

# Diseño del sistema de adecuación del haz y región de detección de la instalación de medición gamma instantáneo del reactor RA-3

M. Valero <sup>1,2</sup>, L. Rogulich <sup>3</sup>, S. I. Thorp <sup>4</sup>, M. E. Miller <sup>4</sup>, M. Szejnberg <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Coordinación BNCT, GAATeN, Centro Atómico Ezeiza, CNEA.

<sup>2</sup> Universidad Favaloro, Facultad de Ingeniería de Ciencias Exactas y Naturales.

<sup>3</sup> Sector Operaciones RA-3, GAATeN, Centro Atómico Ezeiza, CNEA.

<sup>4</sup> Subgerencia Instrumentación y Control, GAEN, Centro Atómico Ezeiza, CNEA.

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

**Introducción:** El análisis de gamma instantáneo es una técnica radioanalítica capaz de detectar prácticamente cualquier elemento de la tabla periódica. En particular, en este trabajo se desarrolla una facilidad de análisis por gamma instantáneo que se está diseñando específicamente para la aplicación de esta técnica para la Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT), en el reactor nuclear de fisión RA-3. La eficacia biológica de BNCT depende principalmente de la concentración de <sup>10</sup>B en tumor y tejido sano, de las propiedades radiobiológicas de los tejidos a irradiar y de las propiedades del flujo de neutrones, que en conjunto llevan a un resultado terapéutico. Medir concentraciones de boro en muestras biológicas es esencial para BNCT debido a que está relacionado a la dosis terapéutica. La medición de tales concentraciones es el objetivo principal de la facilidad en desarrollo y por lo tanto también lo son su sistema de adecuación del haz y la adecuación de la región de detección.

## Esquema de medición

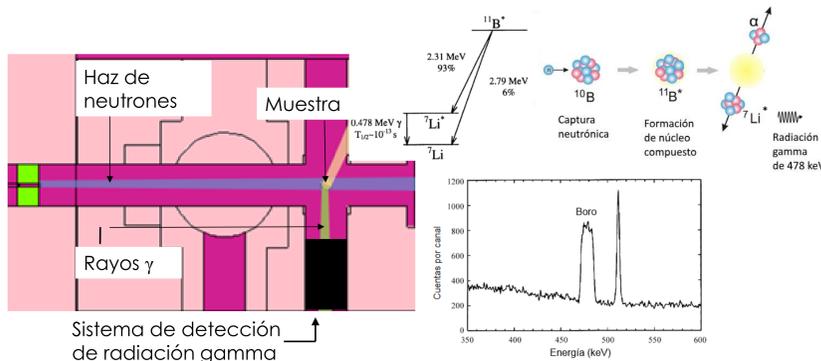


Figura 1: Esquema de medición de gamma instantáneo para medición de boro en BNCT.

## Muestras y requisitos de la técnica para BNCT

Las características de las muestras a medir en esta técnica son las que definen los requisitos de diseño de la facilidad. En el marco de las actividades de BNCT el tipo de muestras pueden ser tanto de tejido tumoral como sano, como por ejemplo biopsias de pulmón, hígado, piel, hueso, sangre, etc. En el caso de muestras sólidas o mixtas se espera poder analizar masas mayores a 0,05 g, o en el caso de muestras líquidas volúmenes mayores a 10 µl, con concentraciones del orden de 10 partes por millón (ppm). Debido a que se requieren tiempos de medición de pocos minutos, se busca tener un flujo neutrónico térmico  $\phi_T > 6,0 \cdot 10^7$  n/(cm<sup>2</sup>·s), con poca contaminación de neutrones de mayores energías, cuantificado como relaciones de flujo de neutrones epitérmicos  $\phi_E$  y rápidos  $\phi_R$  con respecto a térmicos menores al 1 %. El diámetro del haz debería ser de alrededor de 2,5 cm y se espera tener un límite de detección de 0,1 µg y una sensibilidad de 11 cps/µg.

## Etapas 1: Estudio de factibilidad y diseño del dispositivo de irradiación

Una facilidad PGNAA está siendo desarrollada en el reactor en el canal 4 del reactor RA-3. Para ello se comenzó con un estudio de factibilidad a partir de un modelo numérico realizado en MCNP. Con el mismo se realizó un estudio de factibilidad para analizar la posibilidad de obtener un alto flujo neutrónico en la posición de irradiación y asegurar las condiciones de radioprotección. Esta etapa comenzó con un canal 4 completamente vacío, que no había sido diseñado para este propósito en particular y que no había sido caracterizado previamente. En esta etapa se diseñó y construyó el dispositivo de irradiación <sup>[1]</sup> (Figura 2).

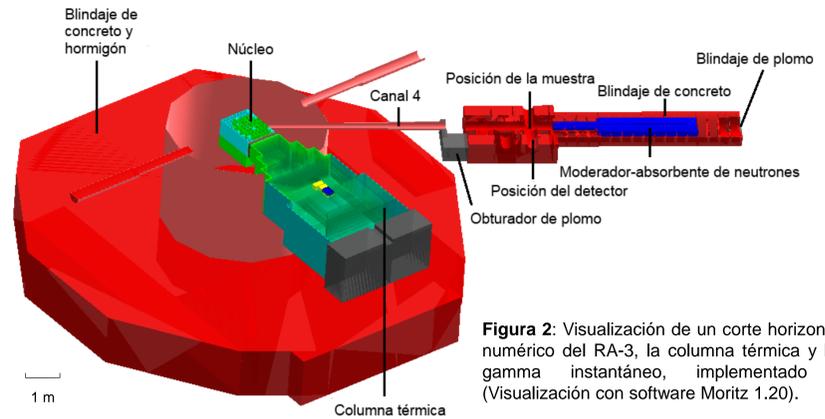


Figura 2: Visualización de un corte horizontal del modelo numérico del RA-3, la columna térmica y la facilidad de gamma instantáneo, implementado en MCNP (Visualización con software Moritz 1.20).

## Etapas 2: Diseño del sistema de adecuación del haz

Se propusieron, simuló y evaluó diseños del sistema de adecuación del haz, para poder alcanzar los requerimientos de flujo neutrónico en la posición de irradiación. Tal sistema de adecuación se compone de un arreglo de colimadores y filtros de distintos materiales, para poder conformar el haz de neutrones y fotones proveniente del núcleo del reactor, tanto en energía como geoméricamente (Figura 3), además de cuidar las condiciones de radioprotección. Este fue un trabajo iterativo, en el cual se comenzó proponiendo modelos de haz angosto, el cual se fue ensanchando progresivamente hasta alcanzar el orden de magnitud deseado de flujo neutrónico térmico. Luego de un trabajo progresivo, un diseño con un haz de ancho intermedio (Figuras 3 y 4) logró concluir con esta etapa <sup>[2-8]</sup>. Las simulaciones fueron realimentadas por mediciones para el ajuste de los modelos numéricos.

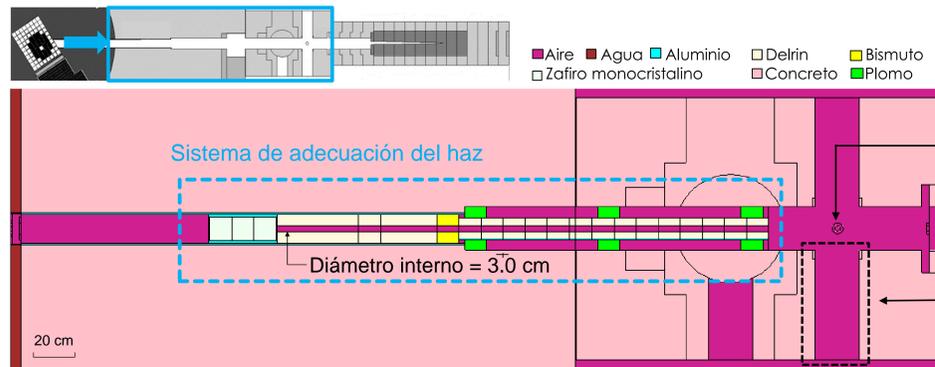


Figura 3: Visualización de un corte horizontal visto desde arriba del modelo numérico del sistema de adecuación del haz de la facilidad de gamma instantáneo en el RA-3, implementado en MCNP (visualización con software VisEd).

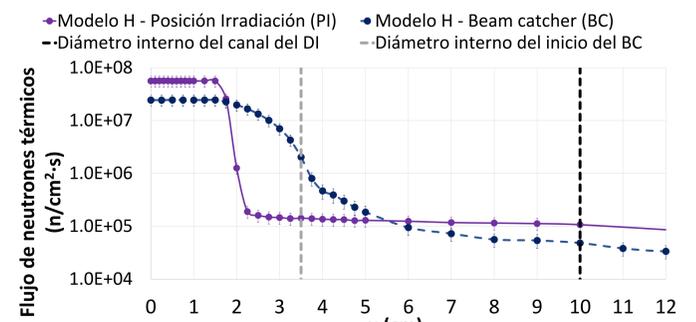


Figura 4: Perfil radial del  $\phi_T$  en la posición de irradiación y el beam catcher según las simulaciones (Figura 3). Este diseño resultó con un  $\phi_T \sim 5,6 \cdot 10^7$  n/(cm<sup>2</sup>·s) y relaciones  $\phi_E/\phi_T = 0,01$  % y  $\phi_R/\phi_T = 0,06$  %. El haz resultó con alta uniformidad dentro de los 3 cm de diámetro en la posición de irradiación, con un buen confinamiento geométrico. El valor medido del  $\phi_T$  de este diseño implementado fue de  $\sim 3,0 \cdot 10^7$  n/(cm<sup>2</sup>·s) <sup>[8]</sup>.

## Etapas 3: Adecuación de la radiación de fondo en la región de detección

En esta etapa aún en progreso, se agregaron componentes para reducir tanto como sea posible el flujo de neutrones y fotones en la región de detección. Esto fue con el objetivo de evitar el daño por radiación en el detector de germanio hiperpuro (HPGe) y poder visibilizar los picos gamma de 478 keV, provenientes de la captura neutrónica en el boro de las muestras. Al igual que en la etapa anterior se fueron proponiendo, simulando y evaluando una gran cantidad de modificaciones para lograr los parámetros buscados <sup>[9]</sup>.

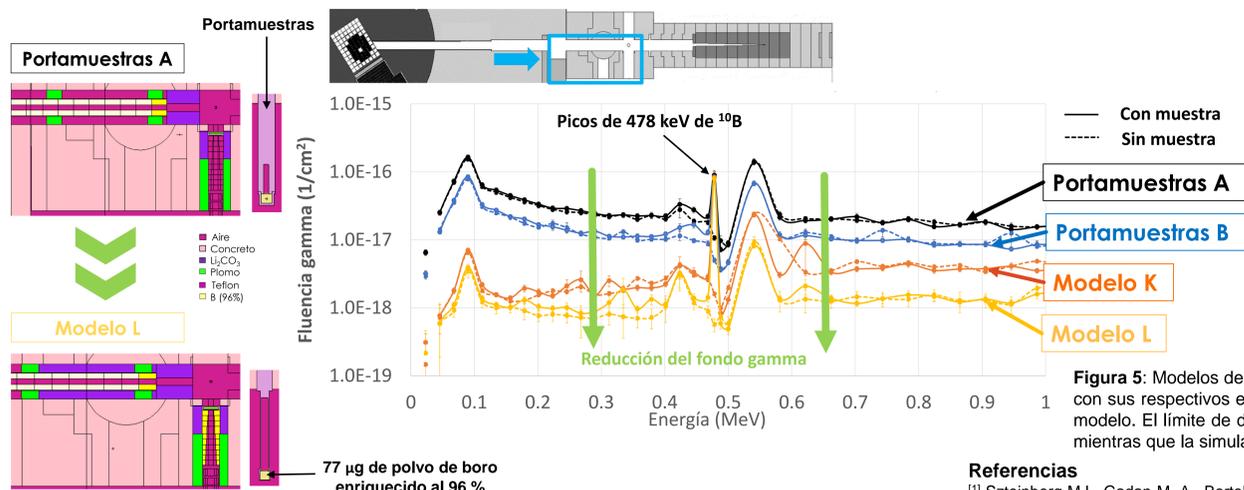


Figura 5: Modelos de los mejores diseños propuestos para adecuación de región de detección, con sus respectivos espectros gamma con y sin muestra. Límites de detección de <sup>10</sup>B de cada modelo. El límite de detección medido para el modelo "Portamuestras A" fue de  $22,2 \pm 1,2$  µg, mientras que la simulación fue de  $20,3 \pm 1,2$  µg <sup>[9]</sup>.

**Discusión:** En la etapa 2 fue necesario ir progresando gradualmente en diseños de haz angosto hacia diseños de haz de ancho intermedio, para lograr alcanzar el orden de magnitud deseado en la posición de irradiación. En la etapa 3 fue necesario realizar distintos análisis y evaluar una gran cantidad de posibilidades de blindajes y modificaciones sobre la facilidad para lograr reducciones de la radiación de fondo en la región de detección. Los diseños conceptuales en este trabajo, tuvieron que tener en cuenta el espacio disponible y el tipo de materiales posibles a utilizar. La técnica PGNAA puede ser utilizada en otros tipos de estudios médicos además de BNCT, con distintos requerimientos de flujo de neutrones, además de otras áreas distintas que la medicina. Se puede implementar por ejemplo para aplicaciones nucleares, composición de materiales y procesamiento, geología, geoquímica y cosmoquímica, arte, arqueología, biología, comida y agricultura y estudios ambientales.

**Conclusiones:** Se implementó el diseño guiado por simulaciones con el código de transporte MCNP, para progresar en el desarrollo de una facilidad PGNAA en el RA-3, para medir concentraciones de <sup>10</sup>B en muestras biológicas, dentro del marco de trabajo del proyecto de BNCT de CNEA. Se logró un flujo neutrónico térmico en la posición de irradiación cercano al ideal de  $6,0 \cdot 10^7$  n/(cm<sup>2</sup>·s), mientras que las componentes epitérmicas y rápidas son de alrededor de 4 órdenes de magnitud más bajas que la componente térmica. El mejor modelo propuesto de la adecuación de la región de detección propuesto hasta el momento, mostró en la simulación que se pueden detectar decenas de µg de <sup>10</sup>B, con un límite de detección de  $\sim 1$  µg de tal elemento. Es necesario realizar mediciones del modelo L para confirmar estas estimaciones. Nuevas mejoras están siendo propuestas y evaluadas para mejorar las especificaciones de la facilidad de gamma instantáneo.

## Referencias

- 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 <sup>10</sup>B measurements at RA-3: Design stage. Appl. Radiat. Isotopes, 69, 1928-1931, 2011.
- Valero, M., Miller, M., Rogulich, L. y Szejnberg, M. Simulaciones del sistema de adecuación del haz de la instalación de medición de gamma instantáneo del reactor RA-3. XLI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2014.
- Rogulich, L., Valero, M., Szejnberg, M., Thorp, S.I., Estryk, G., Riella, ..., y Quintana, J. Caracterización preliminar del canal 4 en el reactor RA-3 para usar en un sistema Prompt Gamma. XLI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2014.
- Valero, M., Rogulich, L. and Szejnberg M. Advances in the beam design and development of the RA-3's PGNAA facility for BNCT. VIII Young Researchers BNCT Meeting, Pavia, Italia, 2015.
- Rogulich, L., Thorp, S. I., Miller, M., and Szejnberg, M., Valero, M., Estryk, G., Riella, J., Quintana, J. Preliminary characterization of the channel 4 at the RA-3 reactor for its use in a Prompt Gamma System. VIII Young Researchers BNCT Meeting, Pavia, Italia, 2015.
- Valero M., Rogulich L., Thorp S.I., Miller M.E., and Szejnberg M. PGNAA facility for BNCT at RA-3: numerical approach towards beam requirements. 17th International Congress on Neutron Capture Therapy, Columbia, Missouri, United States of America, 2016.
- Rogulich, L., Thorp, S. I., Miller, M., Valero, M., Langan, S., Szejnberg, M., Quintana, J. Caracterización preliminar del canal 4 en el reactor RA-3 para su uso en un sistema Prompt Gamma. XI Congreso Argentino de Técnicas Neutrónicas, Buenos Aires, Argentina, Marzo 15-16, 2017.
- Valero, M. Diseño del sistema de adecuación del haz de la instalación de medición de gamma instantáneo del reactor RA-3. Tesis para la carrera de Ingeniería en Física Médica. Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Naturales (FICEN), Universidad Favaloro, 2017.
- Valero, M., Rogulich, L., Thorp, S., Miller, M., Szejnberg, M. Simulation approach for the adequation of the detection region in the PGNAA facility design at RA-3. IX Young Researchers BNCT Meeting, Kyoto, Japan, 2017.