



Agencia  
Boliviana de  
Energía  
Nuclear



ESTADO PLURINACIONAL DE  
**BOLIVIA**

MINISTERIO DE  
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



# "BOLIVIANA REVISTA CIENTÍFICA NUCLEAR MENTE"



aplicaciones  
en salud



aplicaciones  
en la industria



aplicaciones  
nucleares



ciclo del  
combustible



centro de  
investigaciones

Número 1, 2022

Esta publicación fue elaborada por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN y se enmarca en la Constitución Política del Estado, en los 13 pilares de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 y en el Programa Nuclear Boliviano - PNB.

# "BOLIVIANA REVISTA CIENTÍFICA NUCLEAR **MENTE**"



aplicaciones  
en salud



aplicaciones  
en la industria



aplicaciones  
nucleares



ciclo del  
combustible



centro de  
investigaciones



©AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

#### **DIRECCIÓN GENERAL**

Ing. Hortensia Jiménez Rivera  
Directora General Ejecutiva ABEN

#### **ELABORACIÓN DE CONTENIDOS**

Equipo técnico ABEN

#### **REVISIÓN DE CONTENIDOS**

Ing. Hortensia Jiménez Rivera

#### **EDICIÓN DE TEXTOS**

Ing. Sergio Fabian Fernandez Quiroga  
Ing. Vivian Waira Pabon Coela

#### **DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN**

Editorial del Estado Plurinacional de Bolivia

**DEPÓSITO LEGAL:** 4-3-325-2022 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA

# ÍNDICE

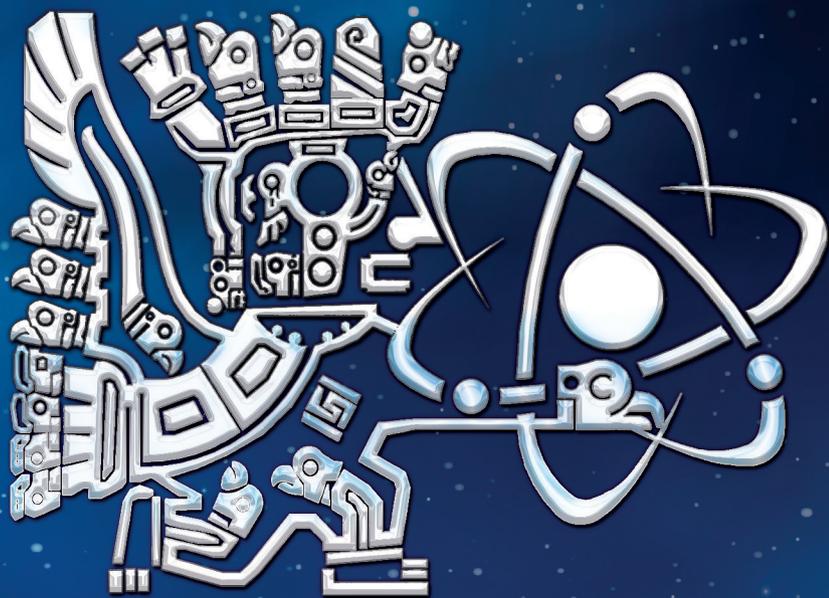
<b>Sección 1.</b> ENTREVISTA .....	5
<b>Sección 2.</b> ARTÍCULOS.....	13
<b>Sección 3.</b> TALLERES CIENTÍFICOS .....	55
<b>Sección 4.</b> NOTICIAS.....	81





Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear

# E N T R E V I S T A



**“BOLIVIANAMENTE”**

REVISTA  
CIENTÍFICA  
NUCLEAR



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



# HORTENSIA JIMÉNEZ RIVERA: LA REVISTA CIENTÍFICA NUCLEAR "BOLIVIANAMENTE" COMO INSTRUMENTO DE DIFUSIÓN SOBRE EL DESARROLLO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO-NUCLEAR EN BOLIVIA



Diciembre 07, 2021

**Por: Sergio Fabian Fernandez Quiroga**

Hortensia Jiménez Rivera es Ingeniera Química graduada en la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) y es MSc. en Desarrollo Energético Sustentable por la Universidad de Calgary, Canadá. Actualmente desempeña el cargo de Directora General Ejecutiva de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), dando continuidad al trabajo de ejecución e implementación del Programa Nuclear Boliviano (PNB) para el uso pacífico de la tecnología nuclear en diversas áreas del desarrollo nacional, trabajo que se vio truncado durante el golpe de Estado, entre 2019 y 2020.

La Ingeniera Jiménez concedió una entrevista exclusiva para "Bolivianamente" Revista Científica Nuclear a fin de tratar acerca de los avances y aplicaciones referentes al desarrollo científico-tecnológico-nuclear en Bolivia. Un tema que debe ser difundido a la población en general, beneficiaria directa, toda vez que los proyectos en curso estén consolidados. Y así también, se brinde conocimiento técnico sobre los resultados que la comunidad científica nuclear boliviana va obteniendo.

**Sergio Fernandez (SF).- Buenas tardes ingeniera, para empezar ¿Cómo nace la idea de elaborar "Bolivianamente" Revista Científica Nuclear? y ¿Con qué frecuencia lo podremos esperar?**

**Hortensia Jiménez (HJ).**- La Revista Científica Nuclear “Bolivianamente” nace como iniciativa de la Dirección de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico (DPIDT) y tiene como objetivo principal poder servir como instrumento de difusión sobre el avance científico en el área nuclear y se espera que podamos presentar a través de este boletín todo el trabajo que se viene desarrollando y se ha realizado durante estos años (desde la creación de la ABEN), el desarrollo de los diferentes proyectos (tanto en temas técnicos como en temas científicos); este boletín tendrá una frecuencia semestral.

**(SF).**- Esta primera edición ¿Qué temas abarcará?

**(HJ).**- Básicamente lo que se busca en esta primera edición es mostrar los beneficios, la capacidad y alcance que tiene la tecnología nuclear en sus diversas aplicaciones, es así que encontraremos diferentes artículos; por ejemplo, la misión que ha tenido la ABEN en un proyecto sobre la hidrología isotópica en el cual no solo participó nuestra institución sino también otros actores involucrados como la Universidad Mayor de San Andrés y la Universidad Tomas Frías, en Sud Lipez-Potosí realizó, misión que realizó el levantamiento de muestras que nos van a permitir poder gestionar los recursos hídricos a través de la hidrología isotópica (empleando técnicas nucleares); por otro lado podremos conocer sobre la técnica del insecto estéril (a través de una participación de la ABEN con SENASAG) y cómo se utiliza la tecnología nuclear para el control de plagas (por ejemplo la mosca de la fruta); lo que nos permitirá mejorar rendimientos productivos y también poder aprovechar el potencial exportador que tiene Bolivia en esa área; también tenemos otros artículos, vamos a mostrar realmente la versatilidad de la tecnología nuclear como instrumento de desarrollo del país.

**(SF).**- Ingeniera sabemos que la Agencia Boliviana de Energía Nuclear es la encargada de ejecutar el Programa Nuclear Boliviano (PNB) ¿Nos podría explicar un poco en qué consiste? y ¿Por qué es importante su implementación?

**(HJ).**- El Programa Nuclear Boliviano es el instrumento base sobre el cual se está desarrollando todas las políticas que ha establecido el Estado en lo referente al tema nuclear, y es a través del PNB que estamos ejecutando e implementando el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear, la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia, y otras áreas de aplicación de la tecnología nuclear en el país. Por tanto, el PNB determina los lineamientos estratégicos para el desarrollo de la tecnología nuclear con fines pacíficos en Bolivia.

**(SF).**- Nos podría explicar por favor ¿Con qué componentes importantes contará el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear?

**(HJ).**- Básicamente tiene 3 grandes componentes tecnológicos:

- El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica. Este complejo nos permitirá realizar la producción de radioisótopos, en el área de radiofarmacia vamos a obtener radiofármacos que van a permitir (en los Centros de Medicina Nuclear) la detección temprana de cáncer, que es un tema muy importante. Haciendo una analogía, este complejo es como una industria farmacéutica muy especializada; este complejo también cuenta con una sección de preclínica que nos va a permitir el desarrollo de investigación utilizando acelerador (ciclotrón) para la obtención de radioisótopos

que nos permita evaluar nuevos radiofármacos, trabajar sobre la nutrición en niños, hacer investigación sobre la síntesis de fármacos de las plantas medicinales; a través de la tecnología nuclear utilizaremos el conocimiento científico occidental, se podrá demostrar con bases científicas sobre las costumbres en el empleo de las plantas medicinales que nuestros ancestros utilizaron y utilizamos.

- El segundo componente tecnológico es el Centro Multipropósito de Irradiación. Enfocado a la parte agroindustrial (sin embargo no es exclusiva para esta área), este componente nos permitirá la irradiación y conservación de alimentos, coadyuvando a que nuestros productores agrícolas puedan tener la opción de exportar a grandes distancias (productos agrícolas, cárnicos), también este concepto de irradiación (a través de Cobalto-60) nos permite poder conservar nuestro patrimonio cultural o también realizar la esterilización de material médico; es decir, tiene diversas aplicaciones; retomando el tema agrícola nos va a permitir el mejoramiento de semillas, y de esa manera incrementaremos los rendimientos productivos conjuntamente con el control de plagas, es decir, se tiene varias aplicaciones.
- Por último, el componente más robusto y más tecnológico es el Complejo del Reactor Nuclear de Investigación, que si bien es un reactor de baja potencia; nos va a permitir formar a nuestros científicos e investigadores en ciencia y tecnología nuclear, y al mismo tiempo en términos de servicios vamos a contar con un instrumento (un laboratorio de muy alto nivel), a través del análisis de activación neutrónica para la prospección minera y también la producción de radioisótopos para el área de hidrología isotópica (por ejemplo), o para el control de sistemas productivos de las industrias, y muchísimas aplicaciones más. Y por supuesto, es un centro estratégico en el área nuclear para el desarrollo de investigación científica.

Acompañando estos 3 componentes, el CIDTN también tendrá laboratorios especializados, un Laboratorio de Radioecología y Radiobiología, un Laboratorio de Plasma y va contar con edificios de capacitación, que realmente nos permitan integrar absolutamente todos los espacios (tanto de servicios, investigación y también de formación).

**(SF)- Y referente a la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyRs) ¿Con que áreas contarán? y ¿Cómo benefician estos Centros a nuestra población?**

**(HJ).**- El segundo gran proyecto en el marco de la implementación del Programa Nuclear Boliviano es la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia, básicamente son 3 Centros médicos altamente especializados, que tienen tecnología de avanzada, que han sido conceptualizados para una asistencia integral para la lucha contra el cáncer.

Tiene un área de diagnóstico por imagen con equipos SPECT/CT y PET/CT, un área de cuarto caliente (donde se hace el fraccionamiento de los radiofármacos), para realizar un diagnóstico temprano y precoz del cáncer; este equipamiento que realmente es de última tecnología y que va a permitir a los médicos puedan detectar de manera muy precisa cuando el tumor aun es pequeño y coadyuvará a la parte medica clínica, logrando a que el cáncer sea una enfermedad curable.

En la parte de tratamiento se tiene un área de Radioterapia Externa (Teleterapia) donde vamos a contar con 2 Aceleradores Lineales; además se contará con un Tomógrafo Planificador (TAC) para que los pacientes que deban someterse al Acelerador Lineal se planifique previamente el tratamiento con un equipo especializado de físicos, tecnólogos y médicos para que la planificación sea realmente efectiva.

Y tenemos el área de tratamiento con Radioterapia Interna, que consta de Braquiterapia de alta dosis (con Cobalto-60), que realmente es un instrumento muy efectivo y muy importante para combatir el cáncer (sobre todo en casos de cáncer de cuello uterino, cáncer de próstata o de estómago).

Además de toda esta infraestructura tecnológica con la que contarán estos Centros, tenemos también incorporado el área de oncología clínica, quimioterapia y farmacia; básicamente se ha decidido incorporar esto (aunque no es parte de la tecnología nuclear) para darle el concepto integral para el tratamiento de los pacientes; así los pacientes no tendrán que trasladarse de un lugar a otro y podrán quedarse en un mismo sitio donde se podrá prestar toda la atención, es decir el oncólogo que está tratando un paciente tenga todas las opciones de tratamiento, así también pueda hacer el seguimiento al tratamiento y posteriormente evaluar los resultados (monitoreo post-tratamiento de los pacientes).

**(SF).- Gracias por la explicación de los Centros, son muy interesantes; y en relación a los convenios que tiene la ABEN, se conoce del convenio que tienen con la UNEFCO, ¿Cuál fue el objetivo que se tuvo con el primer ciclo de formación continua denominado Tecnología nuclear en procesos educativos?**

**(HJ).-** Lo que se pretende con este tipo de convenios en esta primera experiencia que tiene el país en términos de la familiarización y conceptualización sobre utilización de la tecnología nuclear con fines pacíficos es poder iniciar con la Unidad Especializada de Formación Continua de Maestros (UNEFCO) cursos cortos que van a permitir que los maestros a medida que vayan transfiriendo conocimiento en áreas de matemática, química, física, biología también puedan incorporar en su lenguaje y en su didáctica todo lo que es el tema nuclear, ése es un primer paso en el área educativa; sin embargo, también tenemos otros aspectos que vamos a incluir dentro de lo que es la formación (tanto en el área inicial primaria y secundaria) pero son trabajos de más largo plazo para que nuestros jóvenes y nuestros niños tengan el conocimiento nuclear, por lo pronto se transmite todo lo que se sabe de la tecnología nuclear y sus conceptos básicos a los profesores.

**(SF).- Ingeniera para concluir esta entrevista quisiera preguntar ¿Cómo plantea el futuro científico-tecnológico-nuclear en el país, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear?**

**(HJ).-** Como lo mencioné previamente, tenemos 2 grandes proyectos en el marco de lo que es el Programa Nuclear Boliviano, esto no solo viene con infraestructura tecnológica sino que viene acompañado del desarrollo de formación de recursos humanos, hoy por hoy el sistema universitario nacional no cuenta con programas académicos en el área de tecnología nuclear; por lo que hemos desarrollado entre nuestra institución, la UMSA y la EMI, lo que han sido las primeras iniciativas a través de unos diplomados en el área nuclear. Pero en general, para la operación de estas instalaciones nucleares dentro del trabajo que está realizando la ABEN es la formación de recursos humanos, es así que la ABEN (a través de los dos proyectos que están en ejecución) tiene previsto la formación, capacitación y especialización de aproximadamente 260 profesionales jóvenes bolivianos en las diferentes áreas de aplicación de la tecnología nuclear y por supuesto también se trabaja en las 100 becas que otorga el gobierno nacional a través del Ministerio de Educación para la formación tanto en maestrías y doctorados, así también de pregrado en el área nuclear.

Posteriormente también se está viendo otras líneas de capacitación; por ejemplo, ya se tuvo una primera experiencia (que hay que ir replicándola y mejorándola por supuesto); que es la formación y capacitación en el área nuclear de los servidores públicos, que representa uno de los temas importantes cuando se desarrolla un programa nuclear en cualquier país, es contar con una infraestructura nuclear, es decir un sistema de formación que te permita dar sostenibilidad a todos los proyectos nucleares del país y que existan las capacidades instaladas; así por ejemplo, el área de cancillería (relaciones internacionales) ya que un proyecto nuclear se vuelve un tema que entra dentro de una esfera de trabajo conjunto entre diferentes países de manera internacional; también tenemos a la Policía, a los Bomberos, las Fuerzas Armadas (en el área de seguridad), medio ambiente, salud. Todos estos tienen una participación, ya que existe una versatilidad dentro de lo que son las aplicaciones de la tecnología nuclear como se mencionó.

Pero también existen otros detalles que hay que considerar y que también deben ser parte del Boletín Científico, si bien se espera que podamos difundir el trabajo que hace la ABEN conjuntamente con universidades, otras instituciones públicas y privadas, para mostrar el desarrollo conjunto acerca de las investigaciones aplicadas a las necesidades nacionales, también hay otras cuestiones que se están trabajando en la institución, por ejemplo, lo que es género y cómo desarrollar políticas de género para incorporar a más científicas, a más mujeres en el área científica y nosotros que recién estamos empezando (tenemos 5 años de la creación de la ABEN) realmente vamos a poder desde el principio incorporar la equidad e igualdad de género en el desarrollo científico (por lo menos en el área nuclear).

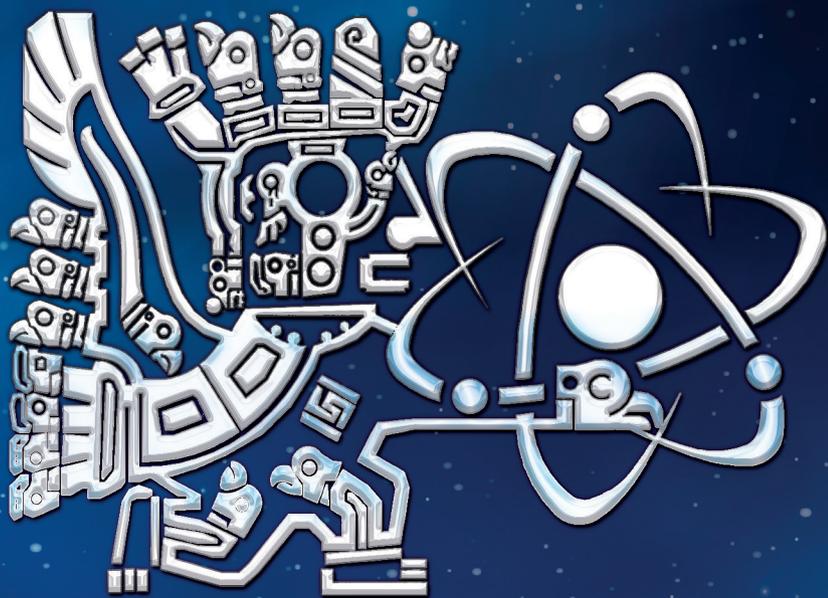
**(SF).- Bueno ingeniera, muchas gracias por la entrevista, ha respondido a todas nuestras preguntas, estaremos a la expectativa de la Revista Científica Nuclear “Bolivianamente”, y también agradecemos al trabajo que está realizando la Agencia Boliviana de Energía Nuclear al implementar estos dos Centros, el Programa Nuclear Boliviano y todo el trabajo de género que se está implementando, que es muy interesante, y estaremos a la expectativa.**

Muchas gracias.



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear

# A R T Í C U L O S



**“BOLIVIANAMENTE”**

REVISTA  
CIENTÍFICA  
NUCLEAR



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



# ÍNDICE

<b>Artículo 1.</b> Procesos hidrológicos y origen de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada mediante aplicaciones de la hidrología isotópica .....	17
<b>Artículo 2.</b> Análisis por activación neutrónica (AAN) para la identificación de elementos radiactivos y tierras raras en muestras de mineral .....	29
<b>Artículo 3.</b> Potencialidad del desarrollo de radiofármacos emergentes a partir de radioisótopos PET producidos en el ciclotrón TR-24 .....	41
<b>Artículo 4.</b> Técnica del Insecto Estéril en Bolivia .....	49



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



# Procesos hidrológicos y origen de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada mediante aplicaciones de la hidrología isotópica

Gabriela Patricia Flores Avilés, PhD. <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: gflores@aben.gob.bo

## RESUMEN

La creciente demanda de agua para el consumo, riego, y actividades turísticas, en la región árida del Altiplano Boliviano, requiere de la consolidación de conocimientos sobre los recursos hídricos disponibles, en particular de las aguas subterráneas. El objetivo de este estudio fue realizar una primera caracterización sobre los procesos hidrológicos y el origen de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada. Este sistema acuífero es estudiado utilizando trazadores isotópicos  $\delta^2 H$ ,  $\delta^{18} O$ ,  $^3H$  e hidroquímicos generados durante abril-mayo de 2019 y combinados con información hidrogeológica, hidrológica, litológica y topográfica.

Las composiciones isotópicas estables e inestables, modelos isotópicos, y características hidroquímicas revelaron que las aguas subterráneas del sistema acuífero en la zona de materiales no consolidados presentan un componente mínimo de recarga por precipitación ( $\sim 42,5 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) y una mezcla de aproximadamente 67% de aguas someras frías, 32% de aguas que emergen de rocas fracturadas (manantiales calientes), y una fracción mínima correspondería a fluidos geotermales ( $<0,02\%$ ), evidenciando que las aguas provenientes de la zona de rocas fracturadas son también una fuente de recarga de la zona de materiales no consolidados.

Las aplicaciones de la hidrología isotópica proporcionaron una comprensión consistente y preliminar de algunos procesos hidrológicos que ocurren en el sistema. Los análisis de deuterio, oxígeno-18, radón-222, y radiocarbono ( $\delta^2 H$ ,  $\delta^{18} O$ ,  $^{222}Rn$   $^{14}C$ ) de las muestras recolectadas durante agosto de 2021, que actualmente se encuentran en proceso, permitirán profundizar el conocimiento científico sobre el funcionamiento del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada, coadyuvando en el desarrollo de un modelo hidrogeológico. Este tipo de modelos se constituyen en una herramienta poderosa para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos.

**Palabras clave:** Hidrología isotópica, Altiplano Boliviano, Recursos hídricos, Gestión sostenible.

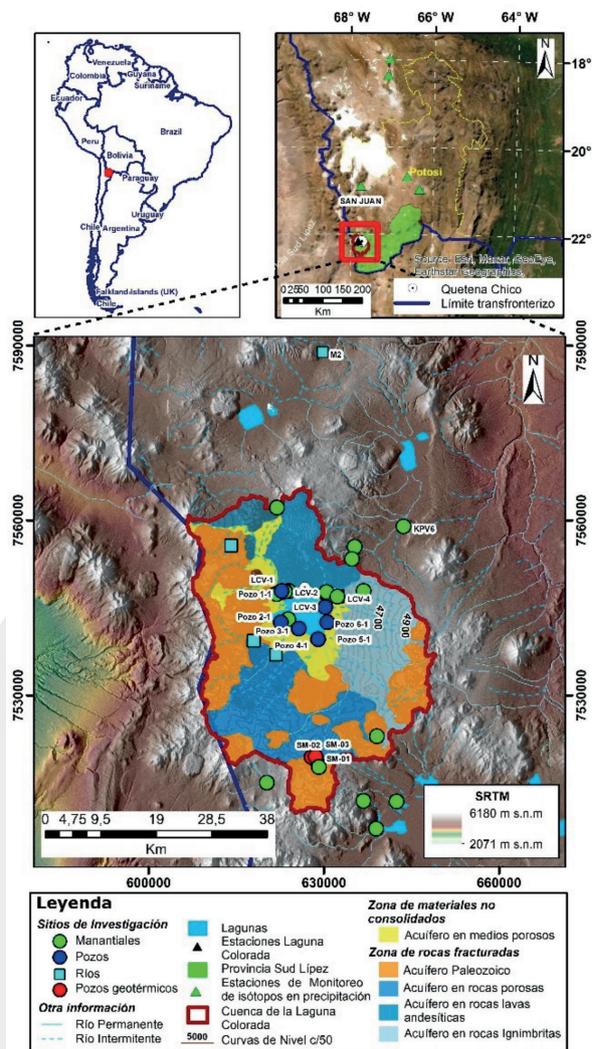
# 1. Introducción

La escasez de agua dulce es un problema latente a nivel mundial, particularmente en regiones áridas y semiáridas donde los recursos hídricos se ven amenazados por el cambio climático y el crecimiento continuo de la población [13,22]. Este es el caso de la Cuenca de la Laguna Colorada, importante fuente de suministro de aguas subterráneas de la región sud del Altiplano Boliviano. La comprensión limitada sobre el funcionamiento hidrogeológico de este sistema acuífero y el impacto de las actividades antropogénicas ha generado presiones y conflictos sociales en esta región [6].

Investigaciones previas a escala local y regional han estudiado a fondo las características geotérmicas de la Laguna Colorada [5,7,16,19]. Además, se han reportado datos sobre estudios de balance hídrico [17]. Sin embargo, todavía se tiene una comprensión limitada sobre la dirección, magnitud, y procesos hidrológicos de los flujos subterráneos, así como los límites del sistema acuífero, y sus mecanismos de recarga y descarga.

El desarrollo de modelos sobre el funcionamiento hidrogeológico es necesario para comprender la dinámica de los acuíferos de esta región. De hecho, numerosas investigaciones a nivel mundial, incluyendo América del Sur [1,8,9,14,20], han documentado el desarrollo de estos modelos en base a estudios multidisciplinarios que incluyen aplicaciones de la hidrología isotópica.

En particular, esta investigación tiene por objetivo realizar una primera caracterización sobre: i) el origen de las aguas subterráneas, y los ii) procesos hidrológicos de evaporación y mezcla durante la recarga del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada, mediante aplicaciones de la hidrología isotópica.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio en (superior izquierda) Sud América, (superior derecho) la Provincia Sud Lípez del Departamento de Potosí. (Inferior) Mapa de la Cuenca de la Laguna Colorada mostrando los sitios de investigación-Misiones de Campo 2019 y 2021. Los colores hipsométricos representan la elevación en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) del terreno (DEM: SRTM 1-Arc-Second Global N.A.S.A, 2000).

## 2. Metodología

### 2.1 Descripción de la zona de estudio

La Cuenca de la Laguna Colorada tiene una extensión de ~1.500 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicada en la Provincia Sud Lípez del Departamento de Potosí (Fig.1), entre las Cordilleras Oriental y Occidental de los Andes. Es una cuenca de drenaje cerrado cuyas aguas fluyen hacia la Laguna Colorada.

Las condiciones climáticas en esta región son extremadamente áridas presentando dos estaciones marcadas “época lluviosa” (noviembre a marzo) y “época de estiaje” (abril a octubre) [6]. La precipitación y la evapotranspiración de referencia media anual, calculadas en base a registros disponibles en [18] de la estación de la Laguna Colorada (1982-2010), es de 77,3 mm • año<sup>-1</sup> y de 873,6 mm • año<sup>-1</sup>, respectivamente.

El clima no siempre fue tan árido como el actual, en efecto, estudios han reportado que durante los ciclos glaciales (condiciones húmedas y frías), que ocurrieron en el Pleistoceno, la precipitación pudo haber sido mayor favoreciendo la formación de los relieves glaciares y lacustres en la Cordillera Oriental y el Altiplano Boliviano [9,10]. Por lo que, los sedimentos que rellenan la Cuenca de la Laguna Colorada son el resultado de erosiones glaciares de una secuencia volcánica del Cenozoico (Cuaternario/Terciario) [5].

Investigaciones previas regionales [5,7,19] han reportado la presencia espacial de dos unidades hidrogeológicas (Fig. 1): i) una zona de materiales no consolidados (205 km), compuesta por sedimentos cuaternarios (arenas y gravas), y ii) una zona de rocas fracturadas (1.251 km), (principalmente rocas ignimbritas y lavas andesíticas) en la que predominan minerales silicatos cálcicos, calcita, y aluminosilicatos de hierro y magnesio.

### 2.2 Estrategia de investigación

Durante abril-mayo de 2019 (al final de la época lluviosa) y agosto de 2021 (época de estiaje) se llevaron a cabo dos misiones científicas de campo a la escala de la Cuenca de la Laguna Colorada.

La estrategia de investigación consistió en el mapeo integrado de fuentes de aguas superficiales y subterráneas (ríos, manantiales, pozos de monitoreo y lagunas). Se consideraron principalmente fuentes de agua emergiendo de la zona de rocas fracturadas (manantiales), y fuentes ubicadas en la zona de materiales no consolidados (pozos) (Fig. 1). En cada sitio de investigación se realizaron mediciones in-situ de parámetros físico-químicos, y la recolección de muestras para análisis de iones mayoritarios, isótopos estables de agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) y radio isótopos de tritio ( $^3\text{H}$ ).

En esta primera edición, solamente se incluye el análisis, procesamiento e interpretación de los datos isotópicos e hidroquímicos generados durante la misión de campo 2019, por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) y la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), en el marco del Proyecto BOL 7005 “Desarrollo de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en la provincia Sud Lípez, empleando Hidrología Isotópica”, financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la ABEN.

## 2.3 Análisis químicos e isotópicos

Las mediciones in-situ de: pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), y potencial redox (Eh), fueron realizadas utilizando un medidor multiparámetro CONSORT C5010.

Las composiciones de isótopos estables de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  fueron cuantificadas en un Analizador Isotópico de Agua-Vapor LGR (Los Gatos Rearch Model 912-0032), y reportadas en relación al Agua del Océano Medio Estándar de Viena o VSMOW (por sus siglas en inglés) en permiles (‰). El error analítico fue menor que 0,2 ‰ y 0,6 ‰ para  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , respectivamente [21]. Los análisis de isótopos inestables de tritio  $^3\text{H}$  fueron realizados mediante un contador Quantulus 1220 de PerkinElmer. El límite de detección de  $^3\text{H}$  fue de 0,15 Unidades de Tritio (UT) para 500 ml de muestras enriquecidas y 0,3 UT para 250 ml de muestras enriquecidas [2]. Los análisis isotópicos fueron realizados en el laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Finalmente, las muestras recolectadas para el análisis de elementos mayoritarios fueron filtradas in-situ utilizando filtros de acetato de celulosa de 0,45  $\mu\text{m}$  y almacenadas en envases de polietileno de alta densidad. Las muestras filtradas para el análisis de aniones fueron congeladas, mientras que las destinadas al análisis de cationes fueron preservadas con ácido nítrico al 2% y almacenadas a 4°C. Las concentraciones de aniones fueron cuantificadas por espectrometría UV-visible y las de cationes por absorción atómica. Los análisis químicos se realizaron en los laboratorios de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) (Tabla A-1).

## 2.4 Línea local de aguas meteóricas

La línea local de aguas meteóricas o LMWL (por sus siglas en inglés) para el sitio de estudio fue determinada en base a las composiciones isotópicas mensuales (2008-2013), disponibles en [11] para la Estación de San Juan, localizada a ~ 146 km de la Laguna Colorada (Fig. 1, mapa superior derecho).

La marca isotópica ponderada, es decir el promedio ponderado del contenido isotópico para la Estación de San Juan fue calculado en base a la siguiente ecuación [3]:

$$\delta_{pa} = \frac{\sum_{ene}^{dic} p_{mes} \cdot \delta_{pm}}{\sum_{ene}^{dic} p_{mes}} \quad (1)$$

Donde  $\delta_{pa}$  es el promedio anual ponderado del delta oxígeno-18 o deuterio [‰],  $p_{mes}$  es la precipitación mensual [mm], y  $\delta_{pm}$  es el promedio mensual ponderado del delta oxígeno-18 o deuterio [‰].

## 2.5 Procesos hidrológicos y origen de las aguas subterráneas

### 2.5.1 Pérdida por evaporación

La fracción de pérdida por evaporación durante la recarga de aguas subterráneas en la zona de materiales no consolidados (Fig.1) fue modelada en base a la ecuación de destilación de Rayleigh [3]:

$$\delta^{18} O_{gw} - \delta^{18} O_{prec} = \varepsilon^{18} O_{total} \cdot Inf \quad (2)$$

Donde  $\delta^{18} O_{gw}$  es el delta de oxígeno-18 de las aguas subterráneas [‰],  $\delta^{18} O_{prec}$  es el delta de oxígeno-18 de la precipitación,  $\varepsilon^{18} O_{total}$  es el enriquecimiento total por evaporación [‰], y  $f$  es la fracción residual de agua.  $\delta^{18} O_{gw} - \delta^{18} O_{prec}$  puede determinarse gráficamente en base a la pendiente de evaporación local y  $\varepsilon^{18} O_{total} = \varepsilon^{18} O_{l-v} + \Delta\varepsilon^{18} O_{bl-v}$ ;  $\varepsilon^{18} O_{l-v}$  [‰], es el factor de fraccionamiento para el intercambio de agua-vapor en equilibrio para  $^{18}O$  y es una función de la temperatura, y  $\Delta\varepsilon^{18} O_{bl-v}$  [‰], es el efecto cinético como función de la humedad.

## 2.5.2 Mezcla durante la recarga y flujo de las aguas subterráneas

Dadas las condiciones climáticas áridas de la zona de estudio, se planteó la hipótesis de que la recarga en la zona de materiales no consolidados, presenta una mezcla de flujos de aguas subterráneas someros fríos, flujos que emergen de los manantiales calientes, y fluidos geotermales (Fig.1). Así, las fracciones relativas de mezcla, fueron calculadas en base a un modelo de balance isotópico de tres fuentes [3]:

$$f_{manan} = \frac{[Cl_{Pozo\ 1-1}] - [Cl_{Pozo\ 2-1}] - f_{geot} [Cl_{geot}] - [Cl_{Pozo\ 2-1}]}{[Cl_{manan}] - [Cl_{Pozo\ 2-1}]} \quad (3)$$

$$f_{Pozo\ 2-1} = \frac{\delta^{18} O_{Pozo\ 1-1} - \delta^{18} O_{manan} - f_{geot} (\delta^{18} O_{geot} - \delta^{18} O_{manan})}{\delta^{18} O_{Pozo\ 2-1} - \delta^{18} O_{manan}} \quad (4)$$

Para la ecuación 3:  $f_{manan}$  es la fracción relativa de aguas subterráneas que emergen de los manantiales [adimensional],  $[Cl_{Pozo\ 1-1}]$  es la concentración de cloruro de las aguas subterráneas provenientes del pozo perforado en la zona de materiales no consolidados Pozo 1-1 [adimensional] [ $mg \cdot L^{-1}$ ],  $[Cl_{Pozo\ 2-1}]$  es la concentración de cloruro de las aguas subterráneas provenientes del pozo perforado Pozo 2-1 [ $mg \cdot L^{-1}$ ],  $f_{geot}$  es la fracción relativa del fluido geotermal [adimensional],  $[Cl_{geot}]$  es la concentración de cloruro del fluido geotermal [ $mg \cdot L^{-1}$ ], y  $[Cl_{manan}]$  es la concentración de cloruro de los manantiales [ $mg \cdot L^{-1}$ ].

Para la ecuación 4:  $f_{Pozo\ 2-1}$  es la fracción relativa de aguas subterráneas someras frías provenientes del pozo perforado (Pozo 2-1),  $\delta^{18} O_{Pozo\ 1-1}$  es el delta oxígeno -18 de las aguas subterráneas provenientes del pozo perforado Pozo 1-1 [‰],  $\delta^{18} O_{manan}$  es el delta oxígeno-18 de las aguas que emergen de los manantiales calientes [‰],  $\delta^{18} O_{geot}$  es el delta oxígeno-18 del fluido geotermal [‰], y  $\delta^{18} O_{Pozo\ 2-1}$  es el delta oxígeno-18 de las aguas subterráneas someras frías provenientes del pozo perforado (Pozo 2-1).

Los valores de referencia del fluido geotermal para la zona de estudio fueron extraídos de [7].

### 3. Resultados y discusiones preliminares

#### 3.1 Características químicas de las aguas subterráneas

Los datos físico-químicos para el conjunto de muestras de aguas subterráneas (Tabla A-1) mostraron valores de pH ligeramente alcalinos (7,5 a 8,5). No obstante, se observaron rangos relativamente amplios de conductividad eléctrica en las muestras de agua provenientes de manantiales (130 a 480  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) y de los pozos perforados (399 a 1080  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ).

Las aguas subterráneas alojadas en la zona de materiales no consolidados (símbolos azules Fig. 1, Fig. A-1) presentan facies del tipo Na(K)-Cl (e.g. Pozo 2-1) que pueden atribuirse a la presencia de evaporitas en los depósitos cuaternarios. Y facies del tipo Na(K)-HCO<sub>3</sub> (e.g. Pozo 1-1) que sugieren la influencia de otras fuentes de agua. Por otra parte, los manantiales calientes que emergen de los sistemas fracturados presentan facies del tipo Na(K)-HCO<sub>3</sub> (símbolos verdes, Fig. A-2) mostrando elevadas concentraciones de sodio que se atribuyen a la geología de la zona de rocas fracturadas consistente en minerales secundarios (calcita, clorita, anortita, entre otros aluminosilicatos) que conforman las lavas andesíticas e ignimbritas dacíticas.

#### 3.2 Composiciones y modelos isotópicos ( $\delta^2\text{H}$ , $\delta^{18}\text{O}$ , $^3\text{H}$ )

En general, las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas varían desde -14.5 ‰ a -10.0 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y -105.7 ‰ a -77.4 ‰ para  $\delta^2\text{H}$  (Fig. 2, Tabla A-1).

La ecuación de la LMWL para la Estación San Juan (Fig. 2) ( $\delta^2\text{H} = 8.1 \delta^{18}\text{O} + 15.7$ ) presenta una pendiente ligeramente elevada de la Línea Global de Aguas Meteoricas (GMWL) ( $\delta^2\text{H} = 8.0 \delta^{18}\text{O} + 10$ ) [4] y un intercepto (15.7) más elevado. Líneas locales con estas características son a menudo reportadas en regiones áridas del mundo [8,12].

La Fig. 2 muestra que las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas de la zona de estudio (pozos y manantiales) no siguen una tendencia a lo largo de la LMWL ni de la GMWL, lo que indica una leve influencia de la precipitación moderna como fuente de recarga del sistema acuífero, sugiriendo que gran parte de la recarga del acuífero se dio bajo un régimen climático diferente. De hecho, las muestras libres de tritio (Tabla A-1) pueden ser interpretadas como aguas que carecen de un componente de recarga reciente, y por tanto con una edad superior a los sesenta años.

En la Fig. 3 es posible observar que el exceso de deuterio con respecto al delta oxígeno 18, a excepción del Pozo 2-1 y Pozo 3-1, se ajustan a una línea con pendiente negativa de acuerdo a la ecuación: D - exceso =  $-4.0 \delta^{18}\text{O} - 47.1$  ( $R^2 = 0,87$ ) mostrando un enriquecimiento isotópico de oxígeno-18 a medida que el exceso de

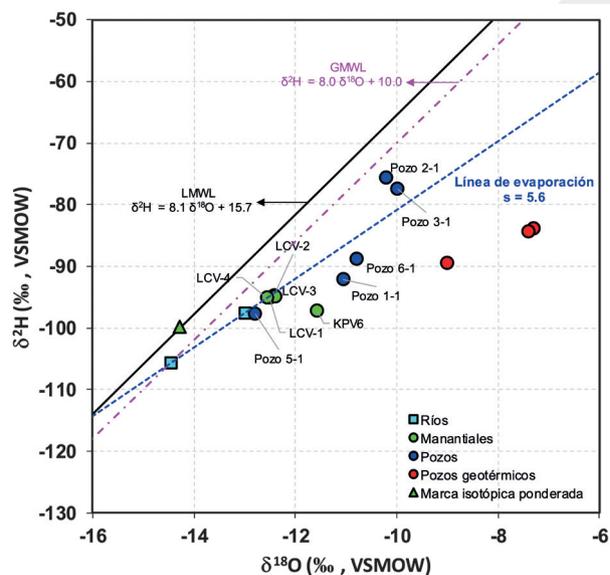
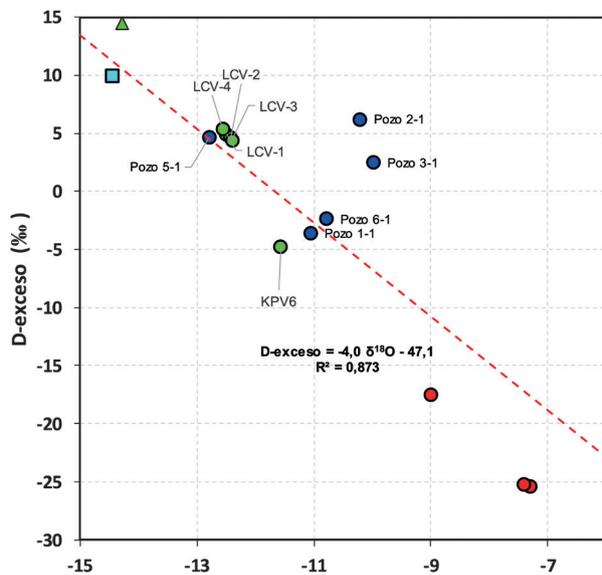


Figura 2. Diagrama de las composiciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de las muestras de agua.



**Figura 3.** Variación del exceso de deuterio con respecto al delta oxígeno - 18.

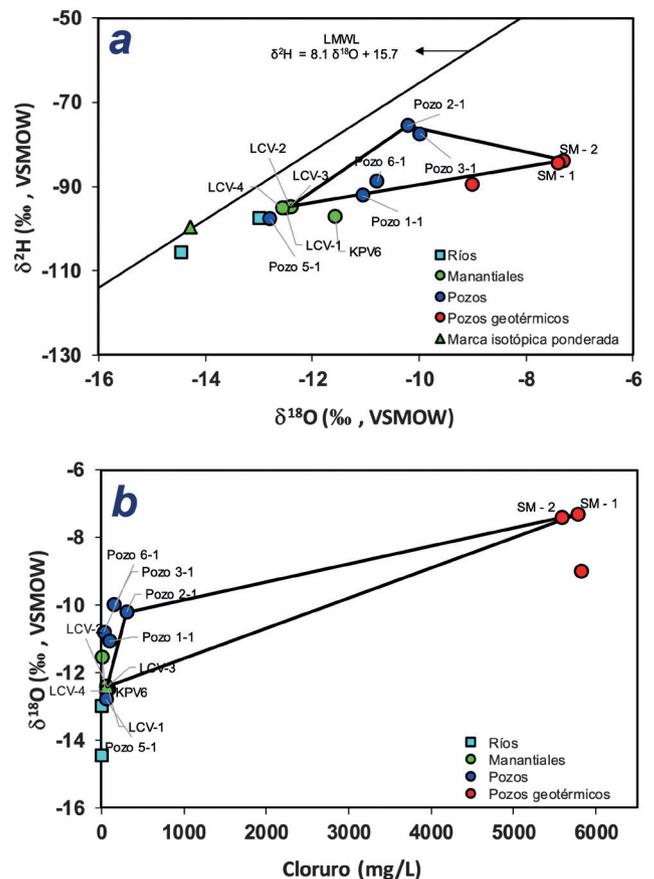
enriquecimiento isotópico. De hecho, Los resultados de la Ec. 2 indican una pérdida por evaporación del 45%, es decir, se estima una tasa media anual de recarga, en la zona de materiales no consolidados (Fig.1), de un 55% de la precipitación media ( $\sim 77,3 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ ).

Finalmente, los resultados del modelo de balance isotópico de tres fuentes (Ec. 3 y Ec. 4) muestran que las aguas subterráneas alojadas en la zona de materiales no consolidados presentan una mezcla de aproximadamente 67% de aguas subterráneas someras frías (símbolos azules Fig. 4a,b), 32% de aguas que emergen de manantiales calientes (símbolos verdes, Fig. 4a,b), y una fracción mínima ( $<0.02\%$ ) correspondería a fluidos geotermales (símbolos rojos, Fig. 4). Estos resultados revelan que las aguas subterráneas del sistema acuífero en la zona de materiales no consolidados presentan un componente mínimo de recarga por precipitación reciente, y evidencian que una parte de la recarga proviene de manantiales que emergen de la zona de rocas fracturadas.

Los datos de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) generados durante la misión de campo 2021 permitirán estimar los tiempos de residencia de las aguas subterráneas y probar si el componente de recarga de aguas subterráneas someras frías corresponden a una precipitación del Pleistoceno.

deuterio disminuye, lo cual evidencia que las aguas subterráneas del sistema acuífero (símbolos verdes y azules Fig.1) pudieron mezclarse con diferentes fuentes de recarga durante regímenes climáticos que fueron sometidos a diferentes grados de evaporación (ciclos glaciales e interglaciales).

Por otra parte, las aguas subterráneas alojadas en la zona de materiales no consolidados (símbolos azules Fig. 1, Fig. 2) reflejan fraccionamiento secundario por evaporación, esto puede observarse en las muestras que siguen una tendencia a lo largo de la "pendiente de evaporación", cuyo valor aproximado es de  $s = 5.6$  (Fig.2). Estos resultados demuestran que las aguas subterráneas experimentaron



**Figura 4.** a) Diagrama de las composiciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , y b) diagrama  $\delta^{18}\text{O}$  vs Cloruro.

## 4. Conclusiones

La información generada durante la misión de campo 2019 (datos representativos de la época lluviosa) permitió realizar una primera caracterización sobre el origen de las aguas subterráneas y la determinación de algunos procesos hidrológicos del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada.

Los análisis de deuterio, oxígeno-18, radón-222, y radiocarbono ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , ( $^{222}\text{Rn}$ , ( $^{14}\text{C}$ ) de las muestras recolectadas durante la misión de campo 2021 (época de estiaje), que actualmente se encuentran en proceso, permitirán la generación de nuevos datos isotópicos para profundizar el conocimiento científico sobre el funcionamiento del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada y dar continuidad a las tareas de: i) sistematización y creación de una base organizada de datos científicos espaciales SIG, ii) análisis, procesamiento, e interpretación de datos científicos, y el posterior iii) desarrollo de un modelo hidrogeológico sobre los principales procesos hidrológicos que controlan la cantidad de las aguas subterráneas a la escala de la Cuenca de la Laguna Colorada, información científica que será publicada en una siguiente edición. Los modelos hidrogeológicos son la base para el desarrollo de modelos numéricos de flujo y transporte de contaminantes y se constituyen en una herramienta poderosa para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos, contribuyendo así en la implementación de la “Política Nacional de Uso Eficiente del Agua Potable y Adaptación al Cambio Climático, para Vivir Bien”.

## Bibliografía

- [1] Bayanzul B, Nakamura K, Machida I, Watanabe N, Komai T. Construction of a conceptual model for confined groundwater flow in the Gunii Khooloi Basin, Southern Gobi Region, Mongolia. *Hydrogeology Journal*. 2019;27(5):1581-1596.
- [2] Copia L, Wassenaar L, Terzer-Wassmuth S, Belachew D, Araguas-Araguas L. Comparative evaluation of 2H- versus 3H-based enrichment factor determination on the uncertainty and accuracy of low-level tritium analyses of environmental waters. *Applied Radiation and Isotopes*. 2021; 176:109850.
- [3] Clark I. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press Taylor & Francis Group. 2015; p. 121-164.
- [4] Clark ID, Fritz P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press LLC. 1997; p. 43-64.
- [5] Delgadillo Z, Rosales H, Gonzáles R. Estudio de Factibilidad Geotérmica en el área de Laguna Colorada “Estudios Geocientíficos de Superficie”. 1987; 98 p.
- [6] ENDE. Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral (EEIA-AI) Proyecto geotérmico Laguna Colorada y Línea de Transmisión Eléctrica. Empresa Nacional de Electricidad. 2010; p. 4-1 – 4-65.
- [7] Figueroa Peñarrieta Y. *Geochemical and Isotopic Characteristics of the Laguna Colorda Geothermal Area – SW Bolivia*. United Nations University. Orkustofnun, Grensasvegur 9. 2018; p. 229-256.
- [8] Flores Avilés GP. A groundwater basin multidisciplinary approach to conceptualize subsurface flow and trace nitrate contamination sources. Lake Titicaca, Bolivia. PhD thesis, École Doctorale Terre-Univers-Environnement, University of Grenoble Alpes, France. 2019; 245 p.
- [9] Flores Avilés GP, Descloitres M, Duwig C, Rossier Y, Spadini L, Legchenko A et al. Insight into the Katari-Lago Menor Basin aquifer, Lake Titicaca-Bolivia, inferred from geophysical (TDEM), hydrogeological and geochemical data. *Journal of South American Earth Sciences*. 2020; 99:102479.
- [10] Fritz S, Baker P, Seltzer G, Ballantyne A, Tapia P, Cheng H et al. Quaternary glaciation and hydrologic variation in the South American tropics as reconstructed from the Lake Titicaca drilling project. *Quaternary Research*. 2007;68(3):410-420.
- [11] IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. 2021; Accessible en: <https://nucleus.iaea.org/wiser>
- [12] Kang S, Yi Y, Xu Y, Xu B, Zhang Y. Water Isotope framework for lake water balance monitoring and modelling in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2017; 12:289-302.

- [13] Kammoun S, Re V, Trabelsi R, Zouari K, Daniele S. Assessing seasonal variations and aquifer vulnerability in coastal aquifers of semi-arid regions using a multi-tracer isotopic approach: the case of Grombalia (Tunisia). *Hydrogeology Journal*. 2018;26(8):2575-2594.
- [14] Mudarra M, Andreo B, Marín A, Vadillo I, Barberá J. Combined use of natural and artificial tracers to determine the hydrogeological functioning of a karst aquifer: the Villanueva del Rosario system (Andalusia, southern Spain). *Hydrogeology Journal*. 2014;22(5):1027-1039.
- [15] N.A.S.A. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Project from the National Aeronautics and Space Administration. 2000; Disponible en: <http://dds.cr.usgs.gov/ee-data/coveragemaps/shp/ee/srtm/srtm.zip>.
- [16] Revilla Vargas Y. Analysis of Bit Operations: Laguna Colorada Geothermal Project, Bolivia. United Nations University. Orkustofnun, Grensasvegur 9. 2016; P. 771-796.
- [17] Saavedra O, Soruco W, Camargo A., Butrón C. Balance hídrico integrado hidrológico e hidrogeológico de la unidad hidrológica Laguna Colorada con análisis de cambio climático. Publicación de MMAyA y Cooperación Suiza en Bolivia. 2017; 157 p.
- [18] S.E.N.A.M.H.I. Servicio Nacional de Meteorología del Estado Plurinacional de Bolivia. 2021; Base de datos disponible en <http://www.senamhi.gob.bo>.
- [19] Scandiffio G & Alvarez M. Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en América Latina. Actas de una Reunión final de coordinación de investigaciones celebrada en San José, Costa Rica, 12-16 de Noviembre de 1990. Organismo Internacional de Energía Atómica. 1990; P. 77-114.
- [20] Viguier B, Jourde H, Yáñez G, Lira E, Leonardi V, Moya C et al. Multidisciplinary study for the assessment of the geometry, boundaries and preferential recharge zones of an overexploited aquifer in the Atacama Desert (Pampa del Tamarugal, Northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences*. 2018; 86:366-383.
- [21] Wassenaar L, Terzer-Wassmuth S, Douence C, Araguas-Araguas L, Aggarwal P, Coplen T. Seeking excellence: An evaluation of 235 international laboratories conducting water isotope analyses by isotope-ratio and laser-absorption spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2018;32(5):393-406.
- [22] Xanke J, Liesch T, Goeppert N, Klinger J, Gassen N, Goldscheider N. Contamination risk and drinking water protection for a large-scale managed aquifer recharge site in a semi-arid karst region, Jordan. *Hydrogeology Journal*. 2017;25(6):1795-1809.

Anexos

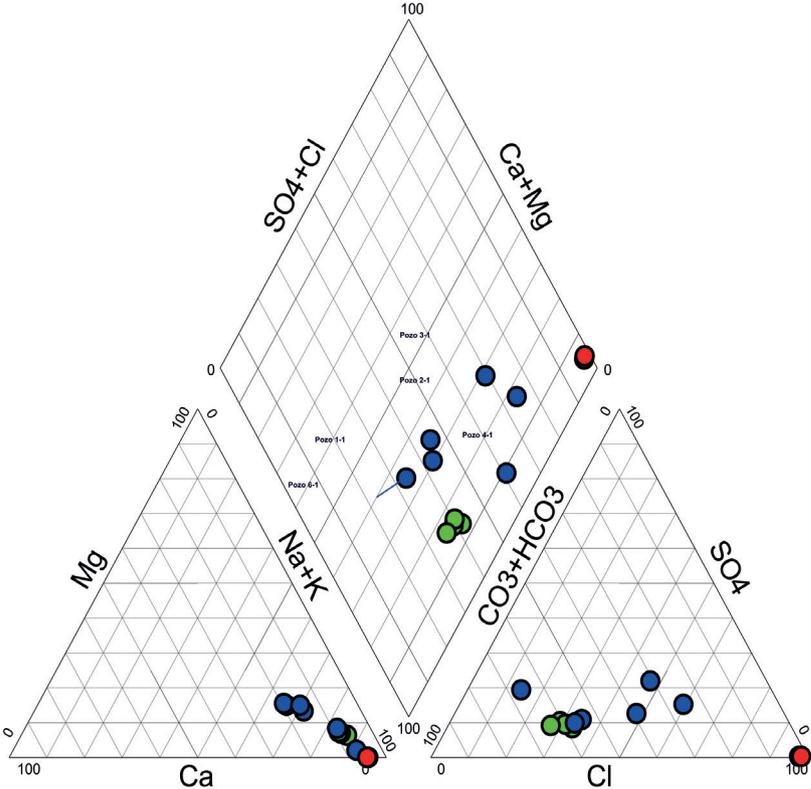


Figura A-1. Diagrama Piper.

**Tabla A-1. Parámetros isotópicos e hidroquímicos de las muestras recolectadas durante la Misión de Campo 2019.**

#	Código	Fuente	Acuífero	Date	X UTM (m)	Y UTM (m)	Altitud (m s.n.m) SRTM	Prof. del Pozo (m)	Nivel Estático (m)	T °C	TDS (mg/L)	pH	Eh (mV)	OD (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	δ <sup>18</sup> O (‰)	δ <sup>2</sup> H (‰)	<sup>3</sup> H (UT)	
<b>Misión de Campo 2019</b>																											
1	LOV-1	Manantial	Ac.Roc.Fract	30/4/2019	623159	7547763	4296	n.d.	n.d.	21.3	468.0	7.8	172.8	1.6	253.8	79.6	10.1	6.2	3.3	253.8	0.9	84.4	29.2	-12.5	-95.0	0.2	
2	LOV-2	Manantial	Ac.Roc.Fract	30/4/2019	623375	7547796	4298	n.d.	n.d.	21.5	386.0	7.8	96.6	1.6	214.7	63.6	9.2	6.0	3.0	214.7	0.8	60.1	28.3	-12.4	-94.8	0.3	
3	LOV-3	Manantial	Ac.Roc.Fract	30/4/2019	630464	7547728	4351	n.d.	n.d.	21.5	365.0	7.9	26.1	1.6	201.7	58.6	8.6	5.7	3.0	201.7	0.7	61.1	25.2	-12.4	-94.8	<0.11	
4	LOV-4	Manantial	Ac.Roc.Fract	30/4/2019	632312	7546953	4343	n.d.	n.d.	21.9	411.0	7.9	25.1	1.6	240.7	64.6	8.6	6.5	3.2	240.7	0.4	60.0	27.4	-12.6	-95.1	<0.24	
5	Pozo 4-1	Pozo	Ac.Por.MNC	1/5/2019	629007	7539651	4296	6.95	1.6	12.3	502.0	8.5	104.5	1.3	169.2	138.1	16.6	9.8	1.8	169.2	1.5	121.5	43.1	n.d.	n.d.	n.d.	
6	Pozo 5-1	Pozo	Ac.Por.MNC	1/5/2019	630619	7542546	4291	7.48	0.6	16.8	313.0	7.5	85.1	1.7	156.2	49.0	5.1	13.0	6.2	156.2	1.1	57.6	24.6	-12.8	-97.7	<0.11	
7	Pozo 6-1	Pozo	Ac.Por.MNC	1/5/2019	630240	7545162	4294	8.76	1.2	8.6	429.0	8.0	95.3	1.9	244.0	65.5	5.2	17.7	8.6	244.0	1.0	30.5	95.9	-10.8	-88.7	0.4	
8	Pozo 2-1	Pozo	Ac.Por.MNC	1/5/2019	622648	7542542	4295	4.2	1.25	18.6	962.0	8.0	47.7	1.6	224.5	253.2	29.6	25.3	14.3	224.5	3.6	305.4	106.0	-10.2	-75.5	<0.13	
9	Pozo 3-1	Pozo	Ac.Por.MNC	1/5/2019	625720	7541461	4295	7.57	1.2	14.8	650.0	8.0	66.4	1.6	175.7	146.1	23.6	29.6	15.8	175.7	3.9	156.5	98.3	-10.0	-77.4	0.4	
10	Pozo 1-1	Pozo	Ac.Por.MNC	1/5/2019	622790	7547914	4295	4	0.57	10.1	495.0	7.8	78.7	1.9	273.3	55.6	14.8	12.4	7.3	273.3	1.3	92.8	37.4	-11.1	-92.1	<0.21	
11	LOV-5	Rio	n.d.	1/5/2019	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.3	n.d.	8.2	36.1	2.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.4	n.d.	n.d.	-13.0	-97.5	<0.13
12	KPV6	Manantial	Ac.Roc.Fract	2/5/2019	643652	7559004	4478	n.d.	n.d.	3.3	n.d.	8.0	33.0	3.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10.4	n.d.	-11.6	-97.3	<0.36	
13	M2	Rio	n.d.	2/5/2019	629772	7588888	4551	n.d.	n.d.	9.7	n.d.	8.2	53.0	2.7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.2	n.d.	-14.5	-105.7	<0.2	
<b>Otra información disponible</b>																											
1	SM-1*	Pozo Geotérmico		1/1/2013	628746	7518887	4866	11.14	n.d.	n.d.	n.d.	7	n.d.	n.d.	n.d.	3281	569	166	0.03	177.5	n.d.	5786	22.14	-7.3	-83.8	n.d.	
2	SM-2*	Pozo Geotérmico		25/4/2013	627895	7519430	4909	1264	n.d.	n.d.	n.d.	7.1	n.d.	n.d.	n.d.	3208	548	151	0.02	217.1	n.d.	5583	22.72	-7.4	-84.4	n.d.	
3	SM-3*	Pozo Geotérmico		23/2/2013	628597	7519539	4890	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.3	n.d.	n.d.	n.d.	3346	559	170	0.08	158.8	n.d.	5622	23.68	-9	-89.5	n.d.	

Ac.Por.MNC Acuífero poroso en materiales no consolidados

Ac.Roc.Fract Acuífero en rocas fracturadas

\* Valores obtenidos de Figlieroa (2018)

n.d. dato no disponible o no analizado

# Análisis por Activación Neutrónica (AAN) para la identificación de elementos radiactivos y tierras raras en muestras de mineral

**Marco Augusto Herbas López, MSc. <sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: mherbas@aben.gob.bo

## RESUMEN

El análisis por activación neutrónica (NAA) es una técnica nuclear útil en la identificación y cuantificación de elementos presentes en muestras irradiadas, para el caso específico de muestras geológicas es posible identificar la presencia de elementos de tierras raras (ETR) en cantidades muy bajas (trazas) debido a la sensibilidad de la técnica, se presenta de manera breve el principio de funcionamiento del NAA, en particular del análisis instrumental (INAA), donde la muestra no requiere alguna preparación especial y los tiempos de irradiación sugeridos según los elementos presentes. De acuerdo con la información recopilada por el detector de rayos gamma (HPGe), es posible determinar los elementos presentes mediante el espectro gamma obtenido.

**Palabras Clave:** Tierras Raras, Análisis por Activación Neutrónica, Reactor Nuclear de Investigación.

## 1. Introducción

A raíz de los grandes avances tecnológicos y el uso masivo de dispositivos electrónicos, el término de elementos de tierras raras (ETR) es cada vez más conocido, sin embargo, hace una década, muy pocas personas conocían su existencia y aplicaciones industriales. El grupo de elementos pertenecientes a las tierras raras son 17, de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (desde el lantano hasta el lutecio) y los restantes dos son el escandio y el itrio.

La denominación “rara” no hace referencia a elementos de escasa abundancia en el planeta, de hecho, son más abundantes que los metales preciosos, son llamadas así debido a que están diseminadas y normalmente no se encuentran en grandes concentraciones en los yacimientos, lo cual hace que su explotación sea inviable en muchos casos. A pesar de las dificultades en su extracción, estos elementos son de vital importancia en diversas industrias como la electrónica, petrolera, medicinal y nuclear entre otras.

Actualmente, son pocos los países productores de ETR a nivel global, China se mantiene como el mayor productor desde el año 2000, llegando a controlar casi el total de la producción (98%) mundial entre el 2005 y 2010 [1], sin embargo, en los últimos años el país asiático redujo su producción hasta ocupar el 60% de la producción mundial, observándose una diversificación de la producción con la participación de EE.UU. (16%), Australia (7%) y Birmania (12,5%) [2].

Se espera que a futuro la demanda de ETR siga creciendo, siendo necesaria una mayor producción o reciclaje de estos elementos a partir de dispositivos electrónicos en desuso, en ese sentido, es importante realizar la prospección y exploración de estos elementos a fin de reducir la vulnerabilidad en el suministro de estos mediante su industrialización y obtener beneficios económicos en los países con yacimientos identificados.

## 2. Aplicaciones de los ETR

Por lo general, los ETR son considerados como un solo grupo, sin embargo, cada elemento que forma parte de este grupo tiene diferentes características y aplicaciones específicas, existiendo diferente demanda según el elemento [3]. En los últimos años, la demanda global creció vertiginosamente, donde en los primeros años posterior a su descubrimiento pasó de ser empleado como productor de chispas para encendido de lámparas y cocinas a ser empleado en dispositivos electrónicos avanzados, generación de energía y en la industria militar [4].

La demanda de óxidos de tierras raras (REO en inglés) pasó de 75,000 toneladas en el año 2000 a 123,100 toneladas en el 2016 [5] representando un incremento del 63%. A pesar de que los ETR son usados en pequeñas cantidades, las características que otorgan son difícilmente reemplazadas por otros elementos.

En la Figura 1 se presentan los principales usos de los ETR en el mundo. Se observan diversos usos, donde los más importantes corresponden a la fabricación de catalizadores para la industria petrolera y tratamiento de agua con el 24% del total. Por otro lado, con el 23% se encuentra la fabricación de imanes para los vehículos eléctricos, motores, discos duros y equipos de refrigeración entre otros, el resto de la demanda se distribuye en diferentes aplicaciones como productos de pulido, vidrio y cerámicas entre otros [6].

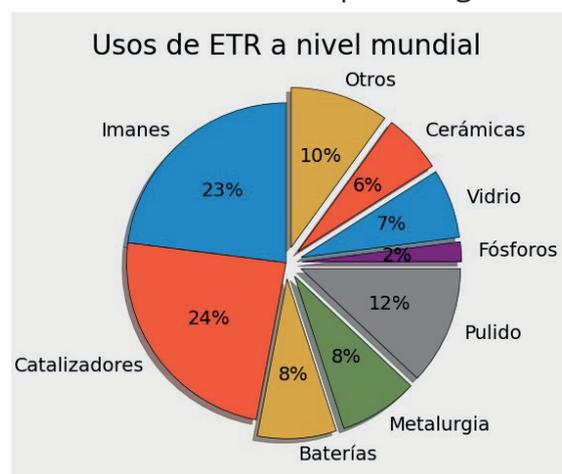


Figura 1. Usos de los ETR a nivel mundial [5]

Como se observa, el uso de estos elementos es variado y cerca de un cuarto del total en la actualidad es destinado a la fabricación de dispositivos electrónicos de alta tecnología, se espera que, en el futuro, producto de los avances tecnológicos y la necesidad de descarbonización de la matriz energética mundial se incremente su porcentaje en la demanda total global al ser empleados en aerogeneradores y paneles fotovoltaicos.

## 3. Técnicas de detección de ETR en muestras geológicas

En la actualidad, son varias las técnicas<sup>1</sup> para la detección de presencia de ETR en muestras geológicas, estas son: [7,9]

- Espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).
- Fluorescencia de rayos-X (XRF).

<sup>1</sup> Las abreviaciones de las técnicas analíticas descritas en este artículo se encuentran en inglés para ajustarse a los términos empleados comúnmente en la bibliografía consultada

- Espectrometría por absorción atómica (AAS).
- Análisis por activación neutrónica (NAA).

A continuación, cada una de estas técnicas será descrita de manera breve, haciendo énfasis en el NAA en la siguiente sección.

### **3.1 Espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)**

Es uno de los métodos más comunes para el análisis de ETR junto con el NAA. La técnica consiste en la vaporización, atomización e ionización de la muestra en plasma para su subsecuente análisis por espectroscopía de masas. Los elementos son detectados en función a la relación masa/carga de sus iones. Por lo general las muestras se deben encontrar en estado líquido, sin embargo, es posible analizar muestras en estado sólido (espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente por ablación láser) [7]. El gas empleado típicamente es el argón (Ar), posterior a la ionización, un espectrómetro de masas se encarga de separar los iones según su masa para su identificación.

Mediante la aplicación de esta técnica analítica, es posible identificar la presencia de ETR en la muestra analizada dada la alta sensibilidad del método, sin embargo, se requiere una preparación previa de la muestra, la cual define de gran manera el resultado final.

### **3.2 Fluorescencia de rayos-X (XRF)**

Es otra de las técnicas empleadas para el análisis de ETR, su principio de funcionamiento consiste en la emisión de rayos-X secundarios, producto del desplazamiento del electrón de una órbita y su redistribución electrónica para alcanzar la estabilidad ocasionado por la excitación de una fuente primaria de rayos-X. Se emiten rayos-X característicos de la muestra, permitiendo identificar el elemento presente en función a la energía detectada por el dispositivo XRF [10].

Es posible identificar elementos con número atómico (Z) mayor a 11 y la muestra no requiere un pretratamiento especial previo a su análisis.

Mediante la aplicación de esta técnica analítica es posible identificar la presencia de ETR a pesar de tener menor sensibilidad respecto al ICP-MS, sin embargo, es una técnica bastante útil para evaluar la presencia de los elementos de interés in situ.

### **3.3 Espectrometría por absorción atómica (AAS)**

Consiste en la absorción de energía radiante con longitudes de onda específicas de átomos en estado gaseoso. Son dos los tipos principales de AAS:

- Espectrometría por absorción atómica por llama (FAAS).
- Espectrometría por absorción atómica por horno de grafito (GFAAS).

[11] sugiere emplear FAAS para la detección de ETR en muestras metalúrgicas y materiales electrónicos. Sin embargo, tiene poco éxito en la determinación de ETR en pequeñas concentraciones puesto que la muestra en contacto con la flama compuesta por óxido nitroso y acetileno se ioniza reduciendo la eficiencia en la detección. [12]

Por otro lado, [11] indica que la técnica GFAAS es más sensible que FAAS, sin embargo, un importante inconveniente son las interferencias en el espectro debido a las características de la matriz de la muestra.

### 3.4 Análisis por activación neutrónica (NAA)

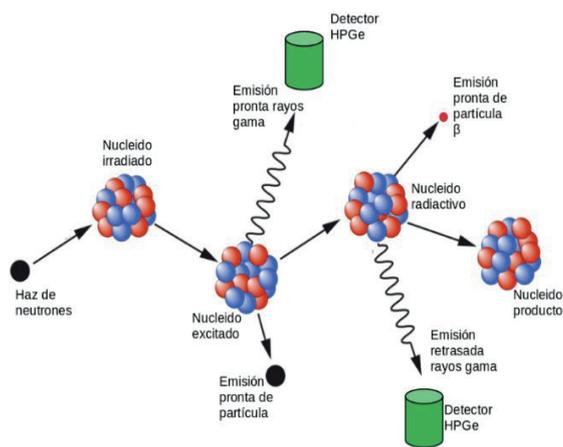
Puesto que el presente artículo se basa en la aplicación del NAA para el análisis de presencia de ETR, en la siguiente sección se describirá de manera más detallada el principio de la técnica.

## 4. Análisis por activación neutrónica en muestras geológicas

### 4.1 Conceptos básicos

El análisis por activación neutrónica (NAA) fue propuesto en 1936 por Hevesy y Levi como una técnica analítica, con aplicaciones en distintas áreas como medicina, arqueología, análisis forense y geología. Es considerada una técnica de análisis no destructiva [13]. En el rubro de la geología, para ser aplicada de manera exitosa en la identificación de elementos en muestras tuvieron que pasar cerca de 30 años, debido a que no se contaban con detectores de rayos gamma en ese entonces.

El principio de NAA consta en la irradiación de un blanco (muestra) con un haz de neutrones producidos generalmente por un reactor nuclear, sin embargo, también pueden emplearse otras fuentes de neutrones. Los elementos de la muestra pasan a un estado de inestabilidad; para retornar a su estado estable emiten algún tipo de radiación (alfa, beta o gamma).



**Figura 2.** Principio de funcionamiento NAA

En la técnica se mide la radiación gamma emitida instantáneamente o del decaimiento de los elementos activados en un rango de energías entre 60 y 1600 keV representado en un espectro gamma. Por cada elemento presente en la muestra se observa un pico de energía detectado mediante un detector de Germanio de alta pureza (HPGe), empleado por sus características de detección de rayos gamma. (Como se muestra en la figura 2).

El NAA es usado en dos casos principales:

- Elementos estables que emiten radiación producto de su activación por neutrones.
- Núcleos radiactivos que emiten radiación.

La fuente de neutrones más utilizada es el reactor nuclear de investigación, casi todos estos reactores, tienen uranio en su núcleo como combustible nuclear, donde el isótopo más importante para el NAA es el  $^{235}\text{U}$ , produciendo por evento de fisión poco más de dos neutrones [14].



Donde  $P_{\text{fisión}}$  son los productos de fisión y E es energía liberada.

Estos neutrones son liberados a altas energías, según los elementos presentes en la muestra, un rango de nivel de energía de neutrón es necesario para que pueda interactuar con la muestra, para reducir la energía de los neutrones, estos deben ser moderados, es decir, deben perder la energía en exceso. Uno de los moderadores con mejores características y bajo costo es el agua, la probabilidad de interacción de los neutrones con el núcleo de un elemento a una determinada energía se conoce como sección eficaz. [15].

Se observa en la expresión (1) que por cada evento de fisión se liberan más neutrones de los requeridos para la fisión, obteniendo así un superávit de neutrones que es empleado en la irradiación de las muestras.

Para un determinado nucleído de un elemento X irradiado por un haz de neutrones, el número de nucleídos formados por esta irradiación se expresa como.

$$\frac{-dN_y}{dt} = \sigma\varphi N_x \quad (2)$$

Donde  $\sigma$  es la sección eficaz ( $\text{cm}^2$ ) y  $\varphi$  es el flujo neutrónico ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $N_x$  es el número de nucleídos estables irradiados y  $N_y$  el número de nucleídos radiactivos producidos.

#### 4.2 Reacciones de activación de neutrones

La reacción nuclear más común producto de la captura de neutrones termalizados es la  $(n,\gamma)$  neutrón-gamma, los elementos irradiados pasan a un estado de excitación, emitiendo rayos gamma en un tiempo entre  $10^{-9}$  –  $10^{-12}$  segundos (ver figura 3), esta emisión es detectada durante la irradiación neutrónica por detectores de germanio de alta pureza (HPGe) próximos al reactor, cada elemento tiene una emisión característica (similar a una huella digital) que permite su identificación. Este tipo de análisis se conoce como “NAA por emisión pronta de rayos gamma”, se emplea generalmente en la detección de boro y elementos ligeros [16].

Por otro lado, el núcleo excitado para retornar a un estado de estabilidad, emite una partícula (neutrón, protón o electrón), el núcleo remanente puede seguir en estado de excitación, emitiendo finalmente un rayo gamma retrasado para llegar a su estado estable (ver figura 2), el rayo gamma retrasado es medido con detectores HPGe generalmente en laboratorios después de un período de “enfriamiento” de la muestra irradiada donde los elementos de mayor tiempo de semidesintegración permanecen, este análisis es conocido como “NAA por emisión retrasada de rayos gamma”.

#### 4.3 Tipos de activación neutrónica

La muestra irradiada consiste en una mezcla de radioactividades (en función a los elementos presentes). Existen dos tipos principales de activación neutrónica, NAA instrumental (INAA) y NAA radioquímica (RNAA) [17].

La primera es considerada una técnica no destructiva y es la que se considera en este artículo, la muestra irradiada es analizada sin ningún tipo de preparación de la prueba antes de la detección de la emisión gamma. Mientras que la segunda requiere de un

tratamiento radioquímico posterior a la irradiación en un laboratorio especializado, si bien este método permite identificar mayor cantidad de elementos, la preparación de la muestra es un proceso delicado, requiere mayor tiempo y es costosa.

#### 4.4 Identificación de Elementos de Tierras Raras por NAA

Entre 1960 y 1980, la técnica preferida para la identificación de ETR fue el NAA, entre sus aplicaciones, se tiene la identificación y cuantificación de elementos presentes en muestras geológicas [18], para lo cual se requiere la preparación de la muestra antes de su irradiación, las muestras usualmente analizadas se encuentran en estado sólido, sin embargo, pueden analizarse también en estado líquido o gaseoso. Generalmente la muestra irradiada tiene un peso aproximado de 100 mg [19] y dado que el flujo neutrónico en el reactor varía es común irradiar 2 o 3 submuestras para confirmar resultados. Es útil conocer de manera general el contenido aproximado de elementos que se quiere identificar a fin de determinar el tiempo de irradiación de las muestras. Algunos ETR tienen periodos de semidesintegración cortos y largos, para evitar la detección errónea, la muestra se separa en dos partes, la primera es irradiada por un tiempo menor para detectar los elementos con periodo de semidesintegración corto y debe ser analizada en el laboratorio en un tiempo no mayor a 1 hora [19], mientras que la segunda corresponde a un mayor tiempo de irradiación, donde debe pasar entre 1 o 2 días para que los elementos de vida corta no interfieran en la medición.

Los primeros elementos requieren menor tiempo de irradiación para llegar a la saturación, sin importar cuánto tiempo más se irradian, presentarán la misma actividad, los segundos elementos requerirán de mayor tiempo de irradiación para llegar al punto de saturación, la Figura 3 [19], representa lo descrito. Se observa que para el  $^{165}\text{Dy}$  la saturación ocurre aproximadamente a las 12 horas, mientras que para el  $^{141}\text{Ce}$  después de 7 días de irradiación se llega a un 10% del punto de saturación. Como regla general, para que un nucleído llegue al 50% de su actividad máxima, deberá ser irradiado durante 1 período de semidesintegración, mientras que para alcanzar el 90% de la actividad máxima, deberá ser irradiado por al menos 3,3 períodos de semidesintegración. [19] Posterior a la irradiación, la muestra decae siguiendo la expresión (Derivada de la expresión 2):

$$A_y = \sigma\phi N_x (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_d} \quad (3)$$

Dónde:  $\lambda$  es la constante de decaimiento del elemento,  $t$  el tiempo de irradiación y  $t_d$  el tiempo de decaimiento posterior a la irradiación.

A continuación, se presenta una tabla de algunos isótopos de ETR con los parámetros requeridos para estimar los tiempos de irradiación:

Tabla 1. Parámetros de isótopos activados por AAN

Isótopos activados ETR	T1/2		$\lambda$		$\sigma$ [barn] precursor
$^{140}\text{La}$	1,678	[d]	0,413	[1/d]	9,21
$^{141}\text{Ce}$	32,511	[d]	0,021	[1/d]	0,51
$^{147}\text{Nd}$	10,98	[d]	0,063	[1/d]	240
$^{153}\text{Sm}$	46,284	[h]	0,015	[1/h]	206
$^{152\text{m}}\text{Eu}$	93,116	[h]	0,074	[1/h]	9230
$^{160}\text{Tb}$	72,3	[d]	0,010	[1/d]	23,8
$^{165}\text{Dy}$	2,334	[h]	0,297	[1/h]	2650
$^{166}\text{Ho}$	26,824	[h]	0,026	[1/h]	64,4
$^{171}\text{Er}$	7,52	[h]	0,092	[1/h]	280
$^{170}\text{Tm}$	128,6	[d]	0,005	[1/d]	107

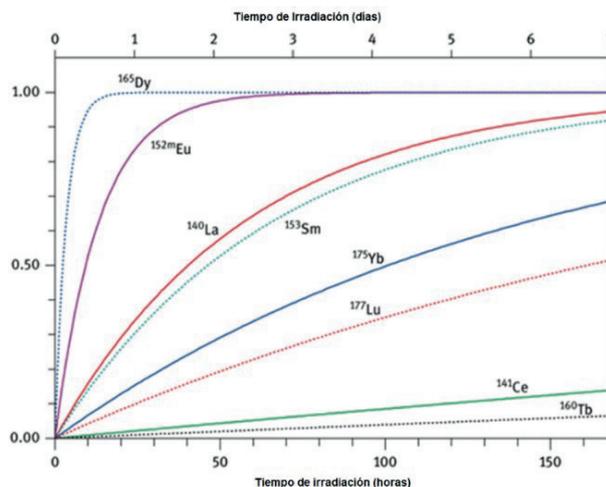


Figura 3. Tiempo de irradiación vs actividad relativa ETR

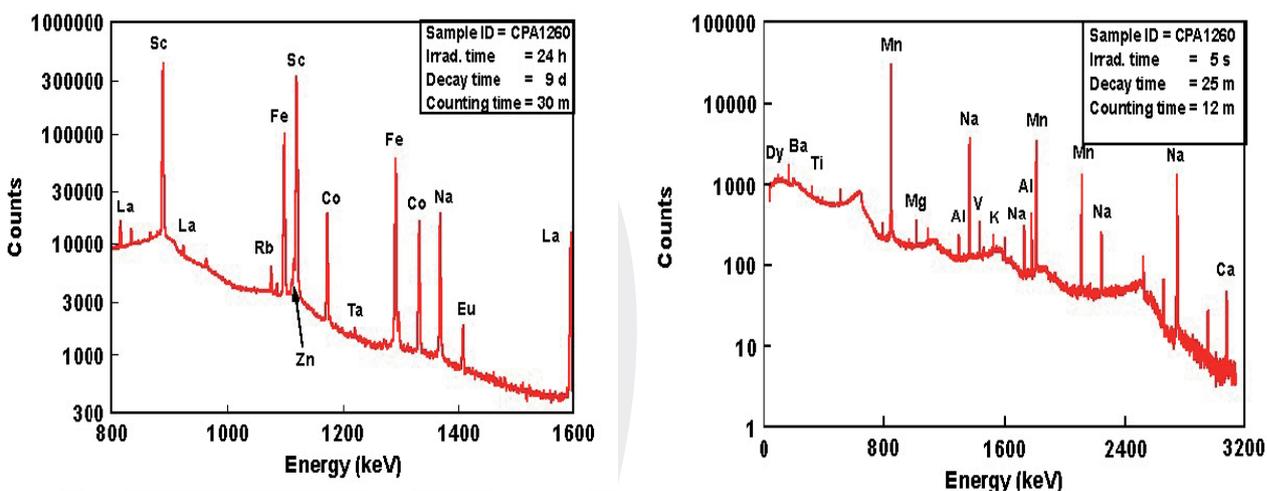


Figura 4. Espectro gamma obtenido por el detector HPGe, elementos con período de semidesintegración, arriba: corta, abajo: media y larga

El conteo de radiación gamma liberada se la hace empleando detectores de HPGe, en función a lo recolectado por el detector, se puede identificar el elemento según sus valores característicos comparados con bases de datos [20] (Ver Figura 4).

Se observa en la parte superior de la figura 4 el espectro gamma correspondiente a radionucleídos de vida corta y en la parte inferior el espectro de radionucleídos de vida mediana y larga, según el número de conteos y energía se identifican los elementos presentes comparando los valores obtenidos con bases de datos.

La técnica de NAA es considerada muy sensible a la presencia de elementos, llegando a detectar elementos en concentraciones de hasta 1 picogramo (10<sup>-12</sup> g) como es el caso del Disproso y Europio y entre 100 y 10000 picogramos para la mayoría de ETR (Asumiendo un flujo neutrónico de 10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) [21].

## 5. Comparación de técnicas de detección

Anteriormente se mencionaron las técnicas analíticas más empleadas para la evaluación de presencia de ETR en muestras geológicas, a continuación, la tabla 2 presenta un cuadro comparativo entre las mismas [7,9, 11, 12, 22,23].

Se observa que la comparación de características de análisis de presencia de ETR recopilada de bibliografía consultada establece que el NAA es la técnica que ofrece mayores beneficios en términos generales ante la ausencia del requerimiento de un pretratamiento de la muestra, alta sensibilidad en la detección, ser un ensayo no destructivo y las características de la matriz de la muestra no influyen en los resultados obtenidos.

**Tabla 2. Comparación de técnicas de detección de ETR**

Característica	ICP-MS	XRF	AA	IAAN
Sensibilidad	+++	+	+	++
Pretratamiento	---	++	--	+++
Tiempo de análisis	++	+++	+	--
No destructivo	--	+	--	+++
Multielemental	++	++	++	++
Independencia de la matriz	--	---	-	+++
Puede aplicarse in situ	+	++	+	---
Cantidad de la muestra	++	---	++	+++
+++ : Excelente	--- : Deficiente			

Entre las desventajas, se tiene que el tiempo de análisis puede ser largo (dependiendo de los isótopos presentes) y que necesariamente requiere de una fuente de neutrones con un flujo elevado, por tanto, no es un ensayo que puede aplicarse in situ.

## 6. Conclusiones

El NAA es una técnica analítica útil para determinar la presencia de elementos en una muestra, mediante su irradiación es posible activar la muestra para que durante su decaimiento emita rayos gamma de emisión pronta y retrasada, los cuales son recolectados generalmente por detectores de germanio hiper puro (HPGe) durante y después de la irradiación permitiendo identificar los elementos presentes con una notable sensibilidad, asimismo, irradiando simultáneamente una muestra conocida (estándar) de elementos, se puede determinar la concentración multielemental de ETR en la muestra analizada.

Por las características del NAA, (específicamente el INAA) no se requiere una preparación especial de la muestra (métodos químicos), por tal motivo el riesgo de contaminación de la muestra se reduce de gran manera, haciendo de esta técnica una de las más adecuadas para el análisis de ETR.

Por otro lado, la técnica de INAA es recomendada en distintos artículos científicos referidos al estudio de presencia de elementos en cantidades traza, puesto que presenta un límite de detección bajo (del orden de ppb<sup>2</sup>), además de requerir una cantidad minúscula de muestra.

La identificación de elementos con períodos de semidesintegración largos puede tomar varios días, sin embargo, los resultados obtenidos son precisos, siendo útiles para la identificación de la presencia de ETR en los lugares donde se recolectaron muestras a fin de evaluar posibles yacimientos para aprovecharlos técnica y económicamente en caso de presencia.

---

2 Partes por mil millones (1:1.000.000.000), la abreviación proviene del término inglés parts per billion.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Van Gonsen, B., Verplanck, P., Seal II, R., Long, K., Gambogi, "Rare-Earth Elements Chap. 0," U.S. Geol. Surv., 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3133/pp18020>.
- [2] USGS, "Mineral commodity summaries. 2021," 2021. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-rare-earths.pdf>.
- [3] V. Zepf, Rare Earths Industry Technological, economic, and environmental implications. Chapter 1: An overview of the usefulness and strategic value of rare earth metals. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [4] K. M. Goodenough, F. Wall, and D. Merriman, "The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations," *Nat. Resour. Res.*, vol. 27, no. 2, pp. 201–216, 2018, doi: 10.1007/s11053-017-9336-5.
- [5] Roskill, "Rare earths: Global industry, markets and outlook," London, 2016.
- [6] Eurare.org, "What are Rare Earth Elements?," 2017. <http://www.eurare.org/RareEarthElements.html>.
- [7] S. P. Verma, E. Santoyo, and F. Velasco-Tapia, "Statistical evaluation of analytical methods for the determination of rare-earth elements in geological materials and implications for detection limits," *Int. Geol. Rev.*, vol. 44, no. 4, pp. 287–335, 2002, doi: 10.2747/0020-6814.44.4.287.
- [8] B. Zawisza, K. Pytlakowska, B. Feist, M. Polowniak, A. Kita, and R. Sitko, "Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques: A review," *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. 26, no. 12, pp. 2373–2390, 2011, doi: 10.1039/c1ja10140d.
- [9] A. El-Taher, "Nuclear Analytical Techniques for Detection of Rare Earth Elements," *J. Radiat. Nucl. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–64, 2018, doi: 10.18576/jrna/030107.
- [10] ThermoFisher, "XRF technology in the field," 2021.
- [11] T. Rao and V. Biju, "Trace Determination of Lanthanides in Metallurgical, Environmental, and Geological Samples," *Crit. Rev. Anal. Chem.*, vol. 30, pp. 179–220, 2000.
- [12] P. Henderson and R. J. Pankhurst, "Rare earth element geochemistry," *Anal. Chem.*, pp. 467–499, 1984.
- [13] S. M. Eriksson, E. A. Mackey, R. M. Lindstrom, G. P. Lamaze, K. P. Grogan, and D. E. Brady, "Delayed-neutron activation analysis at NIST," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 298, no. 3, pp. 1819–1822, 2013, doi: 10.1007/s10967-013-2568-x.
- [14] P. J. Potts, *A handbook of Silicate Rock analysis*. New York: Springer, 1992.
- [15] A. Lamarsh, J., Baratta, *Introduction to nuclear engineering*. Prentice-Hall, 2001.

- [16] M. Peisach, "Prompt techniques. In: S. Amiel," pp. 93–111, 1981.
- [17] R. R. Greenberg, P. Bode, and E. A. De Nadai Fernandes, "Neutron activation analysis: A primary method of measurement," *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.*, vol. 66, no. 3–4, pp. 193–241, 2011, doi: 10.1016/j.sab.2010.12.011.
- [18] IAEA, "Use of research reactors for neutron activation analysis," 2001. [Online]. Available: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1215\\_prn.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1215_prn.pdf).
- [19] H. G. Stosch, "Neutron Activation Analysis of the Rare Earth Elements (REE)-With Emphasis on Geological Materials," *Phys. Sci. Rev.*, vol. 1, no. 8, pp. 1–25, 2019, doi: 10.1515/psr-2016-0062.
- [20] M. D. Glascock, "An overview of neutron activation analysis," *Malaysian Mag. Physics, Sci. Ideas*, vol. 1, no. November, pp. 41–45, 1996.
- [21] M. A. Ali, "A Brief Overview of Neutron Activation Analyses Methodology and Applications," *Second Conf. Nucl. Part. Phys.* 13-17 Nov. 1999, Cairo, Egypt, pp. 71–84, 1999, [Online]. Available: [www.iaea.org/inis/collection/.../\\_Public/37/118/37118483.pdf%0A](http://www.iaea.org/inis/collection/.../_Public/37/118/37118483.pdf%0A).
- [22] M. Barbaro, B. Passariello, S. Quaresima, A. Casciello, and A. Marabini, "Analysis of Rare Earth Elements in Rock Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)," *Microchem. J.*, no. 51, pp. 312–318, 1995.
- [23] S. J. Juras, C. J. Hickson, C. I. Horsky, and W. H. Mathews, "A practical method for the analysis of rare-earth elements in geological samples by graphite furnace atomic absorption and X-ray fluorescence," *Chem. Geol.*, vol. 64, no. 1–2, pp. 143–148, 1987.



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



# Potencialidad del desarrollo de Radiofármacos emergentes de $^{64}\text{Cu}$ a partir de Radioisótopos Pet producidos en el Ciclotrón TR-24

Lucía Alanoca Chura, PhD. <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: lalanoca@aben.gob.bo

## RESUMEN

El avance de la tecnología nuclear en el campo de la medicina proporciona alternativas para encarar los problemas de salud tan delicados como las enfermedades neoplásicas.

El gobierno boliviano encara de manera seria los problemas de salud de la población que padece este tipo de enfermedades. Para ello el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) cuenta en sus instalaciones con un ciclotrón modular TR-24. Este equipo de tecnología nuclear moderna tendrá la capacidad de producir diversos radioisótopos, entre ellos los “teranósticos” como el  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ .

Investigaciones recientes, dan a conocer que las células tumorales acumulan Cu, lo que permite utilizar al  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  como un trazador selectivo para realizar diagnósticos y tratamiento de tumores. Esto es posible gracias al proceso de decaimiento del  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  durante el cual se emite fotones de energía de 511 MeV y electrones Auger, como producto de la aniquilación de positrones-electrones. Por otro lado, el Cu presenta niveles de energía degenerados que favorece a la formación de diversos radiofármacos, entre los que se puede citar al  $^{64}\text{Cu}$ -ATSM y al  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  DOTA-TATE, el primero utilizado para evaluar el flujo sanguíneo e hipoxia celular de tumores y el segundo utilizado para la localización de tumores neuroendócrinos.

**Palabras Clave:** Radioisótopo, Ciclotrón, Teranóstico, tumores, Tomografías por Emisión de Positrones (PET).

## 1. Introducción

En respuesta a la necesidad de la población boliviana en cuanto a las enfermedades neoplásicas y en el marco del Programa Nuclear Boliviano (PNB), el Gobierno Nacional viene implementando el Complejo Ciclotrón de Radiofarmacia Preclínica (CCRP), donde se llevará a cabo la producción de diversos tipos de radiofármacos que serán empleados en medicina nuclear para realizar diagnósticos clínicos de identificación de diferentes tipos de tumores, enfermedades neoplásicas, estadificaciones y tratamientos de enfermedades oncológicas.

El CCRP cuenta con un ciclotrón modular de 16 a 24 MeV de potencia, capaz de producir una variedad de radioisótopos; salas de producción, control de calidad además de un laboratorio de preclínica donde se desarrollarán nuevos radiofármacos considerando principios activos presentes en plantas medicinales tradicionales de Bolivia.

Los radiofármacos que cumplen funciones de diagnóstico y tratamiento, son denominados teranósticos. Este grupo de elementos radiactivos está conformado por el  $^{89}\text{Zr}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ , de los cuales los tres últimos serán producidos en el ciclotrón del CCRP.

A continuación, se presenta las características básicas del ciclotrón del CCRP y las condiciones de producción de radioisótopos emergentes de uso en medicina nuclear para la obtención de imágenes de diagnóstico PET, PET/CT.

## 2. Aspectos Generales del Ciclotrón del CCRP

El ciclotrón es un acelerador de partículas que en la mayoría de los casos es utilizado para la producción de radioisótopos, para diferentes aplicaciones. Existen diferentes tipos de aceleradores caracterizados por su potencia y según el objetivo para el cual fueron construidos (producción de radioisótopos para diferentes fines: investigación, enseñanza, medicina nuclear).

El Ciclotrón-TR-24 con el que contará el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP), tendrá una potencia variable de hasta 24 MeV. Este equipamiento, parte esencial del complejo CCRP, tiene el objetivo principal de producir una serie de radioisótopos, los cuales en forma de sales o incorporados a una molécula orgánica darán como producto a diferentes tipos de radiofármacos.

Entre los radioisótopos que se producirán en el Ciclotrón-TR-24 se encuentran los siguientes:  $^{68}\text{Ga}$  (Galio-68),  $^{64}\text{Cu}$  (Cobre-64),  $^{89}\text{Zr}$  (Circonio-89),  $^{124}\text{I}$  (Yodo-124),  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Tecnecio-99),  $^{123}\text{I}$  (Yodo-123),  $^{18}\text{F}$  (Fluor-18),  $^{11}\text{C}$  (Carbono-11). Los mismos serán utilizados principalmente para la síntesis de radiofármacos, en su mayoría para diagnóstico-tratamiento (teranóstico) de diferentes patologías en medicina nuclear con el empleo de equipos de última generación tales como Tomografías Computarizadas por Emisión de Fotón Único (SPECT), tomografías por emisión de positrones (PET) y Tomografía por Emisión de Positrones/Tomografía Computarizada (PET/CT).

## 3. Desarrollo de radiofármacos de Cu

### 3.1 Generalidades del Cu

El cobre, uno de los metales de transición, de símbolo Cu, número atómico 29 y peso atómico 63,5 g; pertenece al grupo 11 de la tabla periódica y presenta tres estados de oxidación 0 ( $\text{Cu}^0$ ) presenta la siguiente estructura electrónica  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^9$ .

El Cu en su estado oxidativo de  $\text{Cu}^{2+}$  es el tercer elemento más abundante de los metales presentes en el cuerpo humano. La desregulación de este elemento trae como consecuencia una serie de enfermedades. El  $\text{Cu}^{2+}$  es esencial para múltiples procesos biológicos, actúa como cofactor catalítico de muchas enzimas y son componentes estructurales clave para las proteínas funcionales, con roles fundamentales en la biología celular [1].

El  $\text{Cu}^{2+}$  cumple el rol clave para la réplica y crecimiento celular. Muchos estudios revelaron que este ión está involucrado en el desarrollo y progresión de cáncer. Datos experimentales evidencian un elevado nivel de acumulación de cobre en tejidos malignos [2].

En general el metabolismo alterado del cobre en las células cancerosas podría atribuirse a la acción de la proteína transportadora de cobre hCTR1, que contiene 190 aminoácidos. Dicha proteína se sobreexpresa en un elevado número de tumores en próstata, pulmón, mama e hígado; cánceres, glioblastomas y melanoma [3].

### 3.2 RADIOISÓTOPO $^{64}\text{Cu}^{2+}$

El cobre  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  es un radioisótopo que decae con un periodo de semidesintegración de 12,7 horas. Durante su desintegración emite positrones ( $\beta^+$ ), captura electrónica, y radiación beta negativa ( $\beta^-$ ) figura 1 [4].

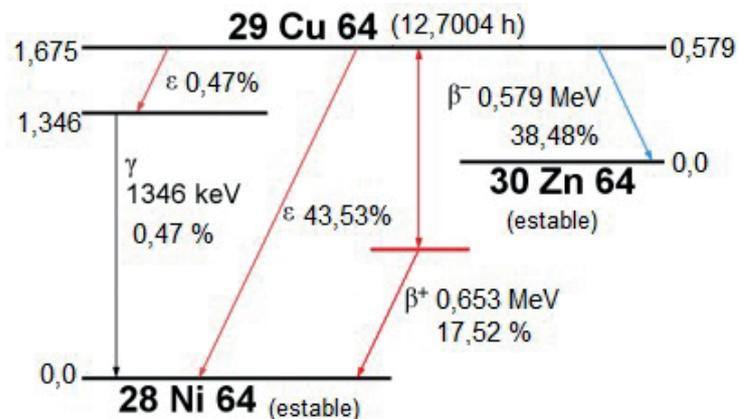


Figura 1. Decaimiento del  $^{64}\text{Cu}$  (<https://nucleonica.com>)

Muchos mecanismos de captación fisiológicos y biológicos en humanos son lentos, considerando este hecho el radionucleído  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  de propiedades nucleares particulares ofrece una amplia ventaja para realizar diagnósticos óptimos y terapias médico nucleares [5].

El  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  actúa como biomarcador para revelar información molecular fundamental en tejidos cancerosos mediante la emisión de fotones de 511 MeV que son detectados por un PET. Seguida a la aniquilación positrón-electrón se producen electrones Auger capaces de destruir las lesiones cancerosas logrando un efecto terapéutico. La selección de la proteína hCTR1 con iones de cobre radiactivos ha sido propuesta como un enfoque eficiente para imágenes moleculares de alteraciones metabólicas en una variedad de cánceres [6].

La configuración electrónica del cobre  $\text{Cu}^{2+}$  permite su reacción con aminas, iminas y ligandos bidentados. Al igual que los metales de transición presentan niveles de energía degenerados (distorsiones Jahn-Teller) y no igualmente ocupados, que favorece a la formación de radiofármacos [7].

### 3.3 PRODUCCIÓN DE RADIOISÓTOPOS DE $^{64}\text{Cu}^{2+}$

El  $^{64}\text{Cu}$  podrá ser producido en el ciclotrón TR24 por irradiación de objetivos de  $^{64}\text{Ni}$  durante 6 horas con una energía de 16 MeV y una corriente de 40  $\mu\text{A}$  (figura 2). Este proceso se da mediante la siguiente reacción  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ . El objetivo o blanco de níquel está constituido por una placa o soporte de Oro (Au), recubierta, mediante electrodeposición, por Níquel de alta pureza y enriquecido en  $^{64}\text{Ni}$ . El soporte también puede ser de Niobio (Nb), Plata (Ag) o grafito (C) [8].

Luego de la producción del radioisótopo, se separa el  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  de otros metales y se recupera el  $^{64}\text{Ni}$ . La disolución del blanco se obtiene agregando sobre el blanco 1,5 ml de HCl al 30% y se calienta a  $60^\circ\text{C}$ . Después de 30 minutos se obtiene  $^{64}\text{Ni}$  disuelto. Se puede añadir algunos  $\mu\text{l}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para acelerar la reacción de disolución. La solución resultante se transfiere a una columna de resina Dowex 1x8 mesh. Seguidamente la fracción de  $^{64}\text{Ni}$  se eluye de la columna de resina con HCl 6M. Finalmente la fracción de  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  es recuperada con HCl 1M [8].

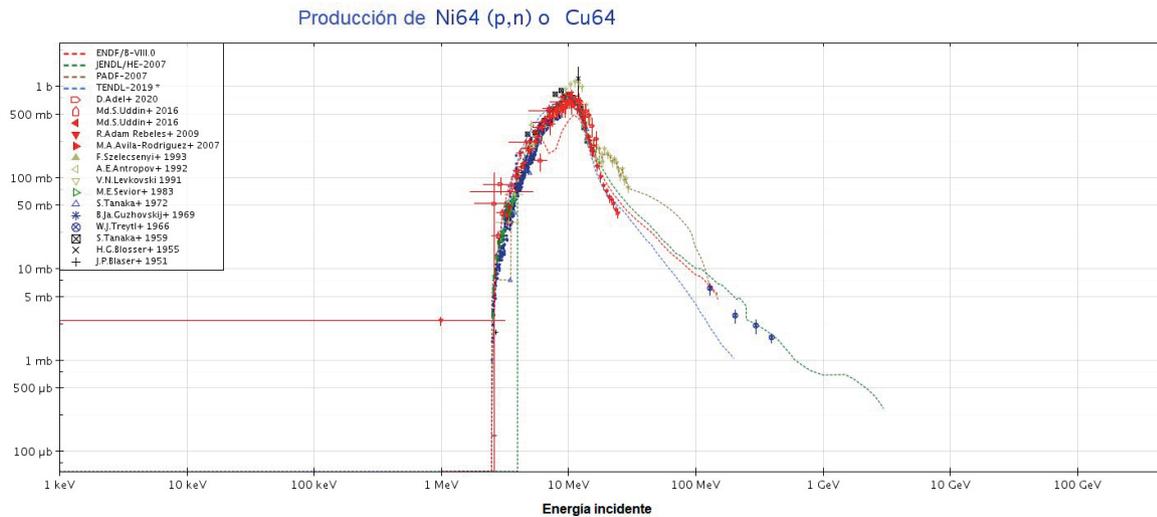


Figura 2. Sección eficaz de la reacción  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$  (<https://www.oecd-nea.org/janisweb/>)

### 3.4 RADIOFÁRMACOS DE $^{64}\text{Cu}^{2+}$

#### • Cuprymina ( $^{64}\text{Cu}-\text{CuCl}_2$ )

El  $^{64}\text{Cu}-\text{CuCl}_2$  es un radiofármaco precursor, no utilizado de manera directa en pacientes. El radiofármaco debe ser utilizado como radiomarcador de moléculas transportadoras, desarrolladas específicamente y autorizadas para su radiomarcación.

#### • $^{64}\text{Cu}-\text{ATSM}$

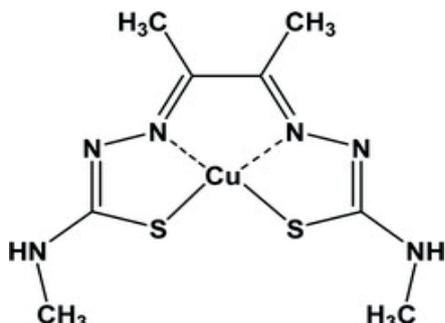
El diacetil bis (N<sup>4</sup> metil-tiosemicarbazona) es un fármaco que marcado con  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ , da como producto al radiofármaco Cu-diacetil-bis (N<sup>4</sup> metil-tiosemicarbazona) ( $^{64}\text{Cu}-\text{ATSM}$ ) como se muestra en la Figura 3. El radiofármaco es utilizado para evaluar flujo sanguíneo e hipoxia celular [9].

La determinación del grado de desarrollo del proceso hipóxico muestra la agresividad del tumor, la insuficiencia de control local y la activación de factores de transcripción que soportan la supervivencia celular [10]. La capacidad de localizar y cuantificar la magnitud de la hipoxia en tumores sólidos mediante el uso de imágenes nucleares facilita el diagnóstico temprano y ayuda a seleccionar el tratamiento adecuado para cada paciente individual [11].

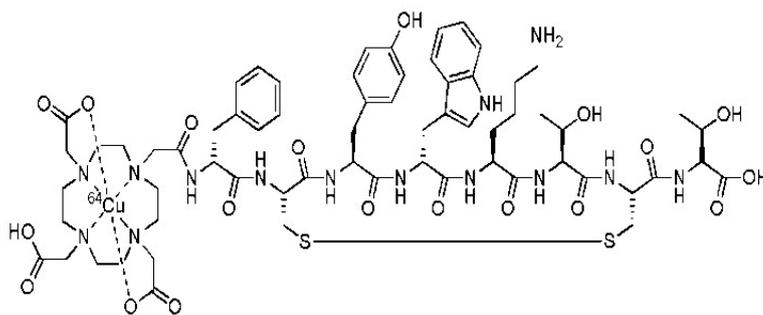
El radiofármaco también es utilizado para observar hipoxia en células en angina inestable del corazón (obstrucción aguda de una arteria coronaria sin infarto de miocardio); muestra retención selectiva en las células cerebrovascular en pacientes con síndrome

de encefalopatía mitocondrial, acidosis láctica y episodios stroke-like (MELAS) [12], enfermedades de Parkinson (cerebro) [13] y tumores con metabolismo hipóxico [14].

En los tumores el  $^{64}\text{Cu}$ -ATSM se acumula en regiones ricas en “células madre cancerosas”, una posible indicación de alta tolerancia terapéutica y capacidad metastásica [15]. Además, la combinación de las propiedades terapéuticas del  $^{64}\text{Cu}$  y ATSM trae una nueva radioterapia interna selectiva para regiones ricas en “células madre cancerosas” [16].



**Figura 3.** Estructura química de  $^{64}\text{Cu}$  (ATSM)<sub>2</sub>



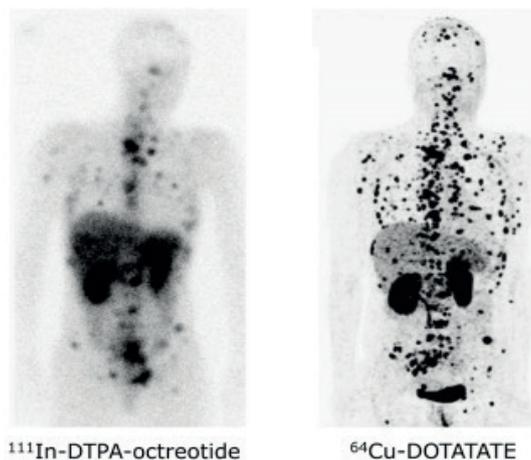
**Figura 4.** Estructura química del  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ -DOTA-TATE

El radiofármaco ( $^{64}\text{Cu}$  (ATSM)<sub>2</sub>) se prepara añadiendo a una solución de  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  en HCl y glicina. A esta solución se añaden H<sub>2</sub>-ATSM en DMSO. La solución se deja reaccionar a temperatura ambiente durante unos segundos. La pureza radioquímica es determinada por cromatografía y es superior al 99% [17].

#### • $^{64}\text{Cu}$ DOTA-TATE

Es un radiofármaco de diagnóstico radiactivo indicado para su uso con Tomografía por Emisión de Positrones (PET) para la localización de Tumores Neuroendocrinos (TNE) positivos para el receptor de somatostatina en adultos figura 4.

Por otro lado, clínicamente el radiofármaco permite la detección de lesiones con una menor carga de radiación, estadificación y tratamiento de tumores neuroendocrinos mostrando imágenes de mayor calidad [18]. En la figura 5, se puede observar la comparación de imágenes obtenidas utilizando  $^{111}\text{In}$  y  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ .



**Figura 5.** Comparación de  $^{111}\text{In}$ -DTPA-octreotide y  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ -DOTA-TATE en un mismo paciente con múltiples metástasis en huesos y tejidos blandos

El radiofármaco, cuya estructura puede ser observado en la figura 5, es obtenido marcando DOTA-TATE con  $^{64}\text{Cu}$ , añadiendo a un vial seco que contiene  $^{64}\text{CuCl}_2$  (800 -1 000 MBq) una solución estéril de DOTATATE y ácido genticico en acetato de sodio acuoso. Se añade ácido genticico para reducir el efecto de la radiólisis. La mezcla se deja a temperatura ambiente durante 10 minutos y luego se diluye con agua estéril, por último, la mezcla se pasa por un filtro estéril. La pureza radioquímica se determina por cromatografía líquida de alta presión en fase inversa (RPHPLC), y la cantidad de  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  no marcado es determinado por cromatografía en capa fina (TLC) [18].

## 4. CONCLUSIONES

En el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica, una infraestructura que cuenta con el equipamiento necesario, tiene una gran potencialidad para la producción de radiofármacos entre ellos los emergentes, ya que cuenta con un ciclotrón TR-24 que permite la generación de diversos radioisótopos tales como el  $^{64}\text{Cu}$ .

Los radiofármacos de  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ , de características físicas, químicas y nucleares particulares atribuidas al decaimiento del radioisótopo de Cu, pueden ser utilizados para la obtención de imágenes mediante Tomografías de Emisión de Positrones (PET). La selectividad de las células tumorales por el  $^{64}\text{Cu}^{2+}$ , permitirá realizar diagnósticos médicos con menor error; pero además el tratamiento de estas enfermedades.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rubino J.T. and Franz, K.J., 2012. Coordination chemistry of copper proteins: how nature handles a toxic cargo for essential function. *J. Inorg. Biochem.* 107, 129-143.
- [2] Ishida S., Andreux P., Poitry-Yamate C., Auwerx J., & Hanahan D., 2013. Bioavailable copper modulates oxidative phosphorylation and growth of tumors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(48), 19507-19512.
- [3] Cai H., Wu J. -s., Muzik O., Hsieh J.-T., Lee R. J., & Peng F., 2014. Reduced  $^{64}\text{Cu}$  Uptake and Tumor Growth Inhibition by Knockdown of Human Copper Transporter 1 in Xenograft Mouse Model of Prostate Cancer. *Journal of Nuclear Medicine*. 55(4), 622-628.
- [4] Cañellas C.O., Salgueiro M.J., Zubillaga M., 2017. *Radiofármacos del Laboratorio al Paciente*. 1ra. Ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires. ISBN 978-987-42-3410-0. 622 p.
- [5] Svenson S., 2013. Theranostics: Are We There Yet? *Molecular Pharmaceutics*. 10(3), 848-856.
- [6] Chakravarty R., Chakraborty S., & Dash A., 2016.  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  Ions as PET Probe: An Emerging Paradigm in Molecular Imaging of Cancer. *Molecular Pharmaceutics*, 13(11), 3601-3612.
- [7] Jahn H, Teller E., 1937. Stability of polyatomic molecules in degenerate electronic states. *Orbital Degeneracy*. *Proceeding of the Royal Society of London*. 161(905):220-235.
- [8] IAEA International Atomic Energy Agency, 2016. Cyclotron Produced radionuclides: Emerging Positron Emitters for Medical Applications:  $^{64}\text{Cu}$  and  $^{124}\text{I}$ . <http://www.iaea.org/books>.
- [9] Fujibayashi Y., Taniuchi H., Yonekura Y., Ohtani H., Konishi J., Yokoyama A., 1997. Copper-62-ATSM: a new hypoxia imaging agent with high membrane permeability and low redox potential. *J. Nucl. Med.* 38, 1155-1160.
- [10] Brown JM. The hypoxic cell: a target for selective cancer therapy--eighteenth Bruce F. Cain Memorial Award lecture. *Cancer Res.* 1999.
- [11] Anderson C.J., Ferdani R., 2009. Copper 64 radiopharmaceuticals for PET imaging of cancer: advances in preclinical and clinical research. 2009. *Can.Bioth. Radioph.* vol 24, 4:379-393.
- [12] Ikawa M., 2009. PET imaging of redox and energy states in stroke-like episodes of MELAS, Mitochondrion. 92, 144-148.
- [13] Ikawa M., 2011. Evaluation of striatal oxidative stress in patients with Parkinson's disease using [ $^{62}\text{Cu}$ ]ATSM PET, *Nucl. Med. Biol.* 38, 945-951.

- [14] Takahashi N., 2000. Evaluation of  $^{62}\text{Cu}$  labeled diacetyl-bis(N4-methylthiosemicarbazone) as a hypoxic tissue tracer in patients with lung cancer. *Ann. Nucl. Med.* 145, 323-328.
- [15] Yoshii Y., Furukawa T., Kiyono Y., Watanabe R., Waki A., Mori T., Fujibayashi Y., 2010. Copper-64-diacetyl-bis (N4-methylthiosemicarbazone) accumulates in rich regions of CD133+ highly tumorigenic cells in mouse colon carcinoma. *Nuclear Medicine and Biology.* 37(4), 395-404.
- [16] Yoshii Y., Furukawa T., Kiyono Y., Watanabe R., Mori T., Yoshii H., ... Fujibayashi Y., 2011. Internal radiotherapy with copper-64-diacetyl-bis (N 4-methylthiosemicarbazone) reduces CD133 + highly tumorigenic cells and metastatic ability of mouse colon carcinoma. *Nuclear Medicine and Biology*, 38(2), 151-157.
- [17] Fujibayashi Y., Taniuchi H., Yonekura Y., Ohtani H., Konishi J., Yokoyama A., 1997. Copper-62-ATSM: a new hypoxia imaging agent with high membrane permeability and low redox potential. *J. Nucl. Med.* 38, 1155-1160.
- [18] Pfeifer A., Knigge U., Mortensen J., Oturai P., Berthelsen A. K., Loft A., ... Kjaer A., 2012. Clinical PET of Neuroendocrine Tumors Using  $^{64}\text{Cu}$ -DOTATATE: First-in-Humans Study. *Journal of Nuclear Medicine*, 53(8), 1207-1215.

# TÉCNICA DEL INSECTO ESTÉRIL EN BOLIVIA

Ing. Danny José Ortiz Condori. <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: dortiz@aben.gob.bo

## RESUMEN

La Técnica del Insecto Estéril (TIE) es un método práctico que se ha empleado con éxito en diversos países para el control de plagas, por ejemplo, Brasil y Cuba demostraron la efectividad de esta técnica aplicada en el mosquito Aedes. En este sentido, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), como principal contraparte del Proyecto de Cooperación Técnica RLA 5083 en coordinación con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), trabajará de manera conjunta con entidades nacionales (Programa Nacional de Lucha contra el Dengue, Instituto Nacional de Laboratorios de Salud (INLASA) y Centro de Enfermedades Tropicales (CENETROP); con el objetivo común de implementar la TIE para el mosquito Aedes en áreas definidas por el grupo de entomólogos, biólogos y otros especialistas que forman parte del mencionado proyecto en una determinada región de Bolivia; posicionando al país en una etapa más avanzada en la lucha contra enfermedades transmisibles y que son perjudiciales para la salud de los bolivianos.

**Palabras Clave:** Insecto Estéril, Técnica Nuclear, Proyecto, ABEN, OIEA.

## 1. Introducción

Una de las principales problemáticas por las cuales atraviesa Bolivia es la transmisión de Arbovirosis, dándose epidemias en los años 2016 (Chikungunya), 2017 (Zika) y 2019 – 2020 (Dengue), que conllevó consigo enfermedades crónicas como la artrosis deformante o microcefalias en recién nacidos y lo que es más crítico, los decesos ocurridos.

Las enfermedades Arbovirales son transmitidas por el vector *Aedes aegypti* a través de las picaduras de este mosquito; por tanto, este insecto constituye un organismo domiciliario que realiza su ciclo de vida en las viviendas, puesto que la hembra oviposita en criaderos comunes de los hogares (baldes, turriles, llantas inservibles con aguas estancadas, entre otros). Esta especie se encuentra en 7 departamentos de Bolivia (La Paz, Chuquisaca, Cochabamba, Tarija, Beni, Pando y Santa Cruz) y se colonizó en 138 municipios, de los cuales en 117 se tiene transmisión de estas enfermedades. En los últimos años (debido al cambio climático) el vector que habita en zonas tropicales tuvo un desplazamiento hacia los valles, teniendo casos confirmados en la ciudad de Tarija (1800 m.s.n.m.) y Cochabamba (2.500 m.s.n.m.); y por consiguiente, la transmisión de Dengue fue confirmada para estas localidades.

Para realizar la prevención y control de estas enfermedades en Bolivia, se empleará la Técnica del Insecto Estéril (TIE), generando una alternativa para el control del vector a través de nuevas tecnologías, siendo los laboratorios de entomología de referencia nacional como el Instituto Nacional de Laboratorios en Salud (INLASA) y el Centro Nacional de Enfermedades Tropicales (CENETROP) los que coadyuvarían con la investigación.

Se tiene previsto la puesta en marcha del Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) en los próximos meses, el cual es un componente del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) en la ciudad de El Alto del departamento de La Paz-Bolivia. El CMI contará con dos irradiadores que emplearán como fuente radiactiva el radionúclido Cobalto-60. El primer irradiador, es un irradiador industrial panorámico de almacenamiento en húmedo con capacidad de hasta 1000 kCi y un irradiador autoblandado con una capacidad de 12 kCi. El objetivo de estas instalaciones es maximizar el aprovechamiento y la tecnología de irradiación para el desarrollo de actividades tanto de investigación como industriales para dar solución a diversas problemáticas de los sectores productivos del país.

### 1.1 OBJETIVO DEL TRABAJO

Implementar la TIE para combatir plagas de mosquitos Aedes en coordinación con el grupo de entomólogos, biólogos y otros especialistas que forman parte del proyecto RLA 5083 en Bolivia, mismos que son miembros del Programa Nacional de Lucha contra el Dengue, INLASA, CENETROP y ABEN.

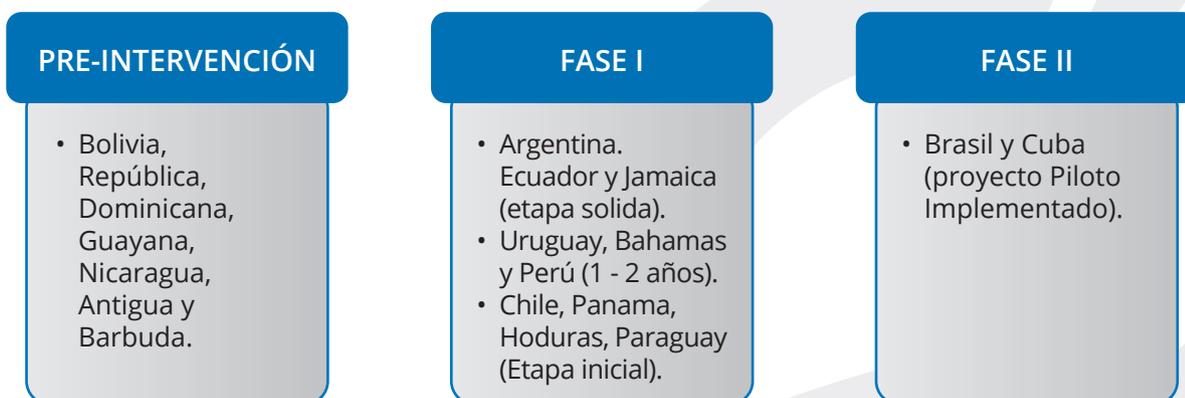
### 1.2 ALCANCE

La aplicación de la TIE en una de las regiones de la ciudad de Santa Cruz, en la cual se realizarán trabajos de campo para la caracterización de especies nativas.

### 1.3 IMPORTANCIA CIENTÍFICA

La TIE es una técnica nueva en el país, por lo que su desarrollo constituiría un hito en la historia boliviana; considerando que a nivel mundial, la aplicación de la TIE en especies de mosquitos es relativamente nueva, y más a esta altura sobre el nivel del mar, cabe mencionar que esta técnica nuclear se ha desarrollado e implementado con éxito para la mosca de la fruta en varios países del mundo.

El desarrollo de conocimiento en este ámbito tendrá un gran impacto para la sociedad boliviana una vez que alcance la plenitud y se haya logrado implementar, y al mismo tiempo, traerá consigo una reducción de las enfermedades que los mosquitos Aedes transmiten, tales como el Dengue, Zika y Chikungunya. El avance en este estudio e implementación de TIE en América Latina se representa en la siguiente figura:



**Figura 1.** Estado de los países participantes basado en el “Enfoque condicional por fases” para la implementación de la TIE para el control de Aedes [1]

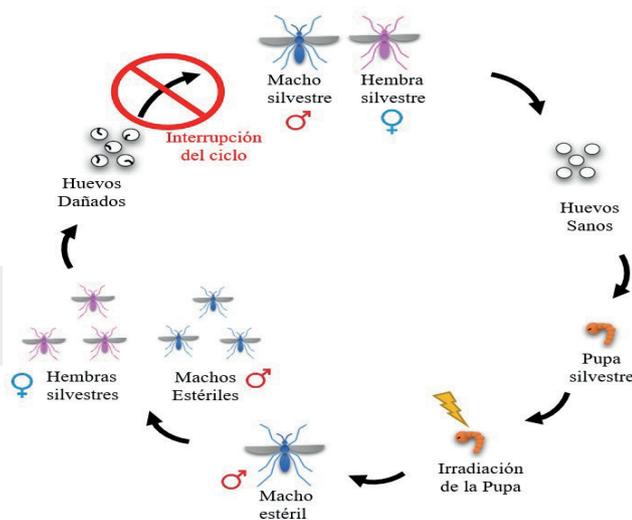
## 2. METODOLOGÍA

“La técnica del insecto estéril es un método de control de plagas de insectos respetuoso con el medio ambiente, implica la cría en masa y la esterilización (por medio de la radiación gamma) de los insectos causantes de una plaga concreta. Una vez esterilizados, se procede a la suelta zonal sistemática de los machos desde el aire o desde el suelo en unas zonas definidas, donde se aparean con hembras silvestres sin que haya descendencia, reduciéndose de esta manera la población causante de la plaga” [2].

Tomando en cuenta la aplicación de la TIE para mosquitos *Aedes*, la forma de esterilización se realizará mediante la irradiación con rayos gamma en el estado de pupas, y respetando determinados rangos de dosis, debido a que esto llegaría a causar daño o incluso la muerte del insecto. La aplicación de la TIE (en general) implica varias etapas que se detallan a continuación:

- Estudio de campo y caracterización de la especie.
- Cría y manutención masiva del insecto.
- Esterilización mediante irradiación de las pupas.
- Evaluación y control de calidad de la esterilización.
- Embalaje de los insectos irradiados para el transporte.
- Liberación en el ecosistema.
- Monitoreo y Evaluación de resultados.

Algunas de estas etapas requieren de sub-etapas que, en el caso de países que se encuentran incorporando esta tecnología se deben estandarizar procesos, realizando arduas investigaciones para la elaboración de protocolos referentes a determinadas capacidades e instalaciones, en especial en el proceso de irradiación.



*Figura 2. Representación esquemática del resultado logrado por la TIE en los organismos y su ciclo de vida.*

### 2.1 PREPARACIÓN DE LAS PUPAS PARA LA IRRADIACIÓN

Una vez que las pupas han sido recolectadas y sexuadas, ya sea utilizando los clasificadores de pupas de vidrio, el método de tamizado, o separando visualmente las pupas en base

a los genitales utilizando un microscopio, las pupas pueden ser contadas en lotes de igual número en pequeños recipientes utilizando una pipeta. Una pipeta de plástico de 3 ml suele ser lo suficientemente grande para recoger las pupas; sin embargo, la punta puede recortarse con una tijera para asegurarse de que las pupas no se dañen al quedar atrapadas en la punta de la pipeta. Es importante que las pupas no sean sometidas a un estrés innecesario, o que diferentes grupos reciban diferentes tratamientos o factores de estrés, ya que esto puede cambiar sus respuestas a la irradiación y presentar resultados diferentes [3].

## 2.2 IRRADIACIÓN

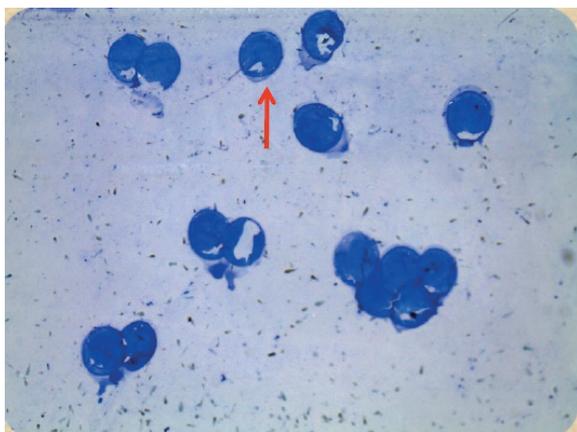
La irradiación consiste en exponer a los insectos en su etapa ideal con el objetivo principal de afectar a los órganos reproductivos de los mismos (parte más sensible a la radiación en los organismos vivos), esterilizando así al insecto.

## 2.3 CONTROL DE CALIDAD DE IRRADIACIÓN

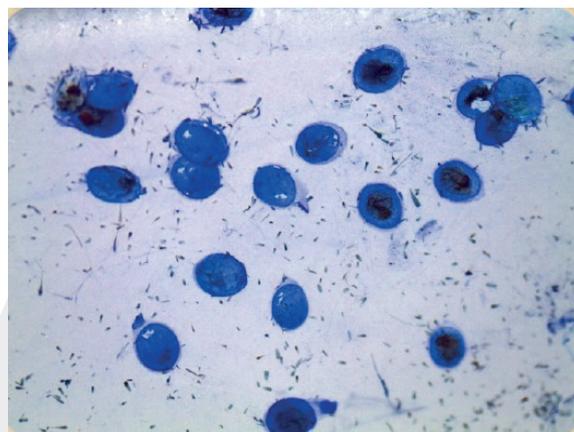
Primeramente, se debe establecer las curvas de isodosis que presenta el irradiador autoblandado (irradiador comúnmente usado para este tipo de técnicas nucleares) para caracterizar el proceso de irradiación y ubicar de la mejor forma los insectos. El control de calidad de la irradiación se realiza a través de la dosimetría del proceso, que estima la dosis que ha recibido el insecto en cuestión, ésta debe ser lo suficientemente alta para esterilizar al insecto y lo suficientemente baja para no matarlo o producirle un efecto adverso en su desarrollo y vida rutinaria.

## 2.4 PRUEBA DE ESTERILIDAD

Como verificación de la esterilidad se emplea el estereoscopio para observar la eclosión de los huevos, cuyo resultado debe dar un índice de eclosión bajo o nulo debido a la irradiación del macho.



Control: Fotografía Alta eclosión



Macho Irradiado x Hembra Estéril  
(Fotografía Mediana a baja eclosión)

**Figura 3.** Análisis de eclosión de huevos (teñidos con azul de metileno)

En la figura 3 (Fotografía Mediana a baja eclosión), se observa que no existe una eclosión natural significativa, lo cual es una evidencia de la efectividad de la esterilización del macho, interrumpiendo así el ciclo reproductivo de la especie de interés.

### 3. CONCLUSIONES

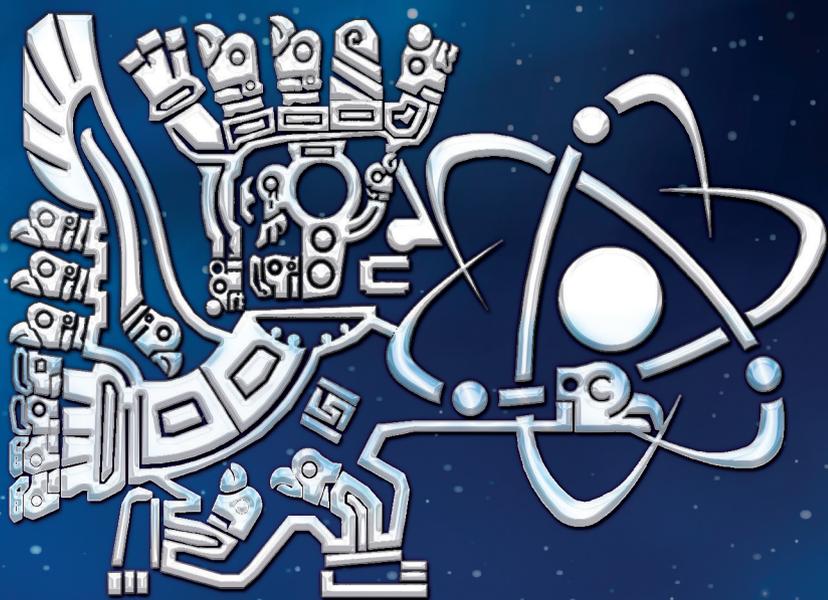
La TIE es desarrollada en varias especies de insectos y su éxito ha sido comprobado, tal es el caso de la mosca de la fruta, que evidencia y justifica los esfuerzos de los diferentes países como Brasil, México, España, Cuba, Chile, Estados Unidos, entre otros, en la aplicación de esta técnica nuclear.

Bolivia tiene especies objetivo para la lucha antiplagas, tales como la mosca de la fruta (*Ceratitis capitata*), mosquitos (*Aedes aegypti*), gusano barrenador (*Cochliomyia hominivorax*), mosca del cuerno de la vaca (*Haematobia irritans*), cuya eliminación o control reducirán el daño a los cultivos, al ganado y a la salud de la población en general, que sin duda traerá consigo un beneficio económico y social de gran impacto y bienestar para el país.

La ABEN proyecta el camino para el desarrollo de la TIE a plenitud en Bolivia, pero se tiene la seguridad de que con la colaboración y empeño de las diferentes instituciones involucradas se lograrán los objetivos propuestos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organismo Internacional de Energía Atómica, Curso Virtual dentro del Proyecto RLA 5083.
- [2] Organismo Internacional de Energía Atómica, "OIEA" [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/servicios/programa-de-cooperacion-tecnica/la-tecnica-del-insecto-esteril> [Último acceso: 18 9 2021].
- [3] Guidelines for Irradiation of Mosquito Pupae in Sterile Insect Technique Programmes, Guidelines for Irradiation of Mosquito Pupae in Sterile Insect Technique Programmes, Food and Agriculture Organization of the United Nations International Atomic Energy Agency, Viena, 2020.
- [4] Presentación del Ministerio de Agricultura de Chile. "Desarrollo de la técnica de insecto estéril (TIE) mediante radiación ionizante, para el control de la plaga cuarentenaria *Lobesia botrana* - Proyecto FIA PYT 2015-0251", Comisión Chilena de Energía Nuclear- Ministerio de Agricultura de Chile-IAEA.



# T A L L E R E S C I E N T Í F I C O S

**“BOLIVIANAMENTE”**

REVISTA  
CIENTÍFICA  
NUCLEAR



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



# ÍNDICE

<b>Resumen del taller:</b> Ciclotrón – Radiofarmacia Preclínica .....	59
<b>Resumen del taller:</b> Centro Multipropósito de Irradiación Gamma.....	64
<b>Resumen del taller:</b> Reactor Nuclear de Investigación .....	68
<b>Resumen de taller:</b> Radioterapia .....	74





Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



# Resumen del Taller: Ciclotrón - Radiofarmacia Preclínica

Rodny Andree Batuani Larrea<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Ciclotrón – Radiofarmacia Preclínica. La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: rbatuani@aben.gov.bo

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear te invita a participar del WEBINAR GRATUITO:

## CICLOTRÓN - RADIOFARMACIA PRECLÍNICA

**TEMARIO:**

- Ciclotrón - Radiofarmacia - Preclínica.
- Objetivos
- Aplicaciones.

**FECHA:** MIERCOLES 23 DE JUNIO  
**HORA:** 15:00  
Enlace: [meet.google.com/jjj-wspf-mif](https://meet.google.com/jjj-wspf-mif)

Para recibir tu certificado de participación envía un screen de la pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a: [aben.informa@gmail.com](mailto:aben.informa@gmail.com)

**DISERTANTE:**  
Lic. Rodny Andree Batuani Larrea  
JEFE DE UNIDAD DE APLICACIONES EN SALUD DE LA ABEN  
- Lic. en Química Industrial, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia  
- Capacitación en Bases Físicas y Químicas de la Radiofarmacia PET, Universidad de la República, Uruguay  
- Capacitación Complementaria en Protección Radiológica y Operación en Instalaciones Clase I, Fundación Centro Diagnóstico Nuclear, Argentina

**ORGANIZA:**

## RESUMEN

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) tiene el objetivo de producir radioisótopos y radiofármacos de distribución nacional, constituyéndose en el primer laboratorio industrial de radiofármacos de Bolivia que permita el acceso a estos insumos requeridos en estudios de Medicina Nuclear, el CCRP contará con un área de Ciclotrón, área de Radiofarmacia y un área de Investigación Preclínica.

### 1. Objetivos del CCRP

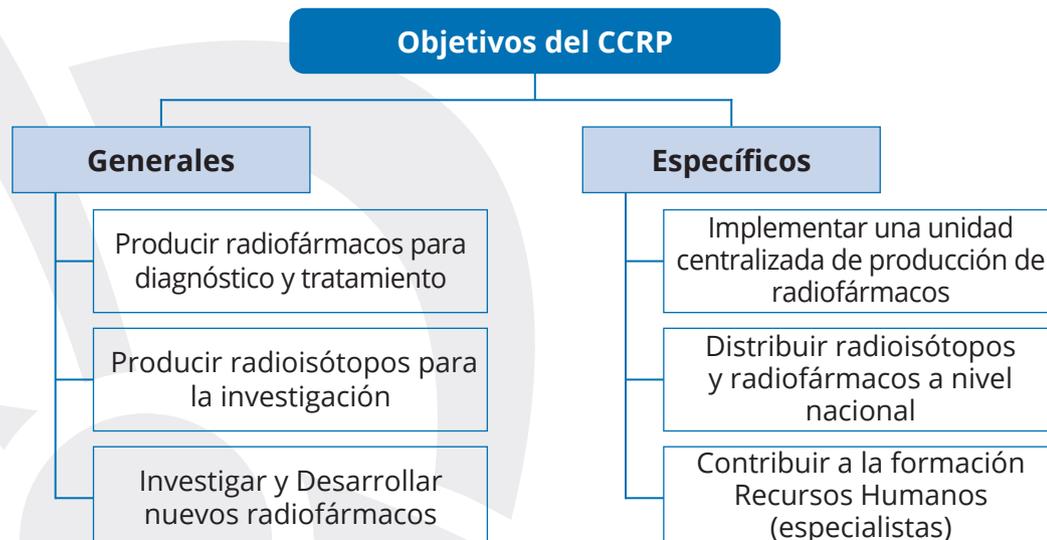


Figura 1. Objetivos del CCRP

## 2. Estructura del CCRP

La estructura del Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica está compuesta por las siguientes áreas:



Figura 2. Estructura del CCRP

## 3. Ciclotrón

Es un acelerador de partículas cargadas, que genera partículas de alta energía para la producción de radioisótopos. Los radioisótopos en el ciclotrón TR-24 se fabrican bombardeando isótopos estables con protones (reacciones nucleares). Todos los componentes operan en una cámara al vacío.

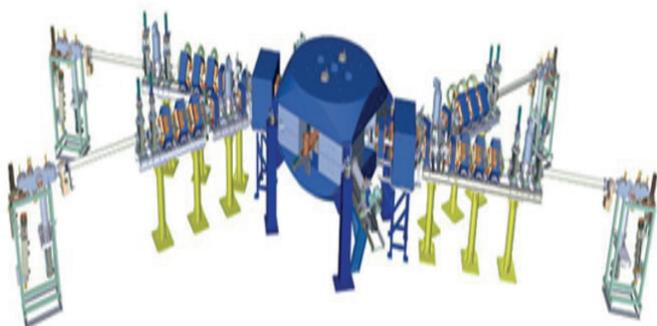


Figura 3. Ciclotrón TR-24, Marca ACSI (Canadá) [1]

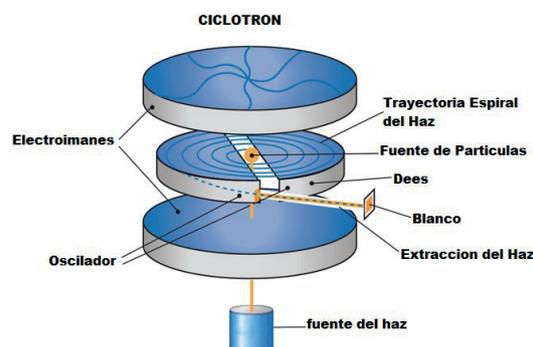


Figura 4. Componentes del Ciclotrón [1]

### 3.1 Radioisótopos producidos en ciclotrones para usos médicos e industriales

**Comercializados:** F-18, Ga-67, Ge-68/Ga-68, Tl-201, In-111, I-123, I-124, Rb-81m, Pd-103, Cu-64.

**Emergentes:** Cu-62, I-124, Br-75,76, Rb-82m.

**Investigación:** Y-86, Tc-94m, K-38, Ti-45, Se-73.

**PET:** C-11, N-13, O-15, F-18, Ga-68.

**SPECT:** Ga-67, In-111, I-123, Tl-201, Rb-81m, Tc-99m.

**Terapéuticos:** Cu-64, In-111, I-124, Pd-103, At-211.

Figura 5. Lista de Radioisótopos producidos en el Ciclotrón

## 4. Preclínica

En el punto 2, se mencionó el área de preclínica, en esta área proporcionará un espacio para la investigación en nuevos productos radiofarmacéuticos. Además, contará con un equipo de obtención de imágenes "PET/SPECT/CT" en animales.



Figura 6. PET/SPECT/CT Vector 5 [2]

Este equipo permitirá tener un sistema de obtención de imágenes de última tecnología para el estudio y desarrollo de nuevos radiofármacos.

## 5. Producción de radiofármacos

### 5.1 Radiofarmacia

Especialidad sanitaria que estudia los aspectos farmacéuticos, químicos, bioquímicos, biológicos y físicos de los radiofármacos.

### 5.2 Radiofármaco

Es una sustancia que contiene un átomo radiactivo en su estructura y se administra con fines diagnósticos o terapéuticos.

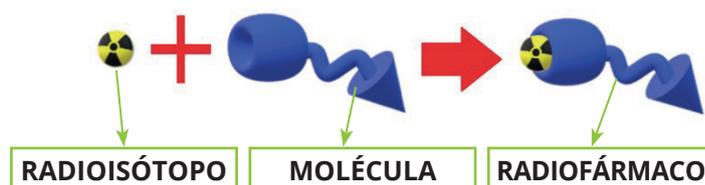


Figura 7. Proceso para producir un radiofármaco [3]

### 5.3 Celdas calientes

Son recintos blindados aptos para manejar cualquier nivel de radioactividad, poseen instrumentos y/o accesorios que posibilita a los operadores trabajar con una exposición a la radiación mínima en la producción de radiofármacos.

### 5.4 Control de calidad

Una vez producido el radiofármaco, es sometido a un control de calidad, para garantizar que el mismo cumpla con los requisitos mínimos de control de calidad (CC). Los equipos utilizados para el CC son:



*Figura 8. Equipos utilizados para el control de calidad de radiofármacos*

## 6. Ruta de trabajo en el CCRP

La ruta de trabajo en el CCRP para la producción de radioisótopos es la siguiente:



*Figura 9. Ruta de trabajo del CCRP*



**Figura 10.** *Objetivos y aplicaciones del CCRP*

# Resumen del Taller: Centro Multipropósito de Irradiación Gamma

Melva Alenka Sanjinez Aguilar<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Centro Multipropósito de Irradiación Gamma. La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: msanjinez@aben.gob.bo

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear te invita a participar del WEBINAR GRATUITO:

## CENTRO MULTIPROPÓSITO DE IRRADIACIÓN GAMMA

**TEMARIO:**

- Centro Multipropósito de Irradiación.
- Objetivos.
- Oportunidades y Desafíos.

**FECHA:** MIERCOLES 26 DE MAYO  
**HORA:** 15:00  
**Enlace:** [meet.google.com/ywk-kzuf-hbc](https://meet.google.com/ywk-kzuf-hbc)

Para recibir tu Certificado de Participación envía un screen de la pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a : [aben.inform@rmail.com](mailto:aben.inform@rmail.com)

**DISERTANTE:**  
 MSC. Melva Sanjinez Aguilar  
 JEFE DE LA UNIDAD DE APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA ABEN  
 - Magister en Física y Tecnología Nuclear. Universidad Nacional de Investigación Nuclear "Instituto de Ingeniería y Física de Masasa" (MIF)  
 - Especialista en Aplicaciones de la Tecnología Nuclear. Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica. (CNEA)

**ORGANIZA:**

## RESUMEN

El Centro Multipropósito de Irradiación Gamma (CMI) es una de las instalaciones tecnológicas del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Nuclear (CIDTN) que será implementado en la ciudad de El Alto al inicio de la gestión 2022, cuenta con la infraestructura, equipamiento y recursos humanos altamente calificados para la realización de servicios y desarrollar investigaciones básicas y aplicadas, por aplicación de radiación gamma (γ).

### 1. Interacción de la radiación gamma con la materia

Una característica fundamental de este tipo de radiación es la capacidad de penetración en la materia y la interacción con ella, por tanto, existen diferentes mecanismos de interacción, que dependen del tipo de radiación, y de la energía depositada al medio que atraviesa en las interacciones.

Efecto Fotoeléctrico	Efecto Compton	Producción de Pares
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interacción entre un fotón y un átomo</li> <li>• Emisión de electrones (fotoelectrones)</li> <li>• El fotoelectrón emitido irá acompañado de rayos X característicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interacción entre un fotón y un electron</li> <li>• Al colisionar el fotón, el electron resulta deflectado</li> <li>• El fotón primario sufre una dispersión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene lugar con fotones de alta energía</li> <li>• fenómeno que tiene lugar es la desaparición del fotón en el campo del núcleo</li> <li>• la creación en su lugar de un par positrón-electrón</li> </ul>

Figura 1. Mecanismos de interacción de la radiación con la materia

## 2. Objetivos del CMI

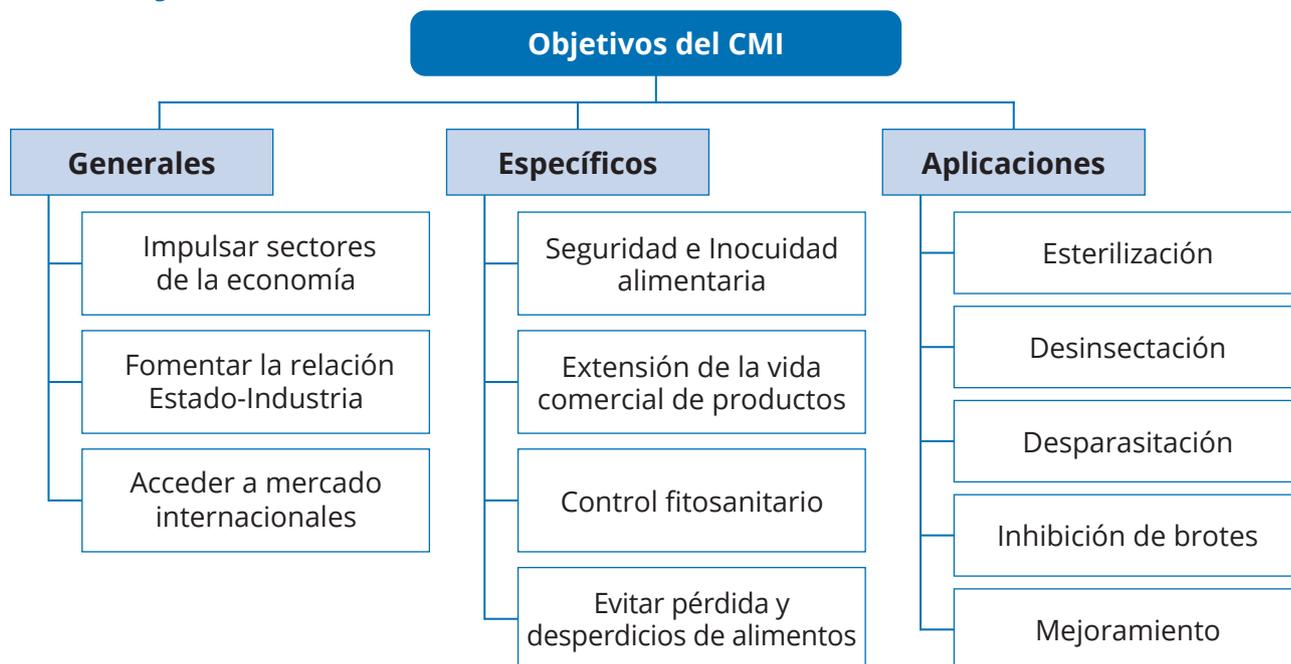


Figura 2. Objetivos generales, específicos y aplicaciones del CMI

## 3. Oportunidades y Desafíos del CMI

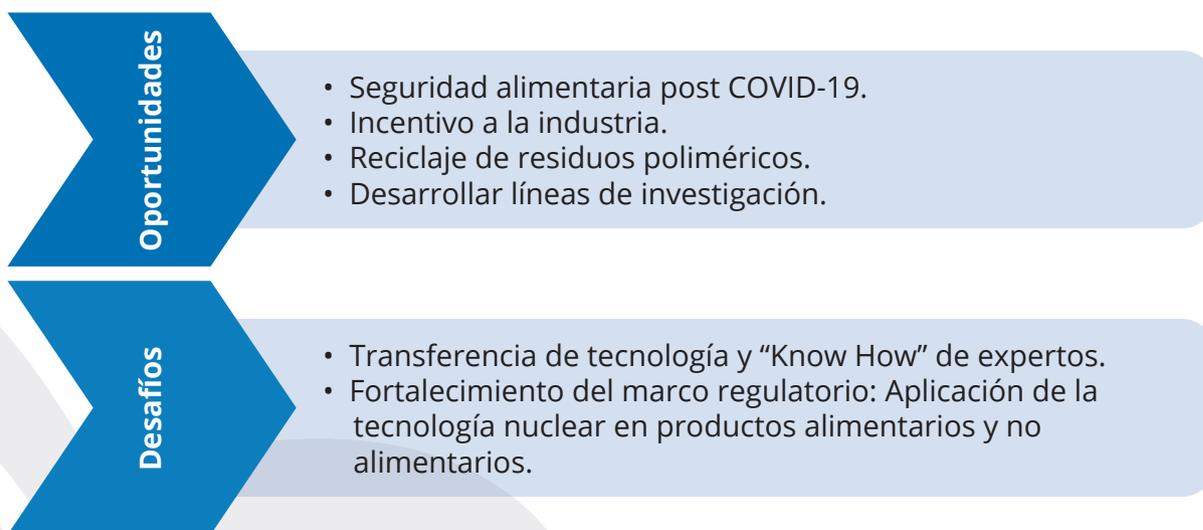


Figura 3. Desafíos y oportunidades del CMI

## 4. El CMI del CIDTN

Para la operación segura de un irradiador, debe existir una completa sinergia entre su infraestructura civil, el equipamiento de sistemas tecnológicos y de ingeniería, y sus recursos humanos, quienes operarán de manera segura esta instalación tecnológica (Ver figura 6, lado derecho).

El CMI está integrado por un Irradiador Autoblindado, el cual será el equipo principal del Laboratorio Gamma del CMI; y por un Irradiador Industrial Gamma en el que se llevarán a escala industrial las pruebas y trabajos realizados en el laboratorio mencionado.

### a. Irradiador Autoblindado – Laboratorio Gamma

Será empleado para el desarrollo de investigaciones básicas y aplicadas, así también la revalidación de protocolos de irradiación y datos, determinación de dosis y desarrollo de nuevos protocolos de irradiación. Contará con:

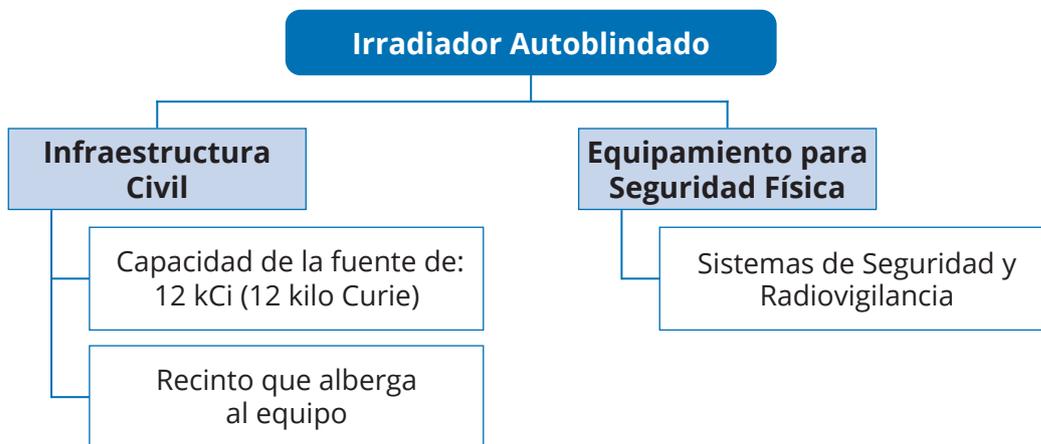


Figura 4. Infraestructura y equipamiento del irradiador autoblindado

### b. Irradiador Industrial

Este dispositivo brindará servicios mencionados en los objetivos del punto 2, enfocados al mercado nacional e internacional. Contará con:

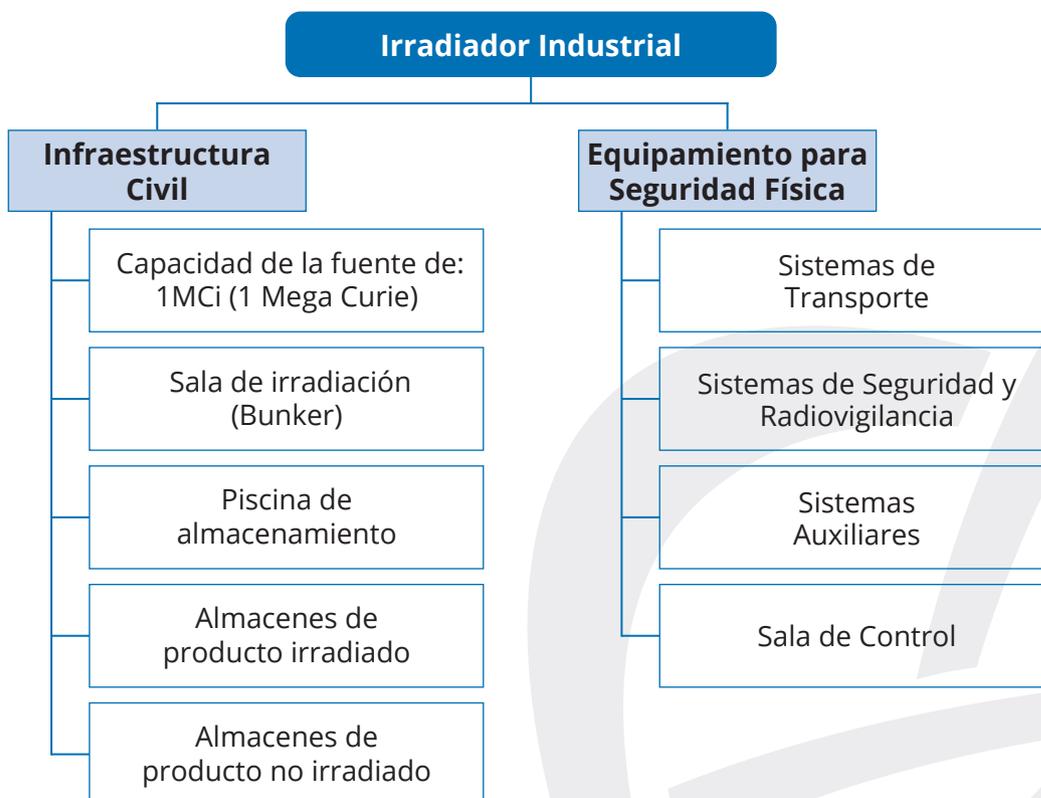
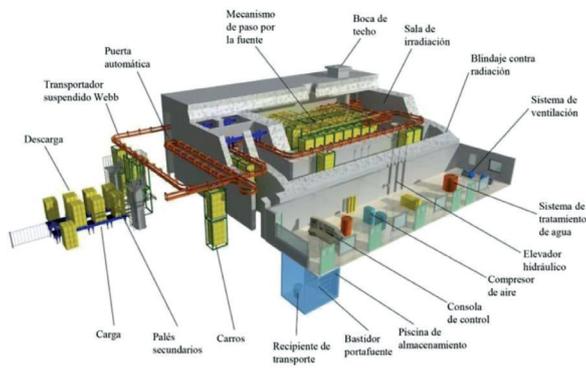
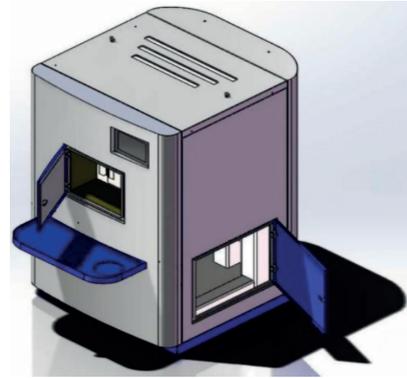


Figura 5. Infraestructura y equipamiento del irradiador industrial



Infraestructura del Irradiador Industrial Gamma y del transporte de productos que se someterán a radiación gamma.



Modelo de Irradiador Autoblindado del Laboratorio Gamma del CMI.

Figura 6. Componentes del CMI [1] [2]

## 5. Aplicaciones del CMI



Figura 7. Aplicaciones del CMI

## 6. Conclusiones

El CMI tiene planificado iniciar con la operación segura de esta instalación a inicios del 2022, y prestar servicios a diferentes sectores como: agroindustria, industria de alimentos, salud, medio ambiente y científico – tecnológico, con el compromiso de brindar seguridad alimentaria y sostenibilidad propiciando e incentivando el incremento de los sectores productivos de nuestro país.

# Resumen del Taller: Reactor Nuclear de Investigación

Juan Cristhian Luque Gutierrez <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear Reactor Nuclear de Investigación. La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: [jluque@aben.gov.bo](mailto:jluque@aben.gov.bo)

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear te invita a participar del WEBINAR GRATUITO:

## REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN

**TEMARIO:**

- Reactor Nuclear de Investigación
- Contexto Nacional
- Beneficios y Aplicaciones



**FECHA:** MIÉRCOLES 21 DE JULIO

**HORA:** 15:00

Enlace: [meet.google.com/zli-yjwv-mvw](https://meet.google.com/zli-yjwv-mvw)

Para recibir tu certificado de participación envía un screen de la pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a: [aben.informa@gmail.com](mailto:aben.informa@gmail.com)

**DISERTANTE:**  
MSc. JUAN CRISTHIAN LUQUE GUTIERREZ  
JEFE DE UNIDAD DE APLICACIONES ANALÍTICAS  
- MSc. Ciencia e Ingeniería Nuclear (distinción), Universidad de Bristol, Reino Unido.  
- Ex-Ingeniero Nuclear Interno del OIEA en Sección de Desarrollo de Tecnología de Energía Nuclear, Equipo de Reactores Modulares Pequeños.  
- Co-editor del: "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: 2020 Edition" (SMR 2020 Booklet).  
- Formación continua en: CCFE-Plasma Physics School (Reino Unido), Cambridge ICE (Reino Unido), Durham-Fusion CDT (Reino Unido), MEFH-EGINT School (online), MAI-EDF Lab (Francia).

**ORGANIZA:**



## RESUMEN

Una de las instalaciones que será implementada en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Nuclear (CIDTN) es el Complejo del Reactor Nuclear de Investigación (RNI), siendo el primer reactor nuclear de investigación en Bolivia; y único en el mundo por su ubicación a más de 4000 msnm en la ciudad de El Alto, la entrega de esta instalación será a mediados de la gestión 2024. El complejo del RNI consta de:

- Reactor Nuclear de Investigación (200 kW)
- Laboratorio de Radioisótopos
- Laboratorio de Análisis por Activación Neutrónica

## 1. Desafíos en Bolivia

Entre los diferentes desafíos que se tiene en Bolivia, se identificaron los que pueden ser atendidos por las instalaciones del Complejo del RNI del CIDTN, señalando así las bondades de la tecnología nuclear para solucionarlos.

### 1.1. Desafíos en la Gestión Sostenible de los Recursos Naturales

- Limitaciones técnicas limitan nuestra capacidad de identificar y conocer nuestros propios recursos naturales.
- Consolidar conocimientos sobre éstos recursos naturales, que permita la toma de decisiones adecuadas para la gestión óptima de los mismos.

## 1.2. Desafíos en la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos

- Debido al cambio climático, existe una reducción de los recursos hídricos.
- Debido a la creciente población, existe mayor demanda de recursos hídricos.
- Es necesario determinar la calidad y cantidad para administrar y proteger nuestros recursos hídricos.

## 1.3. Desafíos en la Gestión Sostenible de los Recursos Minerales

- Exportaciones de minerales que contribuyan a la economía nacional; debido a que Bolivia exporta materias primas, sin tener la certeza total del conocimiento de elementos trazas en bajas concentraciones dentro de las “impurezas”.

## 1.4. Desafíos en la Salud

- La falta de acceso a tecnología médica limita los diagnósticos y tratamientos adecuados de enfermedades potencialmente tratables.
- La necesidad de mejorar la calidad de la Alimentación y Nutrición en la dieta nacional.

## 1.5. Desafíos en Educación

- La ausencia de programas educativos e investigación condiciona a la falta de conocimientos sobre los beneficios que produce la tecnología nuclear.

## 2. Rol del Complejo del Reactor Nuclear de Investigación en los desafíos de Bolivia

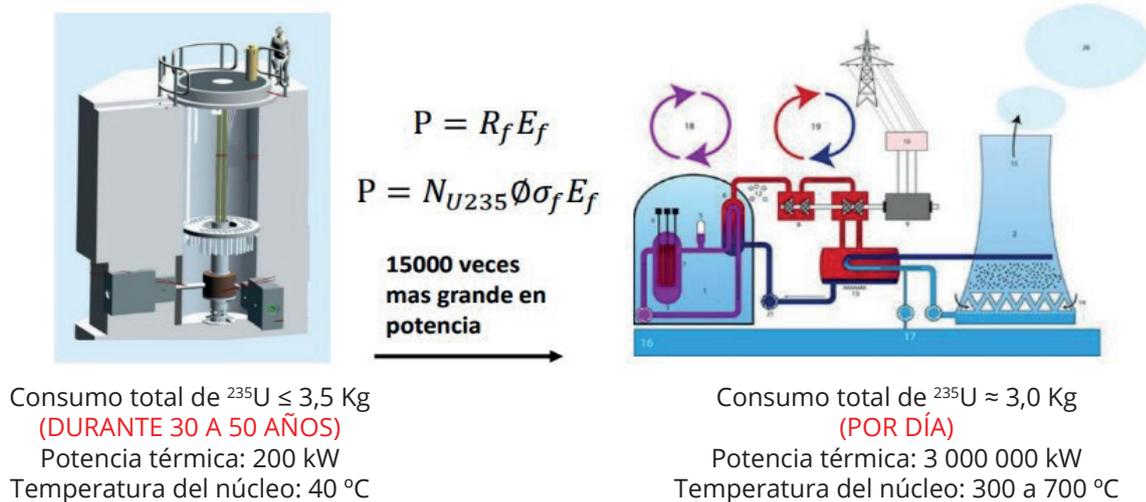
En el siguiente cuadro se presenta áreas y desafíos que serán atendidos por el Complejo del RNI.

<b>Cambio climático</b>	En los Laboratorios de Análisis por Activación Neutrónica y de Radioisótopos se realizará análisis de muestras medioambientales y también aplicación de radiotrazadores en hidrología isotópica.
<b>Gestión de recursos</b>	En los Laboratorios de Análisis por Activación Neutrónica y de Radioisótopos se realizará la identificación y monitoreo de recursos minerales e hidrocarburos; la determinación de contaminantes en aguas; la validación de autenticidad de recursos y la aplicación de radiotrazadores para la identificación de recursos hídricos subterráneos.
<b>Salud</b>	En los Laboratorios de Análisis por Activación Neutrónica y de Radioisótopos se realizará la identificación de niveles de concentración de trazas en muestras médicas y la aplicación de radioisótopos para el diagnóstico y tratamiento de cáncer.
<b>Educación</b>	En los Laboratorios de Análisis por Activación Neutrónica y de Radioisótopos y el Centro de entrenamiento y capacitación se planificará la formación de personal técnico nacional a través de programas educativos que fomentará el desarrollo de capacidades en investigación y divulgación de prácticas empleando tecnologías pacíficas nucleares.
<b>Industria</b>	En el Laboratorio de Análisis por Activación Neutrónica se realizará el análisis de materiales: químicos, farmacéuticos, minería, hidrocarburos; en el Laboratorio de Radioisótopos la aplicación de radiotrazadores para el control de procesos en fábricas como también la comprobación de oleoductos y gasoductos.

### 3. Diferencia entre un Reactor Nuclear de Investigación y un Reactor Nuclear de Potencia

Los reactores de investigación son reactores nucleares que se utilizan con fines de investigación y enseñanza; se producen neutrones para su uso en la industria, la medicina, la agricultura y la ciencia forense, entre otros ámbitos.

Los reactores nucleares de potencia son instalaciones que producen energía iniciando, manteniendo y controlando una reacción nuclear en cadena sostenida (fisión nuclear), que produce en el núcleo del reactor.

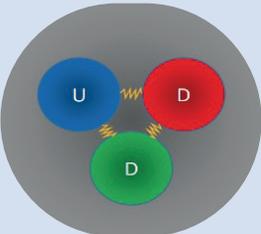


**Figura 2.** Diferencias entre un reactor de investigación y un reactor nuclear de potencia

### 4. Reactor Nuclear de Investigación – fábrica de neutrones

Neutrones

- No tienen carga eléctrica
- Son sensibles a materiales con bajo número atómico.
- Responsables de muchas reacciones nucleares importantes.
- Detectan propiedades magnéticas.

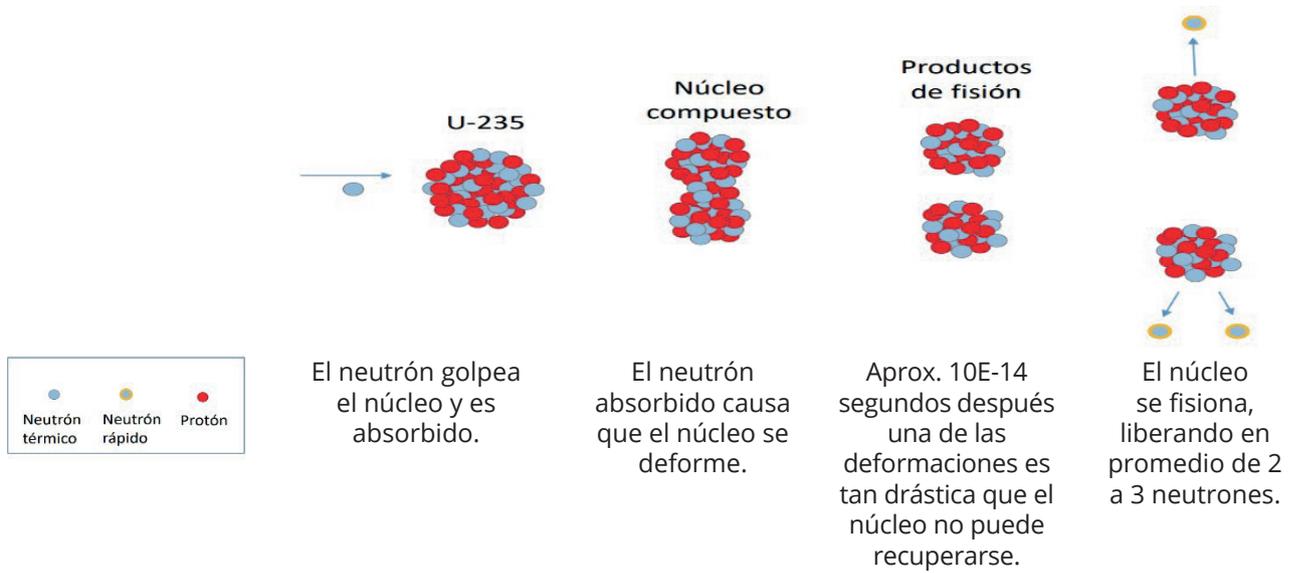


El neutrón está conformado por:

- 2 quarks abajo (D)
- 1 quark arriba (U)

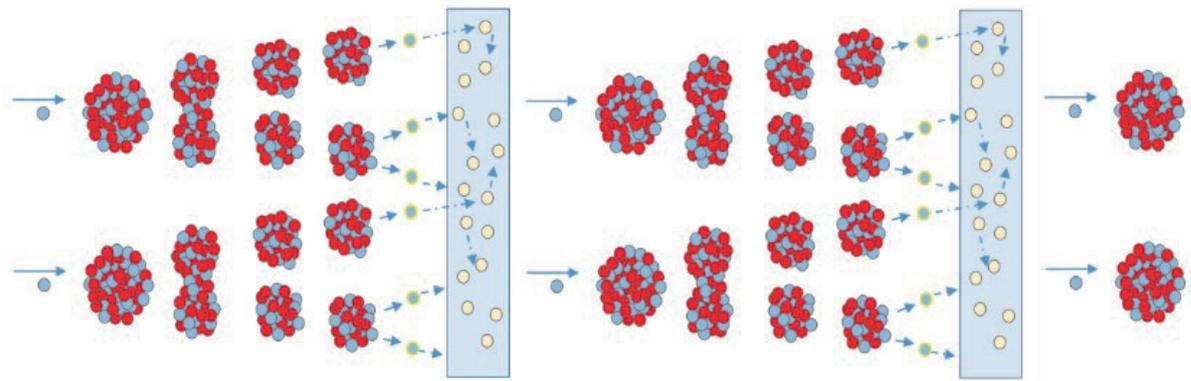
### 5. Fisión nuclear en un Reactor

La fisión nuclear es una reacción en la cual un núcleo pesado (al ser bombardeado con neutrones), se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, con gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neutrones. (Ver la figura 3).



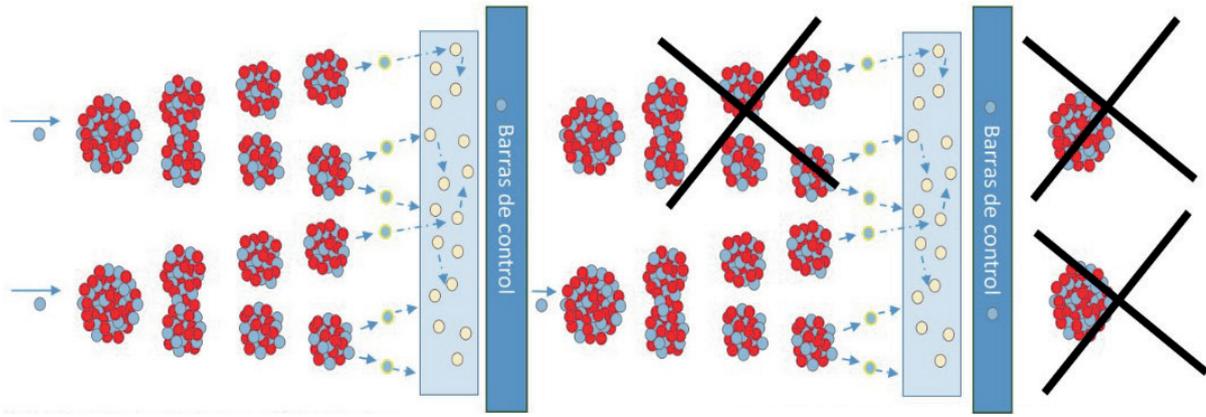
**Figura 3.** Reacción de fisión nuclear [5]

Cuando se lleva a cabo la fisión nuclear en cadena (en el reactor) se quiebra el núcleo blanco liberando varios neutrones (dos o tres) con una energía igual o superior a la de los neutrones incidentes, lo que permite que los neutrones producidos den lugar a nuevas fisiones, y los liberados en ellas a otras nuevas, etc. Con ello se logra conseguir que una vez iniciada la reacción no sea necesario continuar con el bombardeo de neutrones externos, sino que la reacción sea autosustentable [1].



**Figura 4.** Reacción en cadena [5]

El núcleo del reactor está conformado por distintos componentes, entre ellos las barras de control que tienen la función de controlar la reacción en cadena mostrada en la figura 4, para lo cual son introducidos por unos huecos (ubicados entre las vainas del combustible nuclear de un reactor) de esta forma se consigue absorber neutrones y así poder controlar y detener el reactor (eventualmente), como se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Reacción en cadena controlada por las barras de control [5]

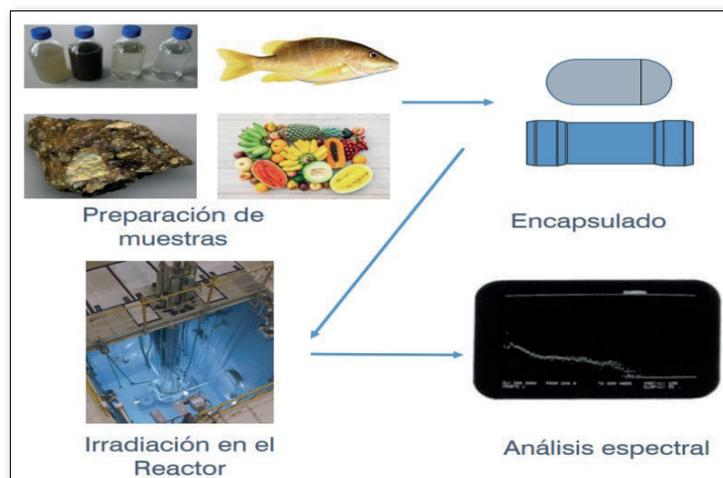
## 6. Aplicaciones de los Reactores de Investigación

- 1 **Análisis por Activación Neutrónica**
- 2 **Producción de Radioisótopos**
- 3 **Educación y entrenamiento**

**Figura 6.** Aplicaciones del RI

### 6.1. Análisis por Activación Neutrónica (AAN)

Es un método analítico cuantitativo y cualitativo de alta sensibilidad, no destructivo y multielemental. Esta técnica es utilizada para análisis de muestras medioambientales, identificación y monitoreo de recursos minerales e hidrocarburos, además de la determinación de contaminantes de aguas. El procedimiento de la técnica se muestra en la figura 7 [4].



**Figura 7.** Procedimiento de la técnica AAN [3]

## 6.2. Producción de Radioisótopos

Los radioisótopos son isótopos de un elemento químico que contienen un exceso de energía, que se libera en forma de radiación. Pueden producirse principalmente en reactores de investigación, la producción de radioisótopos involucra varias actividades (fabricación de blancos, su irradiación, el transporte de los blancos irradiados a instalaciones de procesamiento, control de calidad y transporte a los usuarios finales) [2].

## 6.3. Educación y entrenamiento

Los reactores nucleares de investigación contribuyen al desarrollo de diversas áreas, en educación se implementará para la formación de personal técnico, avance del conocimiento científico, investigación y entrenamiento, todo ello en condiciones seguras y cuyos resultados y avances formará parte de la divulgación científico – técnica de la ABEN.

## 7. Rol del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)

- 1 El OIEA promueve el uso pacífico de las tecnologías nucleares en los Estados Miembros - "Atoms for the Peace and Development".
- 2 El OIEA ayuda a los Estados miembros en la construcción, operación, utilización y ciclo del combustible de los reactores de investigación, así como en la creación de capacidades y el desarrollo de infraestructuras.
- 3 El OIEA tiene un marco normativo internacional que sirve como guía para los Estados Miembros (Fundamentos de seguridad, requisitos de seguridad y guías de seguridad).

*Figura 8. Rol de OIEA*

# Resumen del Taller: Radioterapia

**Klaus Orgaz Rodríguez 1\***

<sup>1</sup> Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia. La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.

\* Correo electrónico: korgaz@aben.gov.bo

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear te invita a participar del WEBINAR GRATUITO:

## RADIOTERAPIA

### Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia

**TEMARIO:**

- ¿Qué es radioterapia?
- Equipos utilizados en la especialidad y sus diferencias.
- Técnicas de tratamiento radiante.

**FECHA:** MIÉRCOLES 22 DE SEPTIEMBRE

**HORA:** 15:00

Enlace: [meet.google.com/mwy-blun-avh](https://meet.google.com/mwy-blun-avh)

Para recibir tu certificado de participación envía un screen de la pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a: [aben.informa@gmail.com](mailto:aben.informa@gmail.com)

**DISERTANTE:**  
Dr. Klaus Orgaz Rodríguez  
ONCÓLOGO RADIOTERAPEUTA  
Profesional en Medicina Nuclear, Agencia Boliviana de Energía Nuclear  
- Especialista en Radioterapia Oncológica, Fundación Escuela de Medicina Nuclear "FUSMEN", Mendoza - Argentina.  
- Capacitación en Técnicas Avanzadas en Radioterapia en el Instituto de Tecnologías Nucleares para la Salud de la Comisión Nacional de Energía Atómica en Bariloche, Argentina.

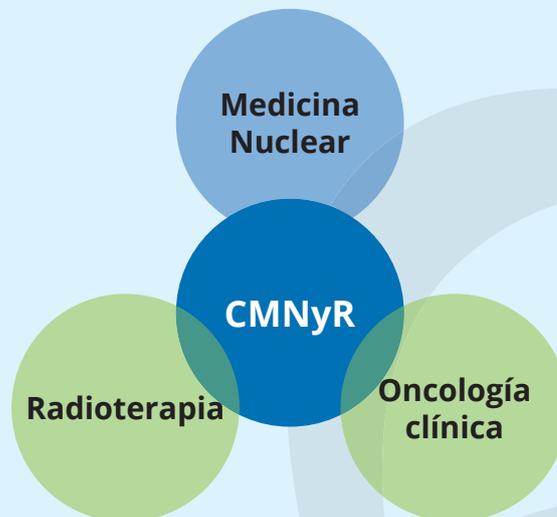
**ORGANIZA:**



## RESUMEN

La Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia CMNyRs son instalaciones especializadas, equipadas con tecnología de última generación, donde, se realizarán diagnósticos por imágenes de enfermedades oncológicas, cardíacas, neurológicas y neuropsiquiátricas, así como su tratamiento y seguimiento. Los centros estarán ubicados en las ciudades de El Alto en la zona de Parcopata, distrito 8, en La Paz en la Meseta de Achumani, y Santa Cruz en Pampa de la Isla.

Cada uno de los CMNyRs está compuesto por las siguientes áreas:



**Figura 1.** Áreas del CMNyR

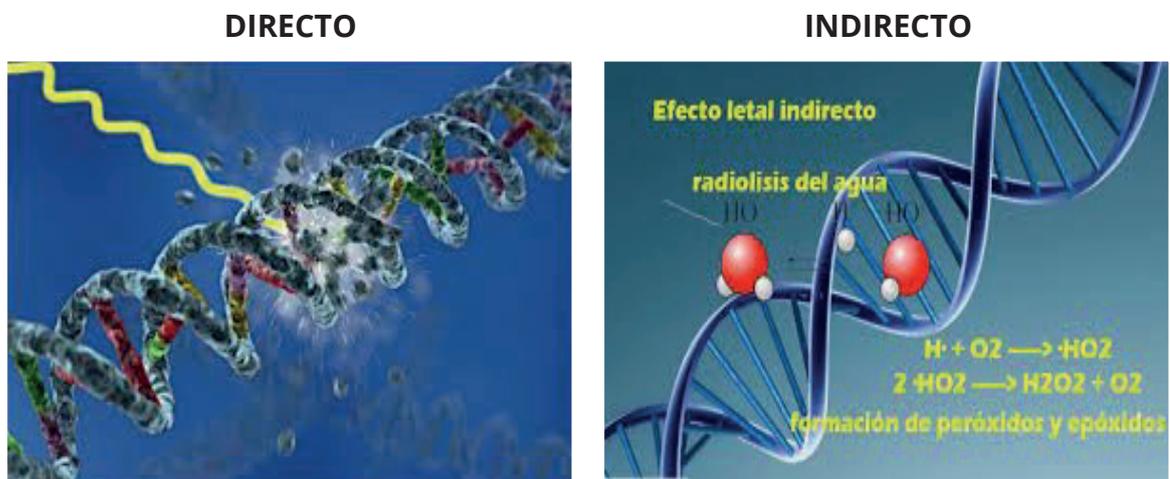
# 1. Radioterapia oncológica

Es una especialidad médica (relacionado a la oncología), que consiste en la aplicación de rayos X u otras partículas como electrones, protones con alta potencia, con el objetivo de eliminar las células cancerosas en el tratamiento regional del cáncer.

El **objetivo de radioterapia**, es concentrar una dosis de radiación (medida con precisión) a un volumen tumoral definido, que propicie la curación o paliación de la enfermedad, limitando al máximo la dosis que pueden recibir los órganos vecinos.

## 1.1 Mecanismo de acción

- a) Provocar lesiones al material genético, ocasionando la muerte o daños que impidan la división y multiplicación de las células. Puede ser:



- b) Provocando la radiólisis del agua que crea un medio tóxico en la célula cancerosa y ésta muere.

## 2. Etapas del proceso de radioterapia

El tratamiento de radioterapia es individualizado y específico para cada paciente. La metodología en la decisión, planificación, administración de tratamiento y seguimiento pasa por las siguientes etapas:



**Figura 2.** Proceso de radioterapia

## 2.1 Evaluación inicial – primera consulta

El objetivo principal de la primera consulta es la estadificación de la enfermedad, proceso por el cual se determina la extensión del cáncer, clave para el pronóstico y tratamiento, a través del examen físico completo, y valoración de estudios como ser: Anatomía patológica, análisis de laboratorio, rayos X, tomografías, resonancias magnéticas, PET/CT, SPECT/CT, etc.; con los cuales se determina el tamaño tumoral, la afectación o no de ganglios linfáticos y diseminación a distancia del cáncer.

## 2.2 Decisión Terapéutica

Se lleva a cabo en el consultorio o en caso de que el proceso sea complejo, se presenta el caso clínico en un comité de tumores. En esta etapa se define la intención del tratamiento que puede ser.

Tratamiento de radioterapia según intención:

### Curativa

- Neoadyuvante: Tratamiento que se utiliza como primer paso antes de cualquier otra intervención.
- Adyuvante: Asociada a otro tratamiento.
- Exclusiva: Tratamiento único.
- Concurrente: Cuando se la realiza (RT - QT) al mismo tiempo.

### Paliativa

- Pretende mejorar la calidad de vida tanto de los pacientes como de los familiares, mediante la prevención y el alivio del sufrimiento (Dolor, hemorragias, compresiones tumorales).

## 2.3 Simulación

Es el proceso en el cual se toman imágenes del paciente con dos parámetros principales:

- La posición del paciente.
- Los sistemas de inmovilización.

### Equipos de Simulación:

**SIMULADOR RAYOS X**



**TOMÓGRAFO SIMULADOR**



## 2.4 Planificación

En la estación de trabajo de planificación virtual, donde se delimitan los volúmenes de riesgo y de tratamiento para posteriormente diseñarse las incidencias (balística) más adecuadas para el tratamiento.

## 2.5 Aplicación del tratamiento

Se clasifica el tratamiento según distancia:

### RADIOTERAPIA EXTERNA:

Donde hay distancia desde la fuente al volumen a tratar, se utilizan equipos bomba cobalto y acelerador lineal.

### ACELERADOR LINEAL

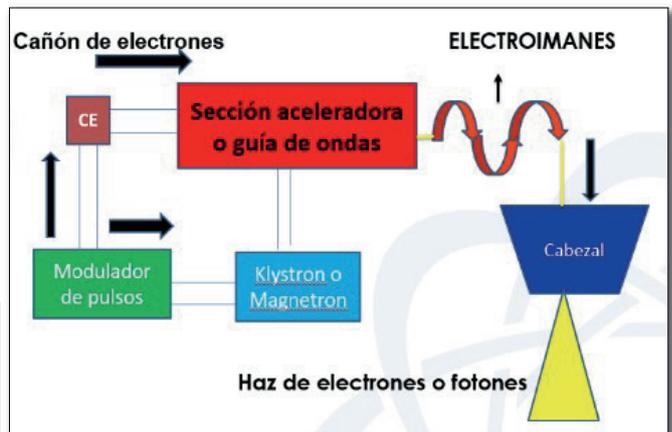


No dispone de ninguna fuente radiactiva, se producen radiaciones a partir de electrones acelerados por ondas electromagnéticas generadas en la propia unidad.

Esta aceleración de electrones se produce en una trayectoria rectilínea, de ahí el apelativo de "lineal".

### Esquema de funcionamiento de un acelerador lineal:

- **Modulador de pulsos:** El cual a partir de la corriente alterna de la red general, crea pulsos de tensión de alto voltaje que alimentan al cañón de electrones y al magnetron.
- **Cañón de electrones:** Generan electrones por efecto termoiónico, mediante la aplicación de un campo eléctrico pulsado.
- **KLYSTRON:** Es un amplificador de potencia de onda de alta frecuencia, es decir, recibe a la entrada ondas electromagnéticas de alta frecuencia (microondas) de baja potencia y da a la salida microondas de alta potencia.
- **Sección aceleradora:** Los electrones son acelerados y por la que circulan las microondas producidas por el KLYSTRON.
- **Electroimanes:** Se encargan de direccionar el haz de electrones.



## 2.5.1 Modalidades del tratamiento

<b>Radioterapia Convencional 2d</b>	Es un procedimiento basado en imágenes de radioscopia en el que se definen los campos de irradiación y ángulo de incidencia utilizando reparos anatómicos como guía.
<b>Radioterapia Conformacional 3d</b>	Utiliza imágenes de TC para la definición de los volúmenes de tratamiento y cálculo computarizado de la distribución de la dosis.
<b>Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT)</b>	Modula la intensidad del haz de radiación mediante la interposición de filtros compensadores o colimadores multiláminas, logrando una distribución más precisa de la dosis.
<b>Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT)</b>	En la VMAT, el acelerador lineal gira alrededor del paciente a la vez que modula tanto la intensidad del haz como la velocidad de giro, permite realizar tratamientos en menos de 5 minutos.
<b>Radioterapia Intraoperatoria (RIOP)</b>	La radioterapia intraoperatoria es un tratamiento de radiación intensivo que se administra durante la cirugía. Permite dirigir radiación directa al área objetivo mientras se conserva el tejido normal circundante.
<b>Radiocirugía (SRS - SBRT)</b>	La radiocirugía consiste en la administración en una sola sesión, de una alta dosis de radiación sobre un blanco específico de manera precisa, de tal forma que los tejidos próximos reciben una cantidad de radiación baja y tolerable.

### BRAQUITERAPIA:

No existe una distancia desde la fuente al tejido a irradiar, se usan pequeñas fuentes radioactivas que se introducen dentro del tumor o en contacto con el mismo.

## 2.5.2 Radioisótopos más utilizados

**CS 137**

En forma de tubos para aplicaciones ginecológicas, el periodo de desintegración es de 30.2 años.

**IR 192**

En forma de semillas o de alambres, implantes ginecológicos e intersticiales, periodo de desintegración de 73.8 días.

**I 125**

En forma de pequeñas semillas en implantes intersticiales permanentes, periodo de desintegración de 59.4 días.

**PD 103**

Para implantes permanentes de próstata, periodo de desintegración es de 17 días.

## 2.6 Control de toxicidad

### TOXICIDAD AGUDA

Son los efectos secundarios que se producen a causa del tratamiento radiante dependiendo la zona a tratar y que inician durante el tratamiento hasta 3 meses después de finalizado el mismo siendo estos reversibles.

### TOXICIDAD TARDÍA

Aparecen en un periodo de meses o años posterior al tratamiento, siendo estos progresivos e irreversibles.

## 2.7 Derivación con médico tratante

El informe final de tratamiento contiene lo siguiente:

- Diagnóstico, estadificación de enfermedad.
- Territorio irradiado.
- Dosis administrada.
- Fecha de inicio, fecha de fin.
- Toxicidad en caso de estar presente.

## 2.8 Seguimiento

Para el seguimiento se solicita estudios por imágenes: rayos X, tomografía, resonancia magnética, PET/CT. Así también, solicitud de estudios de laboratorio y exámenes físicos.

## BIBLIOGRAFÍA

### TALLER: CICLOTRÓN – RADIOFARMACIA PRECLÍNICA

- [1] A. C. Systems. [En línea]. Available: <https://advancedcyclotron.com/node/153>.
- [2] ABEN, «ABEN,» [En línea]. Available: <https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas,1454.html>.
- [3] OIEA, «PRODUCCIÓN DE RADIOISÓTOPOS,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/produccion-deradiofarmacos#:~:text=Los%20radiof%C3%A1rmacos%20contienen%20peque%C3%B1as%20cantidades,de%20part%C3%ADculas%2C%20como%20los%20ciclotrones>.

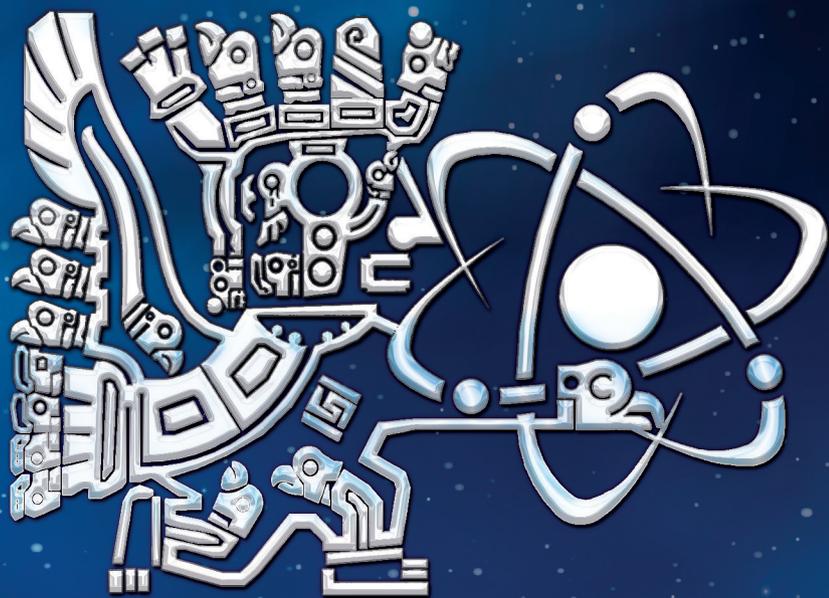
### TALLER: CENTRO MULTIPROPÓSITO DE IRRADIACIÓN GAMMA

- [1] I. d. alimentos, «DocPlayer,» 2018. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/75268338-Manual-de-buenas-practicas-para-la-irradiacion-de-alimentos.html>.
- [2] I. a. d. CENSA, «Laboratorio de técnicas de irradiación,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://mayabequeando.wordpress.com/2018/02/12/en-el-censa-nuevo-irradiador-autoblindado/>.

### TALLER: REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN

- [1] Foro de la Industria Nuclear Española, «Foro de la Industria Nuclear Española - reacción de fisión nuclear en cadena,» [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-es-una-reaccion-de-fision-nuclear-en-cadena/>. [Último acceso: 2021].
- [2] Organismo Internacional de Energía Atómica, «Producción de radioisótopos en reactores de investigación,» [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/produccion-de-radioisotopos-en-reactores-de-investigacion>. [Último acceso: 11 octubre 2021].
- [3] I. d. alimentos, «DocPlayer,» 2018. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/75268338-Manual-de-buenas-practicas-para-la-irradiacion-de-alimentos.html>.
- [4] I. a. d. CENSA, «Laboratorio de técnicas de irradiación,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://mayabequeando.wordpress.com/2018/02/12/en-el-censa-nuevo-irradiador-autoblindado/>.
- [5] C. L. Gutierrez, «Complejo del RNI de Bolivia».

# NOTICIAS



**“BOLIVIANAMENTE”**

REVISTA  
CIENTÍFICA  
NUCLEAR



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear



## SECCIÓN 4. NOTICIAS

### **Noticia 1:**

La ABEN implementa ciencia y tecnología nuclear para la gestión de los recursos hídricos empleando la hidrología isotópica ..... 85

### **Noticia 2:**

Primer Ciclo Formativo “Tecnología Nuclear en Procesos Educativos” ABEN-UNEFCO ..... 86

### **Noticia 3:**

Inició el vaciado del primer hormigón del reactor nuclear de investigación ..... 87

### **Noticia 4:**

Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia ..... 88



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear

LA PAZ, 22 DE AGOSTO DE 2021

## LA ABEN IMPLEMENTA CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EMPLEANDO LA HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

La Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia establece que el agua es un recurso finito, vulnerable, estratégico y cumple una función social, cultural y ambiental. Así, la implementación de la “Política Nacional de Uso Eficiente del Agua Potable y Adaptación al Cambio Climático, para Vivir Bien”, es de vital importancia para el Estado. En este sentido, la ABEN, viene impulsando y promoviendo la investigación, gestión y aplicaciones de la tecnología nuclear empleando la hidrología isotópica, con el fin de contribuir a la evaluación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en Bolivia, para que los tomadores de decisiones puedan establecer y ejecutar políticas para la adecuada gestión de los recursos hídricos.

Actualmente, la ABEN es contraparte principal del Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005 denominado “Desarrollo de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en la provincia Sud Lípez, empleando Hidrología Isotópica” parcialmente financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). En este estudio, con el propósito de establecer un marco de cooperación interinstitucional, se han aunado esfuerzos para potenciar los procesos de investigación realizando convenios de investigación entre la ABEN y la Academia: Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), la Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF) de Potosí, conformando de esta manera un equipo multidisciplinario de trabajo.

Así, del 14 al 21 de agosto de 2021, la ABEN dirigió y supervisó la ejecución de una misión científica de mediciones in-situ y la recolección de muestras en ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos, localizados en la Microcuenca de la Laguna Colorada, para que con la ayuda de las aplicaciones de la energía nuclear los científicos puedan comprender los componentes del ciclo del hidrológico, con el fin de evaluar la cantidad, la calidad y la sostenibilidad del agua



*Equipo multidisciplinario aben-umsa-uatf realizando mediciones in-situ y la recolección de muestras en una vertiente de la laguna colorada*

en esa región. Y así aportar datos para la gestión de los recursos hídricos según los planes de desarrollo del Estado.

Tradicionalmente, la evaluación de la cantidad de los recursos hídricos a la escala de cuencas hidrográficas, mediante el cálculo de los componentes del ciclo hidrológico, ha requerido de grandes inversiones financieras y extensos programas de campo, sobretodo en áreas remotas del país que carecen de la infraestructura adecuada. De manera alternativa, la hidrología isotópica desde el punto de vista económico resulta ser menos costosa, ya que el cálculo de estos componentes requiere del análisis de isótopos de muestras de agua, y su posterior tratamiento e interpretación mediante modelos matemáticos, ofreciendo resultados precisos y eficientes, pudiéndose además aplicar con mayor facilidad a la escala de cuencas.

Finalmente, es importante destacar que la ABEN cuenta con un laboratorio de Hidrología Isotópica, con tecnología nuclear de última generación, con un equipo de profesionales altamente especializados, para proporcionar estudios analíticos de isótopos estables de agua Oxígeno-18 y Deuterio ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ) y radioisótopos de Radón-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ), además del desarrollo de investigaciones, proyectos, estudios y aplicaciones de la hidrología isotópica.

LA PAZ, 27 DE SEPTIEMBRE DE 2021

## PRIMER CICLO FORMATIVO “TECNOLOGÍA NUCLEAR EN PROCESOS EDUCATIVOS”



### ESPECIALISTAS DE LA ABEN QUE CONFORMAN EL CONTINGENTE DE CAPACITADORES

Hortensia Jiménez, Directora General Ejecutiva de la ABEN, en la oportunidad, manifestó que con la firma de este convenio se trabajará en la formación, en tecnología nuclear de maestros y maestras, pues ellos son el pilar fundamental de la educación de los niños y jóvenes bolivianos incentivando el espíritu científico de los estudiantes. “La cultura científica se tiene que dar desde los primeros años de la educación”.

*Ing. Hortensia Jiménez Rivera – ABEN, Tarija 05 de agosto de 2021.*

El Ministerio de Educación, a través de la Unidad Especializada de Formación Continua (UNEFCO), y la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) inauguraron hoy el primer ciclo formativo de enseñanza: “Tecnología nuclear en procesos educativos”, dirigido a maestros y estudiantes de las Escuelas Superiores de Formación de Maestros (ESFM).

*UNICOM – MINEDU, 27 de septiembre de 2021.*

Los tres cursos que conforman este primer ciclo formativo estarán impartidos por profesionales altamente calificados de la ABEN (especializados en Rusia, Francia, Inglaterra, Italia, Argentina y Uruguay); servidores públicos con vocación de servicio que cumplen el rol de capacitadores, conformando así el primer contingente de enseñanza altamente especializada, para contribuir al desarrollo científico-educativo de nuestro país.

*ABEN, 28 de septiembre de 2021.*



### AUTORIDADES DE LA ABEN Y LA UNEFCO DEL MINISTERIO DE EDUCACIÓN (MINEDU)

EL ALTO, 26 DE JULIO DE 2021

## ¡INICIÓ EL VACIADO DEL PRIMER HORMIGÓN DEL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN!



**AUTORIDADES DE BOLIVIA Y ROSATOM**

Comenzó el vaciado del primer hormigón para los cimientos donde se instalará el Reactor Nuclear de Investigación, en el Distrito 8, zona Parcopata, de la ciudad de El Alto, y es el tercero de los tres componentes que conforman el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) con fines pacíficos.

*Ing. Hortensia Jiménez Rivera-ABEN, 26 julio 2021.*



**TRABAJADORES COMIENZAN LA CONSTRUCCIÓN DEL COMPLEJO DEL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN**

El presidente Luis Arce expresó que este reactor es el primero en sus características en instalarse a más de 4.000 metros sobre el nivel del mar.

*La Razón, 26 de julio de 2021.*



**VACIADO DE LA LOZA DEL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN**

### VACIADO DEL PRIMER HORMIGÓN DEL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN EN BOLIVIA

Hoy estamos dando inicio a las obras civiles del tercer componente del proyecto que es el Reactor Nuclear de Investigación. Con esta infraestructura científicos bolivianos y extranjeros podrán realizar estudios nucleares sin precedentes. Ahora El Pueblo, 26 de julio de 2021.

Gracias a la cooperación de nuestros amigos y socios rusos estamos superando las enormes brechas tecnológicas que existen para poner en marcha este ambicioso proyecto que colocará a Bolivia en los umbrales de la tecnología de última generación, ello para beneficiar a nuestra población con aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos", sostuvo el Presidente. Agencia Boliviana de Información (ABI), 26 de julio de 2021.

El proyecto es único por su contenido técnico, el reactor de investigación que habrá aquí en 2024 es una maravilla de la tecnología, una instalación innovadora que pondrá a Bolivia a la par con los principales países del mundo", declaró el primer director general adjunto de Rosatom, Kirill Komarov. Russia Today (RT) 26 de julio de 2021.

El presidente boliviano, Luis Arce, señaló en el acto de vaciado del primer hormigón que el reactor es el "tercer componente" del CIDTN que se edifica en El Alto, el cual se suma a los Complejos Ciclotrón-Radiofarmacia-Preclínica, además del Centro Multipropósito de Irradiación. TeleSUR, 26 de julio de 2021.

EL ALTO, OCTUBRE DE 2021

## RED DE CENTROS DE MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA (CMNyRs)

### Introducción

La ABEN implementará y operará la Red de CMNyRs, que se enmarca en las políticas del Estado Plurinacional de Bolivia, expresadas en los trece pilares de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 (APB-2025), planificación de desarrollo del Estado.



**CENTRO DE MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA DE LA CIUDAD DE EL ALTO**

### Objetivo

La Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia tiene como objetivo general la incorporación y desarrollo de las aplicaciones de la tecnología nuclear en el área de la salud con la implementación de tecnología que permitirá dar soluciones integrales en Oncología Clínica, Medicina Nuclear y Radioterapia.



**RED DE CMNyRs EN BOLIVIA**

### Servicios

Medicina Nuclear: Es una especialidad médica que emplea el uso de radiofármacos para el diagnóstico, se diferencia de otras técnicas de imagen por realizar estudios metabólicos, con detalle anatómico.



**ESPECIALISTAS EN EL CMNyR - EL ALTO**

**Radioterapia:** Es una especialidad médica asociada a la oncología que se encarga del tratamiento del cáncer a partir del uso de altas dosis de radiación con dos tipos de energía, fotones y electrones, para destruir células cancerosas.



**ACELERADOR LINEAL**

Oncología clínica: Está al cuidado del enfermo con cáncer desde el diagnóstico, incluyendo el tratamiento y seguimiento, hasta la curación o progresión y en el período terminal del paciente; su principal competencia es el manejo de tratamiento sistémico o antineoplásico (quimioterapia, hormonoterapia, terapia blanco, inmunoterapia y fármacos en desarrollo), de manera exclusiva o en combinación con Radioterapia, Cirugía oncológica y Medicina Nuclear, siendo tratamientos que se realizan de manera multidisciplinar.

**SALA DE ONCOLOGÍA**





ESTADO PLURINACIONAL DE  
**BOLIVIA**

MINISTERIO DE  
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



Agencia  
**B**oliviana de  
**E**nergía  
**N**uclear

<https://www.aben.gob.bo/>