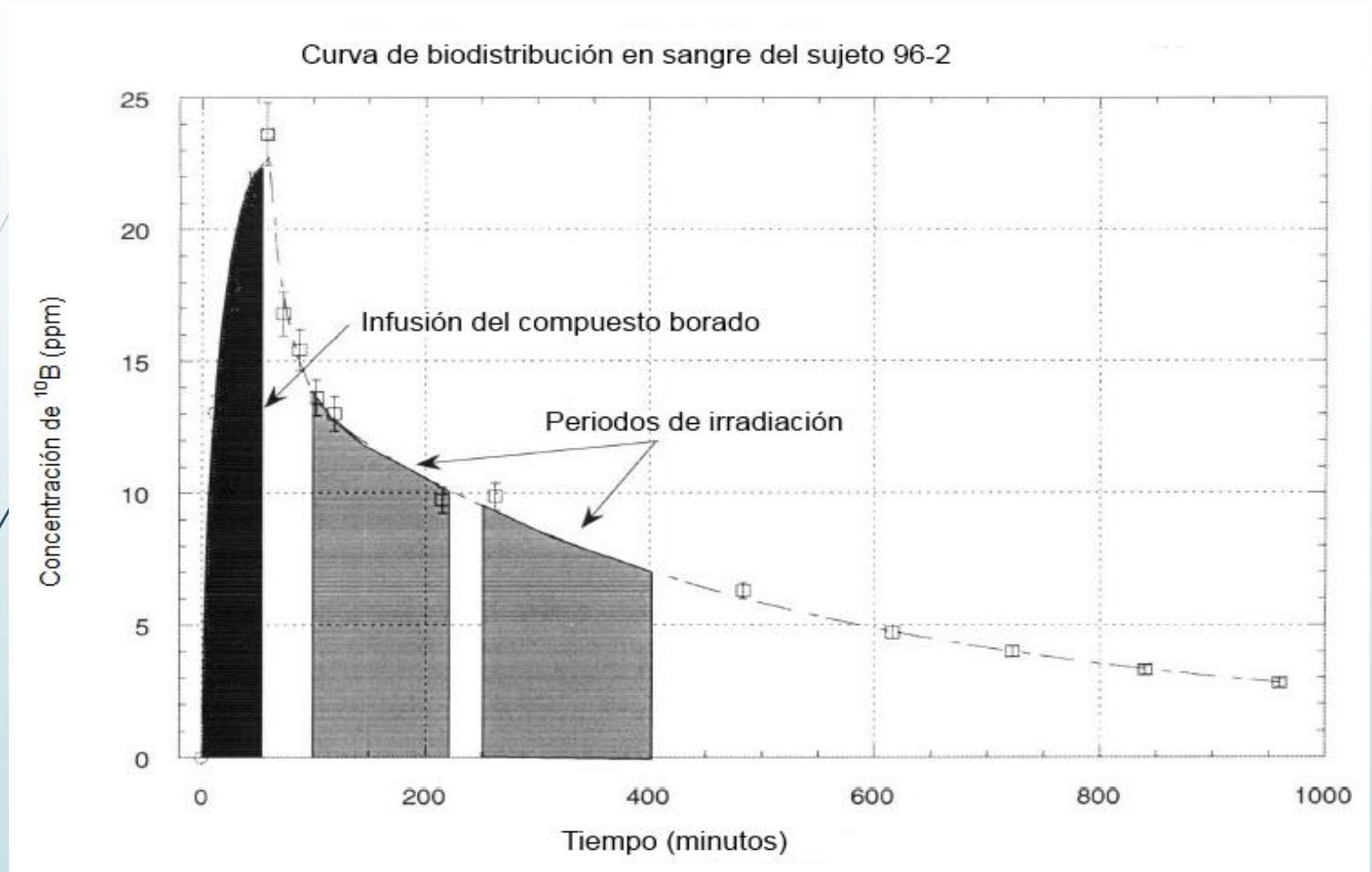


### Dosis por $\gamma$ absorbidos



Inevitable, no específica, mezcla de componentes de bajo y alto LET

# Curva de biodistribución



# Muestras y requisitos de la técnica

## Características de muestras a medir

### Tipo de muestras

Biopsias de pulmón, hígado, piel, tejido tumoral y/o sano y sangre.

### Tamaño

< 0.05 g / ~ 10  $\mu$ l

### Concentración de $^{10}\text{B}$

~ 10 partes por millón

Definen

## Requisitos de diseño de la facilidad PGNAA

### Requerimientos del haz de neutrones en la posición de la muestra

Alto flujo neutrónico térmico ( $\phi_T$ ) (mínimo deseable es de  $\phi_T = 6.0 \cdot 10^7$  n/(cm<sup>2</sup> · s))

Bajas componentes del flujo neutrónico de mayores energías

(Relación  $\phi_E / \phi_T < 1 \%$ )

Relación  $\phi_R / \phi_T < 1 \%$ )

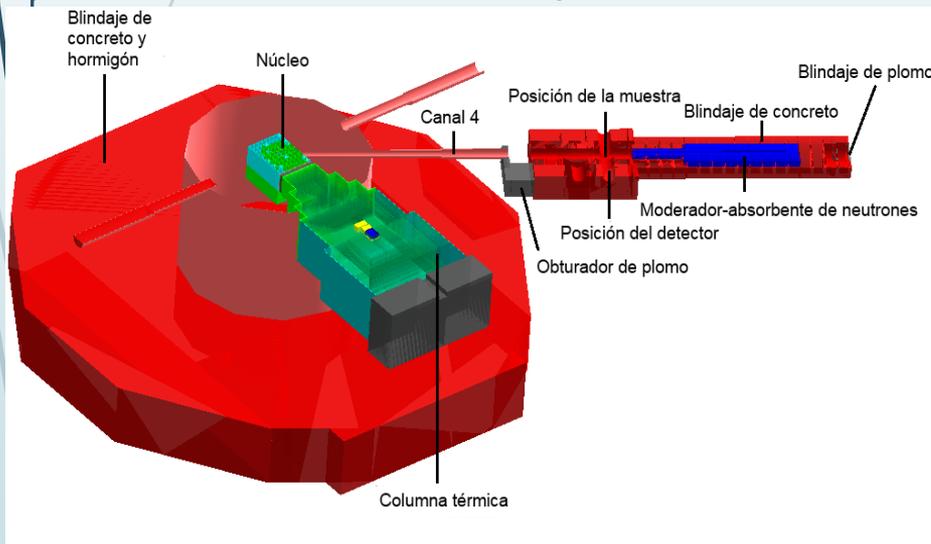
$\phi_E$ : flujo neutrónico epitérmico

$\phi_R$ : flujo neutrónico rápido

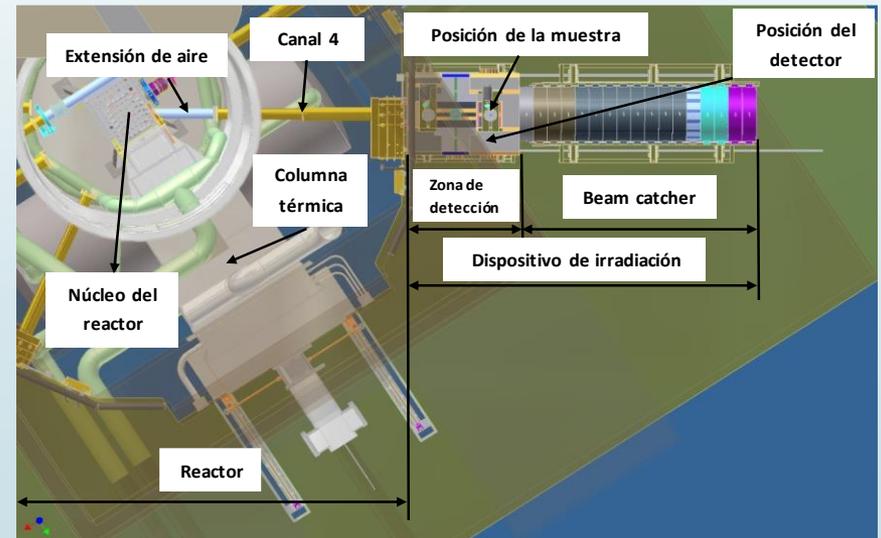
# Diseño guiado por simulación

Se está desarrollando y construyendo una facilidad PGNAA en el Canal 4 del reactor RA-3 por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

Se realizaron diferentes etapas de **simulaciones numéricas** con el código de **transporte de partículas** MCNP 6 1.0, para asistir a los procesos de diseño y caracterización.



Visualización del software Moritz 1.20<sup>[1]</sup>.

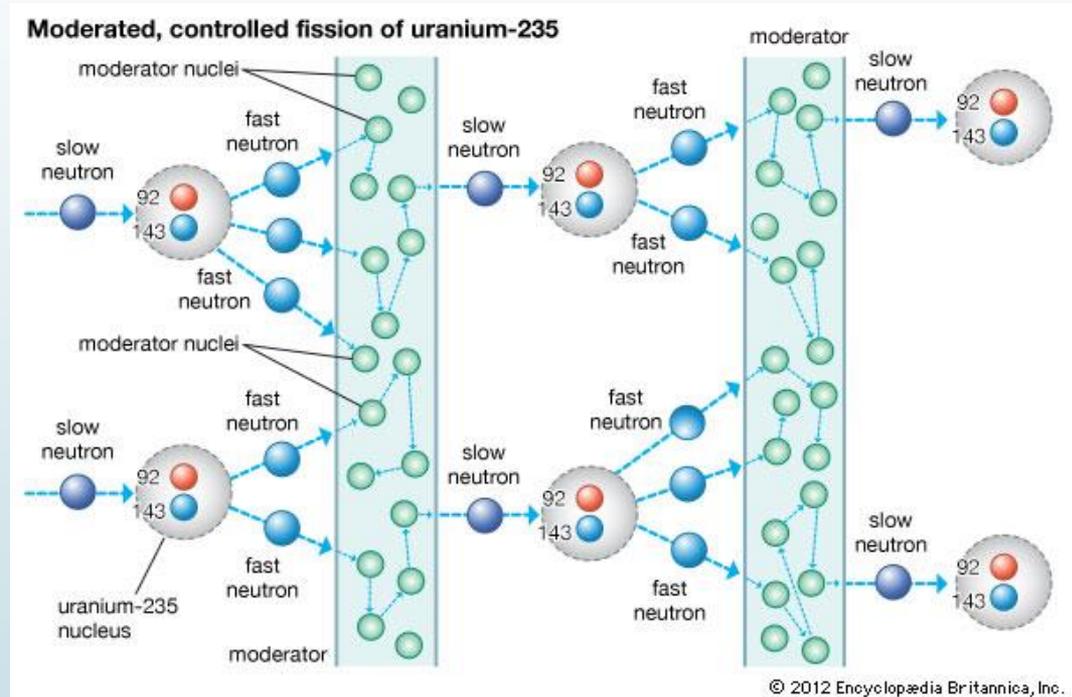
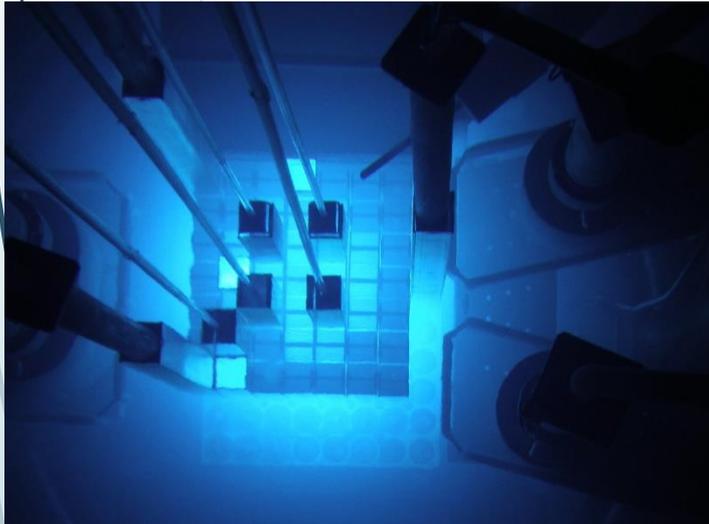


Provisto por Sebastián Langan, comunicación privada.

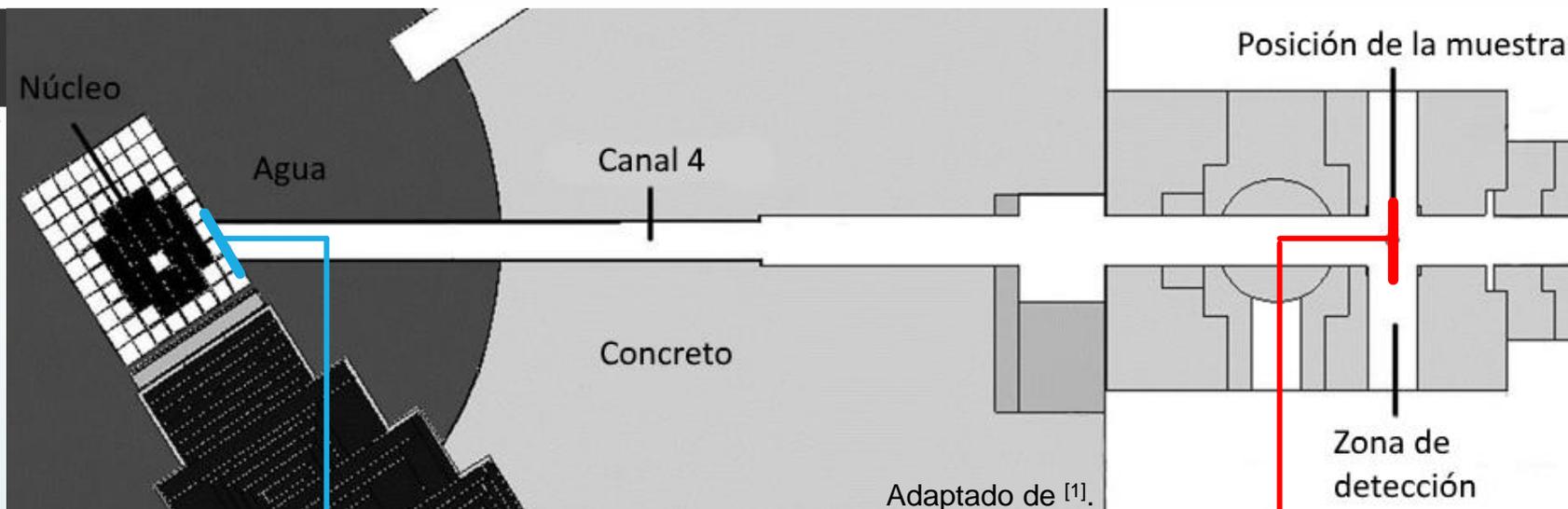
[1] Szejnberg M.L, Gadan M. A., Bortolussi S., Pinto J., Ojeda J., Langan S., ... y Miller M. E. Development of prompt gamma neutron activation analysis facility for 10B measurements at RA-3: Design stage. Appl. Radiat. Isotopes, 69, 1928-1931, 2011

# Fuente de neutrones

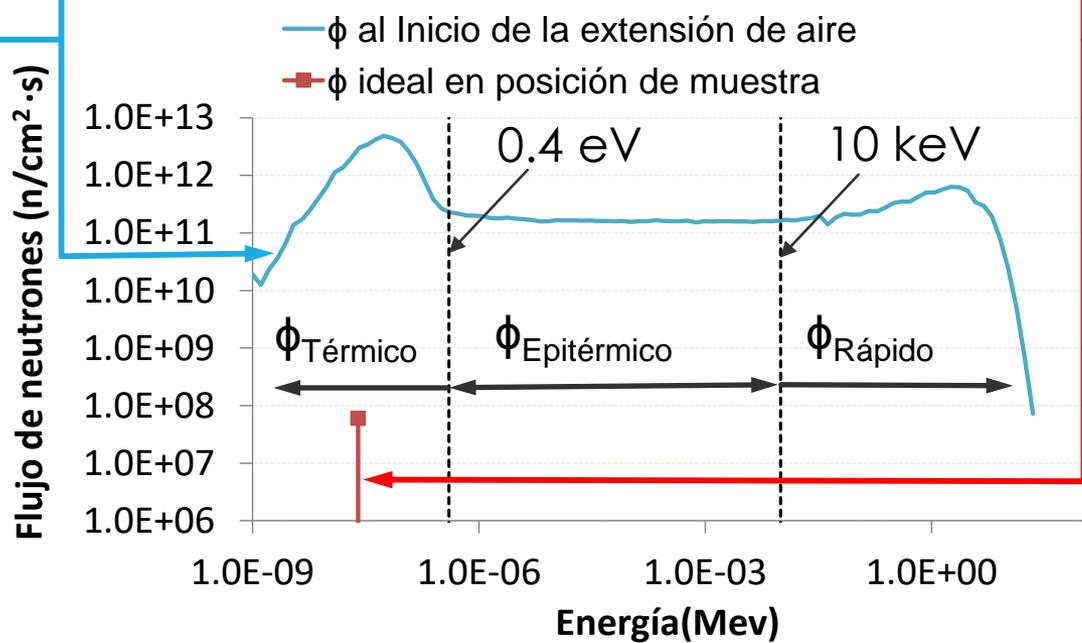
## Reactor nuclear de fisión RA-3 Centro Atómico Ezeiza



# Tarea del sistema de adecuación del haz



Diámetro interno = 14 cm

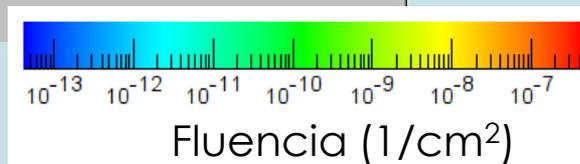
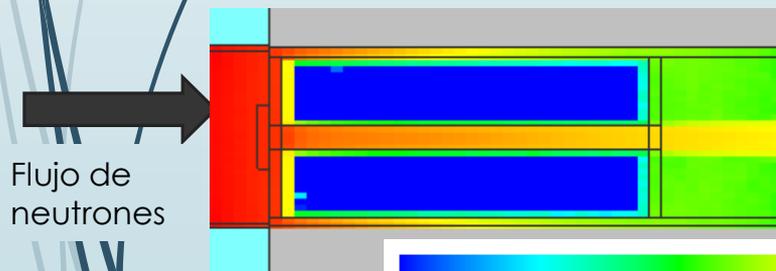
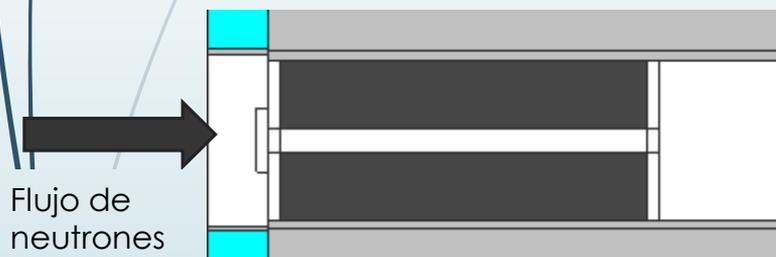


Diámetro interno ~ 2.5 cm

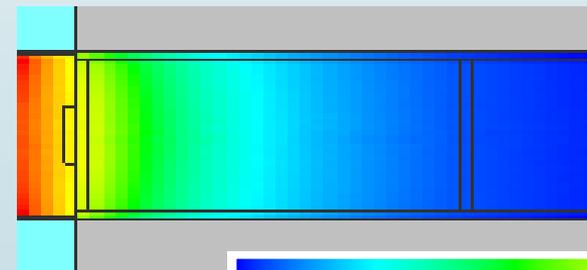
# Formas de adecuación del haz

- Conocimiento de interacción de la radiación con la materia.
- Propiedades de la materia: absorción, moderación, blindaje, etc.

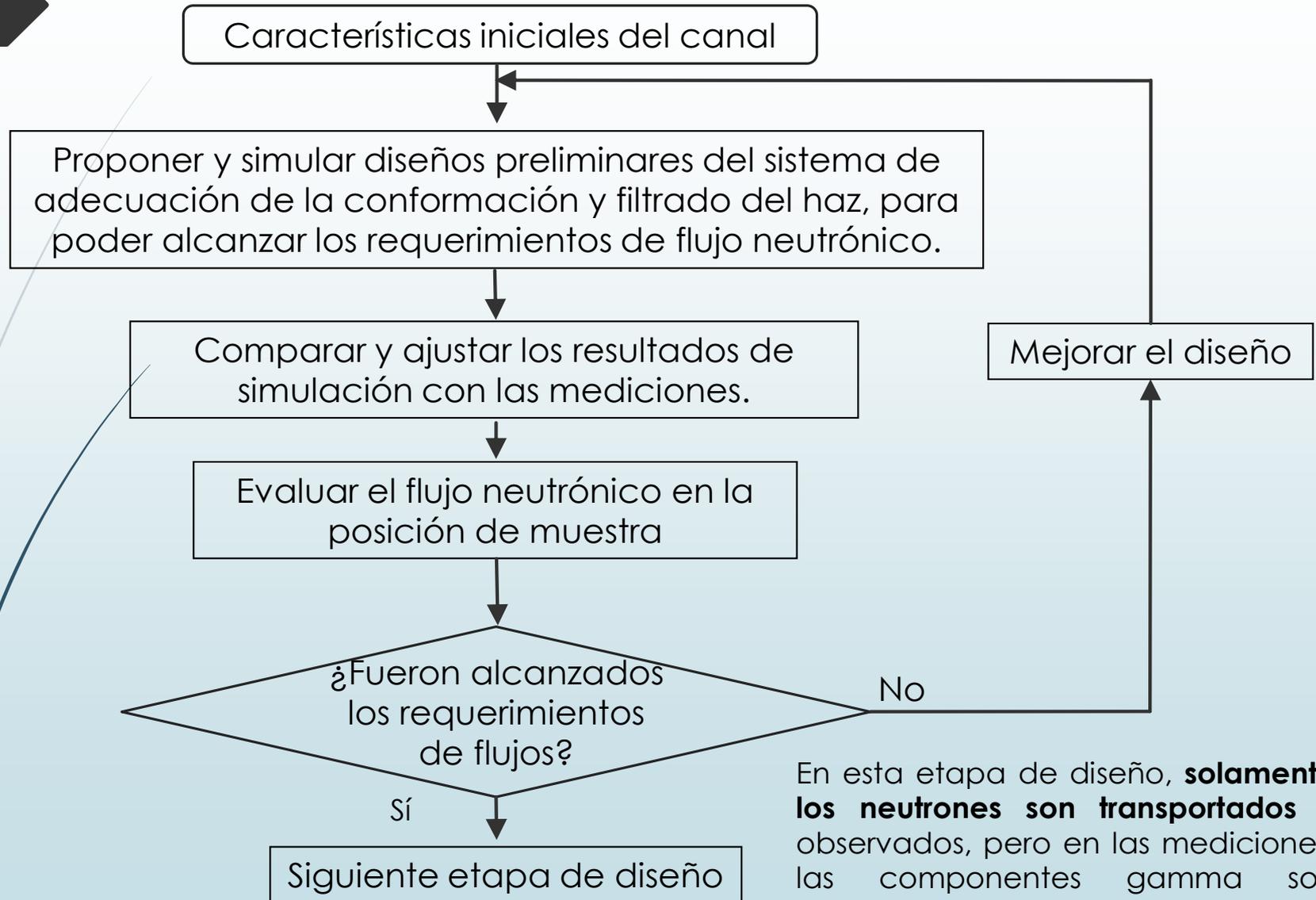
## Colimación de partículas



## Filtrado de partículas



# Proceso de diseño iterativo



En esta etapa de diseño, **solamente los neutrones son transportados** y observados, pero en las mediciones, las componentes gamma son evaluadas en diferentes regiones de la facilidad.

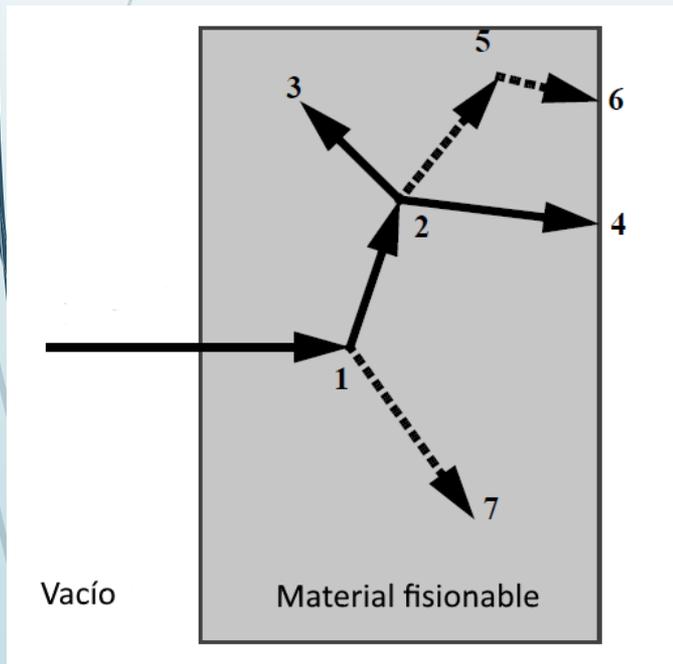
# MCNP

## A General Monte Carlo N-Particle Transport Code



Método basado en simulaciones estocásticas.

Transcripción directa en términos computacionales de un proceso inherentemente probabilístico.

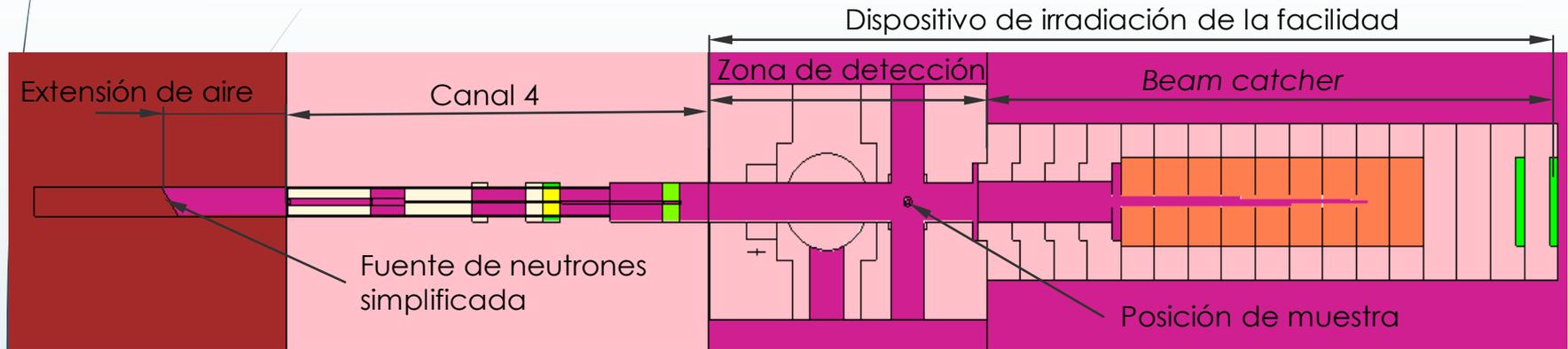


### Registro de eventos

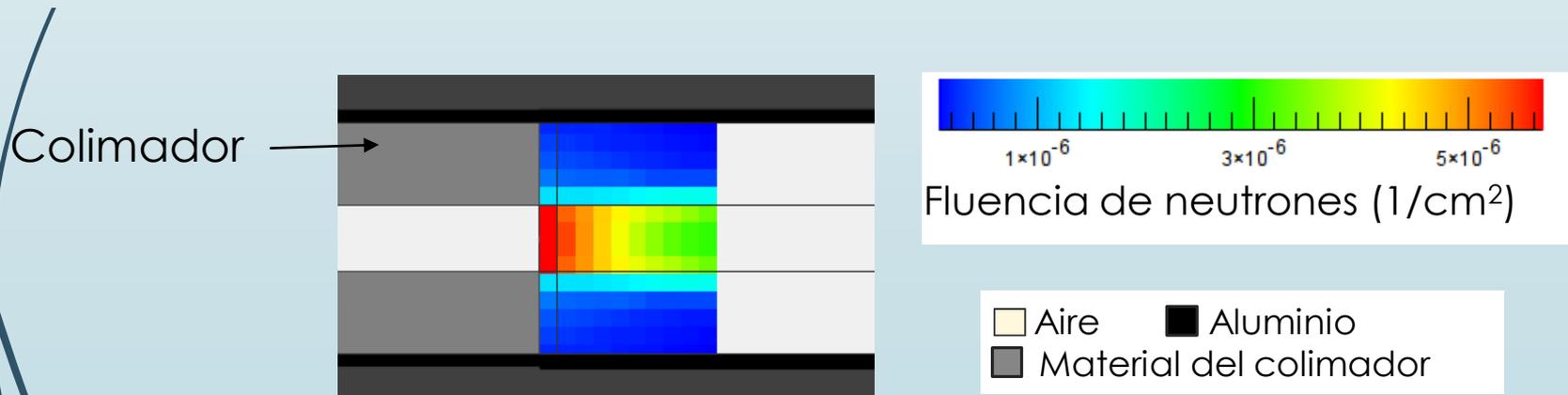
1. Dispersión de neutrón, producción de fotón.
2. Fisión, producción de fotón.
3. Captura neutrónica.
4. Neutrón escapa.
5. Dispersión de fotón.
6. Fotón escapa.
7. Captura del fotón.

# Adecuación del haz

- Modelos numéricos preliminares, fuentes simplificadas considerando un **haz angosto**.

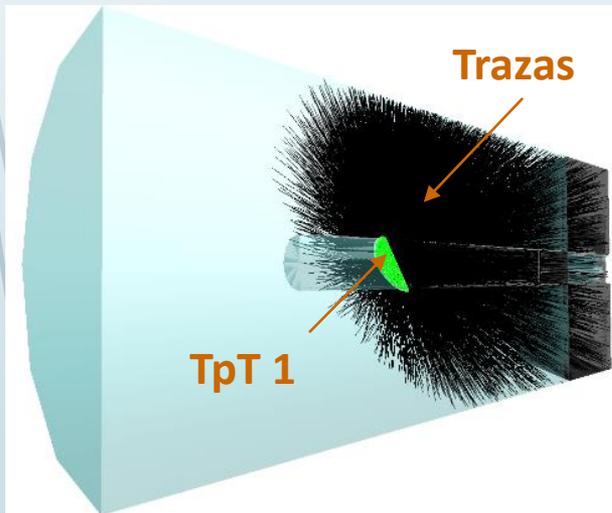


- Caracterización inicial del flujo neutrónico (simulaciones y mediciones).
- Técnicas de reducción de varianza.
- Evaluación de materiales posibles para colimadores.

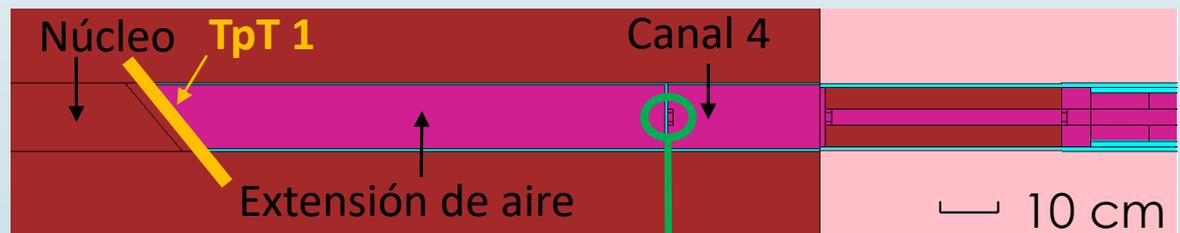
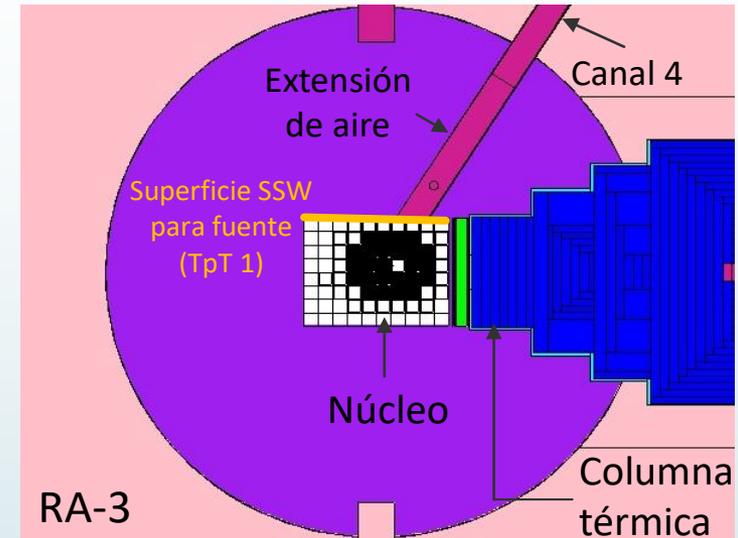


# Criticidad y fuentes traza por traza

- Generación fuentes traza-por-traza (TpT).
- Flujo neutrónico del modelo numérico del RA-3 previamente validado para la Columna térmica [3].
- Ahorro de tiempo computacional.



Visualización con software Moritz 1.25



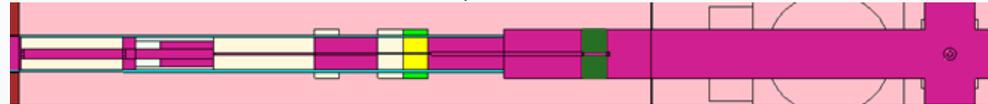
**Posición R:** Posición de referencia para ajuste de simulaciones.

# Progreso del diseño y evaluación

## Diseños de haz angosto

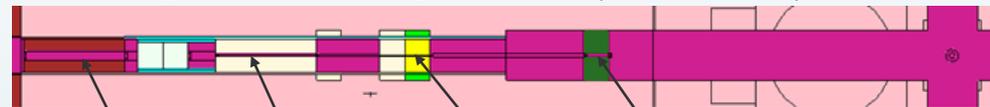
### Modelo I

Colimación utilizando la fuente TpT1

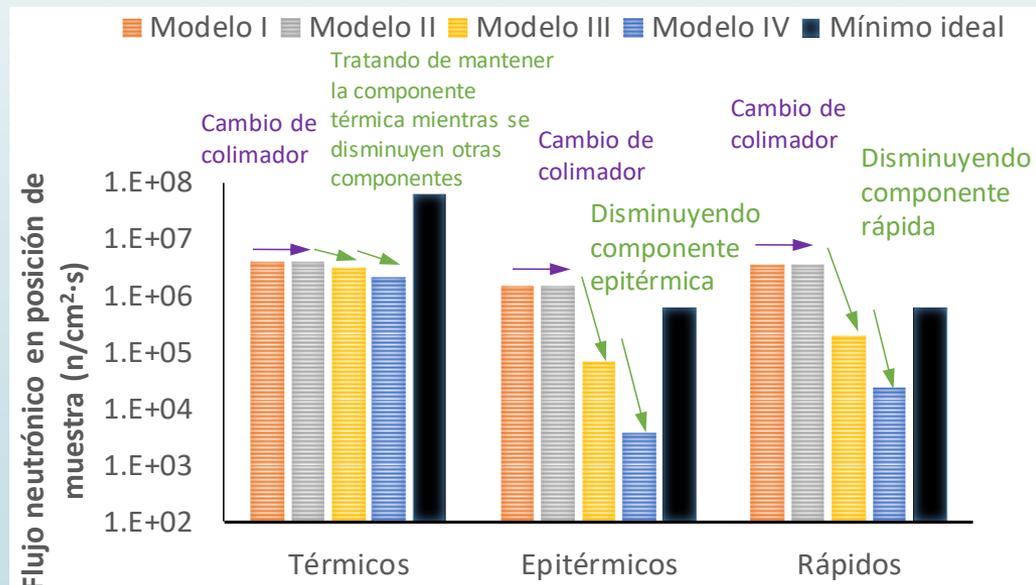


### Modelo IV

Colimación y filtrado con 2 bloques de zafiro (monocristalino)



■ Aire ■ Agua ■ Aluminio ■ Delrin ■ Bismuto ■ Zafiro ■ Carbonato de litio ■ Concreto ■ Plomo



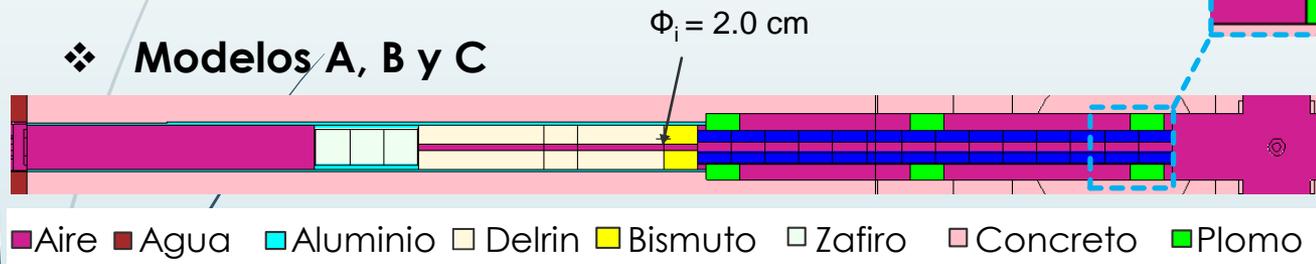
# Progreso del diseño y evaluación

## Diseños de haz de ancho intermedio – 1º Etapa

- Redistribución de filtros y colimadores
- **Ensanchamiento del diámetro interno del sistema de colimación hasta 2.0 cm.**
- Inclusión de un colimador de grafito de 1.4 m de largo con anillos de plomo.
- Inclusión de un filtro de zafiro de 30 cm.

### Modelos de diseño

#### ❖ Modelos A, B y C



Modelo	A	B	C
$\Phi_i$ (m)	3.0	2.5	2.5
$\Phi_o$ (cm)	10.0	10.0	12.3

### Modelos de referencia

Para análisis del impacto de los distintos componentes y para usar como base para mejoras en el diseño.

- ❖ **Modelo D: Sin colimador largo de grafito**
- ❖ **Modelo E: Sin colimadores**
- ❖ **Modelo F: Sin colimadores ni filtros**
- ❖ **Modelo G: Sin filtro de zafiro**

# Progreso del diseño y evaluación

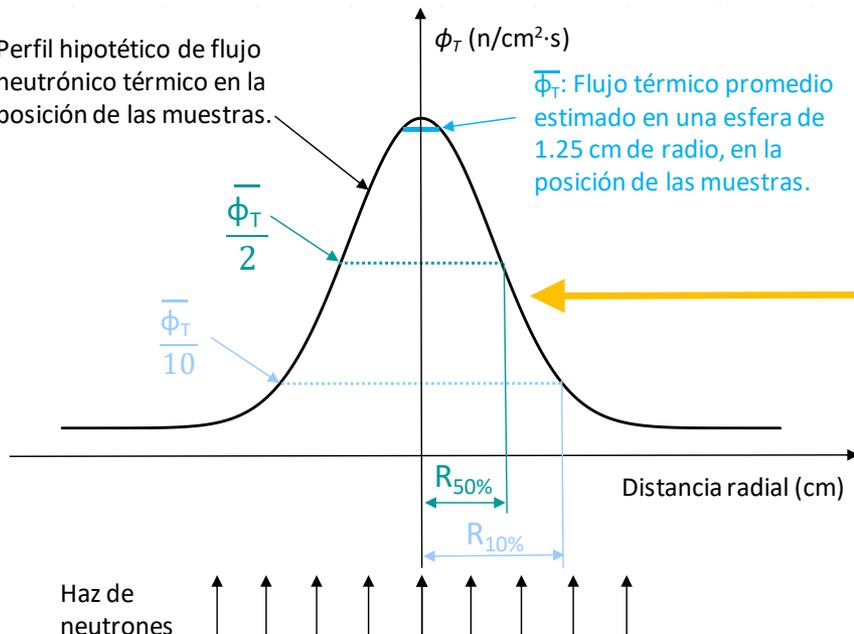
## Diseños de haz de ancho intermedio – 1° Etapa

- Redistribución de filtros y colimadores
- **Ensanchamiento del diámetro interno del sistema de colimación hasta 2.0 cm.**
- Inclusión de un colimador de grafito de 1.4 m de largo con anillos de plomo.
- Inclusión de un filtro de zafiro de 30 cm.

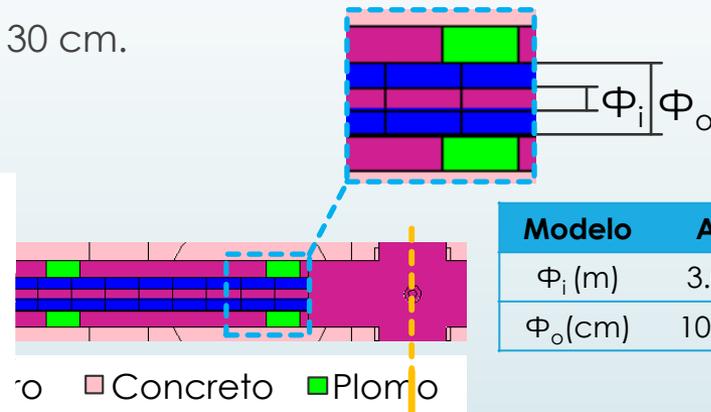
### Modelos de diseño

#### Caracterización del perfil radial del $\phi_T$ en la posición de irradiación

Perfil hipotético de flujo neutrónico térmico en la posición de las muestras.



$\phi = 2.0$  cm



Modelo	A	B	C
$\Phi_i$ (m)	3.0	2.5	2.5
$\Phi_o$ (cm)	10.0	10.0	12.3

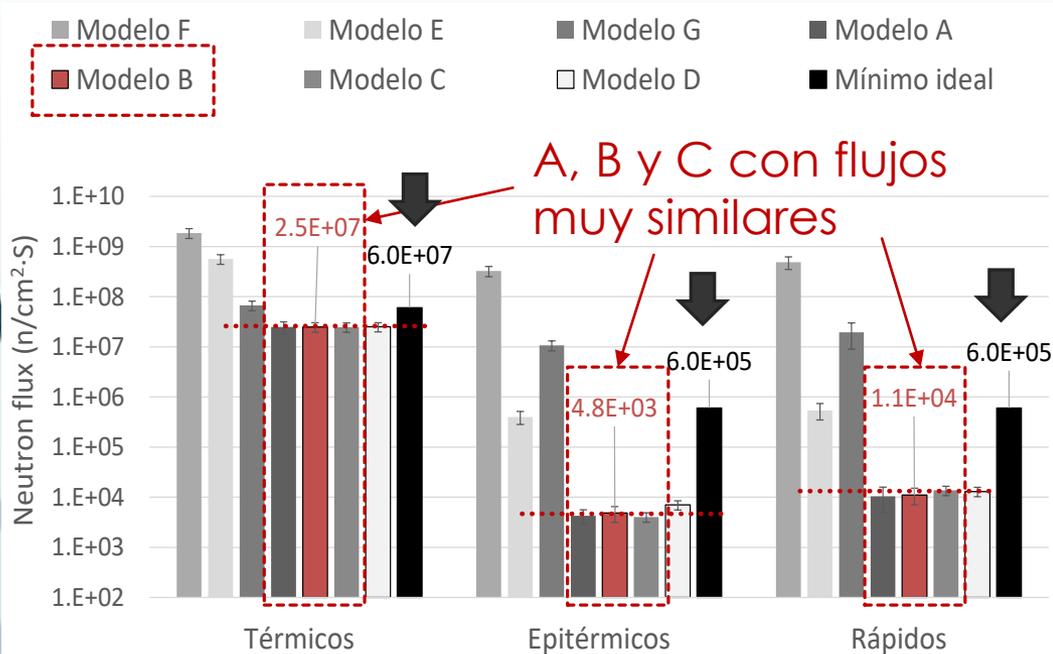
... componentes y para usar como base

grafito

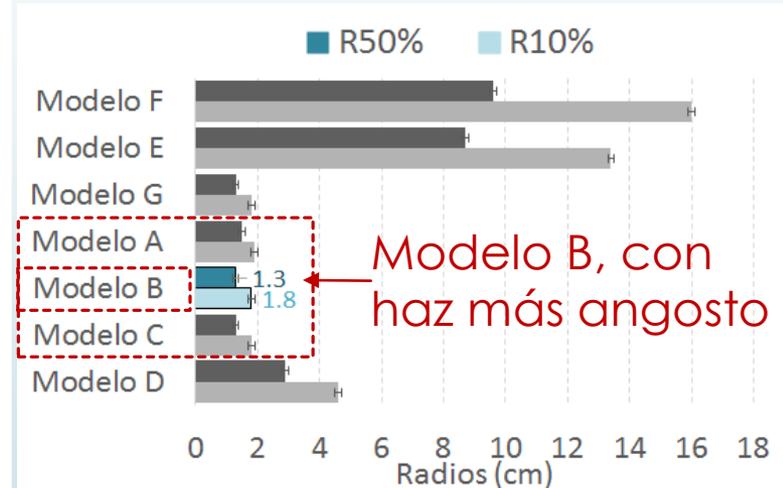
# Progreso del diseño y evaluación

## Diseños de haz de ancho intermedio – 1º Etapa

### Flujo neutrónico en la posición de la muestra



### Perfil radial del flujo neutrónico térmico en la posición de la muestra



(\*) Resultados de simulación ajustados con la medición en la posición R.

- El **modelo B** fue seleccionado para pruebas de medición.
- La simulación resultó de un  $\phi_T \sim 2.5 \cdot 10^7$  n/(cm<sup>2</sup>·s) y relaciones  $\phi_E/\phi_T = 0.02\%$  y  $\phi_R/\phi_T = 0.05\%$ .

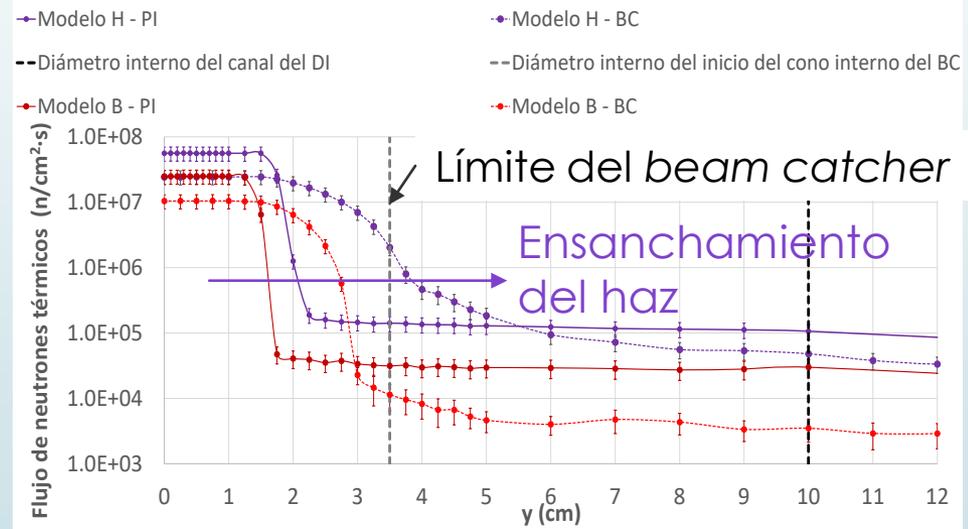
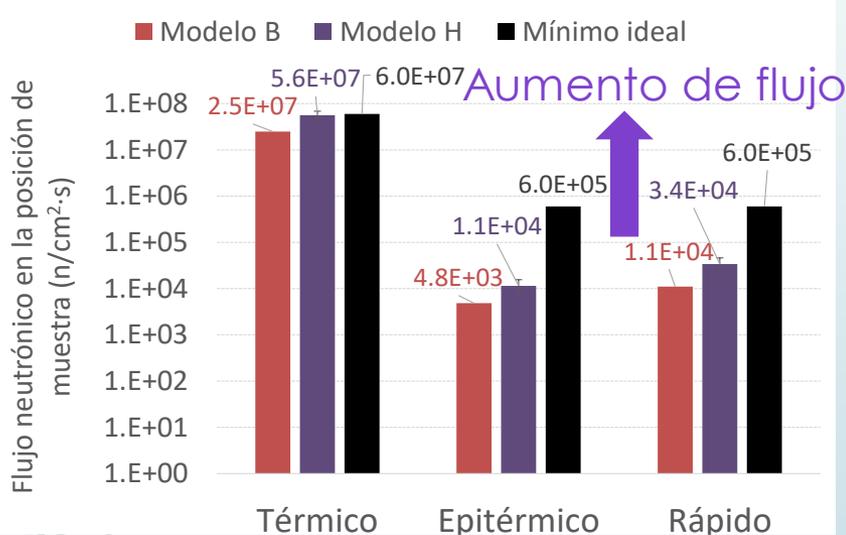
# Progreso del diseño y evaluación

## Diseños de haz de ancho intermedio – 2º Etapa

En el modelo H, se propuso un **aumento del diámetro interno del sistema de colimación** hasta 3.0 cm (antes era de 2.0 cm).

Flujo neutrónico en la posición de la muestra

Perfil radial del flujo neutrónico térmico en la posición de la muestra y *beam catcher*



- El **valor medido** fue de  $\phi_T = 2.7 \cdot 10^7 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  con un error del 5%.
- Diferentes factores pueden ser los que producen las **discrepancias entre las mediciones y las simulaciones**.

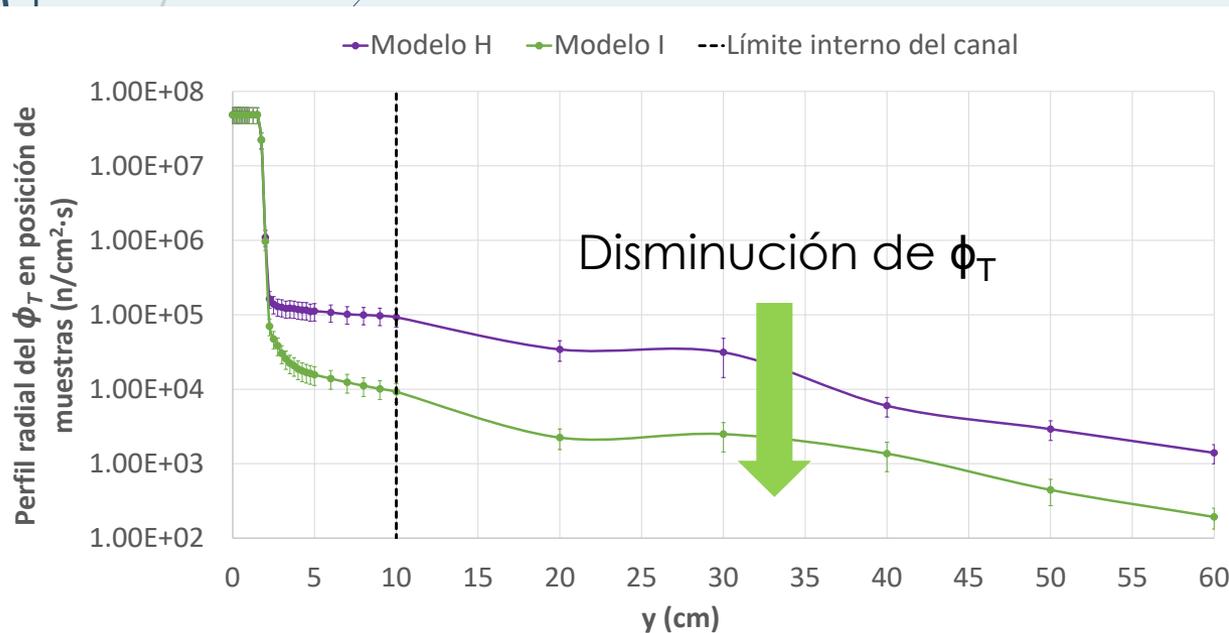
# Progreso del diseño y evaluación

## Diseños de haz de ancho intermedio – 3° Etapa

- Se han alcanzado flujos más altos de aproximadamente  $\phi_T \sim 9.9 \cdot 10^7 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , pero se debe estudiar en detalle el fondo neutrónico y gamma cerca de la posición de irradiación e ir convergiendo hacia la radioprotección.

### Blindaje de la región de detección

Modelo I



# Conclusiones

- Se desarrollaron modelos de MCNP para poder asistir en el diseño y desarrollo de una facilidad PGNAA en el RA-3, para medir concentraciones de  $^{10}\text{B}$  en muestras biológicas, dentro del marco de trabajo del Proyecto de BNCT de CNEA.
- Los mejores modelos alcanzaron un flujo neutrónico térmico muy cercano al valor mínimo deseado de  **$6.0 \cdot 10^7 \text{ n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$** . En el **modelo H** presentado, el tiempo de irradiación de muestras necesitaría **alrededor de 6.5 minutos**.
- Las componentes epitérmicas y rápidas han sido reducidas significativamente en alrededor de 0.01% del  $\phi_T$ , lo cual supera ampliamente la condición del mínimo deseado del 1%.
- Los resultados obtenidos permiten sugerir modificaciones en el diseño y estrategias de medición de flujos.
- **Todos los esfuerzos en evaluación, diseño y construcción llevaron desde un estado inicial del canal en el cual no estaba en uso, y no había sido caracterizado previamente, a un estado actual en el que hay una facilidad PGNAA casi funcional que ahora está medida, caracterizada y modelada.**

# Trabajo a futuro

- ▶ La futura retroalimentación de nuevos modelos y mediciones de una facilidad modificada permitirán obtener mejores características del haz y valores de simulación y medición más cercanos entre sí.
- ▶ **Incluir el acoplamiento fotón-neutrón** en las simulaciones para análisis del sistema de detección gamma, la estructura sostén de la muestra y radioprotección.
- ▶ Validar los modelos.
- ▶ Realizar una calibración y protocolos de medición.



Muchas gracias por la atención!!

[mvalero@cae.cnea.gov.ar](mailto:mvalero@cae.cnea.gov.ar)