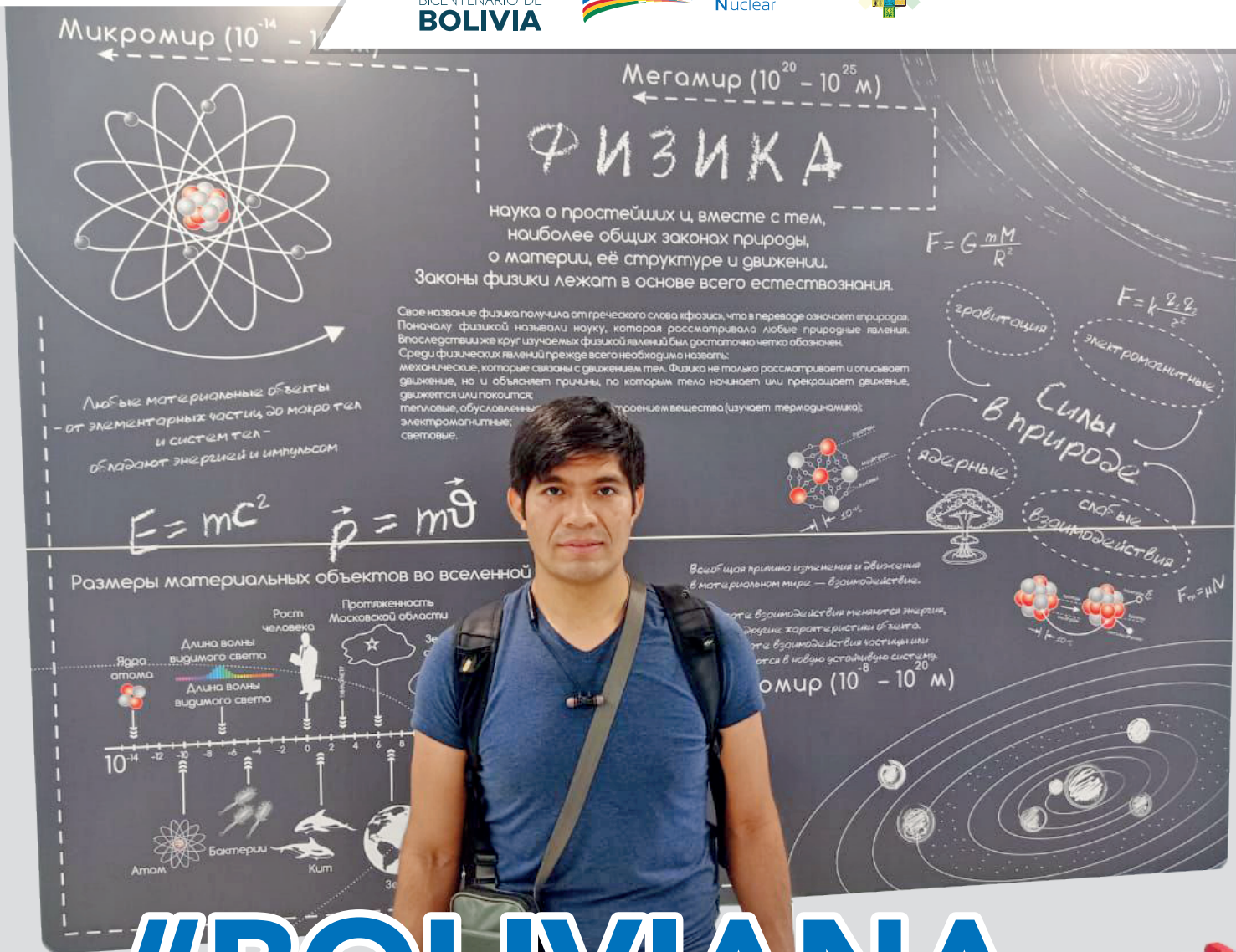




Микромир ($10^{-14} - 10^{-10}$ м)

Макромир ($10^{20} - 10^{25}$ м)

ФИЗИКА

наука о простейших и, вместе с тем, наиболее общих законах природы, о материи, её структуре и движении.
Законы физики лежат в основе всего естествознания.

Свое название физика получила от греческого слова «φύσις», что в переводе означает «природа». Пониманию физикой называли науку, которая рассматривала любые природные явления. Впоследствии же круг изучаемых физикой явлений был достаточно четко обозначен. Среди физических явлений прежде всего необходимо назвать: механические, которые связаны с движением тел. Физика не только рассматривает и описывает движение, но и объясняет причины, по которым тело начинает или прекращает движение, движется или покоится; тепловые, обусловленные движением частиц (изучает термодинамика); электромагнитные; световые.

Любые материальные объекты - от элементарных частиц до макро тел и систем тел - обладают энергией и импульсом

$E = mc^2$ $\vec{p} = m\vec{v}$

Размеры материальных объектов во вселенной

Ядро атома Длина волны видимого света Рост человека Протяженность Московской области Земля

Атом Бактерия Кит Земля

Всёобщая причина изменения и движения в материальном мире — взаимодействие.

Взаимодействие является энергией, которая характеризует объект. Взаимодействие частиц или тел в новой устойчивой системе.

Силы в природе

- гравитация: $F = G \frac{mM}{R^2}$
- электромагнитные: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$
- ядерные: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$
- слабые: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$
- сильные: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$

Мир ($10^{-8} - 10^{-10}$ м)

"BOLIVIANA MENTE"

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



"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

DISEÑO, DIAGRAMACIÓN

Lic. Ana Teresa Gómez Vargas

IMPRESIÓN

Artes Gráficas Sagitario S.R.L.

DEPÓSITO LEGAL: 4-3-578-2025 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA

ÍNDICE

Sección 1. ENTREVISTA	7
Sección 2. ARTÍCULOS.....	13
Sección 3. TALLERES CIENTÍFICOS	99
Sección 4. NOTICIAS	131
Sección 5. PROYECTOS	147



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



ENTREVISTA

"BOLIVIANAMENTE"

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



Eduardo Medina Gironzini: "Bolivia avanza por el camino correcto en el desarrollo nuclear y la protección radiológica"



Como presidente de una organización que reúne a profesionales en Protección Radiológica en América Latina y el Caribe, ¿Cómo evalúa el desarrollo de la seguridad radiológica en Bolivia? ¿Cuáles considera que son los principales avances y desafíos en este ámbito?

Eduardo Medina Gironzini (EM): Como presidente de la Federación de Radioprotección de América Latina y el Caribe (FRALC) que reúne a las sociedades y asociaciones de protección radiológica de 18 países de nuestra región y como ex coordinador de algunos proyectos sobre protección radiológica en nuestra región, he podido apreciar avances interesantes en el tema desde hace varios años siendo el mas resaltante el haber separado orgánicamente las funciones del ente regulador de las funciones que corresponden a la promoción y

servicios de la tecnología nuclear. Hoy se puede ver que hay dos organismos estatales a cargo de esas funciones que al parecer cumplen sus funciones de manera independiente pese a que ambas se encuentran en el mismo ministerio. Adicionalmente se puede ver que hay nuevas normas y procedimientos regulatorios que permitirán fortalecer la protección radiológica en todas las instalaciones nucleares y radiactivas.

Las sociedades o asociaciones de protección radiológica cumplen un papel muy importante en el desarrollo de la protección radiológica porque desarrollan actividades complementarias en el tema y también porque emiten opinión técnica sobre diversos aspectos ya que sus miembros son profesionales que se desarrollan en el campo de la medicina, la industria, la docencia, la investigación y el campo regulador y además trabajan en organismos públicos y privados lo cual permite que se hagan comentarios técnicos de consenso.

El Seminario realizado recientemente es una muestra de lo que se puede hacer trabajando de manera coordinada tanto el regulador como el entre promotor de la tecnología nuclear y por supuesto los profesionales que forman parte de la asociación de protección radiológica.

Y como se ha visto hace unos días en un simposio internacional donde se trataron temas de protección radiológica en medicina, es necesario seguir trabajando en el tema a nivel de nuestra región reforzando la divulgación, la capacitación, la actualización de conocimientos de manera permanente, la definición de funciones, las regulaciones, etc. Y esto incluye también a Bolivia.

¿Cuál es su valoración sobre la calidad y el impacto de los trabajos e investigaciones presentados por la ABEN? ¿En qué aspectos cree que se pueden fortalecer o mejorar?

EM: Los profesionales de la ABEN que han participado en el Seminario Internacional sobre Usos de la Tecnología Nuclear y Protección Radiológica que se llevó a cabo en la ciudad de La Paz los días 21 y 22 de febrero han mostrado gran conocimiento del tema que tienen a su cargo. Respondieron adecuadamente a las consultas de los asistentes y lo mas importante es que tienen muy bien encaminada la formación especializada en los temas nucleares que tiene cada uno y que gracias a ser jóvenes tienen un buen futuro profesional. La interacción con colegas de otros países es muy importante al igual que la participación en eventos internacionales.

Desde su perspectiva, ¿qué papel desempeña la ABEN en el desarrollo científico y tecnológico de la región? ¿Cómo percibe su impacto en el fortalecimiento del sector nuclear y la protección radiológica en Bolivia?

EM: Desde hace varios años he seguido de cerca el desarrollo de Bolivia en el campo nuclear y en este último viaje a La Paz he tenido oportunidad de conocer la ABEN y parte de sus instalaciones. Pude conocer el programa nuclear boliviano hace algunos años cuando organicé un Seminario Web para “Café y Radiaciones” donde la Ing. Hortensia Jiménez expuso para los colegas de América Latina y el Caribe como se estaba avanzando en el tema.

Hoy nuestros países ven como una importante opción para desarrollar el país optando por la energía nuclear ya que los favorecidos seremos la población en general. Y en este tema, Bolivia se ha dado cuenta a tiempo de seguir por ese camino.

La protección radiológica debe avanzar en su desarrollo especialmente en el momento actual en que se tienen instalaciones radiactivas y nucleares relevantes que ameritan un mayor grado de protección y seguridad nuclear. Pero también se debe seguir trabajando en la capacitación a todos los trabajadores que hacen uso de las radiaciones ionizantes en el campo médico, industrial e investigación a nivel nacional, pero también en la actualización permanente mediante charlas, cursos y eventos técnicos como el desarrollado el mes pasado.

Desde su experiencia, ¿qué estrategias o políticas deberían implementarse en Bolivia para fortalecer la protección radiológica y la cultura de seguridad en el país? ¿Qué recomendaciones haría para mejorar la capacitación en esta área?

EM: Aunque reconozco que hay un avance, se hace necesario una mejor evaluación de la situación existente en el país a fin de hacer un verdadero diagnóstico desde el punto de vista de la protección radiológica y plantear propuestas viables a corto y mediano plazo a fin de avanzar de manera acorde con el desarrollo de la tecnología nuclear.

Hay un importante trabajo que hacer en el campo técnico y a nivel de pregrado y posgrado en temas de protección radiológica específica y como especialidad profesional con una visión global de la situación del país a fin de fortalecer el tema. No se debe dejar de lado la actualización de conocimientos ni la difusión permanente de los temas nucleares y de protección radiológica.

Mi experiencia como Director del Centro Superior de Estudios Nucleares del IPEN me permite opinar que sería muy conveniente contar con una unidad orgánica en la ABEN que se encargue exclusivamente de la formación, capacitación, actualización y divulgación de la protección radiológica y de la tecnología nuclear, coordinando permanentemente con diversas instituciones a fin de cubrir las necesidades nacionales y mantenerse al día con los avances a nivel mundial participando en eventos nacionales e internacionales.



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

A R T Í C U L O S



"BOLIVIANAMENTE"

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



SECCIÓN 2. ARTÍCULOS

Artículo 1.

Manejo de la Radiofarmacia Hospitalaria, Procesos y Control de Calidad en la Medicina Nuclear

Autor: Luz Gabriela Samo Aruquipa

Página 17

Artículo 2.

Desarrollo y Aplicación del Sistema de Dosimetría Fricke para el Estudio de la Distribución por Mapeo de Dosis en un Irradiador Industrial Gamma (γ)

Autor: Nandy Sharlin Reyes Patton, Rocío Griselda Choque, Luis Fernando Cáceres Choque

Página 27

Artículo 3.

Reactores Nucleares Modulares Pequeños (SMR) y su rol en la transición energética

Autor: Marco Augusto Herbas López

Página 41

Artículo 4.

Desafío del cumplimiento de Requisitos Regulatorios Sanitarios y Radiológicos en la Producción de Radiofármacos en escala Industrial

Autor: Jose Daniel Bogado Laserna

Página 57

Artículo 5.

Relación Dosis / Actividad en Operación en el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia y Preclínica

Autor: Israel Antezana López

Página 70

Artículo 6.

Producción de Radioisótopos en el Ciclotrón TR-24

Autor: Rodny Andree Batuani Larrea

Página 81

Artículo 7.

Seguridad en la operación del Ciclotrón TR-24

Autor: Luis Miguel Chavez Patiño

Página 89



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

Manejo de la Radiofarmacia Hospitalaria, Procesos y Control de Calidad en la Medicina Nuclear

Luz Gabriela Samo Aruquipa.*

Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia - Santa Cruz
Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Santa Cruz - Bolivia.

*Correo electrónico: lsamo@aben.gob.bo

RESUMEN

El término Radiofarmacia es equivalente a Farmacia Nuclear, y sus funciones se asemejan a las de una farmacia convencional, pero enfocadas en el manejo y control de radiofármacos. La implementación de medidas que garanticen la seguridad del trabajador, del paciente y del medio ambiente es un aspecto fundamental en esta disciplina. En este contexto, la adecuada planificación y organización de la radiofarmacia, desde su diseño estructural hasta la ejecución de sus operaciones, resulta crucial para su correcto funcionamiento. Existen dos riesgos primordiales que pueden comprometer la seguridad tanto del personal como de los pacientes: la exposición a la radiación ionizante y la contaminación de los radiofármacos con impurezas químicas, radioquímicas, biológicas y microbiológicas durante su proceso de elaboración. Para mitigar estos riesgos, la implementación de un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) permite establecer protocolos de trabajo rigurosos y asegurar el registro sistemático de cada procedimiento realizado.

Objetivos: Examinar los procesos involucrados en la gestión de la radiofarmacia hospitalaria, con especial énfasis en los controles de calidad. Esto incluye el análisis de las normativas regulatorias vigentes, con el propósito de garantizar la seguridad radiológica y la eficacia de los radiofármacos empleados en procedimientos diagnósticos y terapéuticos.

Metodología: Se adoptó un enfoque descriptivo basado en la revisión de normativas nacionales particularmente en instalaciones de tipo Clase II, como los cuartos calientes y recomendaciones internacionales sobre el manejo de radiofármacos. Se detallan operaciones fundamentales, tales como la recepción de generadores de radionucleidos, el proceso de radiomarcage de kits, características de calidad de los radiofármacos y los métodos empleados para la evaluación de su pureza radioquímica.

Resultados: El cumplimiento de la normativa vigente y la implementación de procedimientos estandarizados para el control de calidad han permitido garantizar la seguridad y eficacia en todas las etapas operativas de la radiofarmacia. En el Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia Santa Cruz (CMNyR-SC), se han llevado a cabo pruebas de pureza radioquímica como parte del aseguramiento de la calidad de los radiofármacos elaborados en el cuarto caliente. Además, los procesos de recepción y almacenamiento se han desarrollado conforme a los protocolos establecidos, minimizando la incidencia de riesgos y errores operacionales.

Conclusiones: La radiofarmacia hospitalaria constituye un pilar esencial en la medicina nuclear, ya que demanda infraestructura especializada y la aplicación de procedimientos estandarizados de control de calidad. La adhesión estricta a normativas y buenas prácticas radiofarmacéuticas (BPF) garantiza la eficacia de los radiofármacos y la seguridad del personal y los pacientes. La optimización continua de estos procesos contribuirá significativamente al fortalecimiento y desarrollo de la atención médica en el ámbito de la medicina nuclear.

Palabras Clave: Radiofarmacia hospitalaria, control de calidad, radiomarcage, instalaciones Clase II, normativas de seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

La radiofarmacia es una disciplina fundamental dentro de la medicina nuclear, encargada de la preparación, control de calidad y distribución de radiofármacos para su uso en diagnóstico y terapia. Su organización y funcionamiento deben garantizar la seguridad del trabajador, del paciente y del medio ambiente, integrándose dentro de un sistema de garantía de calidad (SGC). Este sistema comprende todas las medidas necesarias para asegurar que los radiofármacos cumplan con los estándares de calidad, minimizando riesgos asociados tanto a la exposición a la radiación como a la contaminación química, radioquímica, biológica y microbiológica.

A nivel global, las radiofarmacias pueden clasificarse en tres categorías principales:

1. Radiofarmacia Industrial: Comercializa radiofármacos listos para su uso o componentes para su elaboración en otras radiofarmacias. Es responsable de la calidad farmacéutica y radiofarmacéutica de los productos durante su período de vigencia, conforme a las instrucciones de uso y conservación.
2. Radiofarmacia Centralizada: Provee radiofármacos a varios centros hospitalarios, permitiendo una producción más eficiente y estandarizada.
3. Radiofarmacia Hospitalaria: La radiofarmacia hospitalaria se define como aquella que funciona en conjunto con un servicio de medicina nuclear. Dependiendo de sus características y equipamiento, estas instalaciones pueden clasificarse según su capacidad de producción y el tipo de radioisótopos empleados:
 - Radiofarmacias hospitalarias PET, que producen estos radiofármacos para uso interno y, en caso de comercialización, requieren una habilitación adicional como radiofarmacia industrial.
 - Laboratorios "calientes" dentro del servicio de medicina nuclear, dedicados a la preparación de radiofármacos de ^{99m}Tc , así como al almacenamiento y fraccionamiento de otros radioisótopos. Un ejemplo de este tipo de instalación es el Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNYR), cuya radiofarmacia está clasificada como una instalación de Clase II.

La organización de la radiofarmacia, tanto como instalación como práctica profesional, requiere el cumplimiento de normativas específicas que regulan su funcionamiento, asegurando la calidad y seguridad de los procedimientos. En este contexto, la radiofarmacia hospitalaria desempeña un papel fundamental en la medicina nuclear, ya que permite la preparación y administración inmediata de radiofármacos dentro de un entorno controlado. A lo largo de este trabajo, se abordarán aspectos clave de la radiofarmacia hospitalaria, tales como la pureza radioquímica, el monitoreo de radiación y la documentación requerida para el correcto mantenimiento de registros. Dado que las actividades en radiofarmacia involucran el manejo de sustancias radiactivas, la implementación de protocolos estrictos es esencial para minimizar riesgos y garantizar la seguridad en cada etapa del proceso.

2. OBJETIVOS

Examinar los procesos involucrados en la gestión de la radiofarmacia hospitalaria, con especial énfasis en los controles de calidad. Esto incluye el análisis de las normativas

regulatorias vigentes con el objetivo de garantizar la seguridad radiológica y la eficacia de los radiofármacos empleados en procedimientos diagnósticos y terapéuticos.

2. METODOLOGÍA

Este estudio se basa en una revisión exhaustiva de la normativa vigente, específicamente para instalaciones de tipo Clase II, de acuerdo con la "Norma Específica Regulatoria - Licencia de Operación de Instalaciones Radiológicas en el Área de Medicina Nuclear". Asimismo, se consideran las recomendaciones sobre buenas prácticas radiofarmacéuticas establecidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), contenidas en el documento titulado "Guía Operacional para la Radiofarmacia Hospitalaria". En el contexto nacional, las prácticas de la radiofarmacia hospitalaria se desarrollan dentro del "laboratorio caliente", integrado en el servicio de Medicina Nuclear, donde se llevan a cabo las operaciones de preparación y control de calidad de los radiofármacos, asegurando el cumplimiento de las normativas y garantizando la seguridad del personal y los pacientes.

3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

Dado que la ubicación, el diseño, los requerimientos y el equipamiento de la radiofarmacia deben cumplir con criterios específicos para minimizar la exposición a la radiación, a continuación, se detallan sus especificaciones en cuanto a ubicación, diseño, requerimientos y equipamiento.

a) SALA DE RADIOFARMACIA O CUARTO CALIENTE: Esta sala debe estar diseñada para minimizar la exposición a la radiación durante la preparación, manipulación y fraccionamiento de radiofármacos. Se requiere blindaje específico acorde con los niveles de actividad y radionucleido usado en la instalación. La infraestructura debe incluir áreas de almacenamiento blindado y superficies resistentes a productos químicos. Todo el personal debe utilizar equipos de protección personal y dosímetros durante sus actividades. Además, deben realizar controles rutinarios para verificar la contaminación superficial y controles diarios a Activímetros.

1. Ubicación: Debe estar en una zona controlada con acceso restringido y próximo a la sala de inyección.
2. Diseño: Amplio y con blindaje adecuado a la máxima actividad y radionúclidos usados en la Actividad. Debe contar con un área para que el personal pueda mudar su vestimenta de trabajo y mesón de trabajo. Superficies lisas, lavables, resistentes a agentes químicos y fácil de descontaminar. Un almacén temporal blindado para desechos radiactivos sólidos y líquidos; además, área para la descarga autorizada de los efluentes radiactivos líquidos.
3. Equipamiento: Debe contar con campana de flujo laminar (con blindaje adecuado) fraccionamiento de I-131, activímetro, equipo de monitorización de radiación y de contaminación, almacén blindado para fuentes para calibración y fantasmas (para decaimiento), contenedor blindado para desechos, contador de radiactividad para verificar la pureza y actividad de los compuestos, herramientas para maximizar la distancia desde la fuente (tenazas y pinzas), bandejas para reducir al mínimo la propagación en caso de derrame, castillo de plomo con vidrio plomado para elusión de generadores, carro transportador blindado con ruedas, porta viales blindado, porta jeringas blindados, blindajes

para jeringas (según radioisótopo) y equipo para controlar los derrames (kit de descontaminación). Los blindajes deben estar acorde al radioisótopo y a la actividad usados en la actividad.

4. Medidas de Seguridad: La sala debe ser monitorizada por video vigilancia, y sistema de enclavamiento, acceso restringido, contar con dos (2) lavamanos

4. OPERACIONES DENTRO DEL CUARTO CALIENTE

Se describen las operaciones dentro del cuarto caliente con un enfoque particular en los procedimientos de control de calidad:

1. Recepción y manejo del generador de radionucleidos ($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$): El generador debe ser inspeccionado a la llegada y almacenado adecuadamente. Se verifican aspectos como el rendimiento, el pH, la esterilidad y la pureza radioquímica del eluido generado.
2. Recepción de kits de radiofármacos marcados “listos para usar”: Se debe realizar una comprobación física de los kits (p. ej. , ^{111}In -octreótido, $^{123}/^{131}\text{I}$ -MIBG) al recibirlos. Se debe consultar el manual de instrucciones del fabricante para obtener instrucciones especiales sobre las condiciones de almacenamiento y los métodos de dispensación. La calidad de un producto de un nuevo proveedor debe verificarse en el lado del usuario.
3. Radiomarcaje de kits de reactivos de radiofármacos: Cada kit debe ser preparado según las instrucciones del fabricante. Sólo se debe preparar un kit a la vez. Son esenciales las prácticas y precauciones asépticas generales, como evitar introducir aire en los kits y evitar perforar el tapón de goma desde el mismo punto para evitar un efecto de perforación de los kits de reactivos. Se realiza un control riguroso de las condiciones de conservación y el seguimiento de los lotes.
4. Fraccionamiento y dispensación de radiofármacos: Realización en condiciones seguras con control de actividad acorde al peso y edad del paciente y radionucleido utilizado. Si se utiliza un vial multidosis, entonces el líquido o las cápsulas deben dispensarse en una unidad de dosis única para un paciente en particular.
5. Gestión de residuos radiactivos: eliminación adecuada conforme a normativas
6. Control de calidad del equipamiento y radiofarmacos : El Control de Calidad de Radiofármacos constituye una parte de las Buenas Prácticas Radiofarmacéuticas (BPR), que resulta de la combinación de las Buenas Prácticas de Fabricación y Control (BPFyC) de medicamentos y las Normas de Protección Radiológica que aplicarán en este caso por tratarse de radiofármacos como también se deben realizar los controles diarios de los activímetros , temperatura del refrigerador de almacenamiento de los kits de reactivos.

5.CONTROLES DE CALIDAD

5.1 Equipamiento

Los procedimientos de control de calidad deben seguir las descripciones de la farmacopea, si están disponibles; de lo contrario, se deben seguir los procedimientos verificados científicamente. Todos los dispositivos e instrumentos utilizados para el control de calidad y el aseguramiento de la calidad deben revisarse y mantenerse de manera periódica.

Se deben realizar controles de calidad de todos los equipos de detección de radiación, como calibradores de radionúclidos y monitores de contaminación, a intervalos regulares. Los resultados de rendimiento y mantenimiento de todos los equipos se deben registrar y revisar de forma regular.

Las temperaturas del refrigerador y del congelador deben registrarse diariamente utilizando un medidor de temperatura máxima y mínima o un sistema central de medición computarizado.

5.1.1 Control del Calibrador de Radionúcleidos “ Activímetro”.

Se deben realizar controles de calidad diarios para garantizar un rendimiento óptimo. Los calibradores de radionucleidos deben calibrarse periódicamente con radionucleidos trazables a los estándares nacionales. Se deben realizar controles de linealidad trimestrales de la respuesta del calibrador de dosis en todo el rango de actividades medidas. Todos los procedimientos deben realizarse como se describe en el procedimiento operativo estándar.

La consistencia del calibrador de radionúclidos debe comprobarse diariamente utilizando un radionúclido de larga duración, como el ^{137}Cs . Esto se hace mediante una comprobación de fondo (sin fuente en el calibrador) y una comprobación de voltaje. La fuente de ^{137}Cs se utiliza luego para realizar la comprobación diaria de la consistencia mediante la lectura de la actividad en cada configuración de radionúclido individual del calibrador de dosis. Es una buena práctica realizar una comprobación anual de la linealidad utilizando una gama de radionúclidos y cantidades de actividades utilizadas clínicamente.

5.2. Generador y eluato del generador

En la primera elución se deben realizar pruebas de pureza de radionúclidos y una prueba de ruptura de ^{99}Mo para el generador. La esterilidad, el pH, la pureza radioquímica y la contaminación por iones de aluminio del eluato del generador también se deben probar al menos en el primer y el último eluato. Los generadores con una vida útil más larga requieren estas pruebas con mayor frecuencia.

5.3. Radiofármacos

El Control de Calidad de Radiofármacos constituye una parte de las Buenas Prácticas Radiofarmacéuticas (BPR), que resulta de la combinación de las Buenas Prácticas de Fabricación y Control (BPFyC) de medicamentos y las Normas de Protección Radiológica que aplicarán en este caso por tratarse de radiofármaco y deben cumplir las características de calidad detalladas en la tabla 1.

El control de calidad implica evaluar por medio de tests o mediciones estas características

Tabla1. Características de calidad de los Radiofármacos

CONTROLES FISICOQUÍMICOS	CONTROLES BIOLÓGICOS	OTROS
Pureza radionucleídica	Esterilidad	Estabilidad
Pureza radioquímica	Ausencia de pirogénos	Rotulado
Pureza química	Toxicidad	Almacenamiento
Aspecto y pH	Biodistribución	Período de vida útil
Actividad específica y concentración de actividad		

Fuente: Elaboración propia

Para los radiofármacos elaborados en la radiofarmacia hospitalaria a partir de kits de reactivos que se elaboran a partir de componentes: generador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ y juegos de reactivos fríos para marcar se establecen dos categorías:

- Radiofármacos listos para usar: son radiofármacos de tipo radionucleído primario, o de tipo compuesto marcado cuyas reacciones químicas de obtención resultan complejas. En este grupo tenemos a todos aquellos radiofármacos que no están marcados con $^{99\text{m}}\text{Tc}$, como por ejemplo todos los radiofármacos de PET, todos los radiofármacos marcados con ^{131}I o ^{123}I , ^{67}Ga , ^{111}In y todos aquellos utilizados en terapia.
- Radiofármacos para elaborar a partir de juegos de reactivos fríos y generadores de radionucleídos: son radiofármacos cuya obtención involucra operaciones sencillas que pueden realizarse en el servicio de medicina nuclear y que hasta el día de hoy agrupa únicamente a los radiofármacos del $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Para que el radiofármaco elaborado a partir de ellos cumpla todas las características y requisitos de calidad mencionados algunas de estas características que deben ser ensayadas por el o la Técnico en Medicina nuclear o el encargado de la radiofarmacia y otras podrían no testear, pero quedaran aseguradas por el ensayo previo del productor. (Tabla 2)

Tabla2. Características de calidad realizadas en el cuarto caliente

ENSAYADAS POR EL TMN	ASEGURADAS POR EL ENSAYO PREVIO DEL PRODUCTOR
Pureza radionucleídica	Tamaño y número de partículas
Pureza radioquímica	Biodistribución y estabilidad
pH y Aspecto	Pureza química y toxicidad
Concentración de actividad	Esterilidad y ausencia de pirogenos
Actividad a administrar	Rotulado, almacenamiento, periodo de vida útil
TMN: Técnico en Medicina Nuclear	

Fuente: Elaboración Propia

5.3.1 Pureza Radioquímica

La evaluación de la pureza radioquímica de los radiofármacos es un requisito fundamental que debe realizarse en cada primer lote antes de su administración al paciente. Existen diversos métodos validados para este control, entre los cuales destacan la cromatografía en capa fina ascendente y la extracción por solvente.

Entre los métodos disponibles, la cromatografía en capa fina es generalmente el más aceptado para la evaluación rutinaria de la pureza radioquímica (PRQ). La Tabla 3 presenta algunos de los sistemas cromatográficos más comúnmente utilizados en la determinación de la pureza radioquímica de los radiofármacos.

Tabla2. Sistemas cromatográficos comunes para la evaluación de la pureza radioquímica y valores de Rf

RADIOFÁRMACO	FASE ESTACIONARIA	FASE MÓVIL	RF RHC	RF TCO4	RF 99MTC - UNIDO
99mTc-Pertecnetato	ITLC-SG	0,9% de NaCl	0.0	1.0	-
99mTc-MDP	N° 1	Acetona	0.0	1.0	0.0
	ITLC-SG	1M Acetato de Sodio o 0,9%NaCl	0.0	1.0	1.0
99mTc-DTPA	N° 1	Acetona	0.0	1.0	0.0
	ITLC-SG	0,9% de NaCl	0.0	1.0	1.0
99mTc-DMSA	N° 1	Acetona	0.0	1.0	0.0
99mTc-MAA	ITLC-SG	0,9% de NaCl	0.0	1.0	0.0

RADIOFÁRMACO	FASE ESTACIONARIA	FASE MÓVIL	RF RHC	RF TCO4	RF 99MTC - UNIDO
99mTc-DISIDA	ITLC-SG	0,9% de NaCl	0.0	1.0	1.0
	ITLC-SA	20% de NaCl	0.0	1.0	0.0

Nota:

Fases estacionarias

ITLC-SG: Cromatografía instantánea en capa fina, gel de sílice.

ITLC-SA: Cromatografía instantánea en capa fina, ácido silícico (ácido polisilícico).

No. 1: Papel para cromatografía Whatman No. 1.

Fases móviles:

0,9% NaCl: solución de cloruro de sodio al 0,9% (solución salina normal).

Se puede preparar acetato de sodio 1 M con 82 mg/ml de acetato de sodio anhidro o 136 mg/ml de acetato de sodio trihidrato.

Terminología:

Rf: frente relativo.

1.0: frente.

0.0: origen.

RHC: coloides hidrolizados reducidos

Fuente: IAEA, *Guía operacional para la radiofarmacia hospitalaria*, pág. 36.

5.4 Monitoreo de Radiación

El monitoreo de radiación debe realizarse al menos dos veces al día o después de cada procedimiento de alta actividad, utilizando un medidor de inspección de área. Además, es obligatorio realizar controles de contaminación en las manos y los pies del operador, así como el uso de dispositivos de monitoreo personal, tales como placas de película, dosímetros de dedo y dosímetros de bolsillo, para evaluar la exposición a la radiación y garantizar el cumplimiento de los límites de dosis ocupacionales.

5.5 Mantenimiento de Registros

La documentación de todos los procedimientos es fundamental para asegurar la trazabilidad y facilitar auditorías en el ámbito de la radiofarmacia hospitalaria.

El Manual de Procedimientos debe contener los siguientes protocolos:

1. Procedimiento de recepción de radiofármacos.
2. Procedimiento de manipulación y fraccionamiento de radiofármacos.
3. Procedimiento de uso del equipamiento.
4. Procedimiento para la disposición de residuos radiactivos.
5. Procedimiento para el control de dosis y alta de pacientes.
6. Procedimiento de monitoreo de radiación y control del personal.
7. Procedimiento de protección radiológica para trabajadoras embarazadas (TOE).

8. Procedimiento de control de calidad del equipamiento de la instalación (frecuencia: diaria, semanal, mensual, semestral y anual).
9. Procedimiento de calibración del equipamiento de la instalación.
10. Procedimiento de mantenimiento del equipamiento de la instalación.

Este manual debe estar accesible para todo el personal de la instalación y servir como referencia constante en las operaciones diarias dentro del servicio de medicina nuclear. Asimismo, debe contar con la firma y aprobación de las autoridades competentes para garantizar su validez y cumplimiento normativo.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la práctica de la radiofarmacia hospitalaria, el cumplimiento de normativas y la implementación de sistemas de control de calidad son esenciales para garantizar la seguridad y efectividad de los radiofármacos. En este sentido, en el Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia Santa Cruz, se han llevado a cabo diversas evaluaciones enmarcadas dentro de los protocolos establecidos para asegurar la calidad de los radiofármacos utilizados en procedimientos clínicos.

Uno de los aspectos clave en este control es la infraestructura de la instalación, donde se cuenta con un “cuarto caliente” que cumple con los requisitos de blindaje radiológico y dispone de áreas de almacenamiento seguras. Además, los procesos de recepción de generadores y el radiomarcado de kits se han realizado bajo estrictos protocolos estandarizados, minimizando errores operacionales y reduciendo la exposición innecesaria a la radiación.

Dentro de los controles de calidad realizados, se ha dado especial énfasis a la verificación de la pureza radioquímica y del pH de los radiofármacos, garantizando su seguridad y eficacia antes de su administración en pacientes. Específicamente, se han venido realizando controles de pureza radioquímica mediante cromatografía en los radiofármacos ^{99m}Tc -MDP, ^{99m}Tc -DTPA, ^{99m}Tc -libre y ^{99m}Tc -MAA, siempre que se dispusiera de los solventes necesarios para llevar a cabo el análisis conforme a técnicas validadas. En todos los ensayos, estos controles fueron satisfactorios, evidenciando mejoras continuas en cada procedimiento. Asimismo, la evaluación del ^{99m}Tc -sestamibi mediante el método de extracción por solvente arrojó los resultados esperados, lo que confirma la fiabilidad del procedimiento implementado.

El éxito en estas pruebas de calidad depende de una serie de factores previos fundamentales, tales como:

- La correcta recepción y almacenamiento del kit radiofarmacéutico.
- El control del pH y del aspecto del radiofármaco antes de su uso.
- La adecuada preparación de los volúmenes y actividades de acuerdo con los prospectos de los fabricantes.
- La aplicación rigurosa de buenas prácticas radiofarmacéuticas y un proceso de marcación preciso.

Estos aspectos son críticos para asegurar la calidad del radiofármaco final, ya que el

control de pureza radioquímica permite detectar impurezas que pudieran haberse generado durante la preparación del radiofármaco. Si dichas impurezas superan los límites permitidos, pueden provocar:

- Alteraciones en la imagen diagnóstica, comprometiendo la validez del estudio.
- Distribución en órganos no objetivo, lo que conlleva una dosis de radiación innecesaria para el paciente, siendo especialmente preocupante en radiofármacos terapéuticos.

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de controles estrictos y la optimización de los procedimientos han permitido asegurar la calidad, seguridad y efectividad de los radiofármacos utilizados en la institución. Sin embargo, la disponibilidad de insumos, la capacitación continua del personal y la optimización de las técnicas utilizadas siguen siendo aspectos clave para mejorar aún más la eficiencia de la radiofarmacia hospitalaria.

7. CONCLUSIÓN

La radiofarmacia hospitalaria desempeña un papel fundamental en la producción y control de calidad de los radiofármacos, garantizando su seguridad y eficacia en aplicaciones clínicas. La correcta clasificación de los radiofármacos según su método de elaboración permite optimizar su producción y uso, destacando la importancia de los kits de reactivos y generadores de radionucleídos para la obtención de radiofármacos de uso inmediato en medicina nuclear.

El cumplimiento de estrictos parámetros de calidad es esencial para evitar efectos adversos y asegurar que el radiofármaco cumpla su función diagnóstica o terapéutica. Factores como la pureza radionucleídica, la estabilidad, la biodistribución y la esterilidad deben ser evaluados de manera rigurosa, ya sea en el laboratorio de radiofarmacia o mediante ensayos previos del fabricante.

Finalmente, la continua investigación en nuevos radionucleídos y métodos de marcación abre oportunidades para el desarrollo de radiofármacos más eficientes y específicos, mejorando así la precisión diagnóstica y la efectividad de los tratamientos en medicina nuclear.

8. REFERENCIAS:

- Asociación Latinoamericana de Sociedades de Biología y Medicina Nuclear (ALASBIMN). (1986). Manual de control de calidad de radiofármacos. Montevideo, Uruguay.
- Farmacopea Argentina. Preparaciones radiofarmacéuticas (7ª ed.).
- Farmacopea Argentina. Monografía 99mTc pertecnecio (7ª ed.).
- IAEA. (2008). Guía operacional para la radiofarmacia hospitalaria. Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Laboratorio de Radioisótopos, Facultad de Farmacia y Bioquímica – UBA. (s.f.). Procedimiento de elución del generador 99Mo/99mTc y control de calidad del eluido. Universidad de Buenos Aires.
- Norma Específica Regulatoria (NER). (2024). Licencia de operación de instalaciones radiológicas área medicina nuclear (p. 13).
- Verdera, E. S., Gómez de Castiglia, S., & Figols de Barboza, M. (s.f.). Control de calidad de radiofármacos. Comité de Radiofarmacia, Asociación Latinoamericana de Sociedades de Biología y Medicina Nuclear.

Desarrollo y Aplicación del Sistema de Dosimetría Fricke para el Estudio de la Distribución por Mapeo de Dosis en un Irradiador Industrial Gamma (γ)

Nandy Sharlin Reyes Patton¹, Rocío Griselda Choque², Luis Fernando Cáceres Choque³

Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear
Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

Correo electrónico: ¹nandy6563@gmail.com, ²rchoque@aben.gob.bo, ³lcaceres@aben.gob.bo

RESUMEN

Este estudio desarrolla y evalúa el sistema dosimétrico de Fricke para determinar la distribución de dosis en irradiadores industriales gamma. Se realizaron cuatro pruebas: evaluación inicial del sistema, irradiación en grupo, identificación del punto de inflexión y un mapeo de dosis en irradiadores industriales. Los resultados mostraron que la dosis absorbida experimental correlaciona con valores teóricos dentro del rango de trabajo establecido (20-400 Gy), identificando un punto de inflexión a 450 Gy. La comparación entre viales de vidrio y plástico confirmó que ambos son adecuados para mediciones precisas. El mapeo de dosis reveló variaciones significativas entre regiones, destacando la necesidad de optimizar la uniformidad del irradiador. Los dosímetros irradiados mostraron estabilidad química durante al menos una semana bajo condiciones controladas, lo que valida su aplicabilidad en el sector industrial. Los resultados confirman que el sistema de Fricke es una alternativa económica y confiable para estudios dosimétricos en irradiadores gamma.

Palabras Clave: Dosimetría Fricke, irradiación gamma, mapeo de dosis, estabilidad química, distribución de dosis.

1. INTRODUCCIÓN

La Dosimetría Estándar de Referencia ASTM 1026 (Fricke) consiste en la irradiación de la muestra producto con dosímetros y mapeo dosimétrico dentro de la cámara de irradiación, para determinar la tasa de dosis mínima, la tasa de dosis máxima y la uniformidad de dosis con la finalidad de calcular los tiempos de irradiación para aplicar las dosis deseadas de irradiación comprobadas con dosímetros de rutina y su posterior evaluación.

El sistema dosimétrico Fricke proporciona un medio confiable para medir la dosis absorbida con respecto al agua basándose en un proceso de oxidación de iones ferrosos a iones férricos en solución ácida-acuosa por radiación ionizante. [1]

El sistema dosimétrico de Fricke ofrece una alternativa económica basada en reacciones químicas bien caracterizadas. Este sistema utiliza una solución acuosa de sulfato ferroso

amoniacal y ácido sulfúrico, donde la radiación ionizante induce la oxidación de iones ferrosos (Fe^{2+}) a iones férricos (Fe^{3+}). La concentración de Fe^{3+} formada es directamente proporcional a la dosis absorbida, lo que permite determinar la distribución de dosis en el irradiador. [2]

El objetivo de este trabajo es desarrollar y evaluar la aplicabilidad del sistema de dosimetría Fricke en irradiadores industriales gamma, enfocándose en su capacidad para realizar mapeos precisos de la distribución de dosis, así como en su estabilidad y fiabilidad bajo diferentes condiciones operativas.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Material y equipamiento

La preparación de la solución Fricke se realizó de acuerdo a la Norma ASTM E 1026-04 en los laboratorios de la Dirección de Aplicaciones de Tecnología Nuclear de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear.

Se preparó la solución de H_2SO_4 0,4 M utilizando agua bidestilada, agitando vigorosamente para saturar de aire la solución, se pesaron las cantidades requeridas de cloruro de sodio NaCl (para reducir cualquier efecto adverso debido a trazas de impurezas orgánicas) y sulfato ferroso amoniacal o sal de Mohr $(\text{SO}_4)_2\text{Fe}(\text{NH}_4)_2$ en una balanza de precisión, se disolvieron en una alícuota de solución de H_2SO_4 previamente preparada. Finalmente, se aforó al volumen correspondiente con solución de H_2SO_4 , se almacenó en un recipiente ámbar y se cubrió el matraz con papel de aluminio para evitar su exposición a radiación lumínica. Se comprobó que cumpliera con los límites impuestos por la norma ASTM (absorbancia $< 0,1$), se tomó una muestra de la solución final para medir su absorbancia en un espectrofotómetro (Spectronic Unicam Heñios), equipo calibrado, previamente verificado con procedimientos. [3] [4].

La solución se distribuyó en viales de vidrio y plástico de 20 ml, envueltas en papel aluminio evitando la exposición a la luz. Posteriormente, los dosímetros se irradiaron con rayos gamma de fuente $\text{Co}60$, en el Centro Multipropósito de Irradiación de la ABEN, cubriendo un rango de dosis desde 19 Gy hasta una dosis estimada de 550 Gy, para comprobar su punto de inflexión y límite de uso del dosímetro, debido a que en la norma se indica que su rango de trabajo es de 20 a 400 Gy [5]. Para cada prueba se aparta 5 dosímetros de control para el cálculo de la de la absorbancia neta.

Para la longitud de onda óptima se realizó un barrido espectral de dosímetros irradiados, registrándose el mayor pico en la gráfica Absorbancia vs. Longitud de Onda, a 302 nm.

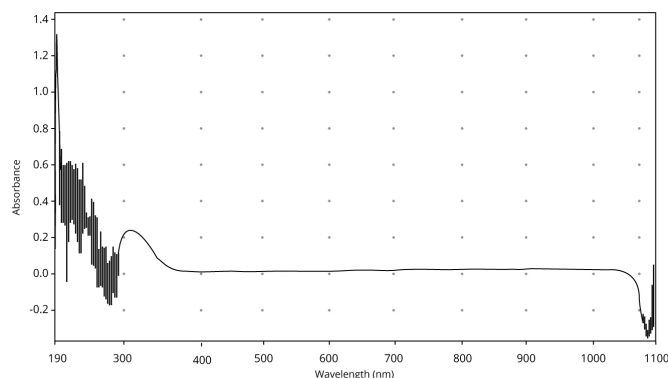


Figura 1: Barrido espectral de un dosímetro irradiado

$$D_F = \frac{\Delta A [1 + 0,0069 (25 - T_{read})] [1 + 0,0012 (25 - T_{irrad})]}{\epsilon_{25} G_{25} \rho d} \quad (1)$$

Donde:

DF = dosis absorbida en la solución (Gy),

ΔA = absorbancia neta a la longitud de onda óptima (302 a 305 nm),

ρ = densidad de la solución dosimétrica, igual a $1,024 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

ϵ = coeficiente de absorción lineal molar de los iones férricos (Fe^{3+}), $\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$, $\epsilon = 219 [\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}]$ (25°C)

G = rendimiento químico de radiación de los iones férricos (Fe^{3+}), $\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$, $G = 1,61 \cdot 10^{-6} [\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}]$. (25°C), y

d = longitud del trayecto óptico de la solución dosimétrica en la cubeta, m.

El valor de ΔA puede calcularse utilizando la ecuación (2)

$$\Delta A = |A - A_0| \dots (2)$$

Donde:

ΔA = absorbancia neta

A = absorbancia del dosímetro irradiado

A_0 = absorbancia media de los dosímetros no irradiados

2.2. Pruebas de irradiación

Primera prueba

En la prueba inicial se evalúa el funcionamiento de los dosímetros de Fricke, preparando 20 dosímetros, de los cuales 15 fueron irradiados y 5 se mantuvieron como blancos. La metodología incluyó la preparación de la solución y los dosímetros, su transporte al Centro Multipropósitos de Irradiación (CMI), la irradiación, el transporte de regreso al laboratorio, las lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro y el cálculo de la dosis absorbida.

Las condiciones experimentales consideraron el uso de un Irradiador Auto blindado IAG, longitudes de onda específicas y temperaturas. Por motivos logísticos, los dosímetros se prepararon un día antes, y las lecturas se priorizaron el mismo día de la irradiación.

Segunda prueba

Se utilizó un diseño experimental 3x3 para evaluar dosímetros irradiados de forma individual y en grupos de tres, con un total de 82 dosímetros preparados a partir de 1000 mL de solución de Fricke. Se realizaron múltiples mediciones de absorbancia en el espectrofotómetro a 302 y 305 nm, incluyendo un barrido espectral inicial para determinar la longitud de onda óptima.

Tercera prueba

En esta prueba, se buscó identificar el punto de inflexión en la curva Dosis vs. Tiempo utilizando intervalos de irradiación más largos y comparar el comportamiento de los dosímetros en viales de vidrio y plástico. Las lecturas de absorbancia se realizaron con un espectrofotómetro optimizado para promediar tres réplicas por medición, sin reutilizar la solución de los dosímetros.

La posición referencial para la primera, segunda y tercera prueba se aprecia en la figura 2.

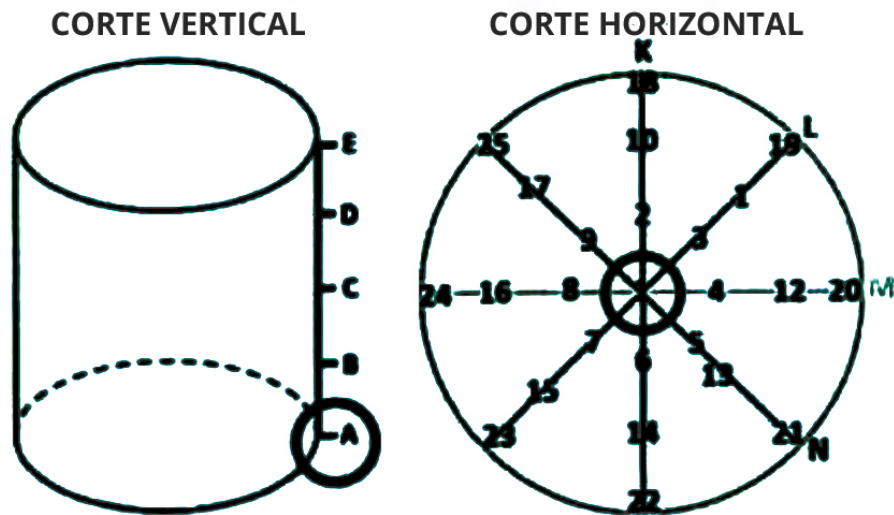


Figura 2: Posición de dosímetros

Cuarta prueba

En esta prueba se realizó un mapeo de radiación utilizando el Irradiador Industrial del Centro Multipropósitos de Irradiación (CMI) para evaluar su funcionamiento y la distribución de radiación.

2.3. Mapeo de Irradiación en Irradiador Industrial IIIG

Para el experimento en el IIIG se replicó la irradiación realizada con los expertos del OIEA en 2023, dosimetría de aire. Con la finalidad de realizar una comparación de resultados, se distribuyeron dosímetros en distintas regiones del irradiador para evaluar la uniformidad de la dosis.



Figura 3: Ubicación de contenedores a ser evaluados, letras resaltadas en azul IIIG

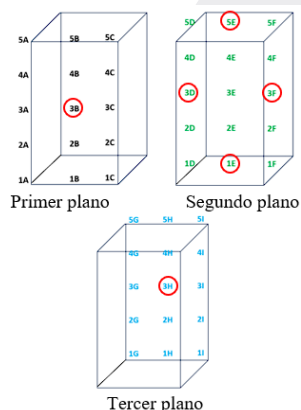


Figura 4: Ubicación de dosímetros dentro del contenedor IIIG

2.4. Evaluación de estabilidad

Los dosímetros irradiados se almacenaron bajo condiciones controladas de temperatura 4 °C y en ausencia de luz. Se realizaron mediciones periódicas de absorbancia periódicamente para evaluar cambios en la concentración de Fe^{3+} .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Primera prueba con estimación de dosis

Con los datos de absorbancia obtenidos de los dosímetros en la primera prueba se calcula la Dosis Absorbida en [Gy] y se comparan con la estimación de dosis por el irradiador autoblandado IAG, mostrado en las tablas 1 y 2, además, se aprecia la comparación en la Figura 4.

Tabla1. Absorbancia y dosis medida en laboratorio

LONGITUD ÓPTIMA = 302 NM		
TIEMPO DE IRRADIACIÓN [S]	DOSIS ABSORBIDA [GY]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
8	9,9319	0,7762
15	17,1172	1,7502
23	24,2415	0,8800
37	38,8078	2,0557
59	60,5140	2,0065

Tabla 2. Datos teórico y experimental de Dosis Absorbida

TIEMPO DE IRRADIACIÓN [S]	DOSIS ABSORBIDA TEÓRICA CALCULADA [GY]	DOSIS EXPERIMENTAL [GY]
8	28,50	9,9319
15	37,75	17,1172
23	46,85	24,2415
37	65,00	38,8078
59	87,20	60,514

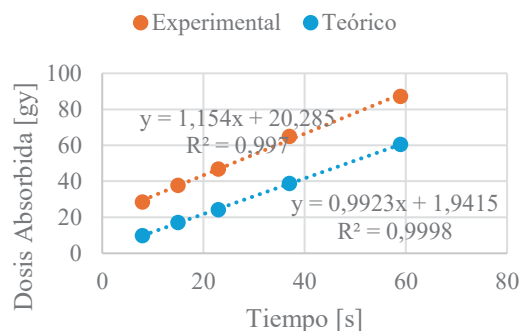


Figura 5: Comparación Teórico – Experimental Dosimetría de Fricke

El comportamiento inicial del sistema mediante la irradiación de dosímetros de forma individual, indica una discrepancia significativa entre la dosis absorbida experimental y la dosis teórica estimada en tiempos cortos de irradiación, pero esta diferencia se redujo a medida que aumentó el tiempo de exposición. Sin embargo, la correlación general entre ambas mediciones valida la capacidad del sistema para estudios de irradiación gamma.

3.2. Segunda prueba – irradiación en grupo

Este proceso mostró una variación en las dosis absorbidas según el tiempo de irradiación y el método de agrupamiento de los dosímetros, como en la figura 5, los resultados de la Dosis Absorbida se muestran en la tabla 3

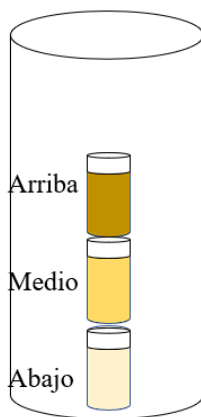


Figura 6: Posición de dosímetros irradiados en grupo

Tabla 3. Resultados de Dosis Absorbida de Dosímetros irradiados en grupo

LONGITUD ÓPTIMA 302 NM				
POSICIÓN	TIEMPO DE IRRADIACIÓN [S]	DOSIS ABSORBIDA [GY]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PORCENTAJE DE IRRADIACIÓN [%]
Arriba	60	81,57	1,90	99,96
Medio	60	81,60	0,85	100,00
Abajo	60	73,48	4,87	90,04
Arriba	120	147,76	8,32	97,22
Medio	120	151,99	4,29	100,00
Abajo	120	133,58	2,57	87,89

LONGITUD ÓPTIMA 302 NM				
POSICIÓN	TIEMPO DE IRRADIACIÓN [S]	DOSIS ABSORBIDA [GY]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PORCENTAJE DE IRRADIACIÓN [%]
Arriba	180	225,93	2,18	98,85
Medio	180	228,56	2,23	100,00
Abajo	180	203,47	1,66	89,02
Arriba	300	362,17	0,50	99,10
Medio	300	365,45	6,15	100,00
Abajo	300	327,48	9,43	89,61

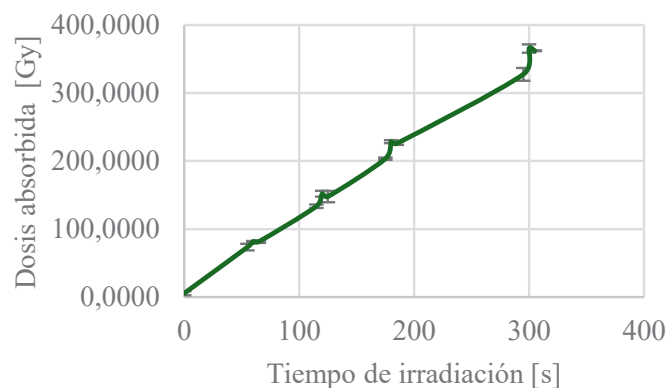


Figura 7: Dosis vs. Tiempo de dosímetro irradiados en grupo

Al irradiar dosímetros en diferentes posiciones dentro de un grupo, se observaron variaciones en las dosis absorbidas. La posición central mostró la dosis más uniforme, mientras que las posiciones periféricas presentaron mayores desviaciones. Esto evidencia la influencia de la geometría del irradiador y su impacto en la uniformidad de la distribución de dosis. Los resultados refuerzan la importancia de un diseño optimizado para garantizar que la irradiación sea homogénea, especialmente en aplicaciones industriales.

3.3. Tercera prueba – identificación del punto de inflexión

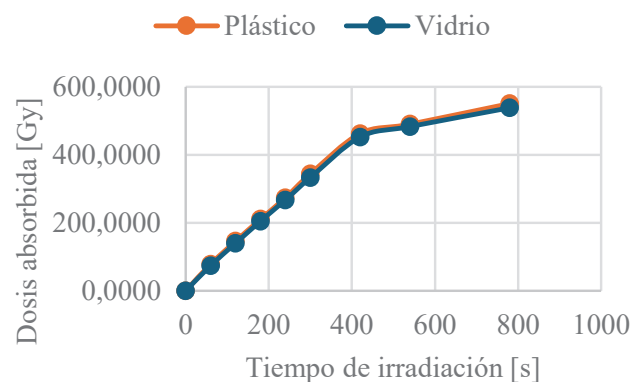


Figura 8: Comparación de Dosis absorbida en Viales de Vidrio y Plástico, y punto de inflexión en la curva.

Los resultados de la tercera prueba mostraron una similitud en la dosis absorbida entre ambos materiales vidrio y plástico, sugiriendo que el tipo de vial no tiene un impacto

significativo en la irradiación. Además, de apreciar una desviación de la curva, a una dosis de 450 [Gy].

La curva Dosis vs. Tiempo permitió identificar un punto de inflexión en aproximadamente 450 Gy, con correlación a los límites especificados por la norma ASTM 1026-04, sin embargo, se comprobó que puede aplicarse hasta 450 Gy. Adicionalmente, el envase plástico es igualmente efectivo, ampliando las posibilidades de elección para futuras aplicaciones, sin comprometer la precisión de los resultados.

3.4. Cuarta prueba – aplicación en el mapeo de distribución de la dosis en Irradiador Industrial Gamma IIIG

En el irradiador industrial se empleó un rango más amplio, limitado entre 33 Gy y 2230 Gy de acuerdo al Estudio Dosimétrico del Irradiador Industrial, a continuación, se presenta los resultados de la distribución de tasa de dosis en el aire dentro de la sala en cuestión de acuerdo a modelado a la fecha de irradiación.

En el IIIG se irradió por 20 minutos en las posiciones indicadas de acuerdo a la figura 3 y 4. La temperatura de exposición de los dosímetros para la prueba se estableció como 23,4°C con dosímetros en frascos de vidrio.

Tabla 4. Resultado de la Dosis Absorbida por Litera

LITERA	PROM.DOSIS ABSORBIDA [GY]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DISTRIBUCIÓN [%]
L16/ Superior	122,723	40,761	31,64
L16/ Inferior	114,311	38,015	29,47
L18/ Superior	387,873	108,353	100,00
L18/ Inferior	386,477	105,710	99,64
L20/ Superior	208,666	79,431	53,80
L20/ Inferior	205,362	87,077	52,95
L23/ Superior	81,867	15,068	21,11
L23/ Inferior	84,180	14,796	21,70
L25/ Superior	155,180	40,562	40,01
L25/ Inferior	158,532	41,706	40,87
L27/ Superior	68,932	11,951	17,77
L27/ Inferior	68,979	11,876	17,78

En la Tabla 4 se ve el promedio de las dosis absorbidas de los 6 dosímetros ubicados como en la Figura 4 en cada litera indicada en la Figura 5, mostrando el porcentaje distribución de la irradiación según la mayor dosis absorbida.

Tabla 5. Resultado de la Dosis Absorbida por Posición en Literas

POSICIÓN	PROM.DOSIS ABSORBIDA [GY]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DISTRIBUCIÓN [%]
Litera superior			
5E	102,575	53,930	44,46
1E	190,186	142,960	82,43
3B	230,732	165,768	100,00
3D	182,509	116,164	79,10
3H	143,316	98,439	62,11
3F	175,923	139,796	76,25
Litera Inferior			
5E	205,913	153,922	82,91
1E	248,351	178,943	100,00
3B	180,617	129,772	72,73
3D	147,900	109,340	59,55
3H	192,561	149,508	77,54
3F	211,688	150,452	85,24

En la Tabla 5 se ve el promedio de las dosis absorbidas según la posición en común ubicada en cada litera, la posición distribuida como en la Figura 4, mostrando el porcentaje distribución de la irradiación según la mayor dosis absorbida, por posición.

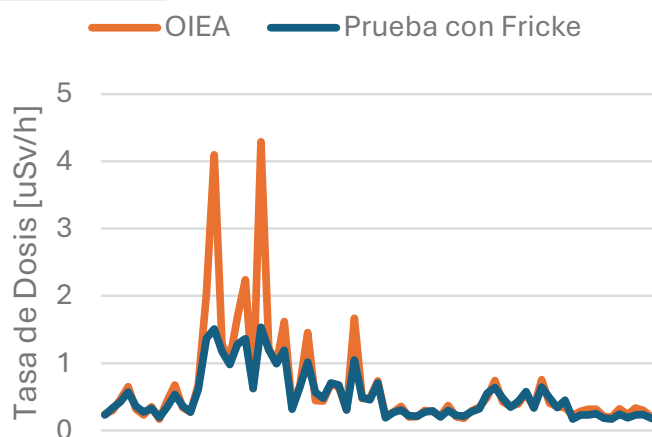


Figura 9: Gráfica de Comparación de Tasa de Dosis Absorbida medida con Fricke y según OEIA

Se realiza el cálculo de la tasa de dosis absorbida de cada dosímetro irradiado en el mapeo. Se realiza una comparación con los resultados del OIEA que fueron ajustados de acuerdo al decaimiento para poder ser comparados. [6]

El mapeo realizado en el irradiador industrial reveló diferencias significativas en las dosis absorbidas entre distintas literas y posiciones dentro de estas. Las regiones centrales y superiores presentaron mejores distribuciones, mientras que las inferiores mostraron menores dosis. Estos resultados reflejan que se debe ajustar el diseño del irradiador para mejorar la uniformidad de la irradiación. Además, la comparación con los resultados del OIEA confirmó la confiabilidad del sistema dosimétrico de Fricke como herramienta para mapeos de dosis.

3.5. Estabilidad de dosímetros post-irradiación

Las mediciones de estabilidad indicaron que no hubo cambios significativos en la absorbancia durante el periodo de evaluación, confirmando que las condiciones de almacenamiento propuestas son adecuadas. La oxidación de la solución de Fricke en el tiempo no fue significativa en los dosímetros no irradiados e irradiados, por tanto, se aprecia una estabilidad de al menos una semana.

3.6. Análisis ANOVA de resultados

Dentro de los resultados obtenidos de los experimentos mencionados, se realizó un análisis ANOVA a partir de las variables respuesta, para ver la significancia y el efecto que tiene los resultados con los parámetros controlados. Estos se dividieron en tres bloques de experimentos:

a. Análisis por efecto del tiempo de análisis y dosis absorbida

Las variables utilizadas en este experimento son tiempo de Análisis (tiempo en el que se demora en analizar las muestras irradiadas) y la dosis de irradiación estimada, teniendo como respuesta la dosis absorbida en el dosímetro Fricke. En la siguiente figura y tabla se muestra el análisis ANOVA de la segunda prueba.

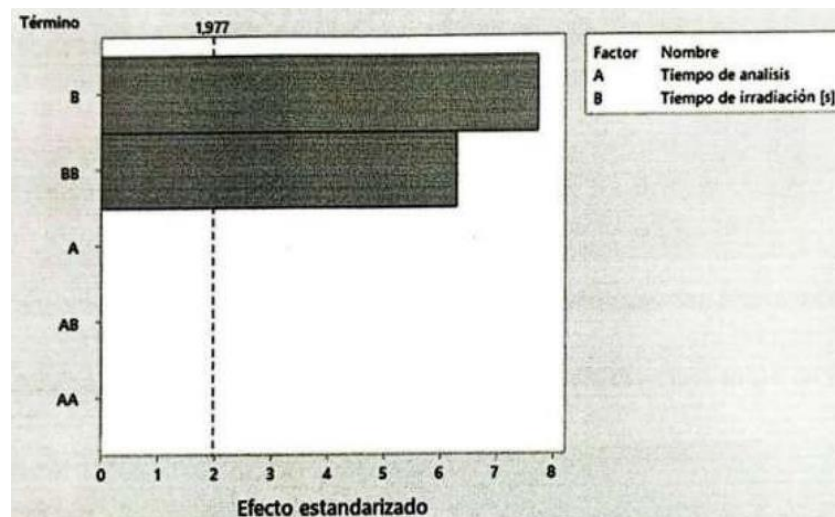


Figura 10: Diagrama de Pareto de tiempo de análisis y tiempo de irradiación

Tabla 6. ANOVA de Tiempo de Análisis y Dosis Absorbida

FUENTE	GL	SC AJUST.	MC AJUST.	VALOR F	VALOR P
Modelo	5	929,00	185,800	18,19	0,000
Lineal	2	613,00	306,498	30,00	0,000
Tiempo de análisis	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Tiempo de irradiación [s]	1	612,52	612,516	59,96	0,000
Cuadrado	2	405,20	202,598	19,83	0,000
Tiempo de análisis	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Tiempo de irradiación[s]	1	405,20	405,195	39,66	0,000
Interacción de 2 factores	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Tiempo de análisis*Tiempo de irradiación[s]	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Error	138	1409,74	10,216		
Falta de ajuste	10	2,01	0,201	0,02	1,000
Error puro	128	1407,73	10,998		
Total	143	2338,74			

Dentro de los resultados de nivel de significancia indica que el tiempo de análisis de los dosímetros Fricke no son significativos. Sin embargo, el tiempo de irradiación de los dosímetros si es significativo, por lo que la dosis absorbida por el dosímetro tiene efecto al tiempo de irradiación. En la Fig. 10 se muestra el diagrama de Pareto dónde indica el efecto del tiempo de irradiación y el tiempo de análisis.

b. Análisis por nivel de irradiación (3 niveles)

La irradiación de los dosímetros se realizó en tres niveles diferentes. El nivel más bajo, denominado nivel A, se encuentra a una altura de 0 mm en el origen del cilindro, correspondiente al punto 1 de la Figura 2. El segundo nivel, nivel B, está ubicado a una altura de 58 mm, también en el origen del cilindro y en el punto 1 de la Figura 2. Finalmente, el tercer dosímetro se encuentra a una altura de 116 mm, en el mismo punto de referencia. A continuación, en la Tabla 7, se presenta el análisis ANOVA para evaluar el efecto de la irradiación en los diferentes niveles.

Tabla 7. ANOVA de Niveles de irradiación a dosímetros

FUENTE	GL	SC AJUST.	MC AJUST.	VALOR F	VALOR P
Factor	2	131,53	65,765	7,03	0,027
Error	6	56,09	9,349		
Total	8	187,62			

Los niveles no son significativos considerando valor el P value de los resultados, sin embargo, una desviación en el nivel 1 tal como se observa en la siguiente figura.

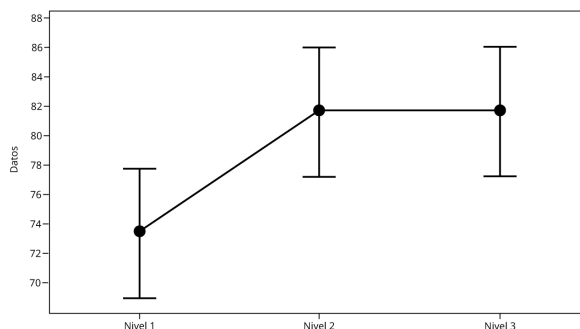


Figura 11: Gráfica de Intervalos de Nivel

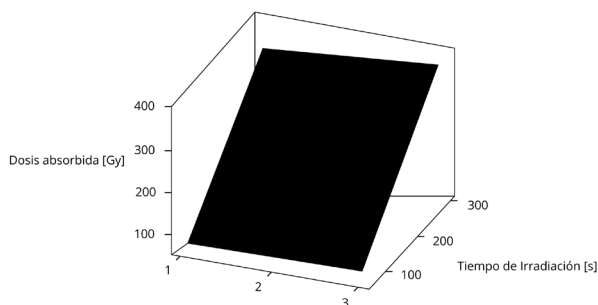


Figura 12: Gráfica de superficie de respuesta de Dosis absorbida en función al nivel y tiempo de irradiación.

En el gráfico se muestra la significancia del tiempo de irradiación con la variable respuesta que es la dosis absorbida.

c. Análisis por material utilizado en el dosímetro Fricke (Vidrio y Plástico)

Así mismo, cómo parte de los experimentos realizados para los dosímetros Fricke, se comparó la respuesta de los dosímetros en frascos de vidrio y plástico, a continuación, se muestra la tabla de resultados del análisis ANOVA, comprando la utilización de estos dos materiales.

Tabla 8. ANOVA de materiales utilizados para dosímetros Fricke

FUENTE	GL	SC AJUST.	MC AJUST.	VALOR F	VALOR P
Factor	1	251	251,0	0,01	0,927
Error	14	405970	28997,8		
Total	15	406221			

Con el análisis ANOVA, se identifica que la utilización de estos materiales no tiene significancia con la dosis absorbida; a continuación, se muestra una comparación de medias.

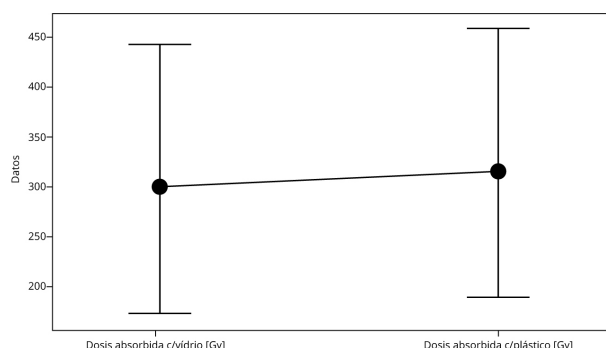


Figura 13: Gráfica de intervalos de dosis absorbida utilizando frasco de vidrio y plástico.

En el gráfico se identifica que las utilizations de estos dos materiales no tienen significancia, es decir, que para posteriores experimentos pueden utilizarse cualquiera de estos dos materiales.

Adicionalmente, se calcularon las medias, Desviaciones estándar y Coeficiente de varianza por los resultados obtenidos de las 9 muestras obtenidas por cada tiempo de irradiación, los resultados se presentan a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9. ANOVA de materiales utilizados para dosímetros Fricke

λ [nm]	Tiempo irradiación [s]	Media	Desviación estándar	CV (%)
Abs. (302 nm)	60	60,85	2,20	1,6
	120	131,35	2,20	1,7
	180	190,97	5,79	3,0
	300	311,88	3,30	1,1
Abs. (305 nm)	60	61,14	1,02	1,7
	120	130,80	2,22	1,7
	180	191,24	5,81	3,0
		311,79	3,54	1,1

Se puede apreciar los promedios (media) de 9 ítems irradiados por cada tiempo de irradiación, así mismo la desviación estándar que permite conocer la dispersión de los datos alrededor de la media y el coeficiente de variación en porcentaje para conocer la dispersión relativa entre diferentes conjuntos de datos.

4. CONCLUSIONES

El sistema dosimétrico de Fricke demostró ser confiable, aunque las diferencias iniciales resaltan la importancia de controlar las condiciones experimentales. Las variaciones en la distribución de dosis dentro de un grupo destacan la influencia de la posición de los dosímetros y la geometría del irradiador. Estos hallazgos subrayan que se debe optimizar la configuración espacial para garantizar una irradiación más uniforme.

El sistema demostró precisión dentro del rango de dosis especificado por la norma ASTM 1026-04, identificando correctamente el punto de inflexión hasta 450[Gy] con tiempo de irradiación de 420[s]. Además, la equivalencia en el desempeño entre viales de vidrio y plástico proporciona flexibilidad para futuras aplicaciones. El mapeo de dosis permitió identificar variaciones significativas en la distribución de radiación, lo que resalta la necesidad de optimizar el diseño del irradiador. La comparación con los datos del OIEA valida la precisión y fiabilidad del sistema dosimétrico de Fricke para estudios industriales.

Los resultados confirman que la dosimetría de Fricke es una alternativa viable al sistema dosimétrico del CMI en el IAG y IIIG, demostrando alta reproducibilidad y precisión en el rango de 20 a 400 Gy, según la norma ASTM E1026-04e1. La distribución de dosis resalta la influencia de la posición y geometría del irradiador, subrayando la necesidad de optimizar la configuración espacial. La equivalencia entre viales de vidrio y plástico amplía sus aplicaciones, y su validación con datos del OIEA refuerza su confiabilidad. Además, se propone la implementación del sistema dosimétrico de dicromato de plata para medir dosis superiores a 2 kGy en irradiación industrial.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la recolección de datos experimentales para optimizar y validar el método, considerando mediciones en tiempos definidos tras la irradiación para evaluar posibles factores de corrección. Se sugiere realizar lecturas inmediatamente después y a intervalos regulares durante 24 horas, además de identificar parámetros que puedan influir en la lectura dosimétrica. Para garantizar la trazabilidad, se recomienda irradiar dosímetros de alanina para construir curvas de calibración.

6. REFERENCIAS

- [1] Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). "Dosimetría de alta dosis." [Online]. Available: <https://www.ipen.gob.pe/index.php/servicios/industria-e-ingenieria/dosimetria-de-alta-dosis#:~:text=El%20sistema%20dosim%C3%A9trico%20Fricke%20proporciona,%C3%A1cida%2Dacuosa%20por%20radiaci%C3%B3n%20ionizante.>
- [2] Gómez, J. P. (2013) "Diseño de un Modelo Digital en el Programa MCNP para la Simulación de la Dosimetría de la Fuente de Cobalto-60 de la EPN y Validación del Modelo mediante Dosimetría Fricke" (Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional).
- [3] F. S. Martínez Osorio and I. de los A. Pérez Espinoza, Calibración de un Espectrofotómetro UV/Vis y Evaluación de la Incertidumbre, tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-León), Departamento de Química, Nicaragua, noviembre 2009.
- [4] L. F. Cáceres Choque, Términos químicos ambientales y nucleares. La Paz, Bolivia, pp. 212-214, agosto 2022.
- [5] ASTM E 1026-04 Standard Practice for Using the Fricke Reference-Standard Dosimetry System (2004).
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA). "Use of Chlorobenzene Dosimetry Systems for Radiation Processing," [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1578_S_web.pdf.
- [7] Agencia Boliviana de Energía Nuclear. (2024). Centro Multipropósito de Irradiación: Reporte de pasantía - Integración de métodos determinísticos y de Monte Carlo en el estudio dosimétrico del irradiador industrial. Autor: Elmer Efraín Alanoca Condori.

Reactores Nucleares Modulares Pequeños (SMR) y su rol en la transición energética

Marco Augusto Herbas López*

Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear - UMPR

Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: mherbas@aben.gob.bo

RESUMEN

La transición energética global requiere fuentes de generación confiables, bajas en emisiones de carbono y económicamente viables. En este contexto, los Reactores Nucleares Modulares Pequeños (SMR, por sus siglas en inglés) han surgido como una alternativa innovadora, ofreciendo ventajas significativas en términos de seguridad, flexibilidad y reducción de costos de capital. Su diseño modular permite una construcción más rápida y escalable, facilitando su implementación en regiones con menor infraestructura energética y diversificando la matriz de generación eléctrica.

Se presenta un análisis comparativo de los SMR con otras tecnologías de generación limpia, incluyendo energía solar fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica. Se evaluaron criterios técnicos, considerando variables como el factor de capacidad y emisiones de carbono en el ciclo de vida. Además, se exploró la complementariedad de los SMR con energías renovables intermitentes, destacando su capacidad para suministrar carga base confiable, equilibrar la variabilidad de fuentes como la solar y la eólica, y optimizar el uso de la infraestructura eléctrica existente.

Los resultados indican que los SMR presentan un factor de capacidad superior al de las renovables intermitentes, lo que los convierte en una opción viable para garantizar la estabilidad de los sistemas eléctricos con alta penetración de energías limpias. Desde el punto de vista ambiental, los SMR generan cero emisiones directas de CO₂ y su ciclo de vida presenta una huella de carbono inferior a la de las centrales térmicas de combustibles fósiles.

Si bien los SMR representan una tecnología prometedora, su adopción enfrenta desafíos clave, como la necesidad de marcos regulatorios adecuados, aceptación pública y estrategias de financiamiento competitivas. A pesar de estos retos, la combinación de SMR con energías renovables podría acelerar la transición energética, proporcionando una solución escalable y sostenible para la descarbonización de la generación eléctrica.

Los SMR desempeñarán un papel fundamental en la transición hacia un sistema energético más limpio y resiliente. Además de complementar a las fuentes renovables al proporcionar estabilidad en la generación de energía, también representan una alternativa viable para reducir la dependencia de combustibles fósiles en sectores industriales y regiones aisladas. Para maximizar su impacto, es importante el desarrollo de políticas públicas y esquemas de financiamiento que favorezcan su implementación en el corto y mediano plazo.

Palabras claves: Transición energética, Reactor Modular Pequeño, Generación Nuclear, Descarbonización.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la transición hacia sistemas y fuentes de generación libres de emisiones de gases de efecto invernadero se ha convertido en prioridad nacional en muchos países, mismos que suscribieron acuerdos internacionales para la reducción de emisiones como es el caso del Acuerdo de París. La búsqueda de alternativas energéticas libres de emisiones, de alta eficiencia y seguridad es vital para garantizar el desarrollo sostenible.

La energía nuclear es una de las alternativas que más promete en la mitigación del cambio climático. A pesar de que su implementación ha sido objeto de debate, es una fuente de generación libre de emisiones de CO₂ y capaz de suministrar electricidad de manera continua.

2. TRANSICIÓN ENERGÉTICA

En el año 2023, las emisiones totales a nivel mundial fueron de 37.790 millones de toneladas de CO₂ (Global Carbon Project & Our World In Data, 2025), se observa en la Figura 1 que a partir de la revolución industrial las emisiones anuales siguen una tendencia de crecimiento constante quitando algunas excepciones como la pandemia en el año 2020. A nivel mundial, las regiones que más emiten son Asia, América del Norte y Europa.

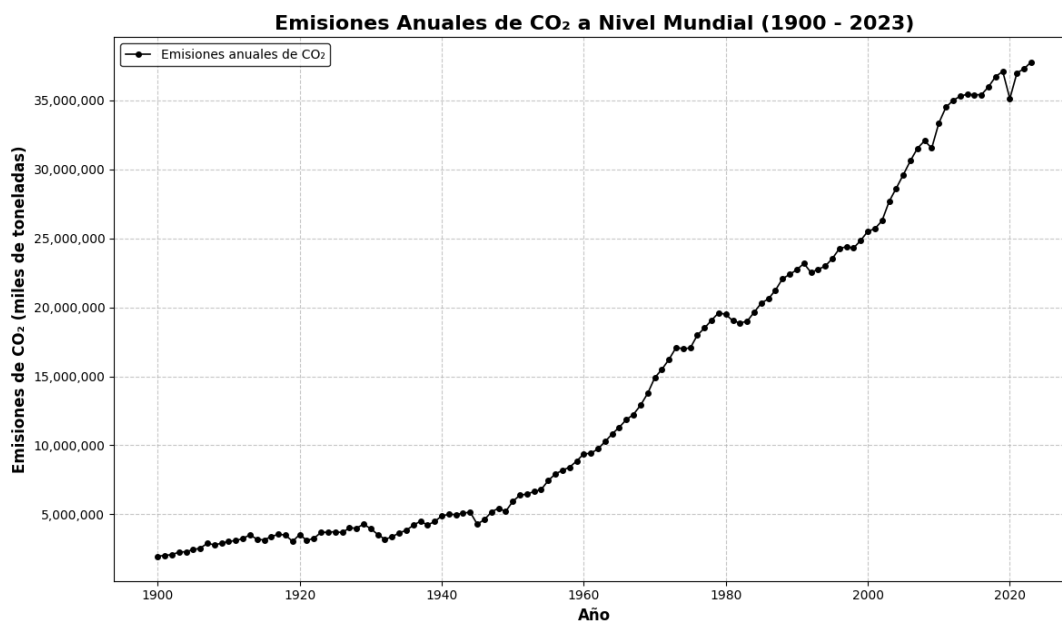


Figura 1. Emisiones anuales de CO₂ a nivel mundial. Fuente: (Global Carbon Project & Our World In Data, 2025)

La tendencia creciente de las emisiones de CO₂ ha generado un aumento en la temperatura global, como se observa en la Figura 2. Este calentamiento global ha impulsado la búsqueda de tecnologías de generación limpia capaces de sustituir las fuentes fósiles sin comprometer la estabilidad del suministro eléctrico. Dentro de este contexto, la energía nuclear ha sido reconocida como una solución clave en la lucha contra el cambio climático, particularmente a través de los SMR, como se discutirá a continuación.

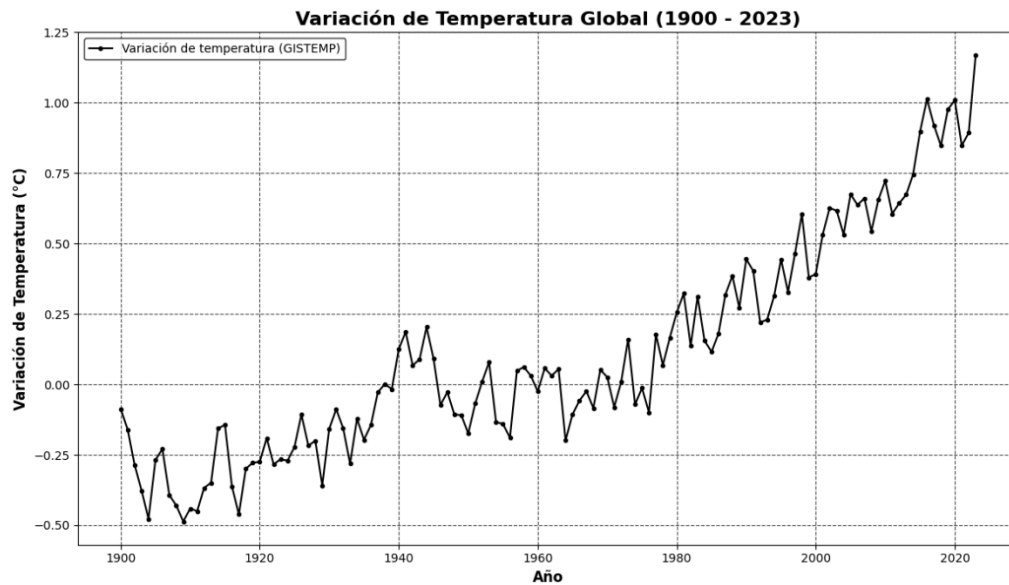


Figura 2: Variación de la temperatura respecto al promedio previo a la revolución industrial. Fuente: Elaboración propia a partir de (NASA, 2025)

Con objeto de mitigar los efectos del cambio climático, gran parte de los países del mundo suscribieron acuerdos y compromisos para la reducción de emisiones, entre ellos se encuentra el Acuerdo de París mencionado anteriormente cuyo objetivo es limitar el incremento promedio de la temperatura global hasta 2 grados centígrados por encima de los valores promedio previos a la revolución industrial (United Nations Climate Change, n.d.). Por otro lado, la COP28 (Conferencia de Partes), celebrada en Dubái estableció formalmente a la energía nuclear como una de las soluciones para cumplir con los compromisos del Acuerdo de París (NEA, 2023), en el que 22 países lanzaron la declaración para triplicar la capacidad nuclear hasta el año 2050, reconociendo el rol fundamental de esta tecnología para la descarbonización de la matriz energética mundial. En el año 2024, durante la COP29, 6 países más se unieron a esta declaración.

3. ENERGÍA NUCLEAR EN EL MUNDO

Hoy en día existen 417 reactores nucleares de potencia (RNP) en operación a nivel mundial en más de 30 países con una potencia instalada de más de 377,000 MWe; 23 RNP se encuentran inoperativos y 62 están en etapa de construcción, la experiencia combinada mundial en la operación de este tipo de reactores supera los 20,000 años de operación (IAEA, 2025b). El año 1954 se conectó el primer RNP a la red eléctrica, la central nuclear Obninsk en la Unión Soviética, a partir de ese año y hasta la fecha los reactores nucleares en operación producen energía eléctrica continua y libre de emisiones.

Actualmente, la generación nucleoelectrónica representa aproximadamente el 10% de la electricidad generada a nivel mundial (Wiatros-Motyka et al., 2024), en algunos países como Francia, Ucrania o Eslovaquia la generación nuclear representa más del 50% de la generación local. En la siguiente figura se observan los países que cuentan con RNP en operación.

Países con reactores nucleares en operación

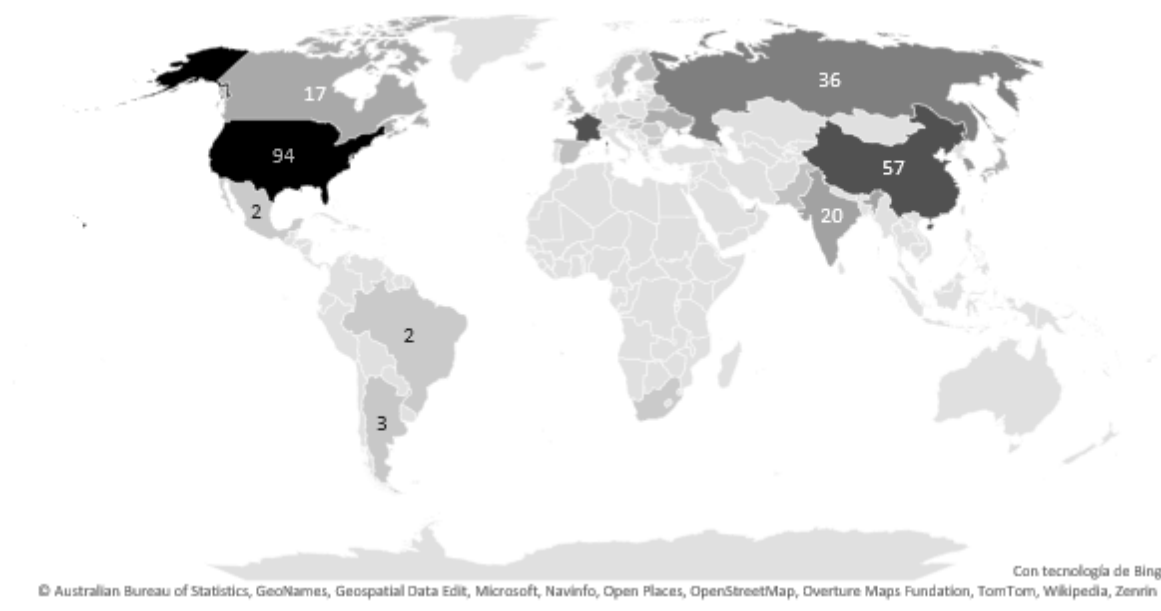


Figura 3: Países con reactores nucleares en operación. Fuente: Adaptado de (OIEA, 2023)

A pesar de que la energía nuclear fue reconocida como una alternativa, el alto costo inicial de implementación de reactores nucleares de potencia, retos en seguridad y regulación y la aceptación pública, han limitado la construcción de más centrales nucleares en diferentes regiones del mundo. En respuesta a estos desafíos, surge una nueva tendencia en la industria nuclear, los Reactores Modulares Pequeños o en inglés Small Modular Reactors (SMR) como una alternativa innovadora gracias a su diseño compacto y modular que permite reducir costos de construcción, simplificar la operación y mejorar la seguridad.

4. REACTORES MODULARES PEQUEÑOS (SMR)

El OIEA define a un SMR como “Reactores avanzados con una potencia instalada de hasta 300 MWe por módulo capaces de producir una gran cantidad de electricidad” (IAEA, 2023), el acrónimo viene de:

- Pequeños: Representan una fracción de la potencia instalada de un reactor nuclear convencional (RNP).
- Modular: Hace que sea posible preensamblar los SMR en fábrica antes de ser enviados a su sitio de emplazamiento.
- Reactor: Reactores nucleares que emplean el principio de fisión para la producción de electricidad.

Existen dos tipos de aplicaciones principales de los SMR:

- Eléctricas.
- No eléctricas.

La primera consiste en la producción de electricidad como se mencionó anteriormente, mientras que la segunda está enfocada en aplicaciones de cogeneración como la

desalinización de agua, producción de hidrógeno rosa y provisión de calor para procesos industriales o calefacción urbana.

Puesto que los SMR tienen menor capacidad respecto a los reactores convencionales, el capital inicial requerido es menor, asimismo, su menor capacidad los hace compatibles con sistemas eléctricos “pequeños” como los que se encuentran en países en vías de desarrollo o con una población reducida, en este sentido, estos reactores se constituyen en una opción para estos países con objeto de reducir su dependencia de combustibles fósiles.

Además de ofrecer solución en regiones con infraestructura limitada, los SMR facilitan la integración de estrategias de descarbonización, pudiendo ser empleadas para reemplazar de manera gradual centrales termoeléctricas a carbón o gas natural aportando carga base (base load) debido a su elevado factor de planta.

Además de los desafíos implícitos al sector nuclear, uno específico en la implementación de SMR es la regulación, dado que pocos países cuentan con regulación específica para esta tecnología.

Cada dos años, el OIEA publica un documento que presenta el estado de avance del desarrollo de SMRs a nivel mundial, en la siguiente gráfica se muestra el número de diseños en el tiempo, en la última versión (2024) el número de diseños se redujo puesto que el OIEA consideró únicamente los diseños activos (OIEA, 2024).

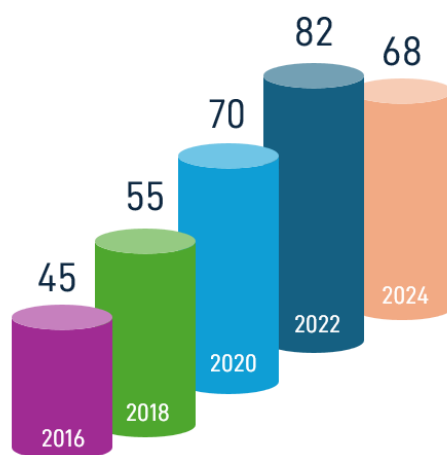


Figura 4: Diseños de SMR en desarrollo. Fuente: Adaptado de (OIEA, 2024)

A raíz de los compromisos suscritos por la mayoría de los países, se inició la implementación de un plan de descarbonización mundial, en el que cada país debe reducir sus emisiones estableciendo como año límite el 2050, en este sentido alrededor de 30 países (Foro Nuclear, 2024) como Argentina, China, Rusia, Francia, Reino Unido o Estados Unidos entre otros se encuentran interesados en implementar SMR con objeto de reducir sus emisiones y proveer fuentes continuas de energía eléctrica. El OIEA a través de proyectos de cooperación y asistencia técnica apoya a estos países para el establecimiento de capacidades técnicas para evaluar la factibilidad de este tipo de reactores.

A medida que se avanza en la implementación de SMR, los esfuerzos globales se centran en optimizar su diseño, reducir costos de producción y establecer marcos regulatorios

más flexibles. Se espera que para 2030 varios países ya cuenten con SMR en operación comercial, consolidándolos como una alternativa viable en la transición energética.

5. METODOLOGÍA

En el presente artículo se adopta un enfoque comparativo entre las diferentes fuentes de generación libres de emisiones, en particular SMRs y renovables (hidráulica, eólica y solar) para evaluar su rol en la descarbonización del sector eléctrico, que representa aproximadamente el 40% del total de emisiones relacionadas a la producción de energía (primaria y secundaria) (World Nuclear Association, 2024a).

Se analizará la complementariedad entre estas tecnologías en términos de factor de capacidad, superficie y materiales requeridos, costos de generación empleando información obtenida de organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA).

6. FUENTES DE GENERACIÓN CONSIDERADAS

Como se mencionó anteriormente se considerarán 4 fuentes de generación:

- Nuclear (SMR).
- Hidráulica.
- Eólica.
- Solar fotovoltaica.

Estas fueron seleccionadas debido a su capacidad de generar electricidad sin emisiones directas durante la fase de operación.

7. ENFOQUE DEL ANÁLISIS

El enfoque empleado consistirá en comparar la generación mediante SMR con las fuentes de generación libres de emisiones, se considerarán los siguientes criterios comparativos:

- Factor de capacidad.
- Superficie requerida.
- Materiales críticos requeridos.
- Huella de carbono.

8. FUENTES DE INFORMACIÓN

Las fuentes de información serán:

- Información publicada por organismos internacionales como el OIEA, IEA e IRENA.
- Datos de proyectos existentes y en desarrollo.
- Artículos científicos y publicaciones.

9. ALCANCE Y LIMITACIONES

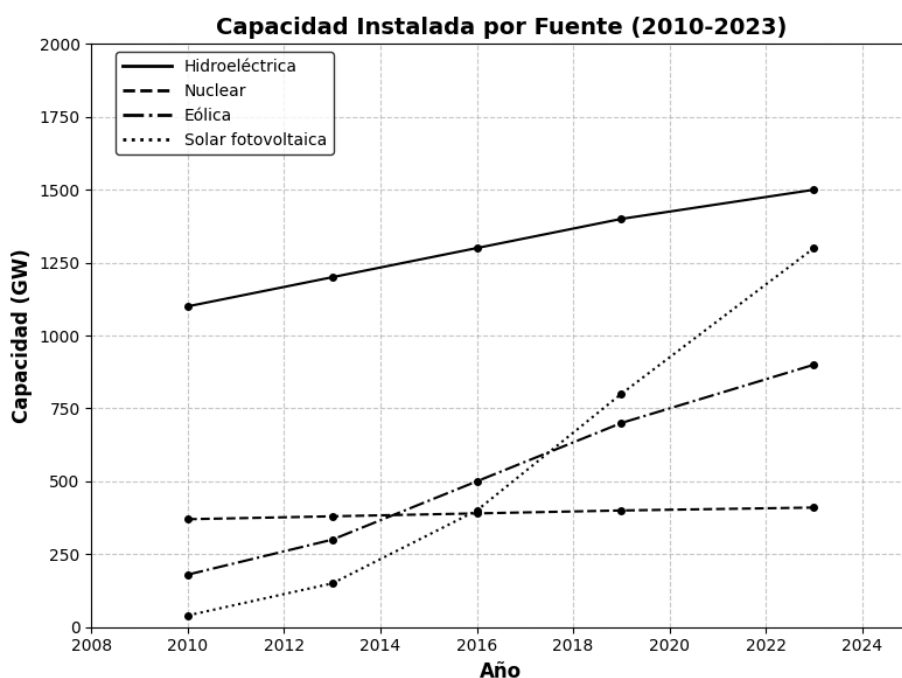
El presente documento se enfoca en un análisis teórico comparativo basado en datos de las fuentes mencionadas anteriormente, no se consideran simulaciones operativas de sistemas eléctricos ni casos específicos de implementación de SMR con fuentes renovables. Los hallazgos serán útiles para futuras investigaciones sobre la integración de estas tecnologías.

10. RESULTADOS

A continuación, se presentará el análisis comparativo entre las fuentes mencionadas anteriormente.

11. FACTOR DE CAPACIDAD

Según (Energy Agency, 2024), la generación solar y eólica experimentaron un crecimiento exponencial en la última década, la generación solar se incrementó 40 veces y la eólica 6 veces entre el año 2010 y 2023 en particular en China, Europa, Estados Unidos y Japón, asimismo, la generación hidroeléctrica experimentó un crecimiento de 1.4 veces, mientras que la nuclear se mantuvo estable en el mismo periodo, como se ve en la Figura 5.



Fuente: Elaboración propia a partir de (Energy Agency, 2024)

A pesar del incremento importante en capacidad instalada de la generación eólica y solar, estas tecnologías tienen el inconveniente de ser intermitentes, es decir que dependen de la disponibilidad del recurso base (viento y radiación solar respectivamente), ocurre lo mismo con la generación hidráulica, que depende de la presencia de agua en las represas. En contraste, la generación nuclear no depende de estos recursos para la generación de electricidad (si requiere agua para la refrigeración del circuito secundario). Dicha intermitencia se refleja en el factor de planta de cada una de estas fuentes, esta se define

como la energía generada por una central en un período determinado entre la generación teórica en ese mismo período, se expresa generalmente en porcentaje. Se expresa como:

$$\text{Factor de planta} = \frac{\text{Energía real generada (MWh)}}{\text{Potencia nominal (MW)} \times \text{Período de tiempo (h)}} [\%]$$

En la siguiente tabla se presentan los valores promedio de factor de capacidad para cada una de las fuentes mencionadas anteriormente.

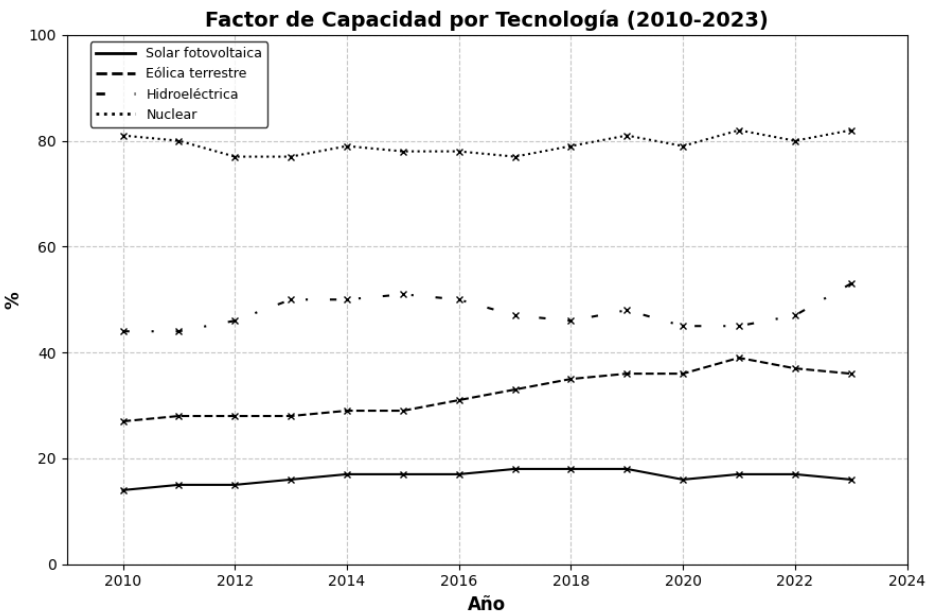


Figura 6: Factor de planta global promedio histórico por fuente. Fuente: Elaboración propia a partir de (IAEA, 2025a; IRENA, 2024)

Se observa en la gráfica anterior los valores promedio del factor de capacidad para el período 2010-2023. Entre las fuentes analizadas, la solar fotovoltaica presenta el menor valor promedio, alcanzando un 16% en 2023. Por otro lado, la eólica terrestre (onshore) muestra un 36%, la hidroeléctrica un 53% y la nuclear, con el mayor factor de capacidad promedio global, un 81%. Cabe destacar que tanto la generación hidroeléctrica como la nuclear son consideradas fuentes de carga base, lo que significa que pueden suministrar energía eléctrica de forma continua durante las 24 horas del día.

Considerando la Figura 5, se evidencia que las tecnologías con menor factor de capacidad son las que han experimentado el mayor crecimiento en capacidad instalada, específicamente las renovables intermitentes como la solar y eólica. Esta tendencia implica que, para compensar las horas en las que no se dispone del recurso primario (radiación solar o viento), se requiere el respaldo de fuentes de generación base que aseguren la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

Actualmente, a nivel mundial, las fuentes base más utilizadas son las centrales termoeléctricas alimentadas con gas natural y carbón, seguidas de la hidroeléctrica y la nuclear. Sin embargo, en el contexto de la descarbonización de la matriz energética, resulta fundamental optar por fuentes limpias. En este sentido, la generación nuclear se presenta como una alternativa clave al ofrecer un alto factor de capacidad y contribuir

significativamente al suministro de potencia base sin emisiones directas de gases de efecto invernadero.

12. SUPERFICIE REQUERIDA

La superficie requerida por cada una de las fuentes analizadas dependerá de la tecnología y del aprovechamiento del recurso empleado para la generación de energía eléctrica.

A continuación, se presentará la superficie requerida por megawatt hora (MWh) generado por metro cuadrado (m^2).

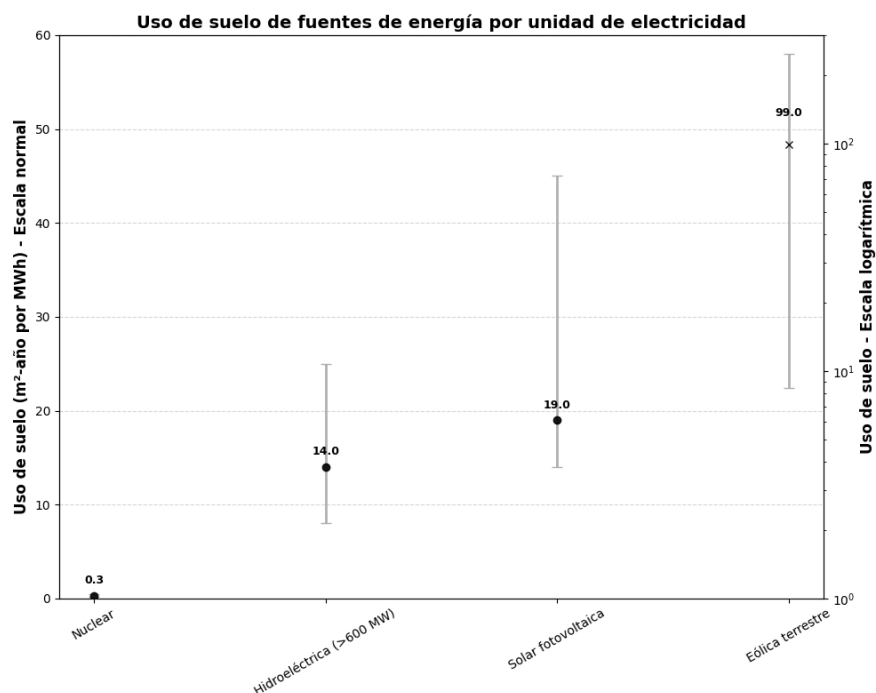


Figura 7: Uso de suelo por fuente de generación expresado en m^2 año/MWh. Fuente: Elaboración propia con base en (UNECE, n.d.)

La Figura 7 muestra el uso de suelo por unidad de electricidad generada ($\text{m}^2\text{-año por MWh}$) para cuatro tecnologías de generación: nuclear, hidroeléctrica (centrales con potencia instalada mayor a 600 MW), solar fotovoltaica y eólica (onshore). Se incluyen las incertidumbres asociadas a cada fuente, evidenciando la variabilidad en función de factores como la ubicación geográfica, el diseño de la planta y los procesos de instalación.

De acuerdo con los datos, la generación nuclear presenta el menor uso de suelo con un valor promedio de $0.3 \text{ m}^2\text{-año/MWh}$, lo que refleja la alta densidad energética de esta tecnología. Este bajo requerimiento de superficie se debe a la elevada capacidad instalada por unidad de área debido a la alta densidad energética del combustible nuclear (uranio) y la operación continua durante largos periodos, posicionando a la energía nuclear como una opción eficiente en términos de ocupación territorial.

Por su parte, la hidroelectricidad muestra un uso promedio de $14 \text{ m}^2\text{-año/MWh}$, mientras que la solar fotovoltaica alcanza $19 \text{ m}^2\text{-año/MWh}$. Si bien ambas fuentes son consideradas

limpias, la hidroeléctrica se beneficia de su capacidad de carga base y mayor factor de capacidad frente a la solar fotovoltaica. No obstante, es importante considerar que la ocupación de terreno en plantas hidroeléctricas puede variar significativamente dependiendo de la topografía y el área de los embalses.

La eólica onshore se destaca por tener el mayor requerimiento de terreno con un valor promedio de 99 m²-año/MWh, la alta ocupación de suelo se explica por la separación necesaria entre aerogeneradores para evitar interferencias aerodinámicas. Cabe mencionar que, aunque el área total de los parques eólicos es extensa, gran parte de esa superficie puede destinarse a actividades como la agricultura o ganadería, lo que mitiga parcialmente su impacto en la ocupación del terreno.

Las fuentes renovables como la eólica y la solar son fundamentales para la descarbonización de la matriz energética, presentan desafíos relacionados con el uso de suelo, especialmente en regiones con alta densidad poblacional o limitaciones territoriales. En este contexto, la generación nuclear se posiciona como una alternativa complementaria clave para suministrar potencia base de forma continua, con la ventaja de requerir una superficie considerablemente menor en comparación con otras tecnologías analizadas.

13. MATERIALES CRÍTICOS REQUERIDOS

La transición hacia fuentes de generación libres de emisiones implica el incremento en el uso de materiales o minerales críticos, fundamentales para la fabricación de componentes de estas fuentes. Un material o mineral crítico se define como “las materias primas — minerales y metales— que son necesarias para generar energía renovable, producir tecnologías no contaminantes y facilitar la transición hacia un futuro más sostenible y con bajos niveles de carbono” (IGF, 2022). Sin embargo, es importante mencionar que la lista de elementos que componen este grupo no está definida y en función al país o a los avances de la tecnología pueden ir cambiando.

A continuación, se presenta una gráfica con el requerimiento de minerales críticos por fuente de generación:

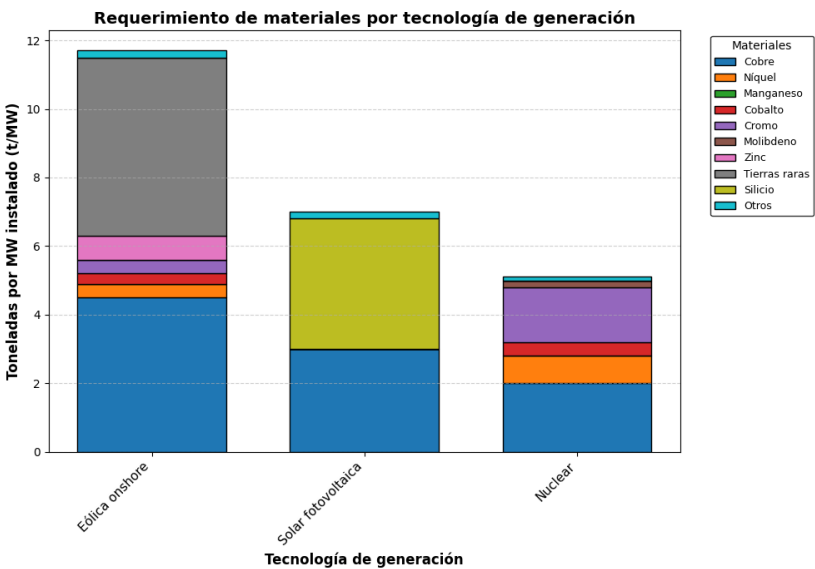


Figura 8: Tonelada de materiales críticos requeridos por MW. Fuente: Elaboración propia a partir de (World Nuclear Association, 2024c)

La gráfica presentada muestra el requerimiento de materiales por tecnología de generación. Se observa que la eólica onshore es la tecnología que demanda la mayor cantidad de materiales por megavatio (MW) instalado, superando las 11 toneladas. Este requerimiento se explica principalmente por el uso de cobre en los generadores y cables, así como de tierras raras empleadas en los imanes permanentes de las turbinas. Además, el de cromo, molibdeno, níquel y zinc para las estructuras y recubrimientos contribuye a la masa total de materiales necesarios para esta tecnología.

En el caso de la generación solar fotovoltaica, se requiere aproximadamente 7 toneladas de materiales por MW instalado. La mayor proporción de este requerimiento corresponde al silicio, empleado en la fabricación de celdas fotovoltaicas. El cobre también representa una fracción importante debido a su uso en las conexiones eléctricas de los módulos, mientras que otros materiales, aunque en menor proporción, son necesarios para las estructuras de soporte y sistemas de transmisión.

La energía nuclear muestra un requerimiento de materiales menor en comparación con las tecnologías renovables intermitentes analizadas, situándose cerca de las 5 toneladas por MW instalado. En esta tecnología predominan los aceros especiales, evidenciados en la presencia de cromo, molibdeno y níquel, utilizados principalmente para garantizar la seguridad y durabilidad de los componentes del reactor. El uso de cobre es moderado, asociado principalmente a los sistemas eléctricos, mientras que la demanda de tierras raras y silicio es prácticamente insignificante en comparación con las fuentes renovables.

Es importante mencionar que la generación hidroeléctrica no se ha considerado en esta gráfica debido a la naturaleza de los materiales utilizados en su construcción. A diferencia de las tecnologías mostradas, la hidroeléctrica requiere principalmente grandes volúmenes de concreto y acero estructural para la construcción de presas y canales, y no depende en gran medida de materiales críticos como los metales presentes en las tecnologías renovables y nuclear. Por ello, su inclusión en este tipo de análisis podría distorsionar la comparación directa del uso de materiales críticos por unidad de capacidad instalada.

Desde el punto de vista de sostenibilidad y la cadena de suministro, la alta dependencia de metales críticos, especialmente tierras raras y cobre, en las tecnologías renovables podría generar inconvenientes en la disponibilidad de estos recursos.

14. HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono puede definirse como la cantidad de GEI emitidas por una central eléctrica durante la generación de electricidad y su construcción (extracción y procesamiento de materiales empleados), este es un parámetro que permite evaluar el impacto ambiental de cada tecnología a lo largo de su ciclo de vida.

A pesar de que las tecnologías solar y eólica no emiten durante su operación, las actividades asociadas a su construcción si lo hacen, en la siguiente figura se presenta una gráfica comparativa con las emisiones durante todo el ciclo de vida de las fuentes analizadas anteriormente.

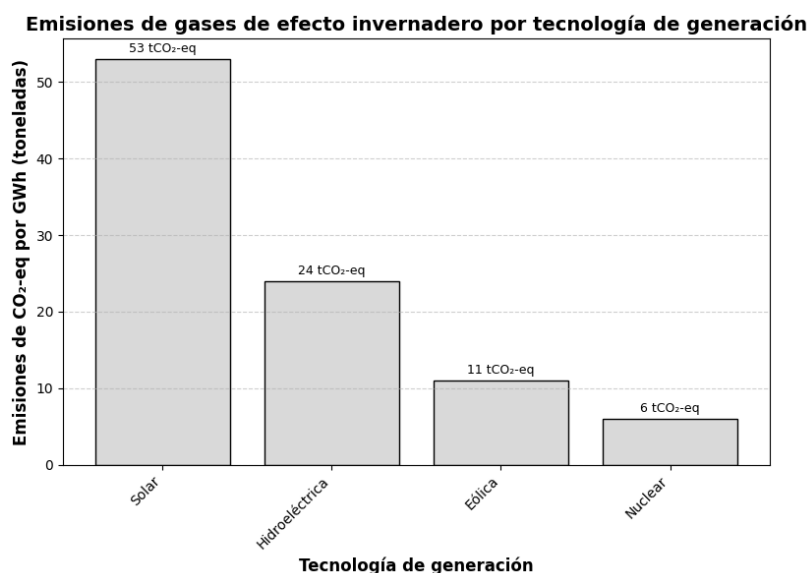


Figura 9: Emisiones promedio por GWh para las fuentes de generación analizadas. Fuente: Elaboración propia con base en <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>

15. DISCUSIÓN

La transición energética hacia sistemas sostenibles y libres de emisiones es una prioridad a nivel mundial, en la anterior sección se realizó un análisis comparativo entre las principales fuentes libres de emisiones empleadas a nivel mundial. Habiendo considerado factores como el factor de planta, superficie y materiales críticos requeridos y su huella de carbono respectiva, la generación nuclear se muestra como la alternativa más eficiente y sostenible para afrontar los desafíos de la descarbonización de la matriz energética mundial.

Entre las ventajas que ofrece la generación nuclear respecto a las fuentes renovables consideradas, se encuentra su alto factor de planta, con un promedio global de 81%, llegando en algunos países a valores superiores al 90%, lo que permite producir energía eléctrica de forma continua y estable a diferencia de las fuentes intermitentes. Esta característica hace de la generación nuclear una fuente de carga base.

En cuestión de superficie requerida, la generación nuclear es la que menor espacio ocupa, debido a la alta densidad energética del uranio, empleado como combustible nuclear (obteniéndose por kilogramo de UO₂ alrededor de 425.000 kWh), esto es fundamental en áreas con limitaciones geográficas. Asimismo, entre las fuentes evaluadas, la nuclear es la que menor cantidad de requerimiento de materiales críticos presenta por MW, lo cual se traduce en una menor exigencia de las cadenas de suministro externas y disminuyendo su dependencia de materiales escasos.

Asimismo, la baja huella de carbono de la generación nuclear durante todo su ciclo de vida (significativamente menor que las fuentes renovables), posiciona a esta tecnología como una alternativa para alcanzar los objetivos climáticos, en particular en un escenario de electrificación de la economía y reducción de emisiones para el año 2050.

16. LOS SMR COMO ALTERNATIVA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

A pesar de que la energía nuclear convencional ha demostrado ser eficiente, segura y sostenible, la construcción de reactores nucleares convencionales (con potencia aproximada de 1000 MWe) enfrenta desafíos como los costos elevados de capital inicial, tiempos largos de construcción, sobrecostos, barreras regulatorias y aceptación pública, ante estos desafíos, los SMR surgen como una alternativa innovadora abordando las limitaciones de los reactores nucleares convencionales.

Los SMR son reactores avanzados con una potencia de hasta 300 MWe por módulo, capaces de ser fabricados en serie y preensamblados antes de su envío al sitio, esta característica de modularidad permite reducir costos y tiempos de construcción, facilitando el escalamiento de esta tecnología, en particular en países con sistemas eléctricos pequeños y en vías de desarrollo. Desde el punto de vista de seguridad, muchos de estos diseños cuentan con sistemas pasivos que no requieren intervención humana o energía externa para funcionar, lo cual contribuye a posicionar de mejor manera la percepción pública ante la implementación de estos.

Además de la generación de electricidad libre de emisiones, su versatilidad permite que los SMR puedan ser empleados en actividades de cogeneración, como la desalinización de agua, muy requerida en países con pocos recursos de agua dulce como el Medio Oriente, producción de hidrógeno rosa (hidrógeno producido por un reactor nuclear) o la provisión de calor para procesos industriales o para calefacción distrital en áreas con temperaturas muy bajas. Su tamaño y superficie reducida requerida hacen de esta tecnología ideal para sectores con limitaciones en terreno o en localidades remotas.

Por otro lado, estos reactores son flexibles, es decir que pueden operar en conjunto con otras fuentes de generación haciendo un seguimiento de carga según se requiera, como puede darse con el uso de la generación solar fotovoltaica o eólica, complementándose entre sí e inyectando al sistema la energía requerida según el momento del día y la disponibilidad de recursos naturales.

El tiempo de vida promedio de los SMR ronda entre los 40 a 60 años, con una posible extensión como ocurre en los reactores convencionales en función al estado de sus componentes cumplido con el tiempo de vida especificado por el fabricante.

17. PERSPECTIVAS FUTURAS DE LOS SMR

El desarrollo de los SMR ha cobrado un impulso significativo en la última década, el OIEA en su última publicación, indica que se cuenta con 68 diseños activos en diferentes fases de su desarrollo, haciendo de esta una de las tecnologías más prometedoras para abordar los desafíos energéticos asociados a la transición a fuentes libres de emisiones. Además de ofrecer libre de emisiones, también ofrece soluciones en aplicaciones industriales.

Actualmente, son dos los países que cuentan con SMR en operación, el primero es China, con la puesta en operación de su diseño HTR-PM (High temperature reactor - Pebble bed module), un SMR de alta temperatura que emplea una nueva tecnología más segura y resistente de combustible nuclear (TRISO) constituyéndose en el primer SMR y reactor de IV

generación en operación. Por otro lado, Rusia tiene en operación el SMR KLT-40S, conocido también como Akademik Lomonosov, un SMR de agua ligera flotante que suministra electricidad y calefacción distrital a comunidades remotas en el ártico, mostrando la capacidad de los SMR de brindar soluciones energéticas en sitios remotos o de difícil acceso. Otros países como Argentina con el CAREM-25 (prototipo de SMR), Estados Unidos con el NuScale VOYGR o Reino Unido con el SMR Rolls Royce se encuentran con sus diseños con aprobación regulatoria y de diseño, permitiendo a estas compañías iniciar la fase de construcción.

Uno de los aspectos más innovadores y con gran proyección a futuro es el rol de los SMR en la provisión de electricidad continua y libre de emisiones para los centros de datos relacionados con la inteligencia artificial (IA), empresas tecnológicas como Amazon, Google y Microsoft han expresado su interés y firmado acuerdos para la implementación de generación nucleoelectrica en sus centros de datos y para cumplir con sus compromisos ambientales (TechTarget, 2024).

Los SMR ofrecen perspectivas alentadoras en la descarbonización de industrias pesadas como la producción de acero o cemento mediante el suministro de calor industrial para sus procesos, el requerimiento de temperaturas definirá la tecnología de SMR a emplear, otra perspectiva interesante es la producción de hidrógeno rosa, un vector energético vital en la transición energética y reducción de emisiones en los sectores del transporte e industria.

18. REACTORES NUCLEARES DE IV GENERACIÓN

El avance en la tecnología de reactores nucleares da lugar a nuevos conceptos, empleando nuevos materiales como refrigerante o combustible nuclear, estos diseños innovadores y avanzados son conocidos como los reactores de IV generación. Estos reactores representan un salto en términos de eficiencia, seguridad y sostenibilidad, están diseñados para un mejor aprovechamiento del combustible nuclear, reducción de residuos radiactivos y sistemas de seguridad más robustos, minimizando el riesgo de accidente.

Entre las tecnologías de reactores de IV generación se tienen (World Nuclear Association, 2024b):

- Reactores rápidos refrigerados por gas a alta temperatura (GFR).
- Reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR).
- Reactores refrigerados por sales fundidas (MSR).
- Reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR).
- Reactores refrigerados por agua supercrítica (SCWR).
- Reactor refrigerado por gas a muy alta temperatura (VHTR).

Una de las ventajas de esta generación es el cierre del ciclo del combustible nuclear, lo que permite el uso del combustible nuclear gastado de otras generaciones de reactores reduciendo la necesidad de extracción de uranio y la acumulación de residuos radiactivos.

19. CONCLUSIONES

La transición energética presenta grandes desafíos para garantizar el suministro eléctrico confiable, sostenible y en particular libre de emisiones, en este contexto y con base en lo mostrado anteriormente, se observa que la generación nuclear se constituye en una

alternativa para complementar la intermitencia asociada al crecimiento acelerado de la implementación de fuentes renovables, los Reactores Modulares Pequeños (SMR) se posicionan como una alternativa en la descarbonización global requerida para mitigar el cambio climático.

Se realizó un análisis comparativo, considerando parámetros como el factor de planta, superficie requerida, materiales críticos necesarios y huella de carbono para las fuentes analizadas (nuclear, hidroeléctrica, solar y eólica). La generación nuclear destaca entre las fuentes mencionadas por su elevado factor de planta promedio a nivel mundial (81%) garantizando la producción de electricidad continua.

Respecto al uso de suelo, la generación nuclear requiere menor superficie por unidad de energía (MWh), importante al momento de considerar áreas remotas con limitaciones geográficas, asimismo, el requerimiento de minerales críticos se torna en un aspecto importante desde el punto de vista que estos son requeridos para la manufactura de tecnologías que permitan la transición energética, fuentes con un menor requerimiento de este recurso serán menos vulnerables ante una posible escasez o alza de precios.

La huella de carbono asociada a cada una de estas fuentes durante su ciclo de vida es importante con el fin de reducir las emisiones según los acuerdos, entre estas, la que presenta menores emisiones a lo largo de su ciclo de vida es la nuclear.

Los SMR en particular, representan un desarrollo tecnológico abordando las limitaciones de los reactores nucleares convencionales. Su diseño compacto y modular permite reducir costos y tiempos de construcción, adicionalmente, se incorporan sistemas de seguridad pasivos que reduce el riesgo de accidentes y facilita su implementación en países en vías de desarrollo o con sistemas eléctricos pequeños. Además de la producción de electricidad, estos reactores están diseñados para su uso en aplicaciones de cogeneración como la desalinización de agua, producción de hidrógeno y provisión de calor para procesos industriales o calefacción distrital.

Se espera que los SMRs cumplan un rol fundamental en el futuro en la transición energética, existen proyectos concluidos y en operación como el reactor HTR-PM chino en operación, el SMR flotante ruso KLT-40S y proyectos en construcción como el CAREM-25 argentino, NuScale estadounidense o Rolls Royce del Reino Unido. Una reciente aplicación potencial es su uso para provisión de energía limpia y continua a centros de datos empleados en tecnologías como la inteligencia artificial, donde las compañías más importantes a nivel mundial firmaron acuerdos para implementar generación nuclear.

La implementación de SMR a gran escala enfrenta desafíos, como la necesidad de marcos regulatorios adecuados, aceptación pública, acceso a financiamiento competitivo y desarrollo de infraestructura adecuada, para esto, los gobiernos, industria y organizaciones internacionales deben colaborar en el desarrollo de políticas públicas para promover la adopción de esta tecnología.

Los SMR ofrecen una combinación de fiabilidad, seguridad, sostenibilidad y flexibilidad (para operar en conjunto a las fuentes renovables intermitentes) ideales para la transición hacia sistemas limpios y resilientes, su implementación a nivel mundial contribuirá a la reducción de emisiones y garantizará la seguridad energética de los países al promover el

desarrollo económica y mejorar la calidad de vida de poblaciones, en particular en regiones remotas o con acceso limitado a la energía.

20. REFERENCIAS

- Energy Agency, I. (2024). World Energy Outlook 2024. www.iea.org/terms
- Foro Nuclear. (2024). IAEA updates guidance for countries considering SMRs. <https://www.foronuclear.org/en/updates/news/iaea-updates-guidance-for-countries-considering-smrs/>
- Global Carbon Project, & Our World In Data. (2025). Global Carbon Budget. <https://globalcarbonbudget.org/>
- IAEA. (2023). What are Small Modular Reactors (SMRs)? <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- IAEA. (2025a). Load Factor Trend. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinAverageLoadFactor.aspx>
- IAEA. (2025b). The database on nuclear power reactors. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
- IGF. (2022). MINERALES CRÍTICOS: DATOS BÁSICOS. <https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques;>
- IRENA. (2024). Global trends. <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Costs/Global-Trends>
- NASA. (2025). GISS Surface Temperature Analysis. 2025.
- NEA. (2023, December 21). La COP28 reconoce el papel fundamental de la energía nuclear para reducir los efectos del cambio climático. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_89153/cop28-recognises-the-critical-role-of-nuclear-energy-for-reducing-the-effects-of-climate-change
- OIEA. (2024). Advances in Small Modular Reactors.
- OIEA. (2025). Power Reactor Information System.
- TechTarget. (2024). Three tech companies eyeing nuclear power for AI energy.
- UNECE. (n.d.). Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources.
- United Nations Climate Change. (n.d.). ¿Qué es el Acuerdo de París? Retrieved February 16, 2025, from <https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris#:~:text=El%20objetivo%20central%20del%20Acuerdo,m%C3%A1s%20el%20aumento%20de%20la>
- Wiatros-Motyka, M., Fulghum, N., Jones, D., Altieri, K., Black, R., Broadbent, H., Bruce-Lockhart, C., Ewen, M., MacDonald, P., Rangelova, K., Brown, S., Copsey, L., Dizon, R., Hawkins, S., Heberer, L., Hong, S., Hutt, R., Lee, U., Lolla, A., ... Zaimoglu Disclaimer, O. (2024). Global electricity review.
- World Nuclear Association. (2024a). Carbon dioxide emissions from electricity. [https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity#:~:text=Just%2020%25%20of%20final%20energy,tonnes%20\(Gt\)%20per%20year.](https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity#:~:text=Just%2020%25%20of%20final%20energy,tonnes%20(Gt)%20per%20year.)
- World Nuclear Association. (2024b). Generation IV Nuclear Reactors.
- World Nuclear Association. (2024c). Mineral Requirements for Electricity Generation.

Desafío del cumplimiento de Requisitos Regulatorios Sanitarios y Radiológicos en la Producción de Radiofármacos en escala Industrial

Jose Daniel Bogado Laserna*

Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica
Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: jbogado@aben.gob.bo

RESUMEN

La producción de radiofármacos a nivel industrial enfrenta el desafío de cumplir con dos regulaciones distintas pero complementarias: las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), que garantizan la calidad y seguridad del producto, y las regulaciones radiológicas, orientadas a la protección del personal, la población y el medio ambiente. Este artículo analiza las discrepancias entre ambos marcos regulatorios, destacando la clasificación de áreas en radiofarmacia industrial como un punto clave en la armonización de las normativas. Se revisan las diferencias en la dirección del flujo de aire, los requerimientos de presión y la gestión de residuos, proponiendo un enfoque integral para lograr una implementación efectiva de ambas regulaciones sin comprometer la seguridad ni la calidad del producto final.

Palabras claves: Radiofarmacia industrial, Clasificación de áreas, Regulación radiológica, Buenas Prácticas de Manufactura.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de radiofármacos combina elementos de la industria farmacéutica y la tecnología nuclear, lo que exige el cumplimiento simultáneo de normativas sanitarias y radiológicas. La regulación sanitaria, basada en las BPM de organismos como la OMS y la FDA, se centra en garantizar que los medicamentos sean seguros, eficaces y de alta calidad. Por otro lado, las regulaciones radiológicas, emitidas por entidades como la IAEA y la ICRP, buscan minimizar la exposición a la radiación y mitigar riesgos ambientales y ocupacionales.

El principal reto en la producción de radiofármacos es la integración de ambos marcos normativos, dado que sus principios pueden entrar en conflicto. Un ejemplo crítico es el diseño de instalaciones: mientras las BPM exigen presión positiva en las salas de producción para evitar la contaminación microbiológica, las regulaciones radiológicas requieren presión negativa para prevenir la diseminación de material radiactivo. Esta investigación busca analizar estas diferencias y proponer estrategias para una implementación efectiva de ambas regulaciones en instalaciones de radiofarmacia industrial.

2. OBJETIVOS

El objetivo es destacar la importancia de la clasificación de áreas en la radiofarmacia industrial desde un enfoque dual: sanitario y radiológico. De manera específica, se busca exponer las medidas de cumplimiento de ambos requisitos, describir las diferencias en la clasificación de áreas en función de los niveles de exposición y requerimientos sanitarios, y revisar las normativas nacionales e internacionales de la IAEA y la OMS que regulan la producción de radiofármacos.

3. METODOLOGÍA

Se realizó un análisis descriptivo basado en la revisión de normativas internacionales, documentos técnicos y reportes científicos de organismos reguladores. Se evaluó la clasificación de áreas en instalaciones de radiofarmacia industrial considerando:

1. Control de contaminación: Diferenciación de zonas según su grado de limpieza (ISO 14644).
2. Protección del personal: Implementación de zonas controladas y supervisadas.
3. Gestión del flujo de aire: Análisis de presiones diferenciales y sistemas de ventilación.
4. Normativas aplicables: Comparación entre BPM y regulaciones radiológicas nacionales para identificar contradicciones y convergencias.

4. ANÁLISIS DE LOS REQUISITOS SANITARIOS Y RADIOLÓGICOS

4.1. Identificación de la regulación nacional (AGEMED Y AETN)

En Bolivia, la regulación de la producción de radiofármacos está supervisada por dos entidades principales:

- AGEMED (Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud): Responsable de la regulación sanitaria, asegurando el cumplimiento de las BPM para garantizar la seguridad, calidad y eficacia de los radiofármacos.

En Bolivia los radiofármacos son reconocidos como medicamentos en la Ley del Medicamento No. 1737, donde el ámbito de la misma establece: “ARTICULO 2.- La presente Ley regula la fabricación, elaboración, importación, comercialización, control de calidad, registro, selección, adquisición, distribución, prescripción y dispensación de medicamentos de uso humano, así como de medicamentos especiales, como biológicos, vacunas, hemoderivados, alimentos de uso médico, cosméticos, productos odontológicos, dispositivos médicos, productos homeopáticos, y productos medicinales naturales y tradicionales”.

Es así que, en cumplimiento de la normativa nacional, el año 2019, se publica la norma específica denominada “NORMAS DE BUENAS PRACTICAS DE MANUFACTURA PARA RADIOFARMACOS”, la presenta las directrices para el cumplimiento de requisitos en la producción de radiofármacos en laboratorios farmacéuticos industriales productores de radiofármacos, por lo que es en base a este documento normativo que se basa en el

análisis para la presente investigación, dado que en su introducción podemos recatar los siguientes textos:

“La fabricación del radiofármaco final debe describir y justificar los pasos necesarios para la fabricación de la sustancia activa y del producto terminado y que parte de las Normas de Buenas Prácticas de Manufactura las cuales son de aplicación al proceso o a las etapas de fabricación específicos.

La preparación de radiofármacos implica el cumplimiento de la normativa vigente sobre protección radiológica.

Los radiofármacos de administración parenteral deben cumplir los requisitos de esterilidad (exigidos a los productos estériles) y, cuando proceda, las condiciones asépticas de trabajo para la fabricación de medicamentos estériles descritas en la Tercera Parte de la Norma de Buenas Prácticas de Manufactura.”

Donde se evidencia la exigencia del cumplimiento de requisitos sanitarios y radiológicos, apoyando la necesidad de un análisis de ambas regulaciones y garantizar una operación segura en la producción de radiofármacos, para que las mismos cumplan con el requisito sanitario primordial de Garantizar que el producto cumpla con directrices de que el medicamento es SEGURO, EFICAZ y de CALIDAD.

- AETN (Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear): Encargada del control y supervisión del uso de materiales radiactivos en el país, estableciendo las normativas de protección radiológica en la producción de radiofármacos.

En la norma específica nacional emitida por la autoridad radiológica se tienen los siguientes documentos normativos:

- LICENCIAMIENTO DE INSTALACIONES CICLOTRÓN RADIOFARMACIA, INSTALACIONES CLASE I, Norma regulatoria específica AETN-CL-I-0.03.01

De la misma se extrae el siguiente objetivo:

“Establecer la Normativa Regulatoria Especifica que regirá, las instalaciones del tipo Ciclotrón Radiofarmacia Hospitalario, Centralizada e Industrial, a la cual deben ajustarse la Construcción, la Puesta en marcha, la Operación y el Cierre y clausura de este tipo instalaciones productoras de radioisótopos y radiofármacos”.

Donde se evidencia que la regulación exige un control en todas las etapas de implementación de la instalación productora de radiofármacos, considerando el diseño en función al cumplimiento de la norma.

5. IDENTIFICACIÓN DE LOS REQUISITOS

Requisitos Sanitarios y BPM

A continuación, se presentan los requisitos más representativos en cuanto las exigencias de la regulación sanitaria para la elaboración de medicamento, haciendo énfasis en los

requisitos para medicamentos de administración parenteral como son los radiofármacos.

- Cumplimiento de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) según normas internacionales (OMS, FDA, EMA).
- Clasificación de áreas según grado de limpieza (ISO 14644 y guías de la OMS).
- Sistemas de ventilación y HVAC para garantizar condiciones de temperatura, humedad y filtración adecuadas.
- Monitoreo microbiológico y de partículas para evitar la contaminación del producto.
- Diseño de instalaciones sanitarias con superficies lisas, fáciles de limpiar y sin uniones.
- Flujo de trabajo unidireccional para minimizar riesgos de contaminación cruzada.
- Pruebas de integridad de filtros HEPA y control de calidad del aire.
- Diferencial de presión entre áreas para evitar la intrusión de partículas.
- Requisitos de esterilidad y limpieza para la producción de radiofármacos estériles.
- Calificación de equipos y validación de procesos para asegurar la reproducibilidad y seguridad del producto.

Requisitos De Regulación Radiológica

Si bien la protección radiológica presenta un conjunto de medidas establecidas para la seguridad y la protección, de los seres humanos y del medio ambiente frente a los posibles riesgos que se deriven de la exposición a las radiaciones ionizantes, a continuación, se enuncian requisitos regulatorios aplicados a instalaciones productoras de radiofármacos:

- Clasificación de áreas según nivel de exposición radiológica (controladas y supervisadas).
- Uso del principio ALARA (Tan Bajo Como Sea Razonablemente Alcanzable) para minimizar exposición.
- Blindaje estructural y diseño de celdas calientes para contener la radiación.
- Flujo de aire dirigido para evitar dispersión de contaminantes radiactivos.
- Monitoreo radiológico del personal y del ambiente mediante dosimetría y detección de contaminación.
- Control de residuos radiactivos y almacenamiento seguro de desechos.
- Protocolos de emergencias radiológicas para mitigar accidentes.
- Capacitación en seguridad radiológica para el personal expuesto.
- Requisitos de licenciamiento y regulación de instalaciones y personal.

6. COMPARACIONES Y PUNTOS DE CONCIENCIA

Similitudes

Habiendo realizado un análisis de la normativa específica y con la finalidad de centrar requisitos que exijan un desafío en su implementación se identifican las siguientes similitudes:

- Ambas regulaciones buscan proteger la vida y la salud, ya sea del paciente (BPM) o del trabajador y el medio ambiente (radiológico).
- Ambas requieren un diseño de instalaciones con áreas bien delimitadas, para evitar contaminación cruzada (sanitaria) o exposición indebida a la radiación.

- El control de calidad del aire es crítico en ambos casos, aunque con objetivos distintos (evitar contaminación microbiológica o limitar la propagación de material radiactivo).
- Ambas regulaciones exigen capacitación especializada para el personal, dado el nivel de riesgo asociado.

Diferencias y Discrepancias

Habiendo reconocido las similitudes, se identificaron las siguientes diferencias y discrepancias, las cuales son la base del presente análisis, presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Diferencia y discrepancias de los requisitos sanitarios y radiológicos en la producción de radiofármacos.

TEMA	REGULACIÓN SANITARIA/BPM	REGULACIÓN RADIOLÓGICA
ENFOQUE	Calidad y seguridad del producto final	Seguridad del personal y medio ambiente
OBJETIVO PRINCIPAL	Asegurar que el radio-fármaco sea eficaz, seguro y de calidad	Minimizar la exposición a la radiación ionizante
DIRECCIÓN DE FLUJO DE AIRE	De la zona limpia hacia la zona menos limpia	Desde la zona menos contaminada hacia la más contaminada para evitar dispersión
PRESIÓN DIFERENCIAL	En cascada positiva en áreas limpias (más presión en áreas críticas)	En cascada negativa en áreas con material radiactivo (para contener la radiación)
BLINDAJE	No requerido	Imprescindible en áreas con material radiactivo
MONITOREO DE CONTAMINANTES	Control microbiológico y de partículas	Monitoreo radiológico (dosimetría, detección de contaminación)
LICENCIAMIENTO Y REGULACIÓN	Control por agencias sanitarias (OMS, FDA, EMA)	Control por organismos de protección radiológica (OIEA, ICRP)

Puntos Críticos a Considerar

Una vez las diferencias y discrepancias de ambas regulaciones han sido identificadas por demos identificar los siguientes puntos críticos a ser considerados en la implementación de una instalación productora de radiofármacos, los cuales deben ser considerados como dicta la regulación en todas las etapas, construcción, puesta en marcha y operación:

- Conflicto entre flujo de aire positivo (BPM) y negativo (protección radiológica): Se deben implementar soluciones de diseño especial como esclusas de aire y sistemas de ventilación mixta.
- Blindaje vs. acceso sanitario: Las áreas con mayor blindaje pueden dificultar el

cumplimiento de BPM en términos de accesibilidad y limpieza.

- Monitoreo doble: Las instalaciones deben implementar tanto el monitoreo de contaminación radiactiva como el microbiológico simultáneamente.
- Capacitación especializada en ambas regulaciones: El personal debe ser competente tanto en BPM como en seguridad radiológica para minimizar riesgos.
- Diseño flexible y adaptado a ambas normativas: La solución óptima radica en diseños que integren ambos requisitos sin comprometer ninguno.

7. REQUISITOS DE DISEÑO

Gracias al análisis de la normativa, es evidente que, en el diseño de instalaciones productoras de radiofármacos, se deben realizar esfuerzos extras para garantizar un diseño funcional y flexible capaz de cumplir ambas regulaciones.

Es así que con la finalidad de ejemplificar de una mejor manera se desarrollan los requisitos que exigen ambas regulaciones.

Consideración para la regulación radiológica

La clasificación de áreas en una instalación productora de radiofármacos es fundamental para garantizar la seguridad radiológica y la calidad del producto. Las áreas se dividen en tres categorías principales:

1. Área Controlada: Zonas donde se manipulan materiales radiactivos. Estas áreas deben cumplir con estrictos requisitos de ventilación, presión diferencial y filtración de aire para evitar la contaminación cruzada y la exposición del personal.
2. Área Supervisada: Espacios adyacentes a las áreas controladas, donde se monitorea la radiación, pero no se manipulan materiales radiactivos directamente.
3. Área Limpia: Áreas destinadas a la producción de radiofármacos estériles, que deben cumplir con los estándares de Buenas Prácticas de Manufactura (GMP) y la normativa ISO 14644.

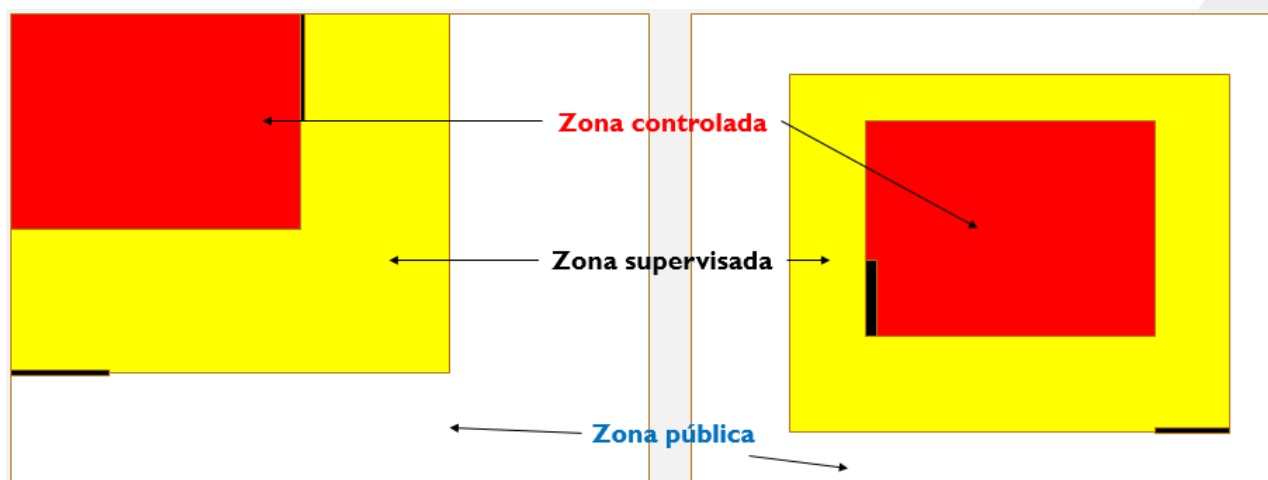


Figura 1: Esquemas de clasificación radiológica de áreas.

Consideraciones para la Clasificación de Áreas

- **Sistemas de Ventilación y Filtración:** Todos los laboratorios deben contar con sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) que mantengan los valores de temperatura, humedad y nivel de partículas dentro de los límites establecidos. El flujo de aire debe diseñarse para que ingrese por el lado "limpio" de la sala y salga por el lado "sucio", transportando contaminantes hacia el punto de escape. Para vapores más pesados que el aire, el aire limpio debe introducirse a nivel alto y el escape a nivel bajo.
- **Filtros HEPA:** Los filtros de alta eficiencia (HEPA) son esenciales para eliminar partículas de polvo y otros contaminantes del aire. Sin embargo, no son efectivos para gases radiactivos, por lo que se requieren sistemas adicionales para su manejo.

Diseño de Instalaciones con Ciclotrón

Las instalaciones con ciclotrón deben estar compuestas por áreas claramente separadas, que incluyen:

1. **Ciclotrón y Áreas Asociadas:** Incluye el bunker blindado, la sala de control, el taller y el almacén de desechos.
2. **Área de Radiofarmacia:** Comprende laboratorios calientes, laboratorios de control de calidad, áreas de preparación de bultos de transporte y almacenes de materia prima y desechos.
3. **Áreas Administrativas y Auxiliares:** Oficinas, comedores, sanitarios y áreas técnicas (sistemas de tratamiento de aire, alimentación eléctrica y gases presurizados).

Clasificación de Instalaciones

Las instalaciones se clasifican en cinco tipos según su escala de producción y complejidad:

1. **Instalación Tipo I:** Diseñada para la producción de FDG y distribución local. Incluye un ciclotrón de 9-19 MeV y áreas específicas como la bóveda de blindaje, sala de control y laboratorios de producción.
2. **Instalación Tipo II:** Produce una gama de radiofármacos comunes basados en emisores de positrones de vida media corta (11C, 13N, 15O y 18F). Cuenta con áreas limpias separadas para dosificación y preparación estéril.
3. **Instalación Tipo III:** Diseñada para radiofármacos de vida media larga y actividades de investigación. Incluye dos esclusas de aire para el ingreso del personal.
4. **Instalación Tipo IV:** Destinada a la producción y distribución a gran escala de radiofármacos SPECT y PET. Utiliza un ciclotrón de 30 MeV y cuenta con múltiples estaciones objetivo.
5. **Instalación Tipo V:** Orientada a la producción a gran escala y la investigación en radiofarmacéutica y física de la radiación. Cumple con los lineamientos de la ISO 14644 y la OMS.

Celdas Calientes

Las celdas calientes son componentes críticos en la producción de radiofármacos, diseñadas para manipular materiales radiactivos de manera segura, es decir brindando la protección al operador y garantizando las consideraciones de limpieza para la producción

de radiofármacos. Sus características principales incluyen:

- Presión Negativa: Se mantiene entre -200 Pa y -500 Pa para evitar la liberación de reactividad.
- Filtros HEPA: Instalados en la entrada y salida de aire para garantizar la pureza del ambiente.
- Blindaje: Protege al personal y al medio ambiente de la radiación, cumpliendo con los requisitos de un ambiente Clase A con flujo laminar.

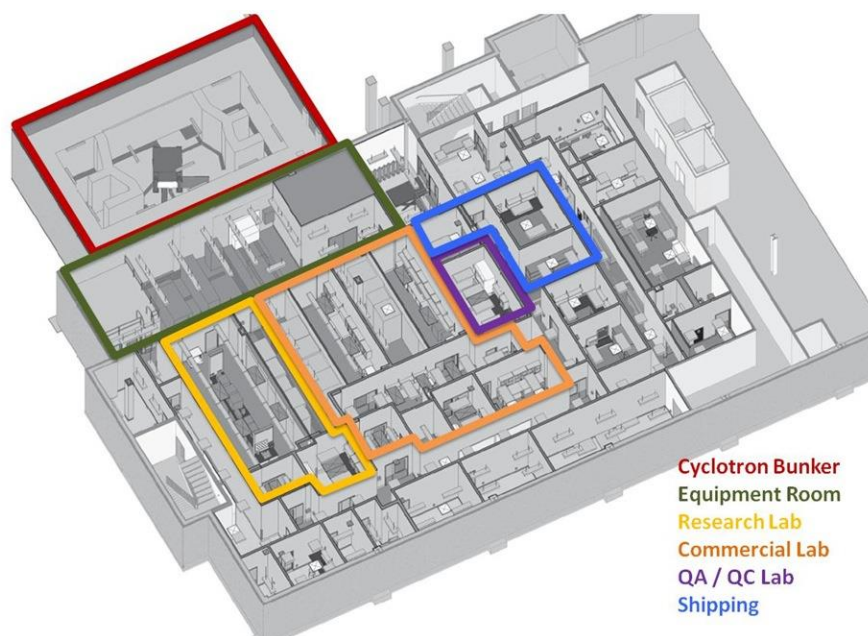


Figura 2: Diseño de instalación productora de radiofármacos con ciclotrón.

Consideración para la regulación sanitaria

La clasificación de áreas en una instalación productora de radiofármacos se basa en la cantidad de partículas presentes en el aire y en el tipo de material que se manipula. Esta clasificación es fundamental para garantizar que los parámetros de limpieza y control ambiental se mantengan estables durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas.

Consideraciones para la Clasificación de Áreas

- Terminaciones Sanitarias: Las instalaciones deben contar con terminaciones sanitarias en techos, paredes y pisos, evitando uniones, recovecos y ángulos de 90°. Las terminaciones cóncavas entre paredes y pisos facilitan la limpieza y reducen la acumulación de partículas.
- Filtros HEPA y ULPA: Los filtros de alta eficiencia (HEPA) y ultra baja penetración (ULPA) son esenciales para garantizar la pureza del aire. Un filtro HEPA clase H13 tiene una eficiencia del 99,95%, mientras que un H14 alcanza el 99,995%. Para instalaciones más exigentes, se pueden utilizar filtros ULPA clase U15 con una eficiencia del 99,9995%. Estos filtros no solo purifican el aire que entra en contacto con el producto, sino que también evitan la liberación de contaminantes radiactivos al medio ambiente.

Clasificación de Áreas Limpias

Las áreas limpias se clasifican en función de la forma farmacéutica y el tipo de operación que se realiza. Las áreas principales incluyen:

1. Áreas Limpias: Destinadas a la producción de radiofármacos estériles, estas áreas deben cumplir con los estándares de Buenas Prácticas de Manufactura (GMP) y la normativa ISO 14644.
2. Áreas Auxiliares: Espacios adyacentes a las áreas limpias, donde se realizan actividades de apoyo pero no se manipulan materiales radiactivos directamente.

Tabla 2. Clase de partículas contenidas en el aire para salas limpias y zonas anexa

NÚMERO DE CLASIFICACIÓN ISO	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
Clase ISO 1	10	2	-	-	-	-
Clase ISO 2	100	24	10	4	-	-
Clase ISO 3	1,000	237	102	35	8	-
Clase ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	-
Clase ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
Clase ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
Clase ISO 7	-	-	-	352,000	83,200	2,930
Clase ISO 8	-	-	-	3,520,000	832,000	29,300
Clase ISO 9	-	-	-	35,200,000	8,320,000	293,000

Criterios para la Clasificación de Áreas

La clasificación de áreas limpias en el ámbito farmacéutico es extremadamente exigente, especialmente cuando se trata de radiofármacos. Los siguientes criterios son imprescindibles para garantizar el cumplimiento de los requisitos sanitarios:

1. Temperatura y Humedad Relativa: Deben mantenerse dentro de rangos específicos para garantizar el confort del personal y evitar el crecimiento de contaminantes microbiológicos.
2. Velocidad de Flujo de Aire: El flujo de aire debe ser unidireccional en áreas de clase A y B, con velocidades típicas de 0,5 m/s.
3. Recambios de Aire: Las salas clasificadas deben tener un mínimo de 20 recambios de aire por hora.
4. Diferenciales de Presión: Las áreas de clase A deben mantenerse bajo presión negativa para contener contaminantes radiactivos, mientras que las áreas adyacentes deben tener presiones diferenciales de 10 a 15 Pa.
5. Pruebas de Integridad de Filtros HEPA: Estas pruebas verifican que los filtros no tengan fugas y funcionen correctamente.
6. Recuentos de Partículas y Microbiológicos: Las áreas limpias deben cumplir con los límites establecidos por la OMS y la ISO para partículas no viables y microorganismos viables.
7. Pruebas de Recuperación: Determinan la capacidad de la instalación para volver a un nivel de limpieza especificado después de una perturbación.

Diferenciales de Presión y Flujo de Aire

- Presión Negativa: Las salas de clase A deben operar bajo presión negativa (-200 Pa a -500 Pa) para contener contaminantes radiactivos. Las áreas de síntesis y dispensado de radiofármacos estériles deben estar en un ambiente de clase A, con un entorno de clase C.
- Flujo de Aire: En áreas de clase A, el flujo de aire debe ser laminar (vertical u horizontal) para garantizar la direccionalidad y evitar la contaminación cruzada. Las celdas calientes deben mantener una velocidad de flujo de aire de al menos 0,5 m/s.

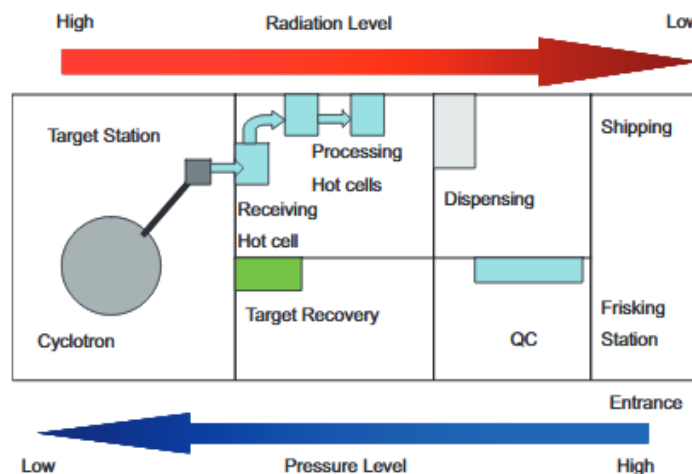


Figura 3: Ilustración de la diferencia del gradiente de presión y radiación en instalación productora de radiofármacos.

Esclusas de Aire

Las esclusas de aire son medidas de contención críticas que ayudan a reducir la contaminación entre áreas de diferentes grados de limpieza. Existen tres tipos principales de esclusas:

1. Esclusa de Aire en Cascada: Mayor presión en un lado y menor presión en el otro.
2. Esclusa de Aire de Sumidero: Mayor presión en ambos lados exteriores.
3. Esclusa de Aire de Burbuja: Mayor presión en la esclusa y menor presión en ambos lados.

Pruebas de Validación

La validación de áreas limpias en la industria farmacéutica es crucial para garantizar la calidad, seguridad y eficacia de los productos, ya que asegura que los ambientes cumplan con los estándares de limpieza y control de partículas y microorganismos. En la producción de radiofármacos, este proceso se vuelve aún más desafiante debido a la necesidad de combinar requisitos sanitarios estrictos con medidas de protección radiológica, lo que implica un control preciso de la presión diferencial, flujo de aire y filtración para evitar la contaminación cruzada y la exposición a materiales radiactivos. Este equilibrio entre limpieza y seguridad radiológica requiere diseños especializados y validaciones rigurosas para cumplir con normativas internacionales y garantizar la integridad del producto final.

1. Integridad de Filtros: Se realiza utilizando un aerosol para detectar fugas en los filtros HEPA. Una lectura mayor al 0,01% de la concentración de aerosol indica una fuga.
2. Patrones de Flujo: Aplica para áreas con flujo laminar en clase A. Se utiliza para verificar la direccionalidad del aire.
3. Recuentos de Partículas: Determina la cantidad de partículas no viables en el aire, con enfoque en tamaños de 0,5 μm y 5 μm .
4. Recuentos Microbiológicos: Complementa la clasificación de áreas limpias, asegurando que se cumplan los límites de contaminación microbiológica.
5. Pruebas de Recuperación: Evalúa la capacidad de la instalación para recuperar su nivel de limpieza después de una perturbación. La OMS recomienda un tiempo de recuperación de 15 a 20 minutos.

Tabla 3. Límites de Contaminación Microbiológica en Salas Limpias

CLASE ISO	Colonia Formadora de Unidades (UFC/ m^3) en aire	UFC / placa (90 mm) en superficies	UFC / mano (guantes del operador)
ISO 1	No se permite contaminación	No se permite contaminación	No se permite contaminación
ISO 2	< 1	< 1	< 1
ISO 3	< 10	< 1	< 1
ISO 4	< 100	< 10	< 5
ISO 5	< 1,000	< 50	< 10
ISO 6	< 10,000	< 100	< 50
ISO 7	< 100,000	< 250	< 100
ISO 8	< 500,000	< 500	< 200

Consideración Final

El diseño y operación de instalaciones productoras de radiofármacos representan un desafío único que combina requisitos radiológicos y sanitarios para garantizar la seguridad, calidad y eficacia de los productos. La correcta clasificación de áreas, la implementación de sistemas avanzados de ventilación y filtración (HVAC), y el uso de tecnologías como filtros HEPA/ULPA y celdas calientes son fundamentales para mantener ambientes controlados y seguros. Además, la validación rigurosa de áreas limpias, incluyendo pruebas de integridad de filtros, recuentos de partículas y microorganismos, y controles de presión diferencial, es esencial para cumplir con normativas internacionales como la ISO 14644 y las directrices de la OMS. Estos esfuerzos no solo protegen al personal y al medio ambiente de riesgos radiactivos, sino que también aseguran la producción de radiofármacos estériles y de alta calidad, cumpliendo con los estándares exigidos por la industria farmacéutica y las autoridades regulatorias. La integración de estos elementos en el diseño y operación de las instalaciones es clave para el éxito en la producción de radiofármacos seguros y eficaces.

Resultados y Discusión

El análisis de los requisitos sanitarios y radiológicos en la producción de radiofármacos a escala industrial revela similitudes y diferencias clave que deben abordarse para garantizar

el cumplimiento de ambas normativas. Las similitudes incluyen la protección de la vida y la salud, el diseño de instalaciones con áreas bien delimitadas, el control de calidad del aire y la capacitación especializada del personal. Sin embargo, existen diferencias significativas en el enfoque, la dirección del flujo de aire, la presión diferencial, el blindaje y el monitoreo de contaminantes.

Un punto crítico es el conflicto entre el flujo de aire positivo requerido por las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y el flujo negativo exigido por la regulación radiológica, lo que demanda soluciones de diseño innovadoras, como esclusas de aire y sistemas de ventilación mixta. Además, la implementación de monitoreo dual (microbiológico y radiológico) y la capacitación integral del personal son esenciales para minimizar riesgos.

8. CONCLUSIONES

La clasificación de áreas en radiofarmacia industrial es un aspecto crítico para el cumplimiento regulatorio y la producción segura de radiofármacos. La integración de requisitos sanitarios y radiológicos es fundamental para garantizar la seguridad del personal y la calidad del producto. Es necesario un enfoque holístico en el diseño de instalaciones para cumplir con ambas regulaciones sin comprometer la seguridad ni la calidad farmacéutica. La presente guía busca facilitar este cumplimiento, proporcionando una referencia para la correcta clasificación de áreas en la radiofarmacia industrial.

9. REFERENCIAS

- IAEA International Atomic Energy Agency (2009). Technical Report Series N° 471. Cyclotron produced radionuclides: guidelines for setting up a facility
- OIEA Organismo Internacional de Energía Nuclear (2016). Requisitos de Seguridad Generales, Parte 3 N°GRS Part. 3. Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación normas básicas internacionales de seguridad.
- AGEMED. Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud. (2019). Norma de Buenas Prácticas de Manufactura para Radiofármacos.
- WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations. fifty-fourth report. (2019). Anexo 2 Internacional Atomic Energy Agency and World Health Organization guideline on good manufacturing practices for radiopharmaceutical products.
- WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations. thirty - seventh report. (2003). Anexo 3 Guideline on good manufacturing practices for radiopharmaceutical products.
- WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations. forty - fifth report. (2011). Anexo 5 Guidelines on good manufacturing practices for heating, ventilation and air - conditioning systems for non-sterile pharmaceutical dosage forms
- WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations. forty - fifth report. (2011). Anexo 6 Guideline on good manufacturing practices for sterile pharmaceutical products.
- IAEA International Atomic Energy Agency. (2024). Documento técnico TECDOC N°2069. Procesos reguladores de autorización e inspección de instalaciones de producción de radiofármacos con ciclotrón.
- ICRP Comisión Internacional de Protección Radiológica. Publicación 103. (2007) Las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. Senda Editorial S.A. https://www.icrp.org/docs/P103_Spanish.pdf
- OPS. Organización Panamericana de la Salud. (2002). Cabinas de Bioseguridad biológica:

- uso, desinfección y mantenimiento,
- Advanced Aseptic Processing: RABS and Isolator Operations
 - <https://www.europeanpharmaceuticalreview.com/article/1372/advanced-aseptic-processing-rabs-and-isolator-operations/>
 - COMECER ELENA Series.
 - <https://www.comecer.com/es/elena-series-shielded-laminar-flow-isolator/>
 - AIEA International Atomic Energy Agency. (2008). Reporte técnico N°465. Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice
 - Presurización Diferencial en Cuartos Limpios de Industria Farmacéutica: Diseño de Flujo de Aire en Cascada (2024).
 - <https://azvircleanrooms.com/presurizacion-diferencial-en-cuartos-limpios-de-industria-farmaceutica-diseno-de-flujo-de-aire-en-cascada/>
 - AGEMED. Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud. (1997). Norma de Buenas Prácticas de Manufactura para Radiofármacos.
 - Filtración de aire en la industria farmacéutica
 - <https://linterfiltros.com.br/es/filtraci%C3%B3n-de-aire-para-la-industria-farmac%C3%A9tica/>
 - WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations. forty - fifth third report. (2019). Anexo 2 Guideline on heating, ventilation and air- conditioning systems for non-sterile pharmaceutical products.
 - SHENA. Safety, Health and Environment National Authority. Clasification of radiation workplaces área guideline. (2024). SHENA/RAD/GUI/4-205 REV 0. https://shena.gov.bn/assets/publication_and_resources/shena-radiation-working-área_classification-guideline-final-1718874431.pdf
 - ISO14644-3:2005 (E) . (2005). Salas limpias y entornos controlados asociados Parte 3 Métodos de prueba. Derechos de autor oficinas ISO. Suiza

Relación Dosis / Actividad en Operación en el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia y Preclínica

Israel Antezana Lopez.*

Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica
Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: iantezana@aben.gob.bo

RESUMEN

El trabajo en el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia y Preclínica (CCRP) implica la producción de radiofármacos para aplicaciones médicas, lo que requiere un estricto cumplimiento de las normas de seguridad radiológica. El ciclotrón, como acelerador de partículas, genera radioisótopos a través de la irradiación de iones hidrogeno, la Radiofarmacia, por su parte, se encarga de combinar estos radioisótopos con compuestos químicos para formar productos farmacéuticos radiactivos. La seguridad radiológica en el CCRP se basa en principios fundamentales como el blindaje adecuado de las instalaciones, el monitoreo continuo de la radiación y el establecimiento de procedimientos de manejo seguro. El blindaje es esencial para proteger al personal, público y medio ambiente de la radiación emitida por el ciclotrón y los radioisótopos. El monitoreo constante de los niveles de radiación y el uso de dosímetros personales permiten controlar la exposición del personal. Por otra parte, existen procedimientos rigurosos para el transporte y almacenamiento de material radiactivo. La estimación de la dosis de radiación antes de realizar cualquier trabajo con materiales radiactivos es crucial en CCRP. Esta evaluación pre-operacional permite implementar medidas de protección adecuadas y garantizar que la exposición del personal se mantenga dentro de los límites establecidos por las regulaciones nacionales e internacionales. **Objetivo:** Realizar un análisis descriptivo de los datos de dosimetría del personal y ambientes del CCRP. para obtener un modelo de Dosis/Actividad predictivo para el trabajo de operación de la instalación. **Metodología:** Descriptiva analítica en base a datos recopilados de los equipos de seguridad radiológica dentro de la instalación. **Resultados:** Un modelo de dosis, tasas de dosis del personal, ambientes y superficies en la etapa operacional dentro del CCRP. **Discusión:** Esta metodología puede ser utilizada en otras instalaciones donde se maneja material radiactivo y de esta manera obtener un método específico de estimación para cada instalación en la que se aplica, con el objetivo de precautelar la salud y la seguridad del trabajador ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. **Conclusiones:** Se obtuvo un modelo mediante el análisis estadístico de los datos y descripción de cada etapa operativa del CCRP a partir de la base de datos y los registros de la instalación para estimar la dosis y tasa de dosis operacionales según la actividad solicitada mediante una orden de producción.

Palabras claves: Seguridad Radiológica, CCRP, tasa de dosis, modelo de dosis.

1. INTRODUCCIÓN

La exposición a la radiación está directamente influenciada por la actividad (A) de una fuente radiactiva, que se define como el número de desintegraciones por unidad de tiempo, típicamente medida en becquerles (Bq) o curies (Ci). Cada evento de desintegración libera energía en

forma de partículas alfa, partículas beta o rayos gamma, que pueden depositar energía en los materiales circundantes. La dosis absorbida (D), medida en gray (Gy), representa la cantidad de energía transferida por unidad de masa de un material debido a la radiación ionizante. La relación entre la actividad y la dosis absorbida depende del tipo de radiación, la energía emitida por desintegración y el medio a través del cual viaja la radiación. Para una fuente dada, una mayor actividad conduce a un mayor número de interacciones por segundo, aumentando la deposición total de energía y, por lo tanto, la dosis absorbida en el material expuesto. [1] [2]

La tasa de dosis ($\dot{D}$) en un punto dado está influenciada por la ley del inverso del cuadrado, el blindaje y las propiedades de atenuación del medio. La ley del inverso del cuadrado establece que la intensidad de la radiación disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia desde la fuente. Además, materiales como el plomo y el hormigón pueden reducir significativamente la dosis absorbida al atenuar la radiación a través de la absorción fotoeléctrica, la dispersión Compton y la producción de pares. La exposición total también se puede controlar limitando la duración de la exposición, ya que la dosis absorbida es proporcional al tiempo en un campo de radiación constante. Estos principios son fundamentales en la protección radiológica, asegurando que las exposiciones ocupacionales y médicas permanezcan dentro de los límites seguros establecidos por organismos reguladores como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Consejo Nacional de Protección y Medidas contra la Radiación (NCRP). [3] [4]

En el complejo Ciclotrón Radiofarmacia y preclínica se tiene como política de seguridad radiológica el de desarrollar un trabajo cumpliendo los principios de Seguridad Radiológica: Justificación al uso pacífico de la tecnología nuclear para el desarrollo científico, tecnológico y social en el marco de la cultura de la paz que tiene el Estado Plurinacional de Bolivia; Optimización aplicando el criterio ALARA (mantener las exposiciones ocupacionales tan bajas como sea razonablemente posible) y Limite de dosis establecidas por la normativa nacional, aplicando las herramientas de protección radiológica: blindaje, tiempo y distancia.

La operación del ciclotrón se puede dividir en 5 etapas: Preparación del ciclotrón; Etapa de irradiación; Etapa de síntesis del radiofármaco, Etapa de fraccionamiento, Fin de la producción. Cada etapa está definida como se ve en la Figura 26, donde los tipos de radiación por ambiente están definidos en Tabla 10.

Etapas de producción del CCRP

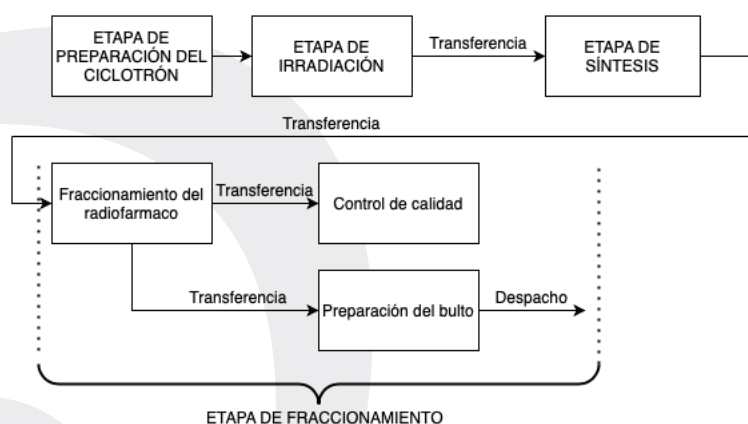


Figura 1: Etapas durante la operación en el CCRP, donde se desglosa las operaciones que conllevan a la penúltima etapa que es la de fraccionamiento.

Tabla 1. Etapas de producción del CCRP.

ETAPA	SALA	DURACIÓN	RADIACIÓN
Preparación del ciclotrón	Bunker	5 [min]	Neutrones gamma
Irradiación	Bunker	1 – 3 [hr]	Neutrones, gamma
Síntesis	Producción	30 [min]	Gamma
Fraccionamiento	Producción, control de calidad y despacho	30 [min]	Gamma
Fin de producción	Zonas controladas y supervisadas	19 [hr]	Gamma

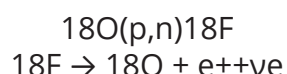
Nota: el tipo de radiación depende del radioisótopo a producir en este caso específico es el ^{18}F .

1.1 Etapa de preparación del ciclotrón

En esta etapa se prepara las condiciones para iniciar la irradiación donde se tienen que revisar las condiciones operativas del ciclotrón previa a su irradiación, así como ajustar la trayectoria del haz de partículas la cual genera un proceso de irradiación inicial.

1.2 Etapa de irradiación

En esta etapa una vez que se llegan a tener las condiciones operativas ajustadas mediante procedimiento, inicia la irradiación del blanco cargado y este a su vez empieza a impactar el blanco y la actividad que se encuentra presente son neutrones y actividad debido a la activación del blanco debido al haz de protones, teniendo las siguientes reacciones:



Donde predomina la actividad debido a los neutrones, los cuales se encuentran contenidos en paredes y techo de concreto de alta densidad y espesor de 2.5 [m]

La etapa de irradiación también abarca un tiempo de transferencia para llevar toda el blanco líquido activado al nivel del subsuelo para luego llegar a una celda de plomo de 75 [mm] de espesor, lo que en promedio tiene un tiempo de duración de 5 [min]

1.3. Etapa de síntesis

Etapa en la cual se transforma el blanco activado, el radioisótopo a la forma química deseada, un proceso automatizado el cual solo se puede llevar a cabo con la celda cerrada y esta se encuentra bloqueada por un nivel de referencia el cual bloquea la apertura, la duración de toda la etapa tiene una duración de alrededor de 30 minutos, el cual también tiene un tiempo de transferencia de una celda de síntesis a una celda de fraccionamiento.

1.4 Etapa de fraccionamiento

En la etapa de fraccionamiento ya conlleva corrida de 3 procesos de forma paralela: El primero es el fraccionamiento del radiofármaco a las cantidades especificadas mediante orden de producción; El siguiente es el control de calidad del radiofármaco a través de varias pruebas en sitio de pureza radio-nucleica, pureza radioquímica, esterilidad y análisis fisicoquímicos; El último proceso es el envasado y acondicionado del empaque para llevar el material radiológico a su destino.

2. METODOLOGÍA

2.1 Monitoreo de ambientes del CCRP

El monitoreo continuo durante cada una de las etapas de operación nos permiten analizar el comportamiento de forma separada para así sacar puntos de interés (hitos) y tratar de verificar el motivo del comportamiento de las gráficas tanto en las zonas controladas como supervisadas dentro del CCRP, el cual nos da el aviso a partir del cual se puede empezar a buscar la relación entre la dosis, tasa de dosis y la actividad dentro de las instalaciones del CCRP en etapa operativa. Para ello se empieza analizando, el bunker del ciclotrón, las zonas controladas y el ambiente de control de calidad.

En el bunker del ciclotrón (Figura 2) se marcan 6 hitos los cuales responden a acciones durante las etapas irradiación al blanco de prueba (dummy) que tiene un lapso de alrededor de 5 minutos, el siguiente hito es aumento gradual de la corriente hasta llegar al valor deseado, una vez que se llega al valor inicia la etapa de irradiación (3er hito, el siguiente hito corresponde más a un bajón de tensión de la radiofrecuencia, el siguiente hito corresponde a la etapa de transferencia la cual es el punto donde se mueve la actividad hasta llegar a la distancia mínima con el detector, de allí se mueve por el subsuelo para llegar a la celda, de allí el ciclotrón para sus actividades.

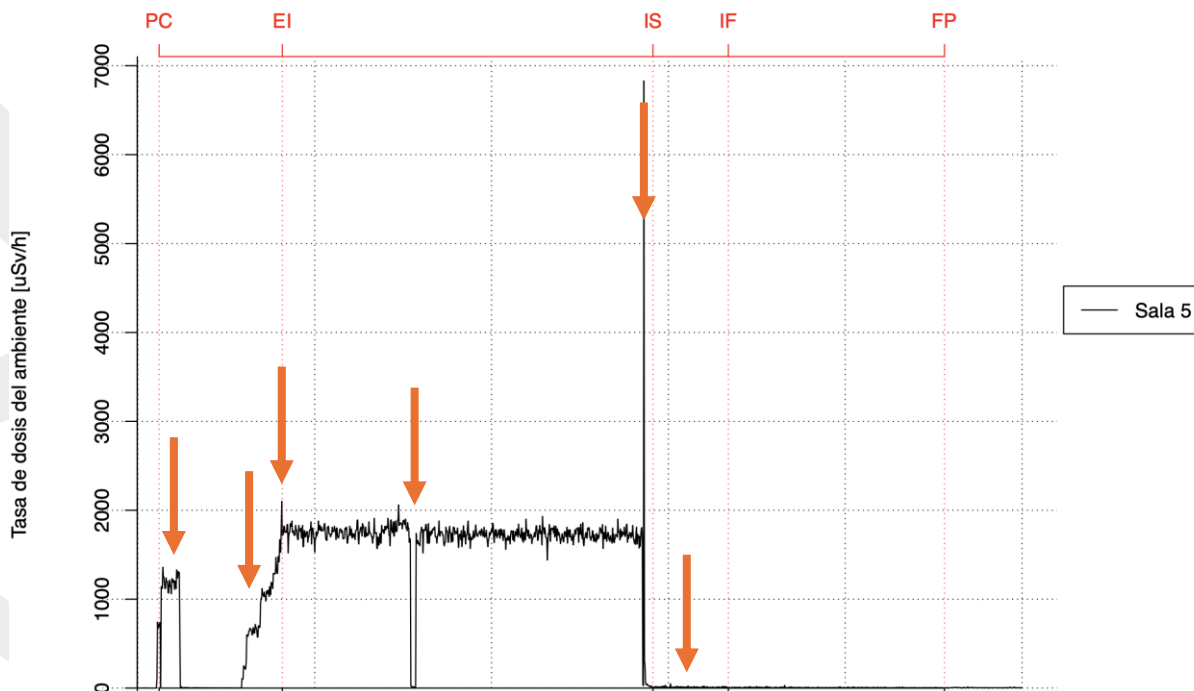


Figura 2: Descripción de la etapa de preparación e irradiación, de izquierda a derecha se analizan los siguientes hitos: Ajuste del haz de irradiación, incremento gradual de la corriente para la irradiación, inicio de la etapa de irradiación al blanco, caída de tensión del ciclotrón, distancia mínima entre la actividad y el detector que corresponde a la transferencia en la etapa de irradiación, cese de actividades pos-transferencia.

Las siguientes etapas son las de síntesis y de fraccionamiento (Figura 3) se marcan 5 hitos los cuales se describen a continuación, se tiene la llegada de la actividad a la celda previo a iniciar la síntesis, antes de llegar a la celda se asegura que la misma se encuentre cerrada y bloqueada, luego del inicio de la síntesis aparece otro punto de interés el cual es el secado de los solventes residuales el cual se encuentra monitorizado y ocurre casi a la mitad de la duración de la síntesis, el siguiente hito corresponde a la etapa de transferencia la cual se mueve la actividad de la celda de síntesis a la celda de transferencia, una vez finalizada la transferencia inicia la etapa de síntesis la cual se puede visualizar al menos 2 picos, lo cual corresponde al movimiento de material radiactivo dentro de un blindaje de plomo hacia la sala de control de calidad y salas de despacho, el fondo de la sala 15 aumenta debido a la proximidad con

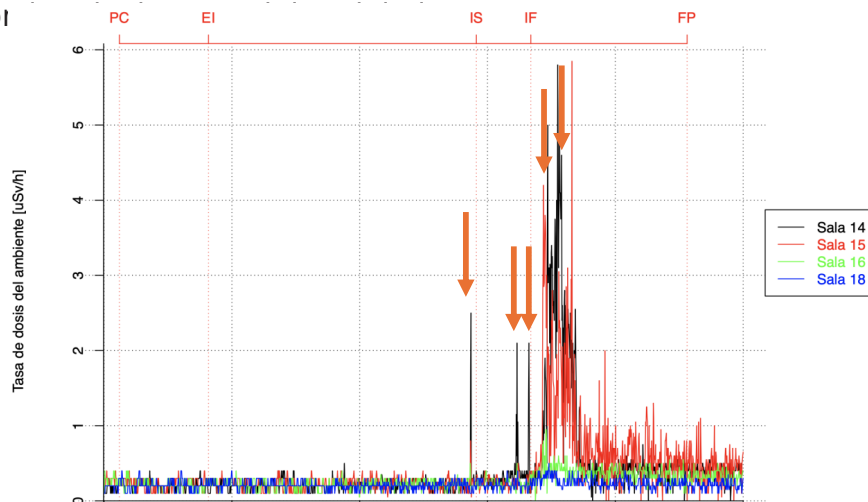


Figura 3: Descripción de la etapa de síntesis y fraccionamiento en zonas controladas, de izquierda a derecha se analizan los siguientes hitos: Transferencia del ciclotrón a la celda de síntesis, evaporación de solventes residuales, Transferencia de la celda de síntesis a la celda de fraccionamiento, transporte del blindaje a control de calidad, transporte de blindajes a la sala de etiquetado y empackado del bulto.

La siguiente etapa de fraccionamiento (Figura 4) se puede visualizar algunos hitos los cuales son: medición de la actividad total de la muestra enviada para su control, el siguiente punto es el análisis de pureza química, de allí finaliza la producción lo cual deja activado los equipos y se puede visualizar el decaimiento exponencial de la actividad hasta volver a sus valores de fondo.

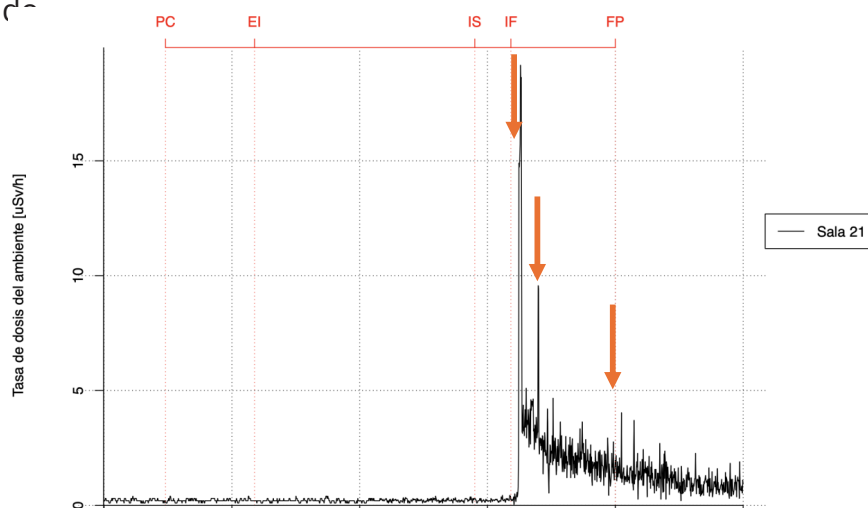


Figura 4: Descripción de la etapa de fraccionamiento hasta el final de la producción donde se ven los siguientes hitos: Medición de la actividad total de la muestra de control de calidad, análisis de pureza química, finalización de los análisis de control de calidad.

2.2 Análisis estadístico de la etapa de irradiación

El primer caso es que el blanco a partir de una aproximación de que la emisión viene del blanco se hace una suposición de que la fuente de emisión de neutrones es isotrópica, teniendo una relación de aproximación lineal entre la corriente de impacto y la tasa de dosis en el ambiente: [5] [6]

$$\dot{D} = \frac{S DCF}{4\pi r^2}$$

Donde S es el flujo de neutrones que es proporcional a la corriente de protones (corriente del Haz), factores de conversión de dosis y el cuadrado de la distancia al ser una fuente puntual generando la siguiente relación en la etapa de irradiación.

$$\dot{D} \propto I$$

Ahora se analiza la dosis total generada en el ciclotrón a partir de la actividad generada en el blanco, se parte de que la Dosis depende de 2 factores: corriente del haz de protones, la energía de estos y a su vez la actividad generada depende de los mismos factores y el tiempo total, el cual se revisa a continuación. [1] [7] [8]

$$D = \sum \frac{I DCF}{4\pi r^2} \Delta t$$

$$A = \Phi I (1 - e^{-\lambda t})$$

Juntando ambas ecuaciones sale una relación proporcional de dosis en función de la actividad generada.

$$D \propto A$$

Ahora en el caso de control de calidad se tiene una medición similar debido a que la actividad depende del tiempo de trabajo lo cual nos da la siguiente relación: [8]

$$D = \frac{\Gamma A_0}{r^2} \int e^{-\lambda t} dt$$

Ahora el trabajo en control de calidad se somete al fraccionamiento de la actividad, movimiento parcial de la fuente para sus distintas etapas lo cual no da a entender que actividades parciales entonces se debe tomar un equipo específico y que más salte a la vista (máximo de la función) el cual es la dosis debido al análisis de pureza química y la dosis de cuerpo entero ambas en función de la actividad inicial del trabajo teniendo las siguientes relaciones:

$$D_{\max} \propto A$$

$$D \propto A$$

En resumen, se hará un análisis de dosis de 4 actividades específicas del CCRP.

La primera es la dosis en función de la corriente en la etapa de irradiación, La segunda es la dosis total en la etapa de irradiación en función de la actividad medida en la etapa de síntesis, la tasa de dosis máxima en función de la actividad en control de calidad en la etapa de fraccionamiento y la dosis total de cuerpo entero en función de la Actividad en control de calidad en la etapa de fraccionamiento. Todos los análisis de dosis se harán de 12 lotes de producción de la gestión 2025.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Tasa de dosis en función de la corriente de irradiación.

La tasa de dosis promedio tiene variaciones que pueden ser mayores al 10% en el caso de que existiese un hito como la caída de tensión la cual genera que la desviación estándar y el promedio tengan discrepancias grandes lo que pondera a la relación entre tasa de dosis y corriente generada para la etapa de irradiación, en el caso visto de toda la serie de lotes analizados se tiene similitud entre el promedio y la moda como se ve en la figura (Figura 5), la relación entre tasa de dosis y corriente se ve en la figura (Figura 6) la cual se aproxima mediante la siguiente función que se muestra en la siguiente tabla (Tabla 2)

Tabla 2. Parámetros de la recta de aproximación lineal del modelo Tasa de dosis promedio en función de la corriente.

PARÁMETROS	VALOR	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Ordenada	351.18	635.97
Pendiente	17.46	7.53

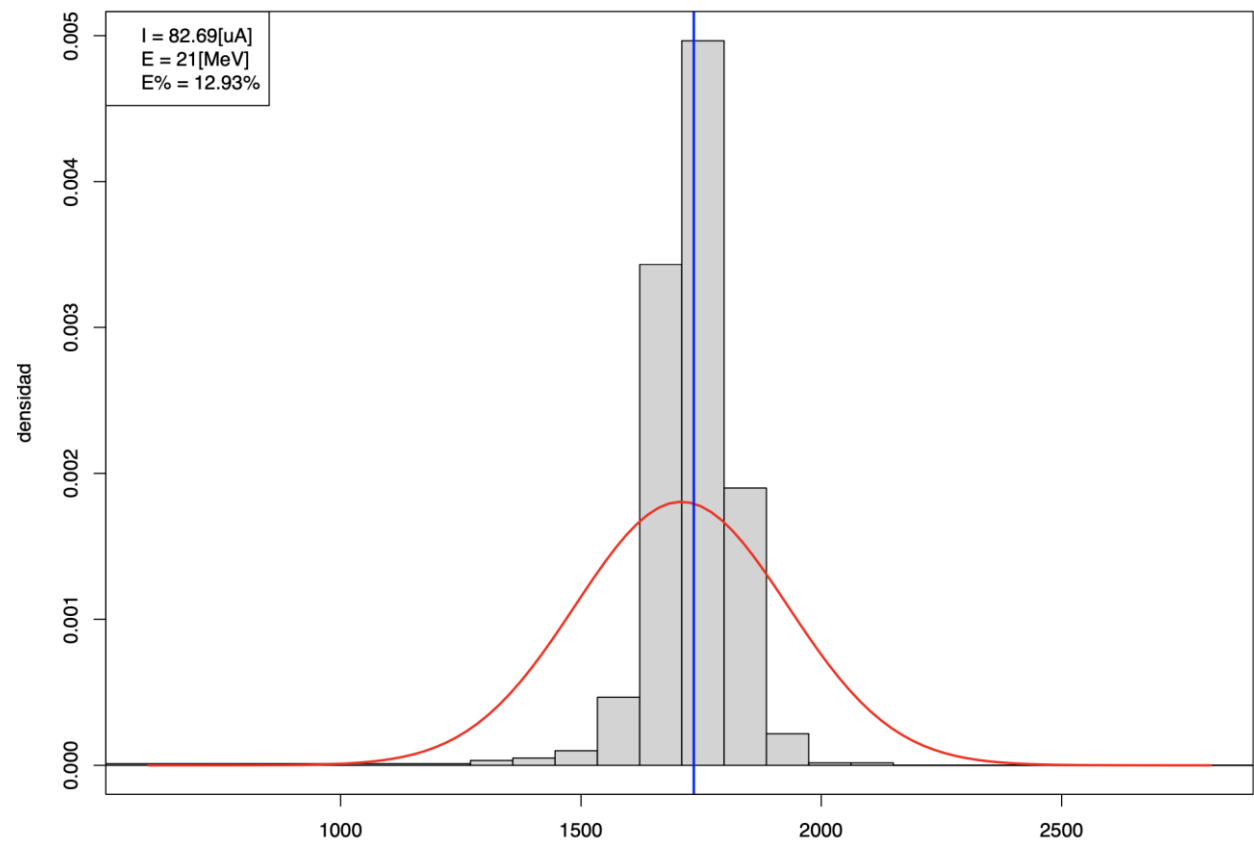


Figura 5: Histograma de un lote en la etapa de irradiación, azul la mediana, curva gaussiana aproximación en rojo.

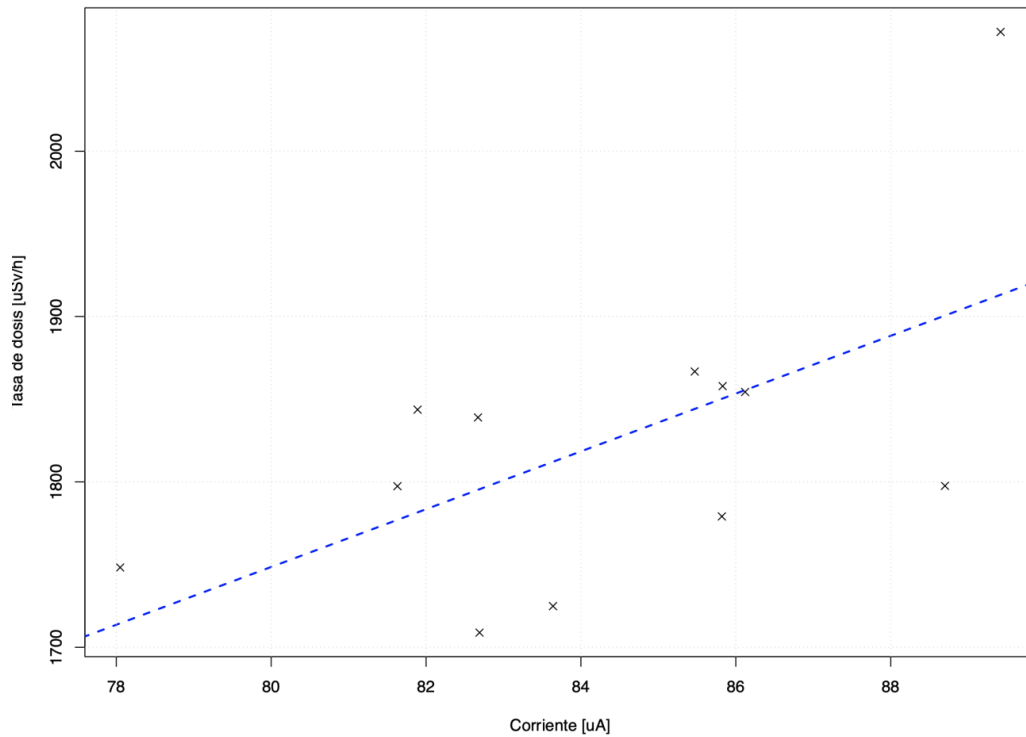


Figura 6: Tasa de dosis en función de la corriente, con la línea de tendencia.

3.2 Dosis de irradiación en función de la actividad

La dosis total al tener una dependencia de actividad generada, la misma se la puede ver en la figura. (Figura 7), donde se marcan los equipos de medición ya que la transferencia puede realizarse a 2 equipos de forma selectiva, lo cual contempla la diferencia sin embargo se utiliza todos los datos para modela la curva y los resultados del modelo se ven en la siguiente tabla ()

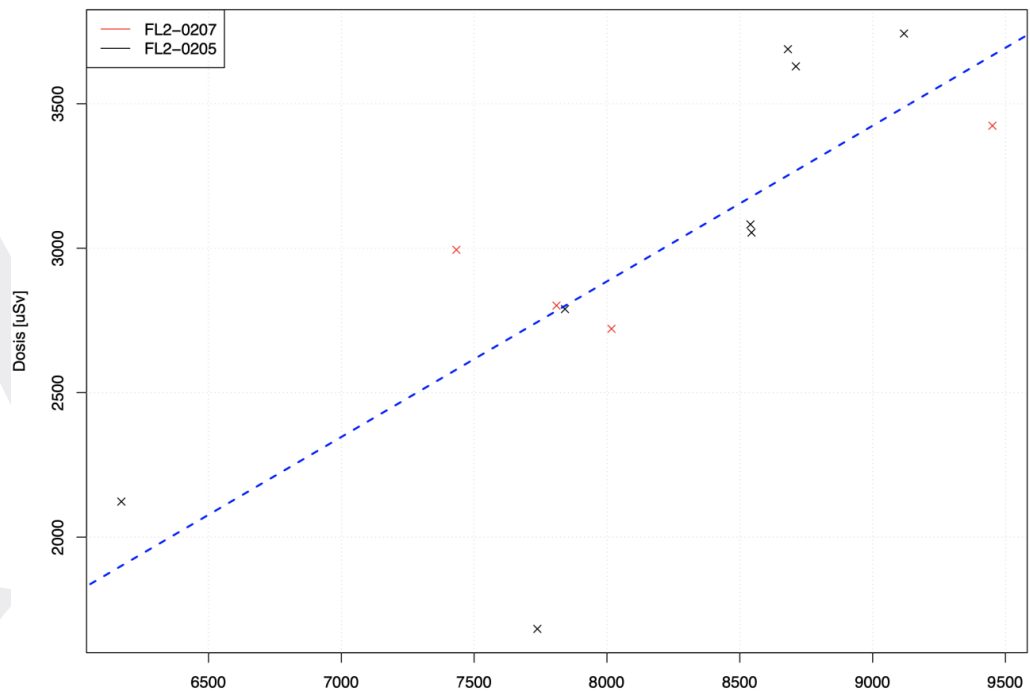


Figura 7: Dosis total computada en la etapa de irradiación en función de la actividad entregada para la etapa de síntesis.

Tabla 3. Parámetros de la recta de aproximación lineal del modelo dosis total en función de la actividad de producción.

PARÁMETROS	VALOR	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Ordenada	-1424	1022
Pendiente	0.54	0.15

3.3 Dosis máxima en función de la actividad entregada a control de calidad

En esta etapa se puede vislumbrar que en la mayoría de los casos el valor de máxima tasa de dosis registrada por el equipo corresponde al análisis de pureza química que es una fracción de 8% de la actividad total enviada, entonces dicha fracción no compromete a la relación más si a sus parámetros de la tendencia lineal del equipo, se tiene la siguiente figura (Figura 8), y los parámetros de la tendencia están en la tabla (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de la recta de aproximación lineal del modelo tasa de dosis maxima en función de la actividad de producción.

PARÁMETROS	VALOR	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Ordenada	-6.11	6.79
Pendiente	0.21	0.06

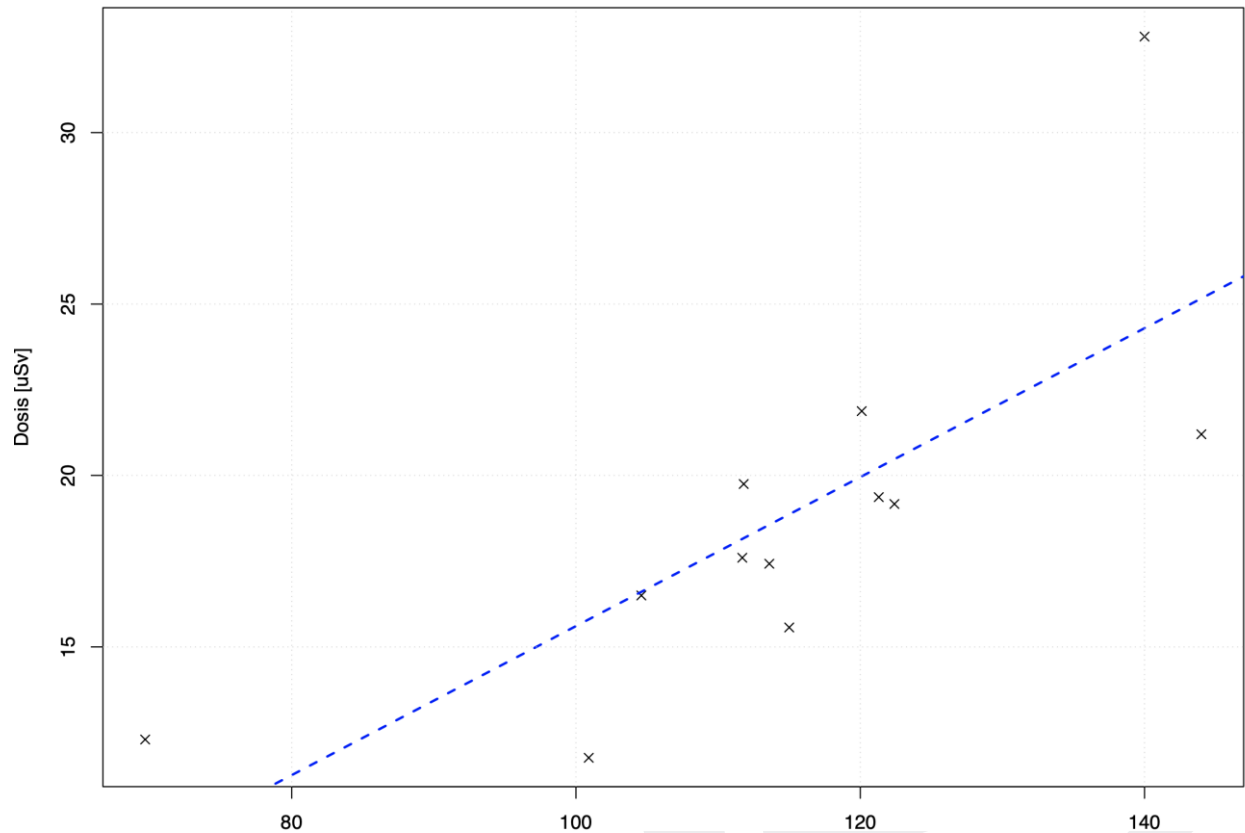


Figura 8: Tasa de dosis máxima en función de la actividad de trabajo en control de la calidad.

Dosis de trabajo por actividad

La dosis de trabajo sale de revisar las actividades del personal a partir de la actividad de trabajo, el parámetro es que en control de calidad los volúmenes de trabajo se mantienen constante s por prueba de control de calidad y lo cual se revisa en la siguiente figura (Figura 9) además se tienen los siguientes parametros de aproximación para cada uno de los trabajadores de control de calidad. (Tabla 5)

Tabla 5. Parámetros de la recta de aproximación lineal del modelo dosis del personal en función de la actividad de control de calidad para ambos trabajadores analizados.

TOE	PARÁMETROS	VALOR	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
TRABAJADOR 1	Ordenada	12.09	3.24
	Pendiente	0.07	0.02
TRABAJADOR 2	Ordenada	3.98	5.42
	Pendiente	0.11	0.05

3.4 Relación dosis actividad

Este modelo puede ser replicado en otras instalaciones donde se trabaje con actividad debido a la relación intrínseca que hay entre la tasa de dosis y la actividad ya sea para fuentes puntuales de radiación gamma, fuentes emisoras de neutrones. El monitoreo constante ayuda a analizar y colocar niveles de referencia, restricciones de dosis y niveles de alarma acordes a las instalaciones aplicadas.

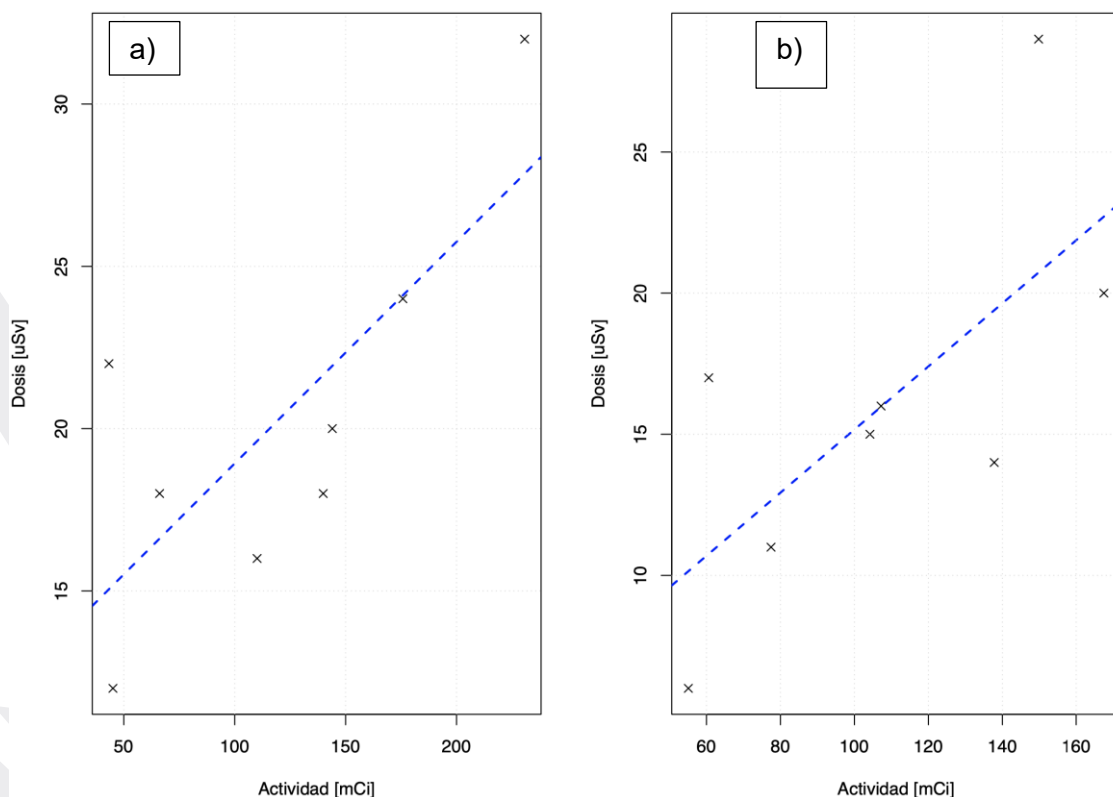


Figura 9: a) tasa de dosis en función de la actividad del trabajador 1 de control de calidad b) tasa de dosis en función de la actividad del trabajador 2 de control de calidad.

4. CONCLUSIONES.

Se obtuvo 4 modelos de dosis, tasa de dosis en función de la actividad, así como la corriente de irradiación a partir de realizar un análisis descriptivo de los datos de dosimetría del personal y ambientes del CCRP.

El modelo puede ser una base para cuantificar desviaciones de la actividad de envío en la etapa de irradiación, así como ser una base de análisis del comportamiento de los equipos de seguridad radiológica en base a las actividades de trabajo. El modelo puede ser una base para verificar el comportamiento del personal en la manipulación de la actividad, y también una herramienta para poder definir niveles de referencia, niveles de alarma y tasas de dosis existentes.

5. REFERENCIAS

- [1] J. E. Martin, Physics for Radiation Protection: A Handbook, third ed., Wiley-VCH, 2013.
- [2] E. C. Finch, «Radiation Detection and Measurement,» Wiley, 2020.
- [3] M. S. a. others, «Novel composite materials for radiation shielding applications,» Radiation Physics and Chemistry, p. 109, 2021.
- [4] H. C. a. T. Johnson, Introduction to Health Physics, McGraw-Hill, 2019.
- [5] U. N. R. Commission, «Neutron Sources,» NUREG/CR-6500, 1997.
- [6] D. A. W. a. K. F. Eckerman, «Radiation Dose Calculations for Positron Emission Tomography,» IEEE Transactions on Nuclear Science, pp. 259-263, 1994.
- [7] I. A. E. Agency, «Beta and Neutron Dose Rate Monitoring,» 2018.
- [8] M. G. Stabin, Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics, Wiley-Blackwell, 2008.

Producción de Radioisótopos en el Ciclotrón TR-24

Rodny Andree Batuani Larrea.*

Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica
Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: rbatuani@aben.gob.bo

RESUMEN

Introducción: El ciclotrón TR-24 es un acelerador de partículas diseñado para la producción de radioisótopos utilizados en aplicaciones médicas y de investigación. Gracias a su versatilidad y diseño modular, se ha consolidado en la ABEN como una herramienta fundamental en el campo de la Radiofarmacia, permitiendo la producción de una amplia variedad de radioisótopos esenciales para la medicina nuclear y sus aplicaciones. **Objetivos:** evaluar la capacidad del ciclotrón TR-24 en la producción de diversos radioisótopos, así como su aplicabilidad en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Además, se busca destacar su potencial para satisfacer las demandas actuales y futuras en el ámbito de la salud. **Metodología:** Se evaluaron los parámetros operativos del TR-24, incluyendo energía de irradiación, tipo de blancos utilizados y eficiencia de producción de los radioisótopos para describir las capacidades tecnológicas que permite este equipo en la producción de radioisótopos. **Resultados:** El Ciclotrón TR-24 demostró ser altamente eficiente en la producción de radioisótopos de alta demanda, como el ^{18}F , ^{123}I y $^{99\text{m}}\text{Tc}$, alcanzando niveles óptimos de actividad producidos. Además, se evidenció su capacidad para generar radioisótopos emergentes y de interés creciente, como el ^{89}Zr y el ^{64}Cu , entre otros. **Discusión y conclusiones:** Los resultados muestran que el TR-24 es una opción fiable para la producción de radioisótopos abasteciendo los centros que cuentan medicina nuclear en la región. Su diseño permite ajustes flexibles en la producción, asegurando una alta disponibilidad de materiales radiactivos para uso médico.

Palabras claves: Radioisótopos, Ciclotrón, Producción

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la tecnología nuclear ha impulsado en nuestro país avances significativos en el campo de la salud, particularmente a través de la medicina nuclear. En este contexto, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) ha dado un paso fundamental con la implementación del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), un proyecto estratégico que incluye, entre sus componentes clave, el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica. Este complejo tiene como objetivo principal la producción de radioisótopos y radiofármacos, así como la investigación preclínica, contribuyendo así al diagnóstico y tratamiento de enfermedades con tecnología de vanguardia.

El corazón de este complejo es el ciclotrón TR-24, fabricado por Advanced Cyclotron Systems Inc. (ACSI), un acelerador de partículas diseñado para alcanzar energías de entre 16 Mega Electrón Voltios (MeV) y 24 MeV, con una intensidad de corriente de hasta 300 microamperios (μA). Estas características lo convierten en una herramienta idónea para la producción de un

amplio espectro de radioisótopos mediante el bombardeo de blancos con haces de protones. Además, su tecnología avanzada permite trabajar con blancos en cualquier estado físico: líquidos, sólidos o gaseosos, lo que amplía su versatilidad y capacidad de producción.

El TR-24 en la ABEN está diseñado para maximizar su eficiencia operativa puesto que cuenta con dos líneas de haz que aceleran partículas cargadas y cinco estaciones de blancos: dos para blancos sólidos, dos para líquidos y una para gaseosos. Esta configuración no solo permite la producción de múltiples radioisótopos, sino que también facilita la realización de irradiaciones simultáneas, lo que significa que es posible producir dos radioisótopos diferentes al mismo tiempo. Esta capacidad es especialmente relevante en un contexto donde la demanda de radioisótopos para aplicaciones médicas está en constante crecimiento.

El desarrollo de la medicina nuclear ha generado una necesidad creciente de producir radioisótopos de alta pureza y calidad, esenciales para técnicas de diagnóstico y tratamiento como la tomografía por emisión de positrones (PET) y la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT). Estas técnicas permiten visualizar procesos fisiológicos y metabólicos en el cuerpo humano con un nivel de detalle sin precedentes, lo que las convierte en herramientas indispensables para el diagnóstico temprano y el seguimiento de enfermedades como el cáncer, trastornos cardiovasculares y neurológicos, entre otras.

En este sentido, el ciclotrón TR-24 de la ABEN se posiciona como una herramienta estratégica no solo para Bolivia, sino también para la región, al garantizar la producción local de radioisótopos como el ^{18}F , utilizado en PET, y el $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ampliamente empleado en SPECT. Además, su capacidad para producir radioisótopos emergentes, como el ^{89}Zr y el ^{64}Cu , abre nuevas posibilidades para la investigación y el desarrollo de terapias innovadoras en el campo de la medicina nuclear.

La implementación de este complejo no solo fortalece la infraestructura científica y tecnológica del país, sino que también reduce la dependencia de la importación de radioisótopos, asegurando un suministro constante y confiable para los centros médicos. Asimismo, fomenta la investigación y desarrollo en áreas como la Radiofarmacia y los radiofármacos teranósticos, donde los radiofármacos no solo se utilizan para el diagnóstico, sino también para el tratamiento dirigido de enfermedades.

2. METODOLOGÍA

Tomando en consideración las especificaciones técnicas del equipo, Se analizaron los siguientes aspectos:

- Tipo de blancos utilizados (sólidos, líquidos y gaseosos).
- Parámetros de energía y corriente del haz.
- Pureza y actividad específica de los radioisótopos obtenidos.
- Evaluación de tiempos de decaimiento y eficiencia en la extracción.

Fluor-18

A la fecha, el principal producto elaborado en el ciclotrón TR-24 de la ABEN es el Flúor-18 (^{18}F), utilizado principalmente para la producción de $[^{18}\text{F}]\text{-FDG}$ (Fluorodesoxiglucosa), un radiofármaco ampliamente empleado en tomografía por emisión de positrones (PET). El Flúor-18 es considerado un isótopo ideal para esta técnica debido a sus excepcionales propiedades físicas y químicas, que lo convierten en una herramienta clave para la obtención de imágenes médicas de alta resolución.

El Flúor-18 se caracteriza por emitir positrones con una energía cinética máxima de 0.64 MeV, la más baja entre todos los radioisótopos utilizados en PET. Esta baja energía se traduce en un alcance reducido del positrón (menor a 2.4 mm en tejido), lo que contribuye significativamente a la obtención de imágenes de alta resolución espacial. Además, el Flúor-18 decae mediante una emisión de positrones casi pura (superior al 97%), transformándose en un núcleo estable, el Oxígeno-18. Su vida media de 109.7 minutos es otro factor clave, ya que proporciona el tiempo suficiente para la síntesis de radiofármacos y su distribución a centros médicos remotos, sin comprometer su actividad radiactiva.

Desde el punto de vista químico, el Flúor-18 destaca por su capacidad para formar enlaces covalentes fuertes con el carbono, lo que permite su incorporación en una amplia variedad de moléculas orgánicas mediante rutas de reacción electrofílicas y nucleofílicas. Estas reacciones suelen alcanzar rendimientos superiores al 50%, lo que garantiza la producción de cantidades suficientes de radiofármacos para su uso en estudios de imagen. Además, la versatilidad química del Flúor-18 permite la síntesis de compuestos como el [18F]-FDG, que se utiliza para evaluar el metabolismo de la glucosa en tejidos, siendo especialmente útil en el diagnóstico y seguimiento de enfermedades oncológicas, neurológicas y cardiovasculares.

La producción de Flúor-18 en el ciclotrón TR-24 se realiza mediante la irradiación de agua enriquecida con Oxígeno-18 (H_2^{18}O). Este proceso genera iones fluoruro ($^{18}\text{F}^-$) en agua pura, lo que hace que la pureza isotópica del Oxígeno-18 sea un factor crítico. Para garantizar una producción óptima, se emplea agua con una pureza isotópica del 98%, asegurando así la calidad y eficiencia del radioisótopo obtenido. Esta metodología no solo es altamente eficiente, sino también escalable, lo que permite satisfacer la demanda creciente de Flúor-18 en el ámbito médico, aprovechando las altas corrientes que alcanza el equipo, la energía variable y la disponibilidad de blancos líquidos de diferentes volúmenes permiten alcanzar actividades de hasta 15 Curies.

En resumen, el Flúor-18 producido en el ciclotrón TR-24 de la ABEN es un radioisótopo de referencia en medicina nuclear, gracias a sus propiedades físicas y químicas que lo hacen ideal para aplicaciones en PET. Su producción local no solo fortalece la autonomía tecnológica del país, sino que también contribuye a mejorar el acceso a técnicas de diagnóstico avanzadas, beneficiando a la población boliviana y posicionando a la ABEN como un actor clave en el desarrollo de la medicina nuclear en la región.

El Flúor-18 producido en el ciclotrón TR-24 de la ABEN es un radioisótopo de referencia en medicina nuclear, gracias a sus propiedades físicas y químicas que lo hacen ideal para aplicaciones en PET. Su producción local no solo fortalece la autonomía tecnológica del país, sino que también contribuye a mejorar el acceso a técnicas de diagnóstico avanzadas, beneficiando a la población boliviana y posicionando a la ABEN como un actor clave en el desarrollo de la medicina nuclear en la región.

Iodo-123

El 123I (Yodo-123) es un isótopo radiactivo del yodo que decae mediante captura de electrones a 123Te (Telurio-123), emitiendo fotones gamma con una energía de 159 keV. Esta característica lo convierte en un radioisótopo ideal para estudios de diagnóstico in vivo, particularmente en técnicas de imagen como la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT). Además, su periodo de semidesintegración de 13.22 horas permite un equilibrio adecuado entre la duración de los estudios médicos y la reducción de la exposición radiactiva del paciente. Una de las principales aplicaciones del 123I es en el diagnóstico de enfermedades tiroideas,

como el hipertiroidismo, el hipotiroidismo y el cáncer de tiroides. A diferencia del ^{131}I (Yodo-131), el ^{123}I no produce daño significativo a las células tiroideas, lo que lo hace más seguro para estudios de diagnóstico. Esto se debe a que el ^{131}I emite partículas beta (β) de alta energía, que pueden causar un efecto conocido como "stunning", donde las células foliculares de la tiroides resultan dañadas y pierden su capacidad para captar el radioisótopo. Este fenómeno puede comprometer la precisión de los estudios postterapéuticos, ya que las imágenes obtenidas con ^{131}I no logran detectar adecuadamente los focos de células cancerígenas, los cuales sí son visibles cuando se utiliza ^{123}I , también La emisión de fotones gamma de 159 keV permite obtener imágenes SPECT de alta resolución, lo que facilita la detección precisa de anomalías tiroideas.

El ^{123}I se produce en un ciclotrón mediante la irradiación de Xenón-124 (^{124}Xe) con protones. Existen dos rutas principales de producción:

- a) Reacción nuclear (p,pn): El bombardeo de ^{124}Xe con protones genera ^{123}Xe (Xenón-123) a través de la reacción $^{124}\text{Xe}(p,pn)^{123}\text{Xe}$. Este isótopo de xenón decae posteriormente a ^{123}I mediante captura de electrones.
- b) Reacción nuclear (p,2n): Alternativamente, la irradiación de ^{124}Xe puede producir ^{123}Cs (Cesio-123) mediante la reacción $^{124}\text{Xe}(p,2n)^{123}\text{Cs}$. El ^{123}Cs decae a ^{123}Xe , que a su vez se transforma en ^{123}I .

En ambos casos, el ^{123}Xe actúa como un intermediario clave en la producción de ^{123}I , asegurando una alta pureza y rendimiento del radioisótopo final.

Además de su uso en el diagnóstico de enfermedades tiroideas, el ^{123}I se emplea en otros estudios de medicina nuclear, como la evaluación de la función tiroidea, mediante la captación de ^{123}I por la glándula tiroides, se puede medir su actividad funcional y su química permite realizar la marcación de otros radiofármacos para distintos estudios (como la obtención de imágenes de neuroblastomas y feocromocitomas, diagnóstico de la hipoxia tumoral entre otras).

Siendo que el TR-24 permite la irradiación de diferentes tipos de blancos, cuenta con una estación de alta energía para irradiación de blanco gaseosos para la producción de ^{123}I , lo que facilita la producción eficiente de ^{123}I , cuenta con un sistema de cámaras de decaimiento y purificación, que permiten purificar el ^{123}I de manera efectiva y operando a una corriente de mas de 100 microamperios, es posible obtener dosis de ^{123}I capaces de abastecer el mercado nacional y regional desde el CCRP como punto de distribución.

El ^{123}I es un radioisótopo versátil y seguro, cuya producción en ciclotrón TR-24 mediante la irradiación de ^{124}Xe garantiza una alta pureza y eficiencia. Sus propiedades físicas y químicas lo convierten en una herramienta indispensable para el diagnóstico preciso de enfermedades tiroideas y otras afecciones, ofreciendo imágenes de alta calidad con una exposición radiactiva mínima para el paciente. Su uso en medicina nuclear no solo mejora la precisión diagnóstica, sino que también contribuye a optimizar los tratamientos, beneficiando tanto a los pacientes como al sistema de salud en general.

Tecnecio-99m

El Tecnecio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) es uno de los radioisótopos más utilizados en medicina nuclear debido a sus propiedades físicas y químicas ideales para aplicaciones de diagnóstico. Con un periodo de semidesintegración de 6 horas y la emisión de fotones gamma de 140 keV, el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ es

ampliamente empleado en tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT) para estudios de imagen en cardiología, oncología, neurología y otras áreas médicas. Su corta vida media y su baja energía de emisión gamma lo hacen seguro para los pacientes, minimizando la exposición a la radiación.

El Ciclotrón TR-24 es una herramienta clave para la producción de ^{99m}Tc mediante la irradiación de blancos de Molibdeno-100 (^{100}Mo) con protones. La reacción nuclear principal para la producción en ciclotrón del Tecnecio-99m es $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99m}\text{Tc}$, este proceso implica el bombardeo de un blanco sólido de ^{100}Mo con protones acelerados a energías de alrededor de 20-24 MeV. Y corrientes elevadas de al menos 250 microAmperios, El ^{100}Mo absorbe un protón y emite dos neutrones, produciendo ^{99m}Tc . Este método de producción directa en ciclotrón es una alternativa eficiente y sostenible a los métodos tradicionales basados en generadores de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$, que dependen de reactores nucleares y su capacidad de procesar el ^{99}Mo y producir Generadores suficientes para abastecer el mercado.

El Ciclotrón TR-24 está equipado con sistemas avanzados para la producción eficiente de ^{99m}Tc , con un sistema de blancos de alta corriente optimizados para maximizar la producción de ^{99m}Tc , sistemas de separación y purificación que garantizan la obtención de ^{99m}Tc con una pureza adecuada para su uso en medicina nuclear

La producción de ^{99m}Tc en el Ciclotrón TR-24 representa un avance significativo en el campo de la medicina nuclear, ofreciendo una alternativa sostenible y eficiente a los métodos tradicionales basados en generadores de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. Sus propiedades físicas y químicas, combinadas con la capacidad de producción del TR-24, lo convierten en una herramienta de suministro constante y seguro, beneficiando a la población con su pronta disponibilidad para estudios SPECT.

Zirconio-89

El ^{89}Zr (Zirconio-89) es un radioisótopo emisor de positrones que decae mediante desintegración beta positiva (β^+), transformándose en ^{89}Y (Itrio-89), lo que lo hace ideal para su uso en tomografía por emisión de positrones (PET). Su periodo de semidesintegración de 78.4 horas (aproximadamente 3.3 días) es particularmente ventajoso para estudios de seguimiento a largo plazo, ya que permite la obtención de imágenes de alta calidad durante un período prolongado sin comprometer la seguridad del paciente.

Una de las principales aplicaciones del ^{89}Zr es en el campo de la inmunoPET, una técnica que combina la especificidad de los anticuerpos monoclonales con la sensibilidad de la PET. Esto permite visualizar y cuantificar la distribución de biomoléculas específicas en el cuerpo, como receptores tumorales o marcadores de inflamación. A diferencia de otros radioisótopos utilizados en PET, como el ^{18}F (Flúor-18), el ^{89}Zr tiene una vida media más larga, lo que lo hace compatible con el tiempo de circulación de los anticuerpos monoclonales en el organismo, facilitando estudios de biodistribución y farmacocinética.

El ^{89}Zr se produce en un ciclotrón mediante la irradiación de Itrio-89 (^{89}Y) con protones, siguiendo la reacción nuclear $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$. Este proceso genera ^{89}Zr con una alta pureza radionuclídica, lo que es esencial para su uso en aplicaciones médicas. Además, la producción de ^{89}Zr requiere el uso de blancos sólidos de alta pureza, que son irradiados a energías de protones de alrededor de 14 MeV. Posteriormente, el ^{89}Zr es separado y purificado mediante técnicas de química radiométrica, como la cromatografía de intercambio iónico, para garantizar su calidad y seguridad.

El ^{89}Zr también se utiliza en la investigación preclínica y clínica de enfermedades oncológicas, especialmente en el desarrollo de radiofármacos dirigidos. Su capacidad para unirse a anticuerpos monoclonales y otros ligandos específicos lo convierte en una herramienta poderosa para la detección temprana de tumores, la evaluación de la respuesta terapéutica y la planificación de tratamientos personalizados. Además, su larga vida media permite su uso en estudios de seguimiento a largo plazo, lo que es particularmente útil en la evaluación de terapias dirigidas y la monitorización de la progresión de enfermedades.

Cobre-64

El Cobre-64 (^{64}Cu) es un radioisótopo versátil con propiedades químicas y nucleares que lo hacen ideal tanto para imágenes de tomografía por emisión de positrones (PET) como para aplicaciones en terapia. Con un periodo de semidesintegración de 12.7 horas, el ^{64}Cu decae mediante tres mecanismos principales: emisión de positrones (β^+), emisión de electrones (β^-) y captura de electrones. Estas características permiten su uso en diagnósticos médicos y terapias dirigidas, especialmente en enfermedades oncológicas.

Por un lado, la vida media prolongada del ^{64}Cu es particularmente ventajosa para estudios de diagnóstico, ya que muchos procesos fisiológicos y biológicos en humanos son lentos, además, el Cobre es el tercer metal mas abundante del cuerpo humano, por detrás del hierro y Zinc. Esto permite una ventana de tiempo amplia para la obtención de imágenes de alta calidad y la realización de estudios de biodistribución, permitiendo la visualización de tejidos cancerosos y la obtención de información molecular detallada mediante técnicas de PET, además, su capacidad para emitir partículas beta y electrones Auger lo convierte en un radioisótopo teranóstico, es decir, el ^{64}Cu es útil tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de enfermedades, puesto que pueden ser aprovechados para inducir daño localizado en células cancerosas, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para terapias dirigidas.

El Ciclotrón TR-24 permite la producción de ^{64}Cu mediante dos rutas principales:

- a) Irradiación de Níquel-64 (^{64}Ni): La reacción nuclear $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ utiliza protones de baja energía (alrededor de 15 MeV) para bombardear blancos de ^{64}Ni enriquecido, electrodepositado sobre una placa soporte. Esta ruta es altamente eficiente y produce cantidades significativas de ^{64}Cu .
- b) Subproducto de la producción de Galio-67 (^{67}Ga): La reacción $^{68}\text{Zn}(p,n)^{68}\text{Ga}$ se lleva a cabo utilizando protones de mayor energía (entre 23.5 y 29 MeV) sobre blancos de Zinc-68 (^{68}Zn). Aunque esta ruta produce menores cantidades de ^{64}Cu , es una alternativa viable cuando se busca obtener ^{67}Ga como producto principal.

Tras la irradiación, el ^{64}Cu debe ser separado y purificado mediante procesos químicos, como la cromatografía de intercambio iónico, para eliminar impurezas y garantizar su pureza Radionucleídica.

La producción de este isótopo tiene sus consideraciones y desafíos que deben tomarse en cuenta al momento de ejecutar su producción, por un lado, El ^{64}Ni tiene una baja abundancia natural, lo que encarece su uso como material de blanco. Para mitigar este problema, debe de implementar sistemas de reciclado local del ^{64}Ni después de su irradiación, y por el otro lado, Cuando se utiliza ^{68}Zn , es necesario modificar el soporte del blanco para evitar la disolución de materiales no deseados. Una solución común es la galvanoplastia de oro sobre el soporte de cobre o plata antes de depositar el ^{68}Zn , lo que previene la contaminación del ^{64}Cu con otros radioisótopos

El ^{64}Cu es un radioisótopo teranóstico de gran valor en medicina nuclear, gracias a sus propiedades físicas y químicas que lo hacen ideal para aplicaciones de diagnóstico y terapia. Su producción en el Ciclotrón TR-24 ya sea mediante la irradiación de ^{64}Ni o ^{68}Zn es posible y garantiza un suministro confiable, aunque requiere consideraciones técnicas para optimizar los procesos de producción y purificación. Su uso no solo abre la posibilidad de nuevos productos para lograr mayor precisión diagnóstica, sino que también abre nuevas posibilidades para el tratamiento dirigido de enfermedades, siendo beneficioso de implementar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El Ciclotrón TR-24 ha demostrado ser altamente eficiente en la producción de radioisótopos de alta demanda para aplicaciones médicas, como el Flúor-18 (^{18}F), Yodo-123 (^{123}I) y Tecnecio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), alcanzando niveles óptimos de actividad con pureza química y radionucleídica adecuadas para su uso en diagnóstico.

La producción de ^{18}F , utilizada principalmente en la síntesis de [^{18}F]-FDG, ha sido optimizada mediante la irradiación de agua enriquecida con Oxígeno-18 (H_2^{18}O). Los rendimientos alcanzados permiten satisfacer la demanda local y regional, reduciendo la dependencia de importaciones. Además, la capacidad del ciclotrón para operar a altas corrientes asegura una producción escalable, lo que es fundamental para centros de imagen PET en expansión.

En cuanto al ^{123}I , su producción a partir de la irradiación de Xenón-124 (^{124}Xe) ha permitido generar un isótopo de alta pureza, minimizando la contaminación con ^{131}I , lo que es crucial para la obtención de imágenes de calidad en estudios tiroideos y neurológicos. La infraestructura del TR-24, que incluye estaciones de irradiación de blancos gaseosos y cámaras de purificación, ha sido clave para optimizar la producción y garantizar una dosis suficiente para abastecer centros de medicina nuclear en la región.

La producción de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ mediante la reacción $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$ es una alternativa innovadora y sostenible a la tradicional producción basada en reactores nucleares. Las altas corrientes del TR-24 han permitido obtener cantidades significativas de este radioisótopo con una pureza adecuada para su aplicación en SPECT, reduciendo la dependencia de generadores de Molibdeno-99 (^{99}Mo).

Además, el TR-24 ha demostrado su capacidad para producir radioisótopos emergentes de interés en investigación y nuevas terapias, como el Zirconio-89 (^{89}Zr) para inmunoPET y el Cobre-64 (^{64}Cu), con aplicaciones en diagnóstico y terapia dirigida. Estos isótopos abren nuevas oportunidades en el desarrollo de radiofármacos personalizados, impulsando la innovación en medicina nuclear.

En términos operativos, el TR-24 ha demostrado una alta estabilidad y eficiencia, con tiempos de mantenimiento optimizados gracias a su diseño modular. La flexibilidad en la selección de blancos y la posibilidad de realizar irradiaciones simultáneas han permitido maximizar la producción y diversificar la oferta de radioisótopos disponibles.

4. CONCLUSIONES

el Ciclotrón TR-24 es una herramienta clave para la producción de radioisótopos utilizados en medicina nuclear, garantizando un suministro confiable de ^{18}F , ^{123}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y otros isótopos emergentes. Su capacidad para operar con diferentes tipos de blancos y su eficiencia en la producción lo posicionan como un recurso estratégico para la atención médica, la investigación y el desarrollo de nuevos radiofármacos.

La implementación del TR-24 en la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) ha reducido significativamente la dependencia de importaciones de radioisótopos, asegurando la autonomía del país en el abastecimiento de materiales radiactivos para diagnóstico y tratamiento. Además, su flexibilidad y capacidad de producción permiten atender la demanda creciente de los centros de medicina nuclear en Bolivia y la región.

La producción de radioisótopos emergentes como ^{89}Zr y ^{64}Cu abre nuevas posibilidades para la personalización de tratamientos en oncología y otras especialidades médicas, consolidando el papel del TR-24 como una plataforma de innovación en radiofarmacia.

5. REFERENCIAS

- Advanced Cyclotron Systems Inc. (2022). <https://advancedcyclotron.com/our-cyclotrons/tr24/>.
- Watt, Russell & Gyles, William & Zyuzin, Alexander. (2015). Building on TR-24 success: Advanced Cyclotron Systems Inc. launches a new cyclotron model. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*
- IAEA (2021). IAEA-TECDOC-1968 "PRODUCTION AND QUALITY CONTROL OF FLUORINE-18 LABELLED RADIOPHARMACEUTICALS".
- VanBrocklin, H. F. (2021). Chapter 25 - PET radiochemistry. En B. D. Ross & S. S. Gambhir (Eds.), *Molecular imaging* (2ª ed., pp. 445-478). Academic Press.
- Mandel S. J., Lalitha K., Benard F., Yamamoto A., Alavi A., 2001. Superiority of Iodine-123 Compared with Iodine-131 Scanning for Thyroid Remnants in Patients with Differentiated Thyroid Cancer, *Clinical Nuclear Medicine*. 26:1, 6-9.
- Zhang Y, Hong H, Cai W. PET tracers based on Zirconium-89. *Curr Radiopharm*. 2011 Apr.
- IAEA (2016). IAEA RADIOISOTOPES AND RADIOPHARMACEUTICALS REPORTS No. 1 "CYCLOTRON PRODUCED RADIONUCLIDES: EMERGING POSITRON EMITTERS FOR MEDICAL APPLICATIONS: ^{64}Cu AND ^{124}I ".

Seguridad en la operación del Ciclotrón TR24

Luis Miguel Chavez Patiño.*

Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica
Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: lchavez@aben.gob.bo

RESUMEN

Introducción: La operación de un ciclotrón como el TR24 implica riesgos físicos y radiológicos que deben ser gestionados para garantizar la seguridad del personal, el medio ambiente y la integridad de la instalación. La seguridad se fundamenta en normativas nacionales e internacionales y protocolos de seguridad, que incluyen medidas de protección radiológica, control de accesos y procedimientos de emergencia. **Objetivo:** Describir las medidas de seguridad física y radiológica en diferentes actividades desarrolladas en el CCRP. **Metodología:** Descriptiva, basada en la recopilación de información sobre la aplicación de normativas en un año de funcionamiento del CCRP. El análisis incluye ejemplos reales. **Resultados:** La seguridad radiológica se gestiona mediante blindajes estructurales, monitoreo continuo de dosis, y el uso de equipo de protección personal. Se establecieron zonas controladas y supervisadas para restringir el acceso según los niveles de radiación. En cuanto a la seguridad física, se implementaron sistemas de control de acceso, videovigilancia y protocolos de verificación de identidad para prevenir accesos no autorizados. Además, los planes de emergencia incluyen simulacros periódicos y procedimientos de evacuación y contención de incidentes. **Discusión:** Las medidas implementadas cumplen con los estándares nacionales e internacionales y permiten una operación segura del ciclotrón. No obstante, la seguridad debe actualizarse continuamente. La capacitación del personal es un factor clave para la efectividad de los protocolos de seguridad. **Conclusiones:** La seguridad en la operación del ciclotrón TR24 es un aspecto crítico que involucra medidas físicas y radiológicas estrictas. El cumplimiento normativo, la capacitación del personal y el mantenimiento de los sistemas de seguridad son esenciales para minimizar riesgos. La mejora continua de los protocolos contribuirá a fortalecer la seguridad y eficiencia operativa en la instalación.

Palabras claves: Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica; Seguridad Física, Protección Radiológica.

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL CICLOTRÓN TR24

El Ciclotrón TR24, instalado en el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP), es un acelerador de partículas utilizado para la producción de radioisótopos empleados en radiofarmacia. Se encuentra ubicado en el búnker, una zona de alta seguridad diseñada para contener la radiación generada durante su operación. Además, cuenta con un cuarto de control desde donde se monitorean y operan todos sus procesos, y un pre-búnker (Sala Técnica de Ciclotrón) donde están instalados los sistemas de alimentación, medición y control del equipo.

1.1. Características Técnicas

El TR24, fabricado por Advanced Cyclotron Systems Inc. (ACSI), es un ciclotrón de energía media diseñado para la producción de radioisótopos utilizados en medicina nuclear.

Parámetros físicos y operativos:

- Tipo: Acelerador de partículas tipo ciclotrón.
- Energía de protones: Hasta 24 MeV.
- Corriente del haz: Hasta 300 μ A.
- Tipo de aceleración: Utiliza campos magnéticos y eléctricos para acelerar protones.
- Modos de operación: Puede operar en distintos rangos de energía según el radioisótopo que se desee producir.

1.2. Producción de Radioisótopos

El TR24 está diseñado para irradiar blancos específicos y producir radioisótopos utilizados en diagnóstico por imágenes y tratamientos médicos. Algunos de los radioisótopos que puede producir incluyen:

- Fluor-18 (^{18}F), Usado en FDG (Fluorodesoxiglucosa) PET para estudios oncológicos.
- Carbono-11 (^{11}C), Aplicado en investigación y diagnóstico por PET.
- Galio-68 (^{68}Ga), Utilizado en radiotrazadores para diagnóstico de tumores neuroendocrinos.
- Cobre-64 (^{64}Cu), Empleado en estudios de imágenes PET y terapia.
- Zircinio-89 (^{89}Zr), Utilizado en inmuno-PET para estudios oncológicos.
- Tecnecio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), Uno de los radioisótopos más utilizados en medicina nuclear, empleado en gammagrafías para el diagnóstico de enfermedades óseas, cardíacas y otros órganos. Puede producirse a partir de blancos de molibdeno-100 (^{100}Mo) irradiado con protones.
- Yodo-123 (^{123}I), Radioisótopo utilizado en estudios de tiroides y otras aplicaciones en imagenología médica. Se produce irradiando blancos de xenón-124 (^{124}Xe).

2. ÁREAS DEL COMPLEJO CICLOTRÓN RADIOFARMACIA PRECLÍNICA (CCRP).

Área de Ciclotrón:

- Taller del Ciclotrón: Se realizan tareas de mantenimiento en los distintos componentes del ciclotrón TR24, incluyendo cambios de blancos, mantenimiento de ventanas de Havar, o-rings y otros elementos esenciales para su operación.
- Pre-bunker (o Sala Técnica de Ciclotrón): Alberga los sistemas de alimentación eléctrica, medición y control del ciclotrón TR24. Aquí se encuentran los PLC (Controladores Lógicos Programables), que regulan el funcionamiento de los equipos.
- Bunker: Espacio blindado donde se encuentra instalado el ciclotrón TR24. En esta área se llevan a cabo las reacciones nucleares necesarias para la producción de radioisótopos.
- Cuarto de Control: Desde esta sala se monitorean y operan todos los procesos del ciclotrón, incluyendo la aceleración de partículas y la producción de radioisótopos.

Producción:

- Cambiadores de Producción: Área donde el personal se equipa con ropa y elementos de protección para ingresar a las zonas controladas de producción de radiofármacos.

- Pasillo de Salas Limpias: Corredor de acceso a los laboratorios de producción, diseñado para minimizar el riesgo de contaminación y mantener las condiciones de esterilidad.
- Laboratorios de Producción: Espacios donde se manipulan y procesan los radioisótopos obtenidos en el ciclotrón para la producción de radiofármacos. Aquí se realizan procesos de síntesis, fraccionamiento y envasado de los productos.

Control de Calidad:

- Laboratorio de Control de Calidad: Área destinada a la verificación de la pureza, concentración y seguridad de los radiofármacos producidos. Se realizan pruebas de esterilidad, apirógenos y análisis fisicoquímicos para garantizar que los productos cumplan con los estándares requeridos antes de su distribución y posterior administración a los pacientes.

Despacho

- Sala de Despacho de Radiofármacos: Sala donde los radiofármacos terminados y aprobados por el control de calidad son preparados para su distribución. Aquí se supervisa el embalaje y etiquetado conforme a las regulaciones de seguridad radiológica y transporte de material radiactivo.

3. SEGURIDAD FÍSICA

La seguridad física se refiere a las medidas para prevenir, detectar y responder a actos malintencionados que involucren material nuclear, material radiactivo, instalaciones nucleares y otras actividades asociadas. Elementos de la Seguridad Física:

3.1. Defensa en Profundidad

La estrategia de defensa en profundidad es una medida esencial para prevenir accesos no autorizados y proteger los materiales nucleares (OIEA, 2014). Es un enfoque de seguridad basado en la implementación de múltiples capas de protección para evitar el acceso no autorizado a materiales o instalaciones nucleares. Si una capa de seguridad falla, otra estará disponible para detener o retrasar la amenaza. Incluye:

- Medidas físicas (barreras, sistemas de control de acceso).
- Medidas técnicas (detección de intrusos, videovigilancia).
- Medidas organizacionales (procedimientos de respuesta, personal capacitado).

3.2. Detección

Consiste en la identificación de actividades no autorizadas o sospechosas que puedan amenazar la seguridad de una instalación nuclear. Se logra mediante:

- Sensores y alarmas de intrusión.
- Sistemas de vigilancia por cámaras (CCTV).
- Patrullaje y monitoreo por parte del personal de seguridad.

3.3. Prevención (o Dilatación/Demora)

Se refiere a las estrategias utilizadas para retrasar el avance de una amenaza una vez detectada, permitiendo ganar tiempo para que las fuerzas de seguridad respondan. Se logra a través de:

- Barreras físicas como muros, rejas, puertas reforzadas.
- Diseño de infraestructura que dificulte el acceso rápido a zonas críticas.
- Dispositivos de bloqueo o trabas electrónicas.

3.4. Respuesta

Comprende las acciones tomadas para neutralizar una amenaza después de su detección. Incluye:

- Intervención del personal de seguridad.
- Coordinación con fuerzas policiales o militares.
- Aplicación de planes de contingencia para proteger el material y la instalación.

4. SEGURIDAD RADIOLÓGICA

La seguridad radiológica es un aspecto fundamental en cualquier instalación que utilice tecnología nuclear, especialmente en aquellas que operan con ciclotrones. Estas instalaciones, como el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP), se dedican a la producción de radiofármacos y requieren estrictas medidas de seguridad para proteger tanto al personal como al público y al medio ambiente.

4.1. ¿Qué es la Seguridad Radiológica?

La seguridad radiológica comprende el conjunto de normas, procedimientos y tecnologías diseñadas para minimizar la exposición a la radiación ionizante y prevenir riesgos asociados a su uso. Su objetivo principal es garantizar que las dosis de radiación recibidas por los trabajadores y el público se mantengan dentro de los límites permitidos, asegurando un entorno de trabajo seguro.

4.2. Principios Fundamentales de la Seguridad Radiológica

Según la ICRP (2007), toda práctica que implique exposición a la radiación debe estar justificada, optimizada y limitada a dosis que no excedan los valores permitidos.

- Justificación: Toda práctica que implique exposición a la radiación debe estar justificada, es decir, sus beneficios deben superar los posibles riesgos asociados.
- Optimización: Se debe aplicar el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), lo que significa que la exposición a la radiación debe mantenerse tan baja como sea razonablemente posible.
- Límites de Dosis: Se establecen límites de dosis para trabajadores y público, garantizando que no se excedan los valores permitidos por la normativa vigente.

4.3. Medidas de Seguridad en Instalaciones con Ciclotrones

En el CCRP, la seguridad radiológica se aplica mediante un conjunto de medidas preventivas y correctivas, entre las cuales destacan:

- Monitoreo y control de dosis: Uso de dosímetros personales para medir la exposición de los trabajadores.
- Clasificación de zonas: Separación de áreas en zonas controladas y supervisadas según los niveles de radiación.
- Blindaje y distanciamiento: Uso de barreras físicas y equipos diseñados para reducir la exposición.
- Protocolos de emergencia: Procedimientos establecidos para actuar en caso de incidentes radiológicos.
- Capacitación y concienciación: Formación continua del personal en prácticas seguras y respuesta ante emergencias.

4.4. Zona Controlada y Supervisada

De acuerdo con el Reglamento N° 6 de la Ley 1205 se definen dos áreas en las cuales puede existir presencia de radiación ionizante durante las operaciones rutinarias del CCRP:

- Zona Controlada.
- Zona Supervisada.

4.4.1. Zona Controlada

Una Zona Controlada es un área delimitada dentro la cual se aplican medidas de protección y control radiológico para prevenir o limitar la exposición a la radiación ionizante y la dispersión de material radiactivo. En esta zona, se requieren o podrían requerirse medidas específicas de protección y seguridad tecnológica con el objetivo de controlar las exposiciones en condiciones normales de trabajo, prevenir la propagación de la contaminación radiactiva y limitar el alcance de exposiciones potenciales.

Podemos mencionar algunas características de la Zonas Controladas:

- Límite de acceso.
- Controles de Contaminación.
- Procedimientos Específicos.
- Señalética.

4.4.2. Zona Supervisada

Una Zona Supervisada es un área donde las condiciones de exposición a la radiación ionizante son controladas, pero los niveles de radiación son lo suficientemente bajos como para que las medidas de protección y seguridad aplicadas sean menos estrictas que en una Zona Controlada. En esta zona, se mantiene un monitoreo regular para garantizar que la exposición se mantenga dentro de los límites permitidos, permitiendo una gestión más flexible en comparación con las áreas de mayor riesgo radiológico.

Al igual que en las Zonas Controladas, podemos mencionar características de las Zonas Supervisadas:

- Monitoreo periódico.
- Restricción de Acceso
- Medidas de vigilancia radiológica

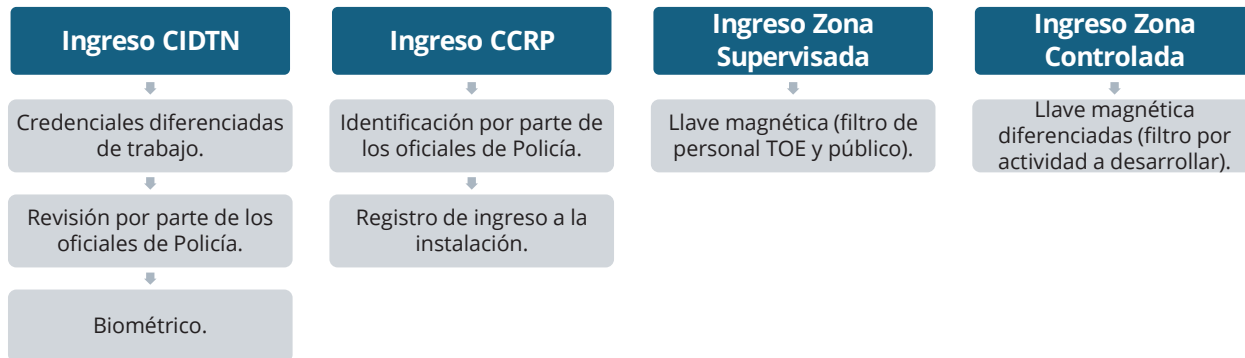
5. RECORRIDO DURANTE LA OPERACIÓN DEL CICLOTRÓN TR24

En la presente sección se realizará un recorrido por el CCRP con el objetivo de mostrar de forma explícita la aplicación de los criterios de seguridad (física y radiológica) adoptados por el personal durante las actividades a ser realizadas.

5.1. Ingreso hasta una Zona Controlada

Para que el personal del CCRP hasta una zona controlada debe pasar por cuatro barreras físicas que impiden (y demoran) a cualquier intruso el poder ingresar a estas áreas.

Diagrama 1. Controles de ingreso desde la puerta principal del CIDTN hasta la Zona Controlada del CCRP.



- **Ingreso al CIDTN:** Al ingresar al Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), es obligatorio que el personal porte en un lugar visible y en todo momento la credencial institucional que lo identifica como trabajador de la institucional. Cabe destacar que la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) está conformada por diversos componentes, entre los cuales se encuentran el Reactor de Investigación (RI), el Centro Multipropósito de Investigación (CMI) y el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP), entre otros. En este contexto, las credenciales poseen colores distintivos que permiten identificar, además, el componente al cual pertenece cada miembro del personal. En el caso de los visitantes, se les entregará una credencial que los identifique como tales. Dicha credencial deberá portarse de manera visible en todo momento durante su permanencia en las instalaciones. Asimismo, el uso del sistema biométrico es una medida adicional que facilita la identificación del personal autorizado. Finalmente, como parte de los procedimientos de seguridad, los oficiales de policía procederán a inspeccionar maletas, bolsos o contenedores para prevenir el ingreso de artículos prohibidos o potencialmente peligrosos para el personal y las instalaciones.
- **Ingreso CCRP:** Una vez completado el proceso de ingreso al CIDTN, el personal autorizado puede dirigirse al acceso del CCRP. En dicho punto de acceso, el oficial de policía presente se encarga de verificar la identificación del personal mediante la credencial institucional correspondiente. Asimismo, es requisito obligatorio que toda persona que ingrese al CCRP realice su registro de manera escrita.
- **Ingreso Zona Supervisada:** El acceso a estas áreas cuenta con un sistema de cerradura magnética, el cual únicamente puede ser activado mediante un pase exclusivo, el cual sólo posee el personal debidamente autorizado. Este personal debe contar, además, con una licencia emitida por la Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear (AETN), que los habilite específicamente para trabajar con material radiactivo.
- **Ingreso Zona Controlada:** esta zona está compuesta por diferentes áreas: ciclotrón, laboratorios de producción y control de calidad. El acceso a estas áreas, al igual que las zonas supervisadas, está equipado con cerraduras magnéticas. Dichas cerraduras únicamente pueden ser activadas por el personal autorizado para ingresar a cada área específica. Por ejemplo, el Operador de Ciclotrón tiene permitido el acceso únicamente al área de ciclotrón, pero su pase no podrá activar las cerraduras magnéticas correspondientes a los laboratorios de producción ni a al área de control calidad.

5.2. Detección de Intrusos

Con el objetivo de facilitar la detección de posibles intrusos, el CIDT) y el CCR) cuentan con sistemas de circuitos cerrados de televisión (CCTV). Estos sistemas permiten al personal

encargado de la seguridad monitorear de manera efectiva las diferentes áreas y secciones del CIDTN.

1. Monitoreo del perímetro del CIDTN.
2. Monitoreo del perímetro del CCRP.
3. Monitoreo del interior del CCRP, con especial atención a las zonas supervisadas y controladas.

5.3. Respuesta

Para facilitar una comunicación ágil y efectiva dentro de la zona controlada, cada ambiente dispone de intercomunicadores estratégicamente ubicados. Junto a estos dispositivos, se encuentra una lista con los números de contacto de las distintas áreas del CCRP, así como los datos de los puestos de los oficiales de policía en el CIDTN. Además, se incluyen los contactos de emergencia, tales como cuerpos de bomberos, centros de salud cercanos, estaciones de policía externas, entre otros.

5.4. Ciclotrón del TR24

5.4.1. Operación

Antes de iniciar la operación del TR24 para la producción de un radioisótopo, el personal debe llevar a cabo una inspección exhaustiva de todos los sistemas del ciclotrón. Este procedimiento es esencial debido a la presencia de enclavamientos de seguridad, que cumplen dos objetivos fundamentales:

- Protección del operador: Garantizan que el personal no se exponga a riesgos innecesarios durante la manipulación del equipo.
- Protección del equipamiento: Salvaguardan la integridad de los sistemas sensibles y peligrosos, evitando daños eléctricos o mecánicos.

Estos enclavamientos se visualizan mediante diagramas de flujo disponibles en la Consola de Control, los cuales detallan la secuencia de acciones necesarias para encender o manipular cualquier sistema del ciclotrón. Por ejemplo, el diagrama correspondiente al primer enclavamiento establece lo siguiente:

Diagrama 2. Condiciones para la condición de Todo Seguro



- Búnker cerrado: Dado que la tasa de radiación en el interior del búnker durante la producción de radioisótopos es muy alta, es indispensable que este se encuentre completamente cerrado para proteger tanto al personal como al entorno.
- Puertas de gabinetes cerradas: Los gabinetes que albergan los sistemas de alimentación y control contienen equipamiento sensible y potencialmente peligroso desde el punto de vista eléctrico. Por ello, las puertas de estos gabinetes cuentan con sensores de presión que aseguran su correcto cierre, minimizando riesgos de daños o accidentes.
- Botón LPO: Este botón se activa durante el proceso de cierre del búnker. Una vez presionado, existe un tiempo límite que permite verificar que todas las condiciones de seguridad se hayan cumplido antes de proceder a la operación del ciclotrón.

Con las condiciones anteriores, se obtiene la condición de Todo Seguro. Esta es la primera condición que se debe alcanzar, a partir de aquí, se deberá cumplir múltiples enclavamientos para los diferentes subsistemas del ciclotrón.

5.4.2. Mantenimiento

El mantenimiento de los equipos dentro del CCRP se lleva a cabo siguiendo estrictos protocolos de seguridad radiológica. Antes de iniciar cualquier actividad de mantenimiento, el personal responsable debe notificar al Responsable de Protección Radiológica (RPR), quien se encarga de evaluar la situación. El RPR determina la tasa de dosis a la que se podría estar expuesto el personal durante la intervención, así como el tiempo de trabajo permitido para minimizar el riesgo radiológico.

Esta evaluación es fundamental para asegurar que todas las labores de mantenimiento se realicen bajo condiciones óptimas de seguridad. Los datos obtenidos, tales como la tasa de dosis y la duración estimada de la intervención, se registran de forma detallada en un libro de actas. Este registro no solo permite un seguimiento riguroso de la exposición acumulada por el personal, sino que también contribuye a la mejora continua de los protocolos de mantenimiento y seguridad en la instalación.

De esta forma, se garantiza que las actividades de mantenimiento no comprometan la salud de los trabajadores ni la integridad de los equipos, manteniendo siempre el cumplimiento de los límites de dosis establecidos por la normativa vigente.

5.5. Medidas de Monitoreo

El monitoreo es fundamental para verificar que las medidas de control se cumplan y para detectar cualquier anomalía en los niveles de radiación, permitiendo actuar de forma inmediata en caso de que se presenten situaciones irregulares. A continuación, se expondrá cuatro subsecciones donde se abarcan el monitoreo ambiental, de superficies, personal y en situaciones de emergencia.

5.5.1. Monitoreo de Radiación Ambiental

El objetivo del monitoreo ambiental es evaluar y controlar los niveles de radiación en todas las áreas críticas de la instalación, asegurando que se mantengan dentro de los límites establecidos por la normativa.

Detectores de Radiación Gamma: Se emplean equipos de detección especializados en distintos sectores de la instalación.

- GM41: Ubicado en el búnker del ciclotrón, este detector mide los niveles de radiación en el área donde se generan las reacciones nucleares.
- GM42: Instalado en las salas de producción, control de calidad, despacho y preclínica, este equipo permite un monitoreo continuo en áreas donde se manipulan y procesan los radioisótopos.
- VRK: Ubicado dentro de las celdas calientes, ofrece información en tiempo real sobre los niveles de radiación.

Sistemas de Alarma y Control:

- Los detectores están conectados a un sistema centralizado que activa alarmas sonoras y visuales en caso de que la radiación supere los niveles predefinidos.
- Este sistema de alarma permite una respuesta inmediata por parte del personal de protección radiológica para tomar las medidas correctivas necesarias.

5.5.2. Monitoreo de Superficies, Personas y Ropa

Este tipo de monitoreo busca prevenir la propagación de contaminación radiactiva, garantizando que tanto las superficies como el personal y la indumentaria se mantengan libres de niveles peligrosos de radiactividad.

Monitoreo de Superficies y Equipos:

- Se utilizan monitores portátiles, como el Ludlum 26-1 y el Ludlum 12-4, para evaluar la presencia de contaminación en áreas críticas y en equipos de trabajo.
- Las mediciones se realizan de manera periódica en puntos estratégicos de cada zona controlada, asegurando que cualquier anomalía sea detectada rápidamente.

Monitoreo del Personal y Ropa de Trabajo:

- Se instalan monitores fijos, por ejemplo, el Ludlum 375, en las salidas de las zonas controladas.
- Estos dispositivos miden la contaminación en las personas y en la ropa al salir de las áreas de riesgo, lo cual es fundamental para evitar la dispersión de materiales radiactivos fuera de los entornos controlados.
- En caso de detectarse contaminación, se activa el protocolo de descontaminación, que incluye procedimientos específicos para limpiar las superficies de la piel y la ropa.

5.5.3. Monitoreo Dosimétrico Personal

El monitoreo dosimétrico es esencial para registrar y evaluar la dosis de radiación acumulada por cada trabajador, permitiendo tomar decisiones informadas sobre la exposición individual y la necesidad de implementar medidas correctivas.

Uso de Dosímetros Personales RAD60:

- Todo el personal que ingresa a las zonas controladas debe portar un dosímetro, dispositivo que mide la cantidad de radiación a la que ha estado expuesto durante su turno.
- Estos dosímetros registran la dosis acumulada y se revisan mensualmente para comparar los resultados con los límites de dosis establecidos.

Registro y Análisis de Datos:

- Los datos dosimétricos se recopilan en registros que permiten llevar un seguimiento histórico de la exposición individual de cada trabajador.
- Si se detecta que un trabajador supera los niveles de alerta, se activan protocolos que incluyen la capacitación adicional, la revisión de los procedimientos de trabajo y, en algunos casos, la asignación de tareas con menor riesgo radiológico.

5.5.4 Monitoreo en Situaciones de Emergencia

En caso de incidentes o emergencias radiológicas, se requiere una respuesta rápida y coordinada para evaluar la exposición y mitigar los riesgos.

Evaluación Inmediata de la Exposición:

- Ante la activación de una alarma o la detección de niveles inusuales de radiación, se procede a una evaluación inmediata utilizando dosímetros electrónicos y detectores portátiles para medir la dosis en tiempo real.
- Esta evaluación permite determinar la magnitud de la exposición y establecer el área afectada.

Activación de Protocolos de Emergencia:

- Se aíslan las áreas donde se ha detectado una elevación de la radiación para evitar que se propague la contaminación.

- El personal de protección radiológica, junto con los equipos de emergencia, procede a iniciar los procedimientos de descontaminación y evacuación si es necesario.

Registro y Reporte del Incidente:

- Se elabora un informe detallado del incidente que incluye los datos de la medición, las acciones emprendidas y las recomendaciones para prevenir futuros eventos.
- Este informe es fundamental para la revisión y mejora continua de los protocolos de seguridad.

6. CONCLUSIONES

La operación del Ciclotrón TR24 en el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica representa un desafío que involucra tanto la gestión de riesgos radiológicos como la seguridad física de la instalación. Las medidas implementadas, que incluyen controles de acceso, sistemas de monitoreo continuo y protocolos de mantenimiento rigurosos, aseguran un ambiente de trabajo seguro para el personal y garantizan la integridad de los radioisótopos producidos. El cumplimiento de los lineamientos establecidos por la ICRP (2007) y la OIEA (2014) es fundamental para garantizar la seguridad en la operación del Ciclotrón TR24, y en conjunto con la actualización constante de los procedimientos y la capacitación del personal, permite minimizar los riesgos inherentes a la operación de equipos de alta tecnología. En este sentido, el cumplimiento normativo y la mejora continua son pilares fundamentales para consolidar la seguridad y eficiencia operativa del CCRP, contribuyendo al avance seguro de la medicina nuclear en el Estado Plurinacional de Bolivia.

7. REFERENCIAS

- International Atomic Energy Agency. (2014). The Safety of Radiation Sources and the Security of Radioactive Materials. IAEA Safety Standards Series No. SSR-3/1. <https://www.iaea.org/publications>
- International Commission on Radiological Protection. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- Agencia Boliviana de Energía Nuclear. (2024). Manual de Seguridad Radiológica del Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica. ABEN.

T A L L E R E S C I E N T Í F I C O S



"BOLIVIANAMENTE"

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



SECCIÓN 3. TALLERES CIENTÍFICOS

Resumen del taller:

Uranio: Desde la identificación hasta la concentración 103

Resumen del taller:

Lineamientos internacionales y normativa nacional en la fase operativa del ciclotrón ...109

Resumen del taller:

Centro Multipropósito de Irradiación..... 113

Resumen de taller:

Técnica del Insecto Estéril 119

Resumen del taller:

Irradiación de Hemocomponentes 122

Resumen de taller:

Monitoreo Radiológico Ambiental..... 126



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

Resumen del Taller:

Uranio: Desde la identificación hasta la concentración

Ladislao Javier Rodríguez Gómez^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).
Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear (DATN)
La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia
Correo electrónico: (1*) lrodriguez@aben.gob.bo

LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Te invita a participar del webinar gratuito:

“Uranio: Desde la identificación hasta la concentración”.

TEMARIO:

Etapas de desarrollo de un proyecto uranífero:

- Prospección y exploración.
- Modelo de depósito y estimación.
- Explotación y concentración.

Para inscribirte y recibir tu certificado de participación envía una captura de pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a:



Ing. Ladislao Javier Rodríguez Gómez

RESUMEN

Se presenta métodos y técnicas geológicas avanzadas para la detección de depósitos de uranio en diversos ambientes geológicos y se destacó la importancia de este elemento en diversas aplicaciones, en particular en la industria nuclear y la investigación científica. Además, se abordaron procesos y tecnologías utilizadas en la concentración de uranio, contribuyendo a una comprensión integral de este componente esencial en la ciencia y la tecnología contemporáneas.

HISTORIA DEL URANIO

El Uranio, fue descubierto en 1789 por el químico alemán Martin Klaproth en la Pechblenda, lleva su nombre en honor al planeta Urano, que había sido descubierto en 1781. A finales del siglo XIX, la República Checa marcó el inicio de la extracción a gran escala de uranio, en parte para los estudios de Marie Curie sobre el aislamiento del Radio. La explotación masiva de depósitos de uranio se expandió a partir de 1945 en regiones como Sudáfrica, Australia y Estados Unidos. En 1948, el suministro de uranio para países occidentales provenía principalmente de Port Radium en Canadá y Shinkolobwe en el Congo Belga. Estos hitos históricos marcaron el desarrollo y la expansión de la industria del uranio en todo el mundo.



Figura 1. Mina subterránea Shinkolobwe

PROSPECCIÓN REGIONAL

La prospección regional abarca la búsqueda de indicios de mineralización en el suelo y subsuelo utilizando métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos (radiometría aerotransportada), así como técnicas y herramientas apropiadas. Los trabajos previos para la identificación de áreas potenciales de contener depósitos de minerales radiactivos y elementos asociados incluyen; la consolidación del área con concesiones mineras, planificación del programa de muestreo de sedimentos de drenaje, teledetección (procesamiento de imágenes) para identificación de zonas de alteración hidrotermal y otras anomalías satelitales y elaboración de un mapa geológico base. En el terreno, programas de socialización del proyecto a ejecutarse, realizar el muestreo de sedimentos de corriente y muestreo orientativo de rocas, efectuar el mapeo geológico regional y lleva a cabo prospección geofísica tanto aerotransportada como terrestre.

El procesamiento de toda la información permitirá generar mapas geológicos, geoquímicos y geofísicos, concluyendo con la identificación de blancos potenciales.

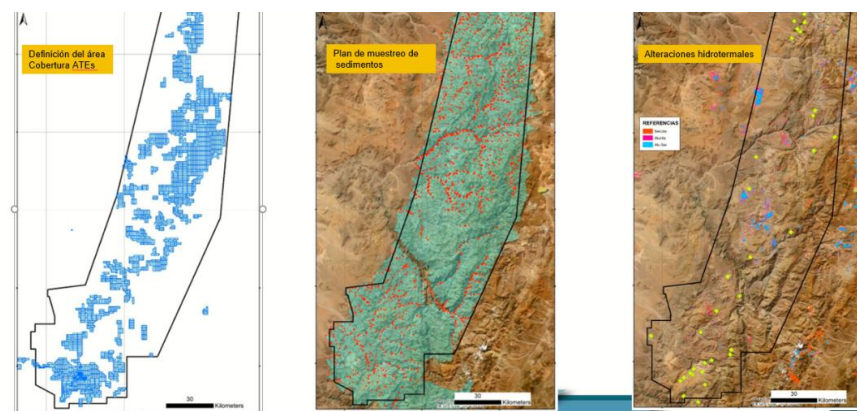


Figura 2. Prospección regional (propiedades mineras, plan de muestreo, alteraciones

CAMPO – MUESTREO DE SEDIMENTOS DE CORRIENTE

Es fundamental tener en cuenta un rango de área de influencia de una cuenca no muy extenso, generalmente entre 5 a 15 km², con una densidad de muestreo de aproximadamente una muestra cada 10 km² y es recomendable usar una malla estándar de muestreo de malla #10 (apertura de 2 mm). Se recomienda tomar muestras inicialmente utilizando dos medidas de malla diferentes con el objetivo de obtener la respuesta más precisa y continuar si con la medida que mejores leyes provea. Además, en el sitio de prospección, es beneficioso muestrear dos o tres pozos y combinar las muestras en un compuesto. Este enfoque estratégico optimiza la eficiencia de la prospección de uranio y mejora la probabilidad de identificar zonas de interés.



Muestreo sobre trincheras



Muestreo canaletas continuas



Resultado muestreos en canaletas



Muestreo de pozos en lateritas

Figura 4. Tipos de muestreo detallado y mapa de distribución

PERFORACIÓN A DIAMANTINA/CIRCULACIÓN REVERSA

Esta etapa es producto del desarrollo de la exploración inicial, donde la integración de todos los datos permite la elaboración de un plan de perforación, incluyendo esta etapa la construcción de accesos, plataformas y pozos de decantación de lodos, ubicada la máquina de perforación según datos del plan, se procede al inicio de la perforación, durante la cual se obtienen testigos de perforación, en el caso de la circulación reversa material triturado por un tricono, estudios geológicos de las muestras comprenden el logueo, muestreo para análisis geoquímicos y otros especiales para determinar la litología, alteración, mineralización y radiometría entre otros. Todo este proceso se repite incrementando la cantidad de metros de perforación y estudios adicionales en forma sistemática hasta llegar a una fase de evaluación si el potencial continua durante este proceso.

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN PROSPECCIÓN-EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN

Para abordar la exposición a la radiactividad de origen natural de U-Th-K y su progenie, se requiere un plan integral de protección y seguridad radiológica que abarque diversas etapas. En la prospección, se debe considerar el posible contacto con el gas radón en fuentes termales, lo que implica el uso de Equipos de Protección Personal (EPP) en especial respiradores antigases. En la fase de exploración y evaluación, en la que se tiene mayor contacto con material radiactivo, actividades que incluyen el mapeo detallado y muestreo de material radiactivo, se hace necesario el uso de EPP, que incluye guantes, lentes y dosímetros, tanto en ambientes cerrados como en monitores programados. A medida que avanzamos hacia la explotación y concentración, el uso de EPP se amplía para incluir respiradores contra polvo y gases, junto con un monitoreo constante de los entornos de trabajo, áreas de acumulación de carga y líquidos, y la incorporación permanente de dosímetros en la mina, limitando la dosis efectiva

anual a 20 mSv/año. Además, en términos de salud y seguridad ocupacional, se recomienda el lavado de manos tras cualquier contacto con rocas o material radiactivo durante las etapas de prospección y exploración, el uso de ropa específica para el trabajo y la implementación de programas planificados de exámenes médicos específicos para todo el personal involucrado en estas actividades.

TIPOS DE DEPÓSITOS DE URANIO

Es crucial definir el tipo de depósito (figura 5) en una etapa inicial para avanzar en su exploración, particularmente en depósitos de uranio, que presentan una clasificación con 15 tipos, 36 subtipos y 16 clases, una amplia variedad mineralógica, que abarca 249 especies minerales, incluyendo óxidos, hidróxidos, óxidos complejos, fosfatos, carbonatos, silicatos, arseniatos, vanadatos y otros, todo esto al ser el uranio un elemento litófilo.

PREFACTIBILIDAD - FACTIBILIDAD

Realizar un estudio técnico-económico, cuyo nivel de complejidad varía entre diferentes etapas, se divide en dos fases: la prefactibilidad y la factibilidad.

En la fase de pre factibilidad, se llevan a cabo diversas tareas cruciales, como la determinación del tamaño de la mina y la planta, la elección del método de explotación y procesamiento, la estimación de las reservas considerando su viabilidad económica, la planificación minera que abarca el desarrollo, extracción y producción, la selección de equipamiento e infraestructura, la elaboración de proyecciones de flujo de caja y rentabilidad del proyecto, así como la consideración de aspectos legales, incluyendo la propiedad, el acceso a agua y energía, entre otros, y las licencias sociales. Además, se realiza un estudio de impacto ambiental, que sienta las bases para el inicio de la construcción de la infraestructura y la operación de la mina.

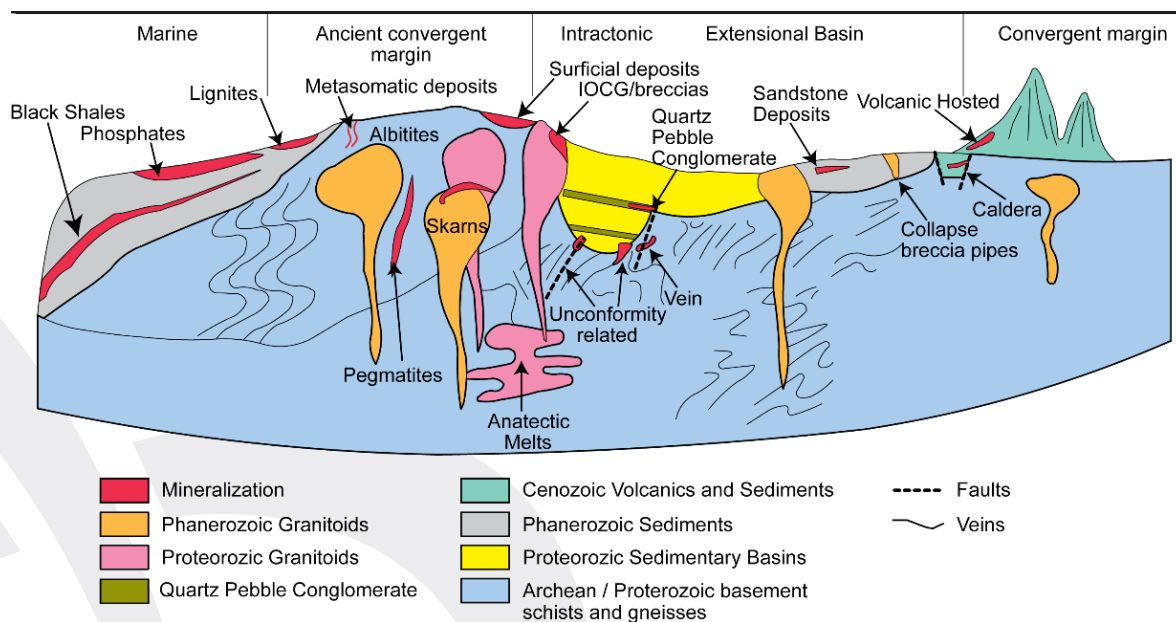


Figura 5. Tipos de depósitos de Uranio

En la etapa de factibilidad, se realiza una evaluación económica con un nivel de confianza del 10% como máximo, lo que determina la viabilidad del proyecto. Se lleva a cabo una estimación detallada de las inversiones requeridas, se determina el flujo de caja y se analizan los riesgos asociados. Asimismo, se calculan los costos de operación (OPEX) y los costos de inversión (CAPEX), y se considera la estrategia de comercialización del proyecto. Estas etapas son esenciales para tomar decisiones informadas en la industria minera.

CONSTRUCCIÓN Y PREPARACIÓN

En una mina subterránea, se llevan a cabo las labores necesarias para alcanzar el cuerpo mineralizado y garantizar un suministro constante de mineral a la planta de procesamiento, mientras que, en una mina a cielo abierto, se enfoca en la extracción del material estéril que cubre el cuerpo mineralizado, incluyendo la construcción de áreas para el almacenamiento de desmontes, una consideración crítica en minas de Uranio-Torio. Simultáneamente, se procede a la construcción de la infraestructura necesaria (figura 6), que abarca la creación de diques, pozos para la toma de agua dulce, diques de colas, instalaciones de extracción, procesamiento, transporte y suministro energético, además de la infraestructura para el personal, como campamentos, dormitorios, comedores, oficinas, hospitales y policlínicos. Es esencial que las etapas de desarrollo y construcción se completen de manera sincronizada para evitar la ociosidad de personal y recursos productivos.

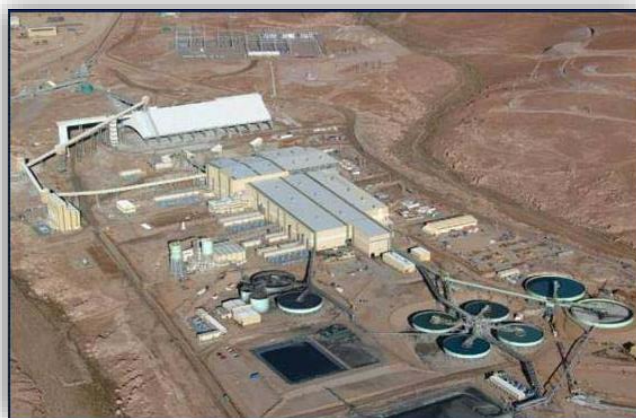


Figura 6. Tipos de muestreo detallado y mapa de distribución

PROCESO DE CONCENTRACIÓN DE URANIO

Existen varios métodos de lixiviación en la industria de la extracción de uranio, que incluyen la lixiviación por agitación a presión atmosférica utilizando ácido y alcalino, la lixiviación a presión empleando tanto ácido como alcalino, así como la fuerte acidificación. Además, se utiliza la lixiviación en pilas con ácido y la lixiviación In situ, principalmente alcalina. El proceso de lixiviación In situ, que representa el 48% de la producción mundial de uranio, implica la inyección de soluciones lixiviantes en el yacimiento, seguida de la extracción de las soluciones enriquecidas en uranio para su posterior concentración. Este método es aplicable a depósitos de uranio alojados en formaciones areniscas y desempeña un papel significativo en la extracción de uranio a nivel global.

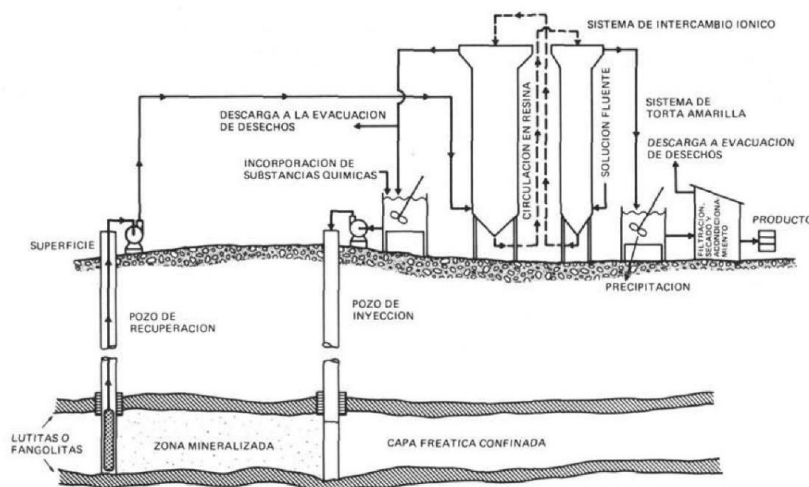


Figura 7. Proceso de lixiviación in situ

Resumen del Taller:

Lineamientos internacionales y normativa nacional en la fase operativa del ciclotrón

Israel Antezana Lopez^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).
Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP)
La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia
Correo electrónico: (1*) iantezana@aben.gob.bo



LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Te invita a participar del webinar gratuito:

“Lineamientos Internacionales y normativa nacional en la fase operativa del ciclotrón”

TEMARIO:

- Definiciones de seguridad radiológica
- Ley 1205
- Fase operativa del ciclotrón

Para inscribirte y recibir tu certificado de participación envía una captura de pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a:
aben.informa@gmail.com

Lic. Israel Antezana Lopez
Profesional en radioprotección de la ABEN

RESUMEN

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia y preclínica (CCRP) tienen como objetivo la producción de radioisótopos y radiofármacos necesarios principalmente para el diagnóstico en la medicina, la fase operativa del mismo se encuentra enmarcado en normativa que son la base del licenciamiento de operación, y la normativa esta en base a las recomendaciones tanto de la IAEA (Organismo internacional de energía Atómica) y otros como el ICRP (Comisión internacional de radioprotección).

La base del webinar es una revisión tanto de la normativa nacional como las recomendaciones internacionales y la aplicación de los mismos dentro del complejo tanto de forma general, y específica.

INTRODUCCIÓN

En el contexto del fortalecimiento de las capacidades nacionales en tecnología nuclear con fines pacíficos, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) ha desarrollado este webinar con el objetivo de divulgar los fundamentos regulatorios y de protección radiológica aplicados al funcionamiento del Complejo Ciclotrón Radiofarmacia y Preclínica (CCRP).

Este webinar se centró en explicar de manera clara y didáctica la integración entre los lineamientos de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la normativa del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), y la legislación nacional vigente en Bolivia

—específicamente la Ley N° 1205— con su reglamentación correspondiente (vigente a la fecha de la exposición de la misma). El propósito principal fue sensibilizar sobre la importancia de aplicar estos marcos regulatorios en la operación del ciclotrón y en la producción segura de radiofármacos.

DESARROLLO CONCEPTUAL

El CCRP es una instalación estratégica clasificada como industria farmacéutica clase uno. Su misión es la producción de radiofármacos para diagnóstico oncológico mediante tecnología PET. El proceso de producción implica varias etapas críticas: operación y mantenimiento del ciclotrón, producción del radiofármaco, control de calidad, y monitoreo de seguridad radiológica. Cada una de estas etapas está sujeta a protocolos estrictos debido a la naturaleza radiactiva de los materiales involucrados.

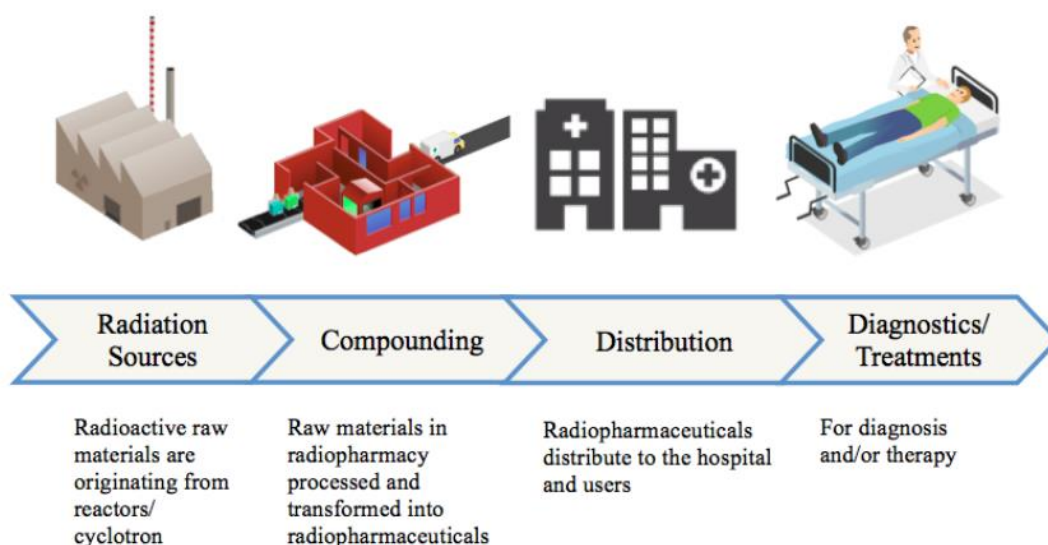
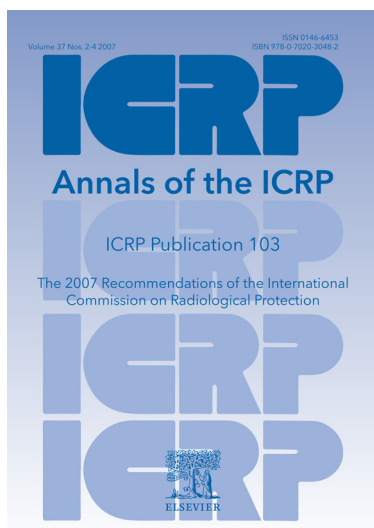


Figura 1. Flujograma de trabajo del complejo ciclotrón Radiofarmacia y preclínica.

Durante el webinar, se abordaron con profundidad los tres principios fundamentales de la protección radiológica según el documento ICRP 103: la justificación (toda exposición debe generar más beneficio que daño), la optimización (criterio ALARA: tan bajo como sea razonablemente alcanzable), y la limitación de dosis (valores máximos anuales para cuerpo entero, cristalino y piel). Estos principios guían todas las decisiones operativas dentro del CCRP.



Asimismo, se discutieron los tipos de exposición existentes: planificadas, de emergencia y existentes. Se explicó que cada exposición requiere un enfoque técnico y operativo específico, que debe ser evaluado desde la fase de diseño hasta la fase de ejecución, aplicando herramientas como barreras físicas, monitoreo ambiental, señalización adecuada y procedimientos normalizados.

Figura 2. Recomendaciones de la comisión internacional de protección radiológica publicación 103 (2007).

Tabla 1. tipos de exposiciones, límites de dosis y niveles de referencia aplicadas a la situación.

Tipo de situación	Exposición Ocupacional	Exposición del público
Planificada	Límite de dosis, restricción	Límite de dosis, restricción
Emergencia	Niveles de referencia	Niveles de referencia
Existente	N/A	Niveles de referencia

NORMATIVA NACIONAL Y APLICACIÓN PRÁCTICA

En relación a la normativa nacional, se destacó la Ley 1205 del 1 de agosto de 2019 como marco legal que consolida siete principios: asignación de responsabilidades, cultura de seguridad, justificación, optimización, limitación de riesgos, prevención de accidentes, y preparación ante emergencias. El ponente resaltó que estos principios están alineados con las buenas prácticas internacionales y se aplican rigurosamente en el CCRP.



Figura 3. Principios de la protección radiológica.

En términos operativos, se detalló cómo el CCRP implementa esta normativa a través de: (1) organigramas claros con responsabilidades definidas, (2) programas de capacitación continua desde 2019, (3) producción de radiofármacos justificada por su utilidad clínica, (4) enclavamientos físicos y sistemas de monitoreo dosimétrico para cumplir con el criterio ALARA, y (5) procedimientos que aseguran una operación segura y trazable.

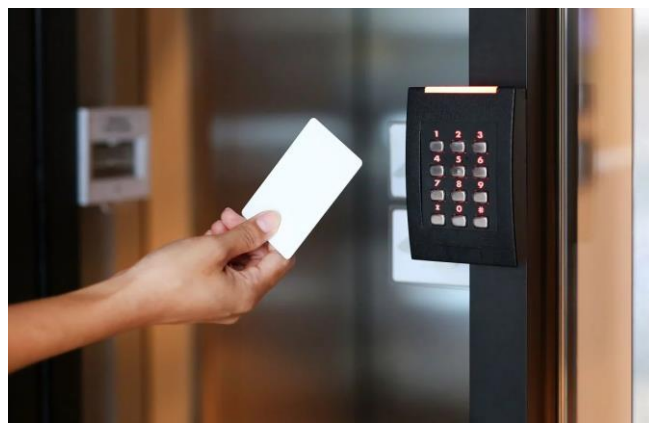


Figura 4. Enclavamientos presentes dentro del CCRP.

Se expuso también el criterio boliviano de optimización: una restricción de dosis ocupacional de 5 mSv/año, 0.1 mSv/año para el público, y una dosis colectiva de hasta 10 Sv.hombre/año. Durante el primer año de operación del CCRP, los valores registrados fueron inferiores a los niveles de referencia, lo que sugiere una gestión radiológica efectiva y segura.

V. CONCLUSIONES

Este webinar permitió fortalecer el conocimiento técnico del público participante en torno a la protección radiológica en instalaciones nucleares. Se enfatizó que el éxito operativo del CCRP no depende únicamente de los equipos o tecnologías utilizadas, sino fundamentalmente del cumplimiento estricto de los lineamientos internacionales y de la normativa nacional vigente.

La aplicación sistemática de barreras físicas, monitoreo ambiental, procedimientos específicos, y sistemas de dosimetría redundante, garantizan la seguridad del personal, del público y del entorno. La existencia de zonas controladas, supervisadas y públicas debidamente diferenciadas y señalizadas, refuerzan esta estrategia integral de protección. Finalmente, se destacó el compromiso del personal del CCRP con una cultura de seguridad que no solo cumple requisitos normativos, sino que se traduce en acciones cotidianas que preservan la salud humana y el ambiente. Este enfoque ejemplar puede servir de referencia para otras instalaciones similares en la región.

BIBLIOGRAFÍA

- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103.
- IAEA. (2018). General Safety Requirements Part 3: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources.
- Ley N° 1205 (2019). Marco normativo de Seguridad y Protección Radiológica en Bolivia.

Resumen del Taller:

CENTRO MULTIPROPÓSITO DE IRRADIACIÓN

Rodrigo Román Matías^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).

Centro Multipropósito de Irradiación (CMI)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

Correo electrónico: (1*) rroman@aben.gob.bo



LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Te invita a participar del webinar gratuito:

“Centro Multipropósito de Irradiación”

TEMARIO:

- Normativa internacional sobre la irradiación de alimentos
- Ventajas de la Irradiación de alimentos
- Centro Multipropósito de Irradiación

Para inscribirte y recibir tu certificado de participación envía una captura de pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a: aben.informa@gmail.com

Trainer: rroman@aben.gob.bo

Ing. Rodrigo Román Matías

Laboratorista del Centro Multipropósito de Irradiación de la ABEN

RESUMEN

El Centro Multipropósito de Irradiación Gamma utiliza exclusivamente fuentes de Cobalto-60. Este isótopo emisor de radiación gamma desempeña un papel crucial en la esterilización de productos médicos, la inocuidad alimentaria y la investigación científica. La naturaleza altamente penetrante de la radiación gamma del Cobalto-60 garantiza una irradiación eficiente y controlada. Este enfoque específico destaca la versatilidad y la eficacia de este centro al emplear tecnología basada en el Cobalto-60 para cumplir con precisión los requisitos de esterilización, prolongación de la vida útil de alimentos y aplicaciones científicas especializadas.

INTRODUCCIÓN

La irradiación de alimentos, que tuvo sus inicios en el siglo XX, donde descubrimientos fundamentales en la aplicación de la tecnología nuclear permitieron contribuir en la mejora de la seguridad alimentaria. Surgida como respuesta a preocupaciones sobre la contaminación microbiológica, esta tecnología utiliza radiación ionizante para eliminar patógenos y microorganismos dañinos. A lo largo del tiempo, ha evolucionado con un enfoque centrado en la seguridad alimentaria, la preservación de la calidad sensorial y la reducción de pérdidas pos cosecha. Organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han respaldado y evaluado continuamente esta técnica para garantizar su aplicación segura y efectiva.

NORMATIVA INTERNACIONAL

La normativa internacional sobre la irradiación de alimentos está dirigida a asegurar la seguridad y la adecuación de este proceso para el consumo humano.

Hoy en día contamos con el Codex Alimentarius que es una colección de estándares, directrices y códigos de prácticas reconocidos internacionalmente relacionados con los alimentos, incluyendo la irradiación. El Codex Alimentarius tiene una Norma General para Alimentos Irradiados que establece las prácticas recomendadas y los límites de dosis para la irradiación de alimentos, así como directrices sobre el etiquetado de los productos irradiados.

Adicionalmente la OMS, el OIEA y la FAO llevaron adelante diferentes evaluaciones de la tecnología de irradiación de alimentos, asegurando que los beneficios de esta tecnología se maximicen mientras se minimizan los riesgos para la salud y el medio ambiente. Llegando a concluir que “La tecnología de irradiación de alimentos es segura hasta tal punto que, mientras se conserven las cualidades sensoriales de los alimentos y se destruyan los microorganismos nocivos”.

Actualmente existe estándares desarrollados en base a los estudios que fueron apoyados por la FAO, OMS y el OIEA. Los mismos pueden ser identificados en las normas ASTM e ISO.

VENTAJAS DE LA IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

La irradiación gamma de alimentos emerge como una tecnología avanzada con múltiples ventajas. En la reducción de microorganismos patógenos, garantiza la seguridad alimentaria sin comprometer nutrientes. En descontaminación, elimina contaminantes químicos y el proceso se lo realiza en el envase final del producto. Su capacidad para prolongar la vida útil minimiza pérdidas poscosecha y conserva la calidad. Además, en desinfestación, controla plagas y cumple con estándares fitosanitarios. Esta técnica se posiciona como un recurso integral, contribuyendo a la seguridad, calidad y sostenibilidad en la cadena alimentaria.

α. Reducción de microorganismos patógenos:

La irradiación gamma elimina eficazmente microorganismos patógenos, reduciendo el riesgo de enfermedades transmitidas por alimentos. Aunque la radiación no crea productos nocivos, puede introducir al mismo tiempo cambios en las cualidades sensoriales y, por lo tanto, debe alcanzarse un equilibrio entre la dosis óptima necesaria para lograr un objetivo deseado y la que reduzca al mínimo cualquier cambio sensorial.



Figura 1. Irradiación gamma en carne

b. Descontaminación:

Las especias, hierbas y condimentos vegetales se valoran por sus sabores, colores y aromas característicos.



Figura 2. Descontaminación de especias mediante irradiación

Antes de que puedan incorporarse con seguridad a otros productos alimentarios, debe reducir la carga microbiana adquirida en su procesamiento y debido a condiciones ambientales.

El tratamiento térmico puede provocar una pérdida significativa de sabor y aroma, lo ideal es un "proceso en frío", como la irradiación.

Anteriormente la mayoría de las especias y hierbas se fumigaban, normalmente con gases esterilizantes como el óxido de etileno, para destruir los microorganismos contaminantes. Sin embargo, el uso de óxido de etileno fue prohibido por una directiva de la Unión Europea (UE) en 1991 y se ha prohibido en otros países porque es cancerígeno.

c. Prolongación de la Vida Útil:

La exposición a una dosis baja de radiación puede ralentizar la maduración de algunas frutas, controlar la podredumbre fúngica en otras y la maduración en ciertas verduras, alargando así su vida útil, la extensión obtenida depende de la calidad y condiciones iniciales del alimento fresco, que debe ser lo mejor posible.

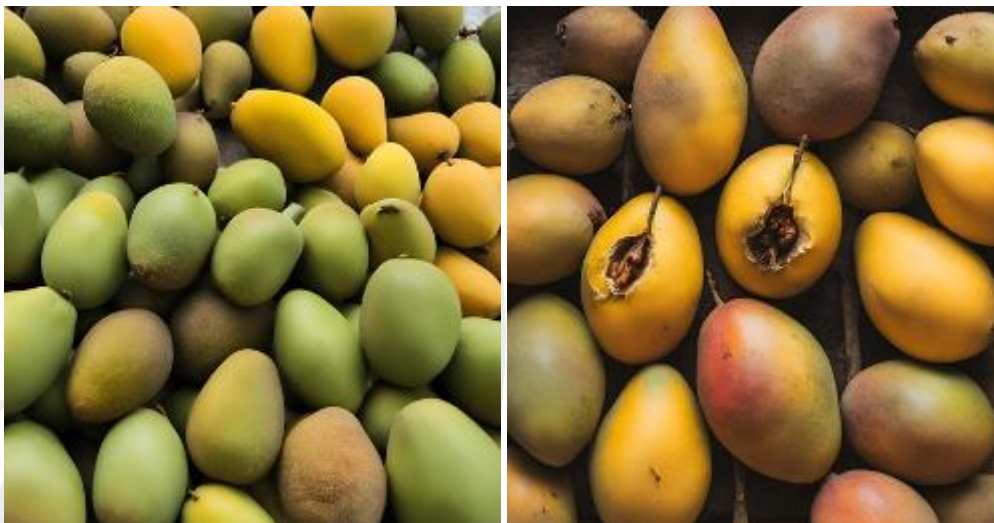


Figura 3. Efecto de la irradiación en la conservación de mangos vs. mangos deteriorados (no irradiados)

Dependiendo del fin, el alimento puede ser irradiado hasta niveles de esterilidad que es utilizado para la alimentación de pacientes inmunocomprometidos, asimismo, para la preservación de alimento por periodos prolongados de tiempo como es el caso del alimento de los astronautas.



Figura 4. Irradiación para esterilidad y larga conservación

d. Desinsectación:

La desinsectación por radiación puede facilitar el comercio de frutas frescas, como cítricos, mangos y papayas, que a menudo albergan plagas de insectos de importancia cuarentenaria. Los insectos se distribuyen fácilmente por el comercio internacional de estas frutas y también por el turismo. Para prevenir o minimizar este riesgo, muchos países prohíben la importación de tales frutas o exigen el tratamiento de cuarentena de las frutas importadas. Estas medidas pueden crear importantes obstáculos al comercio internacional y a la libre circulación de plantas y productos vegetales, pero están plenamente justificadas desde el punto de vista del país receptor. La aparición de moscas de la fruta, como la mediterránea, la oriental, la mexicana o la del Caribe, ha perturbado repetidamente el comercio entre países y entre estados dentro de países grandes, por ejemplo, Australia y EE.UU.

La mayoría de las plagas de interés, como escarabajos, polillas, gorgojos y otros, no son insectos de cuarentena, pero causan grandes daños a los productos almacenados. La irradiación ha demostrado ser un método eficaz de control de plagas para estos productos y una buena alternativa al bromuro de metilo, el fumigante más utilizado para el control de insectos, que se está eliminando progresivamente en todo el mundo debido a sus propiedades de agotamiento de la capa de ozono. A diferencia del bromuro de metilo, la irradiación no es una sustancia que agote la capa de ozono y, a diferencia de la fosfina, el otro fumigante más utilizado para controlar las plagas de los cereales, la irradiación es un tratamiento rápido y su eficacia no depende de la temperatura.

CENTRO MULTIPROPÓSITO DE IRRADIACIÓN

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) se encuentra implementando el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), que cuenta con varias

instalaciones tecnológicas dentro de las cuales se encuentra el Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) ubicado en la ciudad de El Alto zona Parcopata Distrito 8, se inauguró en octubre del 2023.



Figura 5. Centro Multipropósito de Irradiación

Este centro cuenta con dos principales componentes de irradiación:

a. Irradiador Autoblindado Gamma

En esta unidad se utiliza un equipo para irradiar muestras, materiales y productos de menor tamaño, que por sus características contractivas garantiza la protección a la radiación de las fuentes de ^{60}Co que aloja internamente, atenuando la radiación con el blindaje que posee, a niveles aceptables para una operación segura.



Figura 6. Irradiador Autoblindado Gamma

Este equipo permite el desarrollo de actividades de investigación, validación de protocolos de irradiación entre otros.

b. Irradiador Industrial Gamma

Funciona con una fuente de cobalto-60 opera con un diseño que implica sumergir la fuente radiactiva en una piscina. Este sistema utiliza el cobalto-60 para generar radiación gamma controlada. Esta instalación permite la irradiación de grandes volúmenes de productos de manera continua o en modo estacionario dependiendo del producto y los objetivos a ser alcanzados.



Figura 6. Irradiador Industrial Gamma

La aplicación de la radiación gamma no solo está limitada a contribuir a la seguridad alimentaria, asimismo esta también puede ser aplicada en la industria médica como ser la esterilización de insumos médicos, la conservación de material histórico entre otras aplicaciones.

Resumen del Taller: TÉCNICA DEL INSECTO ESTÉRIL

Danny Jose Ortiz Condori^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).

Centro Multipropósito de Irradiación (CMI)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

Correo electrónico: (1*) dortiz@aben.gob.bo



LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Te invita a participar del webinar gratuito:

“TÉCNICA DEL INSECTO ESTÉRIL (TIE)”

TEMARIO:

- En qué consiste la Técnica del Insecto Estéril.
- Qué proyectos se tiene en Bolivia planificados aplicando la TIE.
- Trabajos realizados y por realizar aplicando la Técnica del Insecto Estéril.

Para inscribirte y recibir tu certificado de participación envía una captura de pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a:
aben.informa@gmail.com

ING. DANNY JOSÉ ORTIZ CONDORI

Especialista del Laboratorio de Irradiación Gamma

RESUMEN

La Técnica del Insecto Estéril (TIE) es un método de control biológico que consiste en criar masivamente insectos, esterilizarlos con irradiación gamma y liberarlos al ambiente para interrumpir su reproducción, reduciendo así las poblaciones plaga de forma sostenible y amigable con el medio ambiente. A nivel internacional ha sido aplicada con éxito en el control de moscas tse-tsé, gusano barrenador y mosca de la fruta, con apoyo de la FAO y el OIEA. En Bolivia, esta técnica se impulsa desde el CIDTN y el CMI de la ABEN, con proyectos que abarcan el gusano barrenador del ganado, la mosca de la fruta y el mosquito *Aedes aegypti*, en coordinación con SENASAG, UMSS, INLASA, CENETROP y PNETV. Un hito clave fue la primera irradiación de mosquitos *Aedes aegypti* en noviembre de 2024, donde se aplicaron dosis cercanas a 75 Gy con resultados exitosos en la esterilización, marcando un avance significativo en la implementación de esta tecnología en el país.

1. ¿En qué consiste la Técnica del Insecto Estéril (TIE)?

La Técnica del Insecto Estéril (TIE) es un método innovador de control biológico que busca reducir poblaciones de insectos plaga mediante su esterilización controlada. El proceso comienza con la cría masiva de insectos de una especie determinada, seguida por la separación de los machos, los cuales son posteriormente esterilizados mediante irradiación gamma. Estos insectos estériles son liberados en el medio ambiente, donde compiten con machos silvestres por copular con las hembras. Sin embargo, al no producir descendencia viable, se interrumpe el ciclo reproductivo, lo que con el tiempo provoca una significativa disminución en la población del insecto objetivo. Esta técnica destaca por ser amigable con el medio ambiente y ha sido aplicada exitosamente durante más de 60 años en distintos países.

2. Aplicaciones y antecedentes internacionales del TIE

El uso de la TIE ha sido ampliamente validado a nivel internacional. Ejemplos exitosos incluyen la erradicación de la *Glossina* (mosca tse-tse) en Zanzíbar (1997) y Etiopía (2012), el gusano barrenador en África, así como la eliminación de la mosca mediterránea de la fruta en países como México y Chile, con apoyo de la FAO y el OIEA. En México, incluso se ha investigado su aplicación contra el mosquito *Aedes aegypti*, vector del virus del Zika. La eficacia de esta técnica se basa en su enfoque sistemático y sostenible, respaldado por organismos internacionales especializados.

3. Estructura técnica en Bolivia: CIDTN y CMI

En Bolivia, la infraestructura necesaria para la aplicación de la TIE se encuentra en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), ubicado en el Distrito 8 de El Alto, La Paz. Dentro de sus instalaciones, el Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) dispone de dos irradiadores gamma: uno industrial con capacidad de 1 MCi y otro autoblindado de 12 kCi. Estos dispositivos permiten la irradiación de los insectos, garantizando su esterilización sin afectar su comportamiento natural. Las primeras pruebas realizadas de irradiación de insectos se han realizado en el Irradiador Autoblindado Gamma, debido a la capacidad de rotación del porta muestras mediante en una placa giratoria que permite una mejor uniformidad de dosis, asegurando la eficacia del procedimiento.

4. Proyectos de TIE en Bolivia

En Bolivia, se están desarrollando tres proyectos concretos relacionados con la TIE. Uno de ellos es proyecto RLA 5088 relacionado al gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) que se está desarrollando con el SENASAG, que aún no se ha realizado la irradiación debido a que se requiere establecer la cría y reproducción del insecto. Otro esfuerzo importante se centra en el control de la mosca de la fruta (proyecto RLA 5087), en este proyecto participa el SENASAG y la UMSS, las pruebas de irradiación se están desarrollando con la UMSS donde la ABEN realiza la irradiación de las pupas y estas son evaluadas en los laboratorios de entomología de la UMSS. Este proyecto es muy importante debido a que esta plaga afecta a varios departamentos como Cochabamba, Santa Cruz, La Paz, Tarija, Chuquisaca y Potosí, afectando a la producción de frutales. Finalmente, en el marco del proyecto RLA 5092 de lucha contra mosquitos vectores de enfermedades como el dengue, zika y chikunguña, se han iniciado investigaciones de la dosis de esterilización con el mosquito *Aedes aegypti*, en colaboración con instituciones como el INLASA, también son parte de este proyecto de control de los mosquitos el Programa Nacional de Enfermedades Transmitidas por Vectores (PNETV) y el Centro Nacional de Enfermedades Tropicales (CENETROP), con quienes se está coordinando para realizar las pruebas piloto a futuro en un sitio de estudio en Santa Cruz.

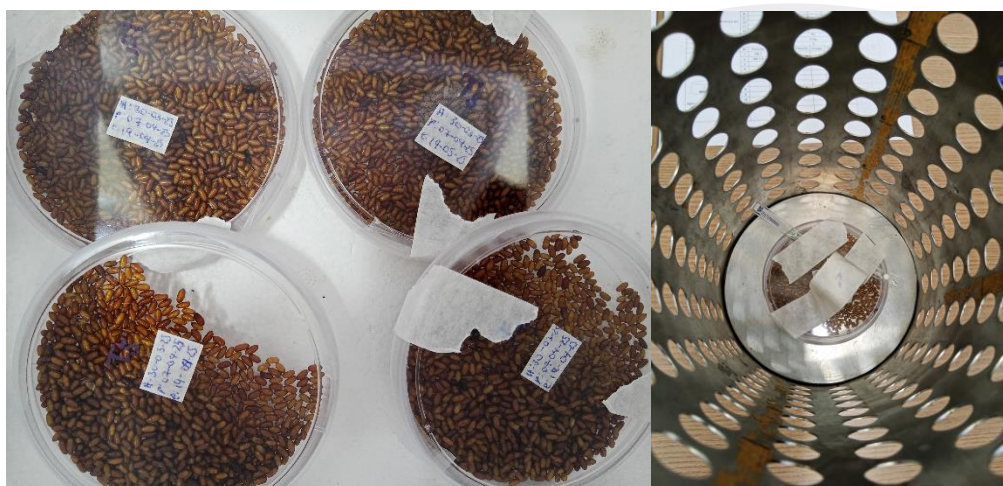


Figura 1. Pupas de *Ceratitis capitata* fueron irradiados en el CMI. Fuente: archivo ABEN

5. Primera irradiación de mosquitos en Bolivia

Un hito importante en la implementación de la TIE en Bolivia fue la primera irradiación de mosquitos *Aedes aegypti* en noviembre de 2024. En esta experiencia piloto se contó con la participación del Dr. William Patricio Ponce Yaulema, experto del Ecuador, que ha acompañado a los profesionales de Bolivia (INLASA y ABEN) en esta primera experiencia realizada. Primeramente, los insectos fueron criados por el INLASA y transportados en condiciones controladas (entre 4 y 9 °C) al CIDTN para su irradiación. Seguidamente, en el CMI se aplicó diferentes dosis cercanas a la dosis de referencia de 75 Gy, esto basado en la experiencia del Dr. William Ponce de Ecuador, la cual ha demostrado un 100 % de eficacia en la esterilidad de los insectos. Los resultados de este experimento han sido evaluados por el laboratorio de entomología del INLASA.



Figura 2. Mosquitos *Aedes aegypti* que fueron irradiados en el CMI. Fuente: archivo ABEN

Resumen del Taller:

IRRADIACIÓN DE HEMOCOMPONENTES

Danny Jose Ortiz Condori^{1*}, Zaida Quispe Apaza^{2*}, Carmen Liliana Muñoz Rocha^{3*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).

Centro Multipropósito de Irradiación (CMI)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

Correo electrónico*: dortiz@aben.gob.bo¹, zquispe@aben.gob.bo², cmunoz@aben.gob.bo³



LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Te invita a participar del webinar gratuito:

“IRRADIACIÓN DE HEMOCOMPONENTES”

TEMARIO:

- Introducción a la irradiación de hemocomponentes
- Irradiación y control de calidad en el: CENTRO MULTIPROPÓSITO DE IRRADIACIÓN
- Protocolos y normativas a tomar en cuenta

Para inscribirte y recibir tu certificado de participación envía una captura de pantalla durante el webinar junto a tus datos personales a: aben.informa@gmail.com

Ing. Danny José Ortiz Condori	Lic. Zaida Quispe Apaza
Especialista del Laboratorio de Irradiación Gamma	Laboratorista

RESUMEN

La irradiación gamma de hemocomponentes es un procedimiento esencial en medicina transfusional, aplicado a hemocomponentes sanguíneos como el concentrado de plaquetas, paquete globular y concentrado de plaquetas por aféresis. Este tratamiento utiliza radiación gamma para inactivar los linfocitos T viables presentes en los hemocomponentes del donante, con el objetivo de prevenir una complicación grave y potencialmente mortal conocida como Enfermedad Injerto Contra Huésped asociada a transfusión (EICH-AT).

Mediante la aplicación de radiación gamma a una dosis de entre 25 y 50 Gy, se logra inhibir la capacidad de división y proliferación de estos linfocitos T, sin comprometer la funcionalidad de los eritrocitos o plaquetas. Esta técnica permite conservar la eficacia terapéutica de los hemocomponentes, garantizando su seguridad para el receptor.

La irradiación gamma es fundamental en pacientes inmunocomprometidos, como aquellos con leucemia, recién nacidos prematuros o receptores de trasplantes, quienes presentan un alto riesgo de desarrollar EICH-AT. Actualmente, es la única medida efectiva comprobada para prevenir esta complicación, convirtiéndose en una herramienta indispensable para transfusiones seguras en poblaciones vulnerables.

En colaboración del personal Banco de Sangre de Referencia Departamental de La Paz, el Bioterio de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímicas (FCFB) de la UMSA y el Programa Nacional de Sangre (PNS), se llevaron a cabo rigurosas pruebas de validación para la irradiación gamma de hemocomponentes (concentrado de plaquetas y paquete globular). Estas evaluaciones de laboratorio demostraron con efectividad de la inactivación de los linfocitos T, cumpliendo así con el objetivo principal del proceso de irradiación.

INTRODUCCIÓN

La irradiación gamma consiste en exponer los hemocomponentes a una dosis controlada de radiación ionizante de entre 25 a 50 Gy. El objetivo principal es **inducir mutaciones en el ADN de los linfocitos T**, inhibiendo su capacidad de proliferación. Esto se logra directamente (por depósito de energía en el ADN) o indirectamente (a través de la formación de radicales libres que dañan el ADN). Es crucial que esta dosis sea suficiente para inactivar los linfocitos T, pero sin afectar significativamente la función de las otras células sanguíneas como los eritrocitos y plaquetas.

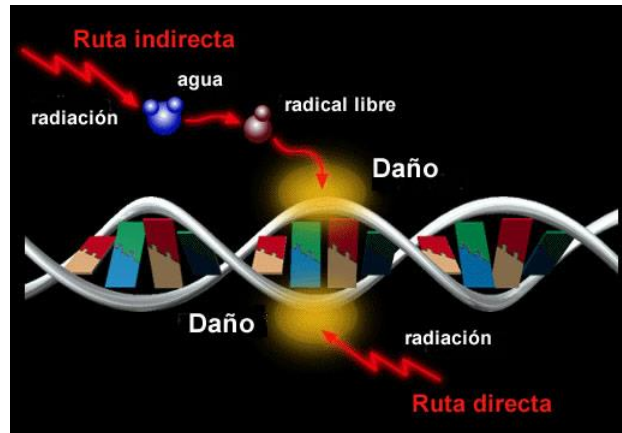


Figura 1. Interacción de la radiación gamma, induce mutaciones en el ADN de los linfocitos T, inhibiendo su capacidad de proliferación. Esto se logra directamente (por depósito de energía en el ADN) o indirectamente (a través de la formación de radicales libres que dañan el ADN).

TIPOS DE HEMOCOMPONENTES

Los hemocomponentes son productos obtenidos a partir de la sangre total mediante procedimientos físicos como la centrifugación o la aféresis. Entre los principales componentes destacan el:

- Paquete globular (concentrado de eritrocitos): La irradiación se aplica para inactivar los linfocitos T que puedan estar presentes, aunque en menor medida que en las plaquetas.
- Concentrado de plaquetas y concentrado de plaquetas por aféresis: Estos componentes son particularmente importantes para la irradiación, ya que contienen una mayor cantidad de linfocitos T viables que pueden proliferar y causar complicaciones.



Figura 2. Hemocomponentes irradiados, unidades de concentrado de plaquetas (imagen izquierda), unidades de paquete globular (imagen derecha).

¿QUIÉNES REQUIEREN HEMOCOMPONENTES IRRADIADOS?

Los hemocomponentes irradiados son cruciales para pacientes con enfermedades que comprometen su sistema inmunológico, pacientes inmunodeprimidos como receptores de trasplantes de medula ósea, o células madre hematopoyéticas, pacientes oncológicos que reciben quimioterapia o radioterapia, neonatos entre otros.

EFFECTO BIOLÓGICO Y APLICACIÓN GLOBAL

La irradiación de hemocomponentes no altera significativamente la eficacia transfusional ni compromete la función biológica del componente, pero sí impide la proliferación de linfocitos T, principal causa de EICH-AT. Esta técnica es utilizada ampliamente en sistemas de salud de países desarrollados y en crecimiento. Entre los países que aplican irradiación rutinaria se incluyen Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Japón y España. En América Latina, su uso está presente en Argentina, Brasil, México, Chile y Colombia, donde instituciones públicas y privadas la han integrado como parte de sus protocolos de bioseguridad transfusional.

TECNOLOGÍA UTILIZADA EN EL CENTRO MULTIPROPÓSITO DE IRRADIACIÓN

El Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) emplea un Irradiador Autoblindado Gamma, un equipo diseñado para garantizar seguridad y precisión en la irradiación de hemocomponentes. Este sistema utiliza fuentes de rayos gamma (Cobalto-60) para lograr la inactivación celular sin necesidad de instalaciones blindadas externas. El control de dosis se realiza mediante diferentes sistemas dosimétricos, como ser: dosímetros de alanina, que permite cuantificar los radicales libres generados por la radiación mediante espectroscopia de resonancia paramagnética electrónica (EPR), o también se puede emplear dosímetros de Fricke, en la que se emplean soluciones líquidas en las que se utiliza espectrometría de absorción. Este procedimiento asegura la exactitud, trazabilidad y reproducibilidad del proceso de irradiación, cumpliendo con estándares internacionales de control de calidad.

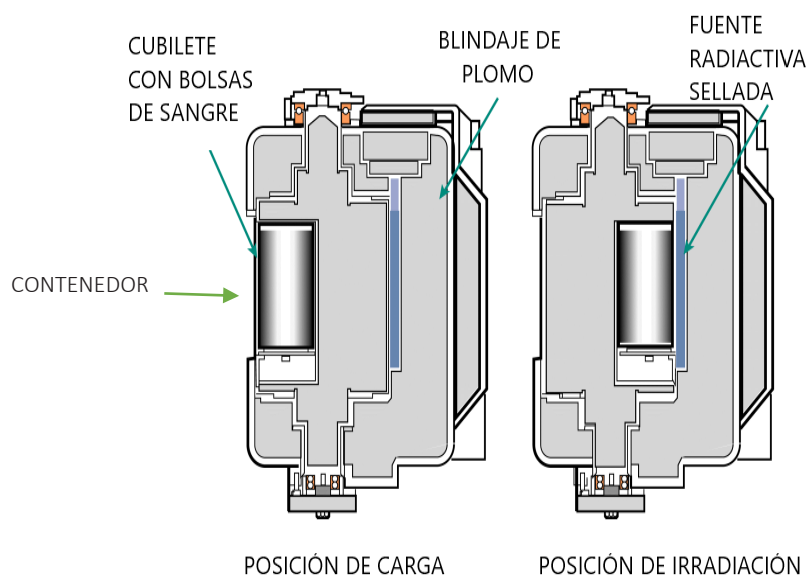


Figura 3. Vista lateral del Irradiador Autoblindado Gamma, en el que se lleva a cabo la irradiación gamma de hemocomponentes.

DOSIMETRÍA Y CONTROL DE CALIDAD

La dosimetría es un componente esencial en la irradiación de hemocomponentes, ya que garantiza que cada unidad reciba una dosis adecuada para la inactivación linfocitaria sin alterar la viabilidad del componente. El mapeo dosimétrico del irradiador permite verificar la uniformidad de la dosis en distintas posiciones de carga. Estas mediciones se realizan con procedimientos validados y calibraciones trazables que aseguran la eficacia del tratamiento y su conformidad con normas internacionales como la ISO/ASTM 51939, que regula la práctica de la dosimetría en la irradiación de sangre.

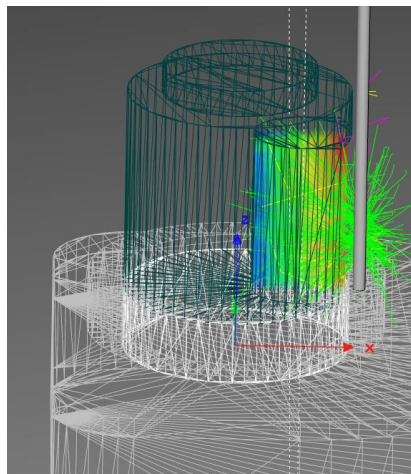


Figura 4. Simulación de la distribución de la dosis en el IAG.

NORMATIVAS Y PROTOCOLOS INTERNACIONALES

El procedimiento de irradiación de hemocomponentes en el CMI se rige por un marco normativo consolidado. Entre los principales documentos de referencia se encuentran el memorando de la FDA (1993), que establece recomendaciones para la modificación de licencias y prácticas en irradiación de sangre, y las normas técnicas ISO/ASTM 51939:2005 y NB/ISO/ASTM 51939 (2023), que definen los requisitos para la dosimetría en irradiación de productos sanguíneos. Estas normativas garantizan la calidad, seguridad y eficacia del proceso, y su aplicación es fundamental para la estandarización de los procedimientos en centros de irradiación como el CMI.

Resumen del Taller: MONITOREO RADIOLÓGICO AMBIENTAL

Carmen Liliana Muñoz Rocha^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).

Centro Multipropósito de Irradiación (CMI)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

Correo electrónico: (1*) cmunoz@aben.gob.bo

LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Te invita a participar del webinar gratuito:

MONITOREO RADIOLÓGICO AMBIENTAL

TEMARIO:

- Monitoreo de la radiación a nivel mundial.
- Importancia de monitoreo radiológico ambiental.
- Monitoreo radiológico ambiental en Bolivia.

Para inscribirte y recibir tu certificado de participación envía una captura de pantalla durante el webinar junto con tus datos personales a:
aben.informa@gmail.com

MSC. Carmen Liliana Muñoz Rocha

RESUMEN

El monitoreo radiológico ambiental es la vigilancia sistemática de la radiación en el entorno para evaluar posibles riesgos radiológicos. Se realiza mediante la medición y análisis de niveles de radiación en aire, agua, suelo y alimentos. Este proceso busca garantizar la seguridad pública, identificar fuentes radiactivas y detectar cambios en los niveles normales de radiación que puedan indicar riesgos para la salud o el medio ambiente.

FUENTE DE RADIACIÓN

Las fuentes de radiación se dividen en dos categorías: naturales y artificiales.



Figura 1. Foro Nuclear (IAEA) 2019

a) Fuentes Naturales:

Las radiaciones naturales provienen de fenómenos como la desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza terrestre, radiación cósmica del espacio exterior y elementos radiactivos en alimentos y cuerpos vivos.

b) Fuentes Artificiales:

Las radiaciones artificiales son generadas por actividades humanas, como procedimientos médicos (rayos X), aplicaciones industriales, reactores nucleares y dispositivos electrónicos. Estas fuentes requieren un control cuidadoso para minimizar riesgos y asegurar un entorno seguro.



Figura 2. Exposición a las radiaciones ionizantes en humanos IRCP 2007.

FONDO NATURAL

La exposición a la radiación natural es una parte inevitable de la vida diaria. Proviene de fuentes como el suelo, el agua y la radiación cósmica. Aunque estas fuentes son parte del entorno, la exposición a niveles bajos de radiación es generalmente segura y forma parte de la radiación de fondo. Sin embargo, en situaciones de exposición prolongada o concentraciones elevadas, se debe monitorear cuidadosamente para garantizar la seguridad y comprender cualquier posible impacto en la salud.

En la siguiente tabla se exponen las dosis efectivas anuales por distintas fuentes de exposición, de fondo natural. Alcanzando una dosis efectiva anual al nivel del mar de 2,4 mSv, siendo una dosis baja de exposición.

Exposición del público a radiación natural		
Fuente de exposición		Promedio de dosis efectiva anual (mSv)
radiación cósmica	directamente ionizante y componente fotonico	0,28
	componente neutrones	0,1
	radionucleidos cosmogénicos	0,01
	Total cosmos y cosmogenico	0,39
radiación terrestre externa	al aire libre	0,07
	adentro	0,41
Total radiación externa		0,48
inhalación	serie de uranio y torio	0,006
	radón (Rn-222)	1,15
	Torón (Rn-220)	0,1
Total radiación por inhalación		1,26
ingestión	K-40 Potasio	0,17
	serie de uranio y torio	0,12
Total radiación por ingestión		0,29
Total al nivel del mar		2,4

Fuente: Nuclear Reactor Technology Development and Utilization, 2020

INFLUENCIA EN EL FONDO NATURAL POR PRESENCIA DE RADIONUCLEÍDOS EN EL AMBIENTE

La emisión fortuita de material radiactivo al medio ambiente, que puede resultar en la contaminación del territorio, tiene el potencial de afectar la salud de las personas y la calidad de la agricultura, la ganadería y otros bienes. Estas emisiones, que pueden derivar de actividades en el pasado no sujetas a control reglamentario, representan un riesgo significativo. En caso de una emergencia nuclear o radiológica, una vez concluidas las actividades de respuesta, es esencial evaluar y abordar los posibles impactos a largo plazo en la salud y el medio ambiente para garantizar la seguridad continua.



Figura 3. Ucrania, Chernobyl en 1986



Figura 4. Brasil, Goiania en 1987

MONITOREO RADIOLÓGICO AMBIENTAL

Medición y evaluación de la concentración de actividad de los radionucleídos y la tasa de dosis ambiental debido a la posible presencia de fuentes de radiación en el medio ambiente en un determinado periodo de tiempo.



Figura 5. Monitoreo Radiológico ambiental

Importancia

- Verificar los resultados de monitoreo de posibles descargas y detectar posibles emisiones inadvertidas.
- Verificar que los límites de dosis no sean excedidos.
- Analizar la presencia y evolución en el tiempo de radionucleídos en el ambiente.

Vías de exposición a la radiación ionizante

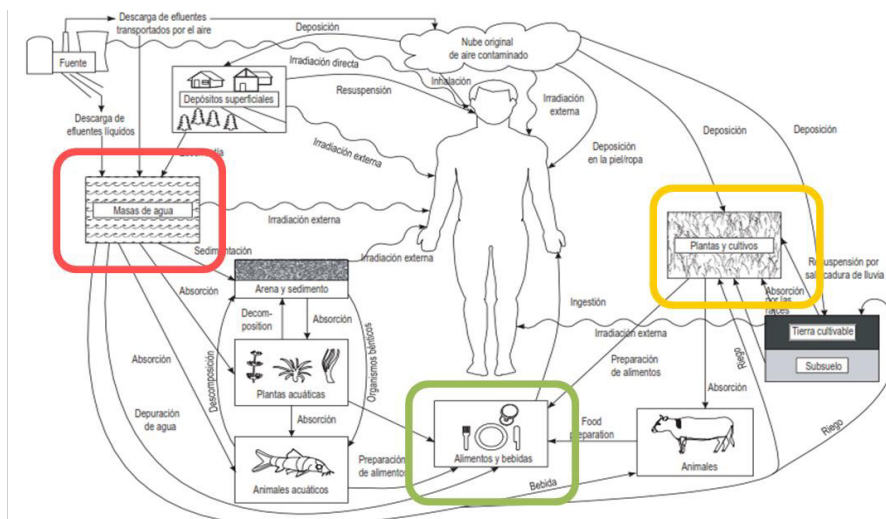


Figura 6. Posibles vías de exposición de miembros de la población como resultado de descargas de materiales radiactivos en el medio ambiente. Fuente: RSG-8

LÍMITES DE DOSIS DE EXPOSICIÓN AL PÚBLICO

La Norma Básica Internacional de Seguridad 2016 establece que la dosis límite de exposición al público, es decir, la cantidad máxima de radiación a la que las personas en general pueden estar expuestas sin riesgos significativos para la salud, es de 1 millisievert (mSv) por año. Esta medida se implementa con el objetivo de garantizar una protección adecuada, previniendo efectos perjudiciales a largo plazo y asegurando que la radiación a la que está expuesto el público permanezca en niveles seguros.

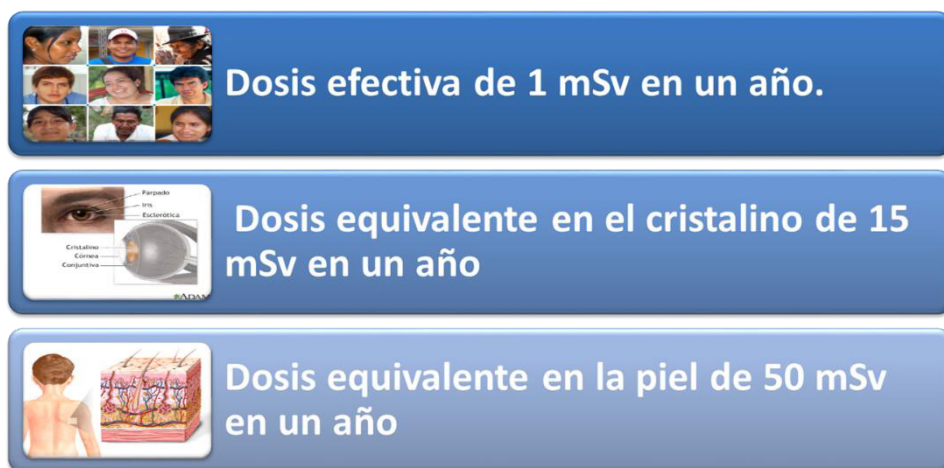


Figura 7. Límites de dosis de exposición al público Fuente: GSR Parte 3 Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Norma básicas internacionales de seguridad 2016

NORMATIVA

Las estrategias de monitorización desempeñan un papel crucial en dos ámbitos específicos. En primer lugar, se enfocan en el control de la descarga de radionucleidos en el marco de las prácticas, asegurando que las emisiones radiactivas al medio ambiente se mantengan dentro de límites seguros y regulados. Esta vigilancia es esencial para prevenir la contaminación y proteger la salud pública. En segundo lugar, estas estrategias se centran en situaciones que requieren intervención inmediata, permitiendo una respuesta ágil ante emergencias radiológicas. Además, ofrecen orientación específica sobre la evaluación de las dosis a grupos críticos de la población expuestos a material radiactivo o campos de radiación ambiental, garantizando una protección eficaz y personalizada

Normas de seguridad del OIEA

para la protección de las personas y el medio ambiente

Monitorización
del medio ambiente
y de las fuentes
de radiación con fines
de protección radiológica

Guía de seguridad
Nº RS-G-1.8

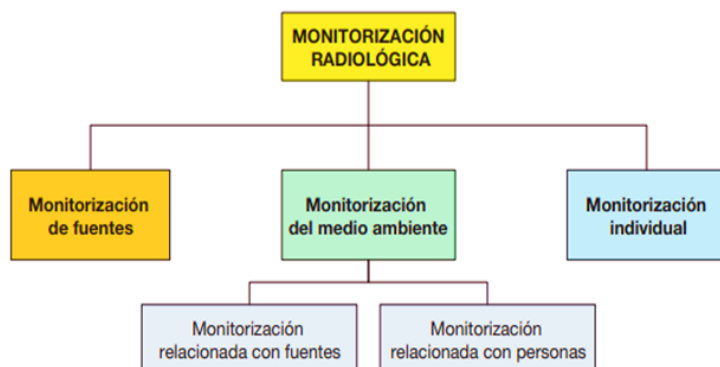


Figura 8. Esquema monitorización radiológica

NOTICIAS



"BOLIVIANAMENTE"

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR

SECCIÓN 4. NOTICIAS

Noticia 1:

La ABEN Y ROSATOM realizan la segunda donación de libros al colegio Copacabana I, en El Alto 135

Noticia 2:

La ABEN apuesta por una ciencia con igualdad de género e identidad de país 136

Noticia 3:

La vasija y primer componente del Reactor Nuclear de Investigación llegó a Bolivia procedente de Rusia 137

Noticia 4:

Erlan Vásquez, el boliviano que fue el mejor alumno de la maestría en tecnología nuclear en una universidad de Rusia 139

Noticia 5:

La ABEN y EPSAS firman un convenio marco de cooperación interinstitucional ... 141

Noticia 6:

Bolivia brilla en ATOMEXPO 2024: ABEN destaca avances en tecnología nuclear ... 142

Noticia 7:

Representante de la OIEA destaca avances en infraestructura para aplicación de la tecnología nuclear 144

Noticia 8:

Llega a BOLIVIA más de 43 toneladas de equipamiento tecnológico para el Reactor Nuclear de Investigación RB-01 145

Noticia 9:

Bolivia fue parte de la 68ª Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) – reafirmando su compromiso con el uso pacífico de la tecnología nuclear 147



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

12 DE MAYO DE 2023

LA ABEN Y ROSATOM REALIZAN LA SEGUNDA DONACIÓN DE LIBROS AL COLEGIO COPACABANA I, EN EL ALTO



Con el lema “la lectura es el arte de la palabra”, más de 500 estudiantes de la unidad educativa Copacabana I, ubicado en la zona Parcopata de El Alto, recibieron ayer con mucho entusiasmo y ávidos de nuevos conocimientos los libros de razonamiento verbal y de lenguaje donados por la Agencia Boliviana de energía Nuclear (ABEN) y la Corporación Estatal de Energía Atómica de Rusia (Rosatom).

La directora ejecutiva de la ABEN, Hortensia Jiménez Rivera, expresó a los estudiantes que ellos no solo son el futuro sino también el presente y que deben estar a la altura de los nuevos desafíos en ciencia y tecnología que afronta Bolivia planteados por el Gobierno nacional, encabezado por el presidente Luis Arce Catacora. “Tienen una gran responsabilidad y tienen la oportunidad de hacer de este país como ustedes se lo imaginan y eso solo se logra estudiando y esforzándose”, complementó la máxima autoridad.

Motivar a los niños y jóvenes alteños a que estudien y aprendan cada día más, y fortalecer sus potencialidades son los principales objetivos que tiene la ABEN. Por ello, la directora ejecutiva de esta entidad, al momento de hacer la entrega, enfatizó en que la lectura es fundamental para la formación. “Es importante no perder el interés en leer, la capacidad de querer aprender, de investigar cada día cosas nuevas, solo así uno crece y se hace grande”, les dijo a los estudiantes.

Esta donación es la segunda que hacen ambas entidades a la biblioteca de esta unidad educativa, que irá en beneficio de la formación de los estudiantes. “Hoy damos la bienvenida a la ABEN y a Rosatom, y queremos decirles que estamos muy felices y agradecidos por la donación de los libros para nuestros hijos”, manifestó emocionada Rosmery Choque, presidenta de la junta escolar.

Por su parte, el director de la unidad educativa, Ángel Espejo Figueredo, destacó el apoyo de la ABEN desde un inicio para fortalecer la biblioteca y otros espacios de ese centro de formación alteño que tiene muchas necesidades.

La Corporación Rosatom viene participando en las actividades de la unidad educativa alteña con donación de libros para todos los niveles. La primera entrega fueron textos de física, química y matemáticas. “El año pasado inauguramos la biblioteca y trajimos la primera parte de los libros. La biblioteca está creciendo, ya se tiene un espacio especial. Me siento muy orgullosa, no sabía si iba a mantenerse así, me gusta mucho que el proyecto se esté fortaleciendo. Vamos a traer más libros”, dijo Asmik Kosian, gerente de Relaciones Públicas para América Latina de Rosatom.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/La-ABEN-y-Rosatom-realizan-la-segunda-donacion-de-libros-al-colegio-Copacabana-I-en-El-Alto,1611.html>

31 DE MAYO DE 2023

LA ABEN APUESTA POR UNA CIENCIA CON IGUALDAD DE GÉNERO E IDENTIDAD DE PAÍS



Hoy se realizó el taller virtual organizado por la Cooperación Internacional Alemana (GIZ) denominado “Participación de las mujeres en el sector tecnológico, energético y eléctrico”, en el que la directora ejecutiva de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), Hortensia Jiménez Rivera, enfatizó en su exposición que esta institución apuesta por una ciencia con igualdad de género e identidad de país.

“La ABEN, en el marco del Programa Nuclear Boliviano, viene impulsando y desarrollando investigación científica enmarcada en la ciencia y aplicaciones pacíficas de la tecnología nuclear. Para ello cuenta con la infraestructura y tecnología nuclear de última generación y un equipo de investigadores con participación de mujeres en las mismas condiciones de igualdad que los hombres”, resaltó la máxima autoridad.

La presentación de Jiménez titulada “La ABEN y la incursión de las mujeres en la política científica del Estado Plurinacional de Bolivia” se basa en un estudio de caso elaborado y publicado por esta institución que permitió lograr un diagnóstico sobre la situación actual de esta institución para establecer la igualdad de participación de mujeres y hombres.

Los resultados del diagnóstico evidenciaron que al interior de la ABEN hay un 50% de mujeres y un 50% de varones en el personal total de la institución, siendo la mayoría de mujeres en los niveles de dirección. “Y esto se debe a que han sido seleccionadas por sus méritos como profesionales y a sus

capacidades”, manifestó.

Los datos generados a través de este estudio “constituyen una evidencia fundamental para diseñar y promover políticas que respondan a las necesidades reales de las mujeres, lo cual permitirá contribuir al desarrollo de la política de despatriarcalización para la revolución democrática cultural que nuestro Gobierno, encabezado por el presidente Luis Alberto Arce Catacora, viene promoviendo”, dijo la Directora de la ABEN.

Asimismo, destacó que en el Estado Plurinacional de Bolivia se vienen realizando acciones importantes con el propósito de lograr avances significativos para la incursión de las mujeres en la ciencia y tecnología, especialmente porque se cuenta con un marco normativo que promueve la presencia de las mujeres científicas en el personal de investigación de las empresas estratégicas del Estado.

“Dar a las mujeres igualdad de oportunidades para desarrollar y prosperar en carreras STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Matemáticas) ayuda a reducir la brecha salarial de género, mejora la seguridad económica de las mujeres, garantiza una fuerza de trabajo diversa y talentosa, y evita los sesgos en estos campos y en los productos y servicios elaborados”, finalizó.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas,1615.html>

13 DE AGOSTO DE 2023

LA VASIJA Y PRIMER COMPONENTE DEL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN LLEGÓ A BOLIVIA PROCEDENTE DE RUSIA



El presidente del Estado Plurinacional de Bolivia, Luis Arce Catacora, dio a conocer hoy a través de un tuit la llegada de la vasija del Reactor Nuclear de Investigación (RNI) al país procedente de Rusia.

“Avanzamos por la senda del desarrollo, la ciencia y la tecnología como un pueblo digno y soberano. Llegó a Bolivia la vasija y 1er componente del Reactor Nuclear de Investigación, que estará en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear de El Alto”, tuiteó el Primer Mandatario.

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), en el marco del Programa Nuclear Boliviano, viene implementando una serie de proyectos que van en beneficio del país, uno de ellos es la construcción del Reactor Nuclear de Investigación (RNI).

“Ya está en el país la vasija de este reactor, que es uno de sus principales componentes y que ayudará en el desarrollo científico del país. Con esto estamos entrando a la fase de equipamiento del RNI”, dijo la directora ejecutiva de la ABEN, Hortensia Jiménez Rivera.

Este reactor nuclear boliviano es único debido a que está ubicado a más de 4.000 metros sobre el nivel del mar. Está emplazado en la ciudad de El Alto, en el Distrito 8, en las instalaciones del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN).

Tiene 200 kilovatios de potencia térmica, es de tipo piscina moderado y enfriado por agua ligera.

“Esta característica lo convierte en la primera instalación de este tipo a esta altura abriendo todo un abanico de posibilidades para la investigación”, dijo Erlan Vasquez, especialista en ingeniería nuclear de la ABEN.

La llegada de la vasija al país marca un hito muy importante en la implementación del Reactor Nuclear de Investigación del país, ya que significa la transición entre la fase de construcción y la fase de montaje del equipamiento, es decir es el inicio de la instalación de los componentes que forman parte del corazón del reactor en el cual se llevan a cabo los principales procesos.

Los reactores nucleares de investigación son instalaciones diseñadas para estudiar y desarrollar aplicaciones nucleares con fines científicos y tecnológicos. “A diferencia de los reactores de potencia utilizados para generar electricidad, los reactores de investigación se enfocan en la investigación y el desarrollo de tecnologías relacionadas con la energía nuclear. Estos reactores son utilizados por científicos, ingenieros y académicos para realizar experimentos, generar datos científicos y formar a futuros profesionales en el campo de la energía nuclear”, explicó Vasquez.

Un reactor nuclear de investigación tiene un amplio rango de aplicaciones, que van desde las medio ambientales, industriales, mineras hasta la rama forense. "Este tipo de instalaciones nos permite la producción de radioisótopos que pueden ser usados para mejorar la gestión de nuestros recursos hídricos. Otro ejemplo es la aplicación del análisis por activación neutrónica en la minería, lo que nos servirá para identificar minerales del interés nacional y estratégicos para el país y por ende identificar áreas con potencial para su explotación", añadió el especialista.

La vasija de reactor de investigación es un recipiente especialmente diseñado para albergar el núcleo del reactor. "La vasija del reactor boliviano fue construido en Rusia por la Corporación Rusa Estatal ROSATOM. Antes de su embarque se realizaron inspecciones con el objetivo de verificar que la fabricación se

haya realizado de acuerdo con los estándares internacionales y que todos los controles de calidad se hayan llevado a cabo", afirmó el especialista de la ABEN.

La vasija de un reactor de investigación tiene la función principal de contener de manera segura las reacciones nucleares y prevenir la liberación de material radiactivo, además de facilitar la transferencia de calor del núcleo hacia el sistema de refrigeración, pero sobre todo está destinado para la instalación y el montaje del núcleo del reactor. "Estos elementos que hacen posible la operación segura del reactor de investigación en sus diferentes modos de operación", detalló Vasquez.

<https://www.aben.gob.bo/index.php/noticias/La-vasija-y-primer-componente-del-Reactor-Nuclear-de-Investigacion-lleg-a-Bolivia-procedente-de-Rusia,1638.html>



10 DE SEPTIEMBRE DE 2023

ERLAN VÁSQUEZ, EL BOLIVIANO QUE FUE EL MEJOR ALUMNO DE LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA NUCLEAR EN UNA UNIVERSIDAD DE RUSIA



El boliviano Erlan Vásquez, especialista en ingeniería nuclear de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), fue el mejor alumno de la maestría en Tecnología Nuclear que cursó en Moscú, Rusia, en la Universidad Nacional de Investigación Nuclear (MEPhI).

El Estado Plurinacional de Bolivia patrocina becas y la ABEN impulsa la investigación científica en el marco del Programa Nuclear Boliviano (PNB), y para ello necesita profesionales altamente capacitados. “En la ABEN otorgamos becas a estudiantes de todos los rincones del país que tienen la fuerza, la dedicación y la constancia de salir adelante”, afirma la directora general de la entidad, Hortensia Jiménez Rivera.

La máxima autoridad de la ABEN añadió que Bolivia está incursionando en el área científica en temas de energía nuclear. “Por eso es tan importante la especialización de nuestros profesionales. Es un orgullo para la ABEN tener profesionales altamente calificados

que aporten con conocimiento científico al desarrollo del país”, resalta Jiménez.

La universidad MEPhI es uno de los centros de estudios superiores técnicos más prestigiosos de Rusia. Esta universidad nacional de investigación nuclear colabora con muchas organizaciones científicas y educativas, y atrae a estudiantes de todo el mundo a programas educativos en las áreas de la ciencia, la tecnología y la ingeniería.

Para Vásquez, ir a estudiar a Rusia fue un reto desde el principio y fracasar no era una opción. “Tuve que aprender el idioma en tiempo récord y debía pasar los exámenes para ser admitido en el programa de maestría. Una vez en el programa redoblé esfuerzos para alcanzar el nivel de mis compañeros, muchos de los cuales eran ruso hablantes, aun así logré notas que me permitieron llegar a lo requerido para obtener un diploma rojo, que es equivalente a concluir el programa con excelencia”, cuenta el profesional.

El profesional nació en Monteagudo, Chuquisaca, pero pasó la mayor parte de su vida en Santa Cruz, donde estudió en un colegio de convenio ubicado en el Plan Tres Mil. Luego ingresó a la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, donde estudió Ingeniería Petrolera.

Se inclinó por esa carrera porque Bolivia es productor de hidrocarburos. “Las necesidades laborales en nuestro país se encontraban en el área petrolera. Trabajé alrededor de cinco años en sectores relacionados con los hidrocarburos”, cuenta.

Asimismo, recuerda que cuando se enteró de que Bolivia firmaba un acuerdo con la Federación de Rusia para la construcción de un Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear, le llamó mucho la atención. “Yo debía formar parte de este Centro, es así que empecé a buscar becas relacionadas con la Tecnología Nuclear”, expresa.

Debido a la incursión de Bolivia en la tecnología nuclear, la Embajada de Rusia en Bolivia ofrece becas estatales de la Federación de Rusia para especialidades en el área. La beca consiste en un año del programa preparatorio en idioma ruso y materias base.

“Una vez aprobados los exámenes finales te habilita para cursar el programa seleccionado, ya sea pregrado o postgrado. En mi caso apliqué para una maestría en idioma ruso que tiene una duración de dos años”, dice Vásquez.

Vásquez trabaja hace dos años y medio en la ABEN en el área del Reactor Nuclear de Investigación (RNI), donde ve temas de Licenciamiento, revisión de documentación de diseño, salvaguardias, respuesta a emergencias, temas que son específicos para la implementación del RNI.

“Quiero dirigirme a los jóvenes de donde provengo y decirles que a pesar de todas las limitaciones es posible salir adelante. Con persistencia y esfuerzo es posible realizar un sueño; para ello, trazarse un objetivo es imprescindible”, finaliza el tecnólogo nuclear.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas/1640.html>



18 DE SEPTIEMBRE DE 2023

LA ABEN Y EPSAS FIRMAN UN CONVENIO MARCO DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL



La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) y la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento SA (EPSAS) firmaron este lunes un convenio marco de cooperación interinstitucional para desarrollar actividades de investigación, proyectos y servicios que permitirán contribuir al incremento de la seguridad hídrica mediante el desarrollo de un Plan de Manejo Sostenible del Sistema de Abastecimiento de agua potable y de fuentes subterráneas del área metropolitana de La Paz y del Sistema Acuífero Purapurani.

El documento fue suscrito entre la directora general de la ABEN, Hortensia Jiménez Rivera, y el interventor de EPSAS, Jaime Gutiérrez Quevedo, en las oficinas de la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS).

La ABEN suscribe este convenio con EPSAS buscando impulsar el desarrollo de actividades de investigación, de desarrollo tecnológico en tareas vinculadas a las ciencias nucleares y sus aplicaciones pacíficas para el estudio y monitoreo de los

recursos hídricos dentro del país.

Es así que en el marco del Programa Nuclear Boliviano se están realizando avances importantes a través de la conformación de una vanguardia científica-tecnológica que contribuye al desarrollo de una seguridad alimentaria con soberanía, de la transformación e industrialización de los recursos naturales, de la salud con cuidado integral, del medio ambiente sustentable, en armonía con la madre tierra, que es el mandato del presidente Luis Arce.

En su intervención, la máxima autoridad ejecutiva de la ABEN dijo que la disponibilidad del agua es un problema actual y complejo en el que intervienen una serie de factores influyentes que demandan cada vez más este recurso para uso del consumo humano, así como para llevar a cabo actividades económicas.

“El cambio climático ha derivado en una escasez de agua afectando de manera significativa a ciudades y localidades, como es el caso de La Paz, por lo que

es imprescindible aunar esfuerzos para generar estudios que conduzcan a tomar medidas adecuadas y pertinentes, que permitan satisfacer de forma sostenible la demanda de este recurso”, añadió Jiménez.

Por su parte, el interventor de EPSAS manifestó que la suscripción de este convenio marca un hito significativo entre ambas instituciones promocionando el agua y saneamiento básico de calidad a las diferentes poblaciones de La Paz y El Alto y sus alrededores.

La gestión deficiente de los recursos hídricos se ha convertido en un desafío cada vez mayor. “En este contexto, esta alianza cobra especial relevancia por la aplicación de la hidrología isotópica, ya que representa una herramienta poderosa para comprender mejor nuestros acuíferos, la calidad del agua y su gestión social. Este tipo de investigación científica es esencial para tomar decisiones informadas y garantizar el suministro de agua confiable a largo plazo para nuestras comunidades”, expresó Gutiérrez.

Finalmente, la Directora de la ABEN afirmó que la importancia del manejo adecuado del agua es fundamental para el desarrollo socioeconómico, para tener ecosistemas saludables y para la supervivencia humana, por lo que es importante generar convenios que coadyuven al desarrollo científico, tecnológico y sustentable del país.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas/1644.html>

25 DE MARZO DE 2024

BOLIVIA BRILLA EN ATOMEXPO 2024: ABEN DESTACA AVANCES EN TECNOLOGÍA NUCLEAR



La Directora General Ejecutiva de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), Hortensia Jiménez Rivera, resaltó hoy los significativos avances de Bolivia en el ámbito de la tecnología nuclear con fines pacíficos, durante su participación en el XIII Foro Internacional de Energía 'ATOMEXPO 2024', celebrado en la ciudad de Sochi, Rusia.

En este destacado evento, Jiménez Rivera explicó detalladamente los esfuerzos emprendidos por Bolivia en este campo, subrayando su integración en una política nacional de planificación a mediano y largo plazo.

Esta política, afirmó, se alinea estrechamente con la visión de promover la salud universal, la formación de talento humano especializado y la industrialización de los recursos naturales.

La presencia de Bolivia en el foro internacional refleja el compromiso del gobierno socialista del presidente Luis Arce con el desarrollo sostenible y el aprovechamiento responsable de la tecnología nuclear en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

MEGA PROYECTOS

Bolivia ha establecido un programa nuclear enfocado inicialmente en aplicaciones no energéticas de la tecnología nuclear, marcando así un hito en su desarrollo tecnológico. Este programa incluye la construcción de dos proyectos de gran envergadura: la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (Red CMNyR), compuesta por tres centros especializados en el país, y el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), que cuenta con tres complejos de gran importancia que se complementan mutuamente.

El objetivo principal de la implementación de estos proyectos es mejorar significativamente la calidad de los servicios de salud en Bolivia, al mismo tiempo que se introduce tecnología de vanguardia en el país.

Además, el Centro de Investigación Nuclear está diseñado con la finalidad de fomentar la investigación científica y el desarrollo tecnológico a nivel nacional. Estos proyectos representan un paso crucial

en el avance tecnológico de Bolivia y reflejan su compromiso con el progreso y la innovación en el ámbito de la medicina y la investigación científica.

REACTOR DE ALTURA

La representante de la ABEN enfatizó uno de los logros más significativos del programa: la edificación del primer Reactor Nuclear de Investigación (RNI) del mundo, situado a más de 4.000 metros sobre el nivel del mar.

Con una potencia térmica de 200 kilovatios y un sistema de enfriamiento de agua liviana, este reactor representa un hito en la innovación tecnológica.

Además, Jiménez subrayó los desafíos que enfrenta Bolivia en términos de capacitación de personal altamente especializado y la complejidad técnica de operar estas instalaciones avanzadas.

Se prevé que el RNI entre en funcionamiento en el año 2025, lo que marcará un momento trascendental en el desarrollo científico y tecnológico del país, consolidando su posición en el escenario internacional como un actor destacado en el ámbito nuclear.

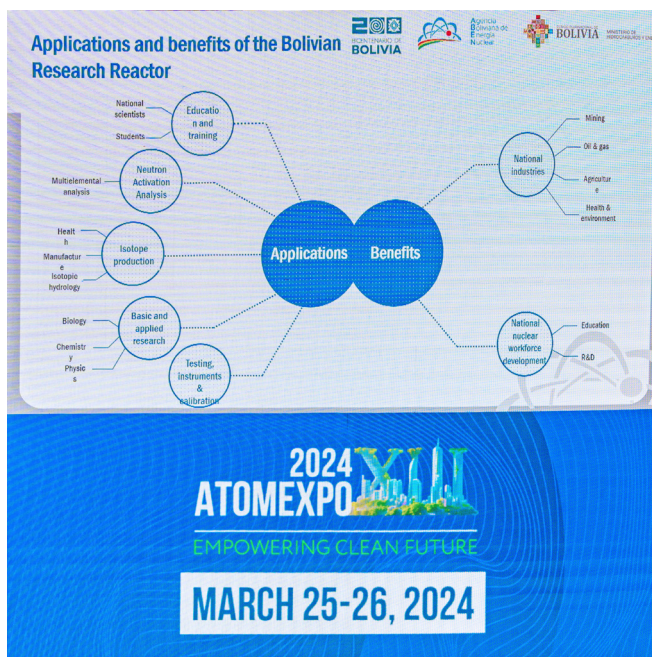
INTEGRACIÓN

Además, la directora de la ABEN resaltó el enfoque de Bolivia en la cooperación regional y la integración en redes internacionales, como parte activa de la Red de Reactores de Investigación de América Latina y el Caribe (RIALC).

Esta red tiene como objetivo fomentar la colaboración y el intercambio de conocimientos en el ámbito nuclear, con miras a avanzar hacia una ciencia y tecnología nuclear abierta y soberana.

La Directora General Ejecutiva de la ABEN señaló que en algún momento, la ciencia y la tecnología fueron utilizadas como instrumentos de control para el desarrollo de las naciones, y subrayó el compromiso de Bolivia en iniciar un proceso de soberanía científica y tecnológica a través de la construcción de este reactor de investigación.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas,1682.html>



13 DE MAYO DE 2024

REPRESENTANTE DE LA OIEA DESTACA AVANCES EN INFRAESTRUCTURA PARA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR



El Oficial Gerente de Programas del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Facundo Deluchi, destacó los avances logrados en la habilitación de infraestructura en el país para la aplicación de la tecnología nuclear y el impacto directo que tendrá para el beneficio de la población.

“Es maravilloso ver todos los avances que han logrado en Bolivia y la infraestructura que han desarrollado en relación a las aplicaciones de la tecnología nuclear y sobre todo el traslado de esta tecnología con un impacto directo a la sociedad boliviana”, dijo, en una visita al Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) y del Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia de la ciudad de El Alto (CMNYR El Alto).

Resaltó que se lleva una grata impresión sobre los resultados del recorrido que hizo a ambas instalaciones que se encuentran ubicadas en la zona de Parcopata de la ciudad de El Alto.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/Representante-de-la-OIEA-destaca-avances-en-infraestructura-para-aplicacin-de-la-tecnologa-nuclear-,1693.html>

22 DE SEPTIEMBRE DE 2024

LLEGA A BOLIVIA MÁS DE 43 TONELADAS DE EQUIPAMIENTO TECNOLÓGICO PARA EL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN RB-01



En la noche de este 20 de septiembre llegaron 186 bultos con un peso de 43 toneladas de equipamiento tecnológico para el Reactor Nuclear de Investigación RB-01, al aeropuerto de Santa Cruz, todos los componentes embalados será transportados en los siguientes días a la ciudad de El Alto donde se está construyendo este complejo de alta tecnología en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN).

El Reactor Nuclear de Investigación RB-01, debe entrar en funcionamiento a mediados de la gestión 2025, esta moderna instalación tecnológica será la más alta del mundo a más 4000 mil metros sobre el nivel del mar y tiene como objetivo desarrollar investigación científica en ciencia nuclear, así mismo se formaran, en estas instalaciones, recursos humanos altamente calificados formando de esta manera una comunidad científica nacional, esta instalación también está pensada para realizar aplicaciones en los sectores de salud, minería, gestión de recursos hídricos y agricultura. Por sus características únicas, los estudios que se realicen en el RB-01

serán un aporte importante en las ciencias a nivel global.

El Programa Nuclear Boliviano, está siendo acompañado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), cumpliendo con los requerimientos y estándares internacionales para la aplicación de la tecnología nuclear con fines pacíficos, además Bolivia forma parte del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe (ARCAL), que tiene como objetivo un trabajo mancomunado y coordinado en la región en el desarrollo de la ciencia y tecnología nuclear para beneficio de la población.

Bolivia tiene un contrato de construcción, equipamiento y capacitación de recursos humanos con la Corporación Rosatom de la Federación de Rusia para poner en marcha el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), que consta de cuatro componentes, el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) y el Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) ambos

en funcionamiento, los laboratorios de Radioecología y Radiobiología próximos a inaugurarse y el Complejo Reactor Nuclear de Investigación que está en su etapa de construcción y montaje.

La Directora General Ejecutiva de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) Ing. Hortensia Jiménez Rivera, a tiempo de informar de la llegada de este equipamiento, afirmó que Bolivia cada día está dando pasos importantes para primero, cerrar la brecha en desarrollo tecnológico con los países vecinos y segundo convertirse en un referente en el desarrollo de la ciencia y tecnología nuclear.

El presidente del Estado Plurinacional de Bolivia Luis Arce Catacora anunció la finalización del CIDTN con la entrega del primer Reactor Boliviano de Investigación (RB-01) a mediados de la gestión 2025. En este contexto, Jiménez destacó la experiencia que está desarrollando Bolivia como país que implementa la construcción de su primer reactor nuclear de investigación.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas,1706.html>



29 DE SEPTIEMBRE DE 2024

BOLIVIA FUE PARTE DE LA 68ª CONFERENCIA GENERAL DEL ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (OIEA) - REAFIRMANDO SU COMPROMISO CON EL USO PACÍFICO DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR



Bolivia presentó los avances y proyecciones en el uso pacífico de la tecnología nuclear en la 68ª Sesión Ordinaria de la Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), celebrada en Viena, Austria.

Este relevante evento reunió a funcionarios de alto nivel y representantes de los Estados miembros del OIEA en su conferencia anual. En representación del país intervino la Directora General Ejecutiva de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) Hortensia Jiménez Rivera quien destacó el compromiso de Bolivia con la sostenibilidad y el éxito de su Programa Nuclear, señalando que sus logros son el resultado de la formación de recursos humanos altamente calificados.

La directora de la ABEN enfatizó que el Programa Nuclear Boliviano se basa en dos

pilares fundamentales que enmarcan sus objetivos y logros históricos.

El primer pilar es la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia, que brinda atención avanzada a pacientes con cáncer. Este servicio, que abarca desde el diagnóstico hasta el tratamiento y seguimiento, ha permitido saldar una deuda social histórica en el ámbito de la salud, ofreciendo atención gratuita a través del Sistema Único de Salud (SUS) para quienes padecen enfermedades oncológicas. La red representa una nueva esperanza de vida para muchos bolivianos.

El segundo pilar es el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), la primera instalación de su tipo en Bolivia. Este centro apoya la investigación científica y ofrece servicios a sectores clave como la minería, la agricultura, la gestión hídrica y

la salud. Ubicado en la ciudad de El Alto, a más de 4,000 metros sobre el nivel del mar, el complejo incluye tres instalaciones principales: un Complejo Ciclotrón de Radiofarmacia Preclínica para la producción de radiofármacos, un Centro Multipropósito de Irradiación Gamma que contribuye a la seguridad alimentaria, y un Reactor Nuclear de Investigación, enfocado en la investigación y la formación de recursos humanos.

La directora de la ABEN, puntualizo que los avances realizados en el país en tecnología nuclear están bajo los lineamientos establecidos en la gestión de gobierno del Presidente del Estado Plurinacional de Bolivia Luis Alberto Arce Catacora, quien anuncio hace poco la finalización de la construcción del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), con la entrega programada del primer reactor nuclear de investigación boliviano (RB-01) a mediados de la gestión 2025

La conferencia también sirvió como plataforma para discutir temas relacionados con el desarrollo de infraestructura nuclear, en la cooperación técnica y la gestión de proyectos.

De esta manera, Bolivia reafirma su compromiso con el uso responsable y pacífico de la tecnología nuclear, contribuyendo al

bienestar social, al desarrollo sostenible, cuidado del medio ambiente, seguridad alimentaria y la calidad de la salud.

Durante la conferencia, Jiménez participó también en el evento paralelo denominado "Búsqueda de caminos en el despliegue de reactores de investigación: experiencias, desafíos y lecciones aprendidas", organizado por la Corporación Estatal Rosatom de la Federación de Rusia.

A su vez, la directora de la ABEN fue parte de la XXV Reunión del Órgano de Representantes del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe (ARCAL), donde se abordaron temas cruciales como el fortalecimiento de la cooperación en proyectos regionales como la validación de la técnica del insecto estéril y las capacidades de los ciclotrones. Además, se discutieron gestiones en el área de salud relacionadas con la radioterapia, con el objetivo de implementar y lograr mejores resultados en los proyectos.

Este evento permitió compartir proyectos y experiencias en la preparación de estudios de factibilidad para planificar nuevos reactores de investigación con fines pacíficos.

<https://aben.gob.bo/index.php/noticias/notas,1707.html>





P R O Y E C T O S

"BOLIVIANAMENTE"

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

SECCIÓN 5. PROYECTOS

PROYECTO BOL 6032

Fortalecimiento de capacidades en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN)

Contraparte: Rodny Batuani Larrea, Rodrigo Román, Mauricio Nishino y Cristian Condori Tarqui

Página 153

PROYECTO RLA 9009

Fortalecimiento de las capacidades nacionales para la implementación del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Nuclear y los Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia

Contraparte: Rolando René Chuquimia Ninahuanca

Página..... 157



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



PROYECTO BOL 6032: FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN TECNOLOGÍA NUCLEAR (CIDTN)

**Responsables del proyecto: Rodny Batuani Larrea¹; Rodrigo Román²; Mauricio Nishino³
y Cristian Condori Tarqui⁴**

Direcciones del ¹Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica; ²Centro Multipropósito Irradiación;
³Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia La Paz; y ⁴Aplicaciones en Tecnología Nuclear
Correo electrónico: ¹rbatuani@aben.gob.bo, ²rroman@aben.gob.bo, ³mnishino@aben.gob.bo,
⁴ccondori@aben.gob.bo



OBJETIVO

Mejorar la salud y el bienestar general de la población mediante el fortalecimiento de las capacidades de los recursos humanos y los conocimientos en el uso seguro del complejo preclínico de radiofarmacia ciclotrón, el centro de irradiación multipropósito, el reactor de investigación, así como los centros de medicina nuclear y radioterapia.

PRINCIPALES RESULTADOS

El proyecto fue iniciado en la gestión 2024 con el objetivo de brindar fortalecimiento al Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear y sus componentes.

El OIEA concluye la misión de evaluación integrada de la seguridad del primer reactor nuclear de investigación de Bolivia



Un equipo de expertos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) señaló que la Agencia de Energía Nuclear de Bolivia (ABEN), operadora del primer reactor nuclear de investigación de Bolivia (RB-01) que se encuentra en construcción, ha desarrollado un sistema de gestión que aplica las normas de seguridad del OIEA. A medida que la ABEN se acerca a la finalización de la fase de construcción y se prepara para poner en servicio el reactor, el equipo de revisión identificó la necesidad de realizar más mejoras, incluido el establecimiento de un comité de seguridad, mejoras en el programa de capacitación y calificación para el futuro personal operativo y una mayor participación del personal de la ABEN en el programa de puesta en servicio.

La ABEN solicitó la realización de una Misión de Evaluación Integrada de la Seguridad de los Reactores de Investigación (INSARR), que verificó la seguridad del proyecto del reactor de investigación en relación con las normas de seguridad del OIEA. La misión, de siete días de duración y que concluyó el 18 de febrero, abarcó la estructura organizativa y de gestión y examinó aspectos técnicos, como el análisis de seguridad, la construcción y el programa de puesta en servicio.

El equipo de la misión INSARR estuvo integrado por cuatro expertos de Bulgaria, Canadá, Francia y el Reino de los Países Bajos, así como un funcionario del OIEA.

El reactor de investigación RB-01 es un reactor de agua ligera de tipo piscina de 200 kilovatios con una vida útil de 50 años. El reactor de investigación desempeñará un papel clave en la producción de radioisótopos que se pueden utilizar para mejorar la gestión de los recursos hídricos de Bolivia, así como en el análisis de activación neutrónica para identificar minerales de interés nacional. La construcción de la instalación comenzó en julio de 2021 y se espera que comience a operar en julio de 2025. El proyecto del reactor ha recibido licencias de evaluación del sitio, construcción y puesta en servicio del regulador boliviano.

El reactor de investigación forma parte de un acuerdo entre la Federación de Rusia y el Estado Plurinacional de Bolivia para la construcción de un Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CRDNT), ubicado en El Alto, una de las ciudades más altas del mundo, a una altitud de más de 4000 metros. Una vez completado, el RB-01 será el reactor nuclear más alto del mundo.

El equipo del INSARR visitó el reactor y sus instalaciones asociadas y se reunió con el personal y la dirección del reactor de investigación. “ABEN ha logrado avances significativos en la construcción y está creando una organización eficaz para comenzar la puesta en servicio, lo que contribuirá a garantizar la seguridad”, dijo el líder del equipo de revisión, Joseph Christensen, Oficial Superior de Seguridad Nuclear del OIEA. “El equipo de revisión alienta a ABEN a seguir manteniendo la seguridad como máxima prioridad a medida que avanzan hacia la puesta en servicio”.

El equipo de la misión también observó la organización y limpieza del lugar de construcción del reactor y formuló recomendaciones y sugerencias a ABEN para introducir mejoras, entre ellas:

- Fortalecer la formación en el trabajo del futuro personal operativo del reactor, incluso mediante la participación activa en las pruebas de puesta en servicio, a fin de garantizar la disponibilidad de personal calificado para una operación segura;
- Formalizar el comité de seguridad para proporcionar una revisión y evaluación independientes de las actividades importantes para la seguridad en las áreas de puesta en servicio y operación;
- Fortalecer la supervisión de la construcción y puesta en servicio de las instalaciones por parte de ABEN, incluyendo la revisión y evaluación de los cambios de diseño importantes para la seguridad, las no conformidades y la verificación de los criterios de aceptación para las pruebas de puesta en servicio;
- Actualización del programa de protección radiológica; y
- Establecer límites operacionales y condiciones específicas para la puesta en servicio.

“El Estado Plurinacional de Bolivia decidió implementar el Programa Nuclear Boliviano (PNB) con el claro entendimiento de que el desarrollo de la tecnología nuclear solo es posible a través de un estricto compromiso con la cultura de seguridad. Esto asegura la implementación exitosa del programa, permitiendo que la población se beneficie de sus amplias aplicaciones en la salud, la industria, la agricultura, el medio ambiente, los recursos hídricos, la minería, la ciencia y la tecnología”, afirmó Hortensia Jiménez Rivera, directora general Ejecutiva de ABEN. “Además, la implementación del primer reactor nuclear de investigación de Bolivia representa un punto de inflexión en el desarrollo científico y tecnológico del país”.

FONDO

Las misiones INSARR son un servicio de revisión por pares del OIEA, que se lleva a cabo a petición de un Estado Miembro, para evaluar la seguridad de los reactores de investigación con arreglo a las normas de seguridad del OIEA. Las misiones de seguimiento son componentes estándar del programa INSARR y suelen realizarse en un plazo de dos años a partir de la misión inicial. Puede encontrarse información general sobre las misiones INSARR en el sitio web del OIEA.

Las normas de seguridad del OIEA proporcionan un marco sólido de principios, requisitos y orientaciones fundamentales para garantizar la seguridad. Reflejan un consenso internacional y sirven como referencia mundial para proteger a las personas y al medio ambiente de los efectos nocivos de la radiación ionizante.

Avanza la implementación del reactor nuclear de investigación RB-01 con respaldo técnico del OIEA

En el marco del fortalecimiento nacional en el ámbito nuclear, Bolivia recibió la cuarta visita de una misión de expertos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), con el objetivo de brindar asistencia técnica a los grupos de operación y mantenimiento responsables del manejo del primer Reactor Nuclear de Investigación (RB-01) perteneciente a la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).

La misión del OIEA para la Evaluación de Operación y Mantenimiento de Reactores de Investigación (OMARR) estuvo conformada por los expertos internacionales, Rubén Mazzi, líder técnico de la sección de reactores de investigación; Carlos Díaz, experto en operaciones de reactores de investigación; y Sebastián Vaucheret, experto en mantenimiento de reactores de investigación.

El grupo de expertos realizó una evaluación de la documentación existente, referido a los ámbitos de operación y mantenimiento incluyendo (planes, programas, procedimientos, entre otros), así como del perfil del personal técnico y de capacitación.

Asimismo, la misión, definió el alcance y la metodología que deberá llevar a cabo la misión principal de OMARR, cuando el RB-01 se encuentre en operación cumpliendo los estándares internacionales de seguridad operación y mantenimiento de este tipo de instalaciones.

El objetivo de las evaluaciones que realizan estas misiones es para aplicar las normas internacionales del OIEA, las mismas se realizan en tres etapas principales del servicio OMARR: 1) Pre-OMARR, 2) Misión Principal OMARR y 3) Misión de Seguimiento OMARR. Al finalizar cada misión, se elabora un informe técnico que resume los aspectos más relevantes de la visita, incluyendo observaciones, recomendaciones y sugerencias para mejorar la operación y el mantenimiento de la futura instalación.

Durante su visita, los especialistas internacionales compartieron conocimientos y experiencias en el cumplimiento de normativas, estándares Y buenas prácticas internacionales en el área nuclear, contribuyendo así al uso seguro y eficiente del RB-01. Esta cooperación busca asegurar que las operaciones nucleares en el país se realicen bajo los más altos criterios de seguridad, calidad y responsabilidad técnica.

Ruben Mazzi, el líder del equipo de expertos representante del OIE, expresó “Estoy muy gratamente sorprendido y satisfecho de haber visitado este centro. Realmente tienen un desarrollo impresionante; es muy grato ver cómo han logrado construir y consolidar este centro de investigación de manera tan destacada”.

En el marco de la misión de Evaluación Integrada de la Seguridad de Reactores de Investigación (INSARR), se tiene programada próximamente la llegada de dos misiones adicionales: el Examen Integrado de la Utilización de Reactores de Investigación (IRRUR) y la Evaluación Independiente de la Cultura de la Seguridad (ISCA).





PROYECTO BOL 9009: FORTALECIMIENTO DE LAS CAPACIDADES NACIONALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA NUCLEAR Y LOS CENTROS DE MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA

Responsable del proyecto: Rolando René Chuquimia Ninahuanca¹

Dirección de Aplicaciones en Tecnología Nuclear

Correo electrónico: ¹rchuquimia@aben.gob.bo



OBJETIVO

El objetivo es contribuir a las prioridades nacionales identificadas en la Agenda Patriótica 2025 relacionadas con la educación, la diversificación productiva, la salud y el bienestar.

Datos del Ministerio de Salud (2018) indican que el cáncer en Bolivia se ha convertido en uno de los principales problemas de salud pública, lo que representa el 60% de la carga de morbilidad y mortalidad.

Actualmente, en Bolivia solo hay cinco servicios de radioterapia operativos que utilizan máquinas de cobalto. Por lo tanto, el gobierno de Bolivia ha establecido como prioridad la creación de una Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia para diagnósticos tempranos de enfermedades oncológicas, cardíacas y neurológicas, así como para el tratamiento de enfermedades oncológicas.

Además, y esencial para el funcionamiento de los Centros de Medicina y Radioterapia, es el establecimiento de un ciclotrón, radiofarmacia y preclínica, que proporcionará radiofármacos a esos centros.

Otro problema identificado en el país se abordará a través del Centro de Irradiación

Multipropósito (CMI), que tiene dentro de sus objetivos la seguridad y inocuidad de los alimentos y controlará la infestación de insectos a través de radiaciones ionizantes.

Según el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), se estima que menos del 50% de los alimentos producidos, procesados y elaborados en el país siguen controles de seguridad.

El proyecto brindará una oportunidad para la desinfección de productos agrícolas y agroforestales y el cumplimiento de las normas fitosanitarias internacionales.

Finalmente, el Reactor Nuclear de Investigación (RNI) contribuirá al desarrollo científico y tecnológico y en la aplicación de la tecnología nuclear en los diferentes campos de la ciencia, la agricultura, la medicina, la industria, la exploración y explotación de recursos minerales naturales.

A pesar de tener un número de profesionales capacitados en las diferentes áreas mencionadas, existe la necesidad de aumentar el número de personas capacitadas.

PRINCIPALES RESULTADOS

Instalación y puesta en marcha de las Estaciones de Monitoreo Ambiental, así como el entrenamiento del personal boliviano para su operación

En el marco del Proyecto de Cooperación Técnica del OIEA, BOL9009, Bolivia, a través de la ABEN, ha recibido su primer Estación de Monitoreo Radiológico Ambiental (EMRA), ubicada en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) de El Alto.

Con esta estación se podrán identificar los radionucleidos que pudieran haber en el aire. Un radionúclido es un elemento químico inestable que emite radiación al desintegrarse y volverse más estable. También se le conoce como radioisótopo. Se instalarán tres más:

1. Villamontes
2. Uyuni
3. CMNyR de Santa Cruz





ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

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