



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



"BOLIVIANA REVISTA CIENTÍFICA NUCLEAR MENTE"



aplicaciones
en salud



aplicaciones
en la industria



aplicaciones
nucleares



ciclo del
combustible



centro de
investigaciones

Número 2, 2023

"BOLIVIANA REVISTA CIENTÍFICA NUCLEAR MENTE"



aplicaciones
en salud



aplicaciones
en la industria



aplicaciones
nucleares



ciclo del
combustible



centro de
investigaciones



©AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

DIRECCIÓN GENERAL

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
Directora General Ejecutiva ABEN

ELABORACIÓN DE CONTENIDOS

Equipo técnico ABEN

REVISIÓN DE CONTENIDOS

Ing. Hortensia Jiménez Rivera

EDICIÓN DE TEXTOS

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

DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN

Editorial del Estado Plurinacional de Bolivia

DEPÓSITO LEGAL: 4-3-325-2022 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA

ÍNDICE

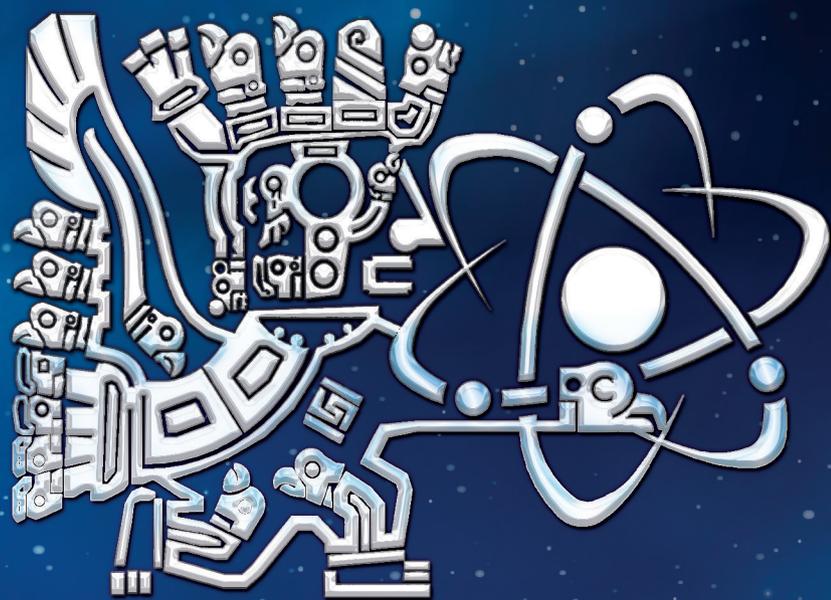
Sección 1. ENTREVISTA	5
Sección 2. ARTÍCULOS.....	13
Sección 3. TALLERES CIENTÍFICOS	49
Sección 4. NOTICIAS.....	75
Sección 5. PROYECTOS	87





Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

E
N
T
R
E
V
I
S
T
A



“BOLIVIANAMENTE”

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



LUIS FERNANDO CÁCERES: EL PRIMER PREMIO NOBEL DE BOLIVIA VA A SER PARA UNA MUJER



16 de enero, 2023

Por: Teresa Maya Pacheco Machicado

Maya (M): Para el número 2 de la revista científica nuclear **Bolivianamente** nos encontramos en presencia del licenciado Luis Fernando Cáceres Choque, director de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear, quien nos concedió una entrevista en exclusiva. Buenas tardes licenciado Cáceres, en primer lugar me gustaría que nos cuente sobre su trayectoria.

Luis Fernando (LF): Inicialmente estudié en la Escuela Industrial Pedro Domingo Murillo y salí como Técnico Medio en Química y Procesos. Empecé a trabajar, pero me di cuenta de que quería adquirir aún más conocimiento. Entonces, un amigo me convenció de estudiar

la carrera de Ciencias Químicas, nivel licenciatura. Con toda esa base pude empezar a desarrollar trabajos en el sector público y en el sector privado, así también opté a cursos de capacitación en diferentes rubros, siempre relacionados con la química. Trabajé desarrollando investigación, que puede resolver muchos problemas en el país. Finalmente, toda esa experiencia me permitió formar parte de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) apoyando a desarrollar los grandes proyectos que se tiene.

M: ¿Qué rol considera usted que ocupan las mujeres en la ciencia?

LF: Tengo fe de que en unos 30 o 40 años vamos a tener un Premio Nobel y el primer Premio Nobel de Bolivia para mí va a ser una mujer. Pienso que, si las mujeres fueran evaluadas o vistas en su real dimensión, los premios de ciencia y tecnología posiblemente se los llevarían en mayor proporción ellas. Un ejemplo es Lise Meitner, la austriaca que trabajó con Otto Hahn, el químico que ganó el Premio Nobel en 1944 por la explicación de lo que era fisión nuclear. Ese trabajo y la explicación física y química de ese fenómeno no lo hizo él, sino Lisa Meitner, que era su compañera de trabajo, pero como era judía los problemas sociales de la época evitaron que le dieran el Premio Nobel a ella. Otro ejemplo de las injusticias de género es Marie Curie, quien no pudo ser profesora de la universidad porque era mujer. En esa época las mujeres tenían que disfrazarse de hombres para entrar a la universidad y pasar clases. Entonces, la única forma de romper eso es que las mujeres realmente tomen su rol protagónico y reclamen por esas cosas. En el ámbito científico en Bolivia conozco mujeres muy preparadas, pero en definitiva yo creo que tienen que ganarse los espacios a fuerza, es reclamar lo justo, no es reclamar ni más ni menos, es lo justo y eso lo tenemos que hacer. Creemos en las mujeres, tenemos que coadyuvar en eso también y esperemos que con la implementación de la red de CMNyR y con el CIDTN nazcan nuevas líderes y referentes científicas en ese rubro.

M: ¿Cuál es su opinión acerca del desarrollo de la tecnología nuclear en Bolivia desde la década de los 70?

LF: Tuve la fortuna de trabajar en la época del 80 en lo que fue el IBTEN y logré conocer parte de lo que había quedado de la COBOEN, que era el primer emprendimiento para desarrollar tecnología nuclear en el país. Se consolidó en esa época, en los 70, con algunos trabajos de prospección, evaluación y concentración de uranio como yellow cake. Más allá de lo que se pueda pensar, yo creo que ese es un punto de partida importante porque así parezca hoy en día un proceso muy simple la extracción de uranio y de minerales, en ese entonces se logró implementar todo un sistema que le permitió extraer uranio y obtener yellow cake. Fue un gran paso porque se podía establecer que con conocimiento local era posible desarrollar ciencia de concentración de elementos tan interesantes como el uranio. Creo que ese es el mérito de la época del 70, que logró mostrar de que era posible de alguna forma con recursos humanos locales desarrollar este tipo de tecnologías.

M: ¿En qué consiste el Programa Nuclear Boliviano (PNB)?

LF: El Programa Nuclear Boliviano (PNB) es un gran acierto, más allá de los colores políticos refleja una política de Estado que vela por desarrollar tecnología nuclear en el país y es una cuestión totalmente necesaria, es tecnología totalmente beneficiosa para el país. Las aplicaciones en salud las estamos viendo día a día, las aplicaciones en el sector industrial,

minero, en investigación, medio ambiente van a ser igual de importantes. Posiblemente ahora nuestra cultura nuclear local no esté muy afianzada, pero vamos a lograr en el tiempo demostrar que los que pensaban en desarrollar tecnología nuclear, apostando al PNB por esta tecnología, estaban en lo correcto.

M: ¿Cómo contribuirán los tres componentes del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) al desarrollo tecnológico del país?

LF: Ya están contribuyendo. Tal vez deberíamos no hablar de 5 componentes, sino inclusive de 5 componentes porque hablamos del Reactor Nuclear de Investigación (RNI), Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP), Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) y tenemos que hablar de los laboratorios de investigación que por sí mismos van a desarrollar investigación en el área nuclear importante para el país y además especializada. Por ejemplo, hablamos de Radiobiología y Radioecología, que va a ser el único laboratorio del país que tendrá la posibilidad de hacer evaluaciones aplicando radioisótopos.

Ahora, hablando de los componentes más grandes tenemos el CCRP, este complejo va a ser en poco tiempo un complejo referencial porque cuenta con toda una infraestructura que le permitirá desarrollar investigación casi de principio a fin, va a mostrar que en Bolivia es posible encontrar por un lado principios activos de acción positiva contra el cáncer a partir de fuentes naturales y, por otro lado, develará que los recursos humanos locales tienen capacidades importantes como para mostrar esto. El CCRP será reconocido en el mundo.

Luego tenemos el CMI, usando la irradiación gamma para modificar semillas, modificar polímeros, preservar alimentos, etc. Además, nos permitirá realizar investigación; por ejemplo, la irradiación gamma puede ser utilizada para la coloración de algunas piedras semipreciosas como la bolivianita, que es una combinación de dos minerales: amatista y citrino. Entonces, es posible pensar en que se le puede dar un valor agregado mayor, representando una nueva fuente de ingreso para los productores de ese tipo de minerales.

El tercer componente es el Reactor Nuclear de Investigación (RNI), que va a ser como la reina favorita del lugar porque es el componente por esencia nuclear del CIDTN. Yo sueño realmente con ver ese Reactor de Investigación porque vamos a plasmar el sueño del país de contar con un reactor en el cual se puedan ver fenómenos que los veíamos solamente en libros.

Creo que es como la cúspide para cualquier investigador y más aún para uno que ha estudiado ciencias puras como nosotros, porque la ciencia es eso, no hay ciencia que sea de papel, es praxis y la química y la física son ciencias que tienen que ser demostradas realmente. Considero que todo el CIDTN está conceptualizado para desarrollar investigación de frontera, va a contar con la infraestructura, el equipamiento, los insumos y con los recursos humanos como para llevar la investigación básica y aplicada empleando tecnología nuclear a otro nivel, será un punto de inflexión importante en el desarrollo del país.

M: Respecto a la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia, ¿cómo considera actualmente que está beneficiando a la población?

LF: Tuve la oportunidad de trabajar desde el principio con este concepto de los Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR), no creíamos que las estadísticas que se habían

generado en el país eran ciertas. Pero, ¿qué decían estas estadísticas? Que entre 10.000 y 15.000 casos nuevos de cáncer se generan cada año en el país. Al principio parece un número exagerado y grande, pero no es así, más bien esos números son pequeños respecto a lo que realmente pasa en Bolivia. El problema del cáncer va a persistir a nivel global mucho tiempo todavía y no es algo que se vaya a erradicar pronto. Debemos tener los instrumentos pertinentes como para hacer el diagnóstico temprano, hacer seguimiento, tratar de frenar la proliferación de estas células malignas aplicando tecnología adecuada.

Ya no es un lujo tener estos equipos como un PET/CT o un acelerador lineal que hagan radiocirugía, ahora es una necesidad. Entonces, la Red de CMNyR muestra la cara visible y directamente beneficiosa de lo que es tecnología nuclear en salud, y eso se lo ve en el rostro de la gente que tiene la oportunidad de ver en estos centros una gran opción para que le puedan diagnosticar, tratar y además de forma gratuita sin la necesidad de ir al exterior. Por cada persona que se va a tratar ya hemos ganado.

M: Finalmente, ¿cómo plantea el futuro científico tecnológico nuclear la ABEN?

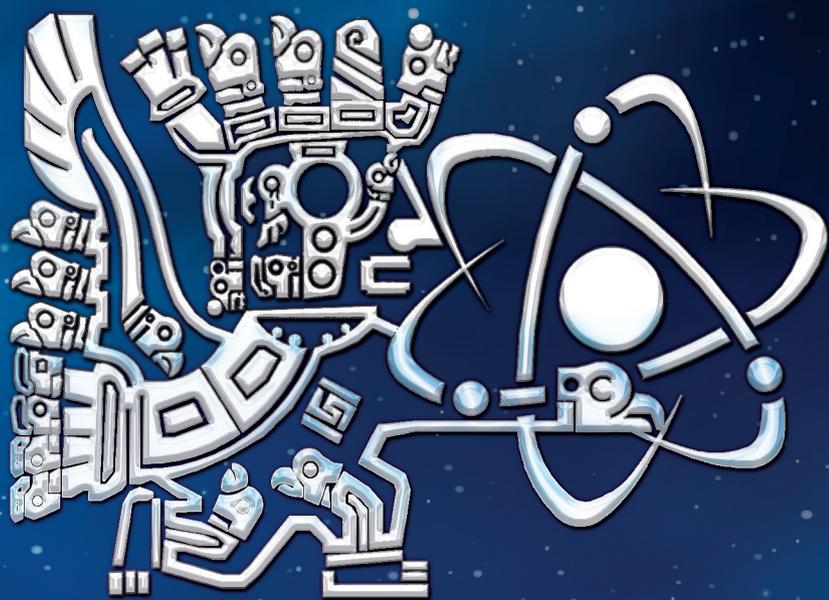
LF: Creo que el futuro está aquí, ahora. Antes lo veíamos lejano, cuando veíamos estos proyectos en papel parecía hasta cierto punto utópico pensar que íbamos a tener instalaciones radiológicas y nucleares, hoy es una realidad. Sin embargo, tenemos que pensar que se tiene que hablar de ciencia desde los niveles iniciales mostrando los beneficios de la tecnología nuclear porque es la única forma en la que los niños se interesen en lo que es ciencia y tecnología. Lo más importante es formar a nuestros recursos humanos, prepararlos para que puedan estar listos, siendo los científicos del mañana, llegando más lejos que nosotros, esta es la apuesta y el fin que se tiene con todo este desarrollo, pensar en que es posible hacer ciencia y tecnología nuclear desarrollando socioeconómicamente el país.





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.

Análisis fitoquímico preliminar de Plantas Medicinales del Municipio de Tapacarí, para selección de especies a ser sometidas a una prueba piloto de exposición a la radiación gamma

Autor: Teresa Maya Pacheco Machicado y Elva Ugarte Choque

Página 17

Artículo 2.

Producción de FDG y su aplicación en Medicina Nuclear

Autor: Susan Carolay Rodriguez Acha

Página 25

Artículo 3.

Bolivia en el contexto internacional de los acuerdos de la no proliferación nuclear

Autor: Cristian Condori Tarqui

Página 32

Artículo 4.

Nuevas tecnologías y perspectivas futuras de reactores nucleares

Autor: Marco Herbas López

Página 37



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



Análisis fitoquímico preliminar de Plantas Medicinales del Municipio de Tapacarí, para selección de especies a ser sometidas a una prueba piloto de exposición a la radiación gamma

Teresa Maya Pacheco Machicado MSc.¹, Elva Ugarte Choque Est.²

¹Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz - Bolivia.

*Correo electrónico: tpacheco@aben.gob.bo

²Carrera de Ingeniería Química, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

RESUMEN

Se realizó la selección de plantas medicinales, mediante la comparación bibliográfica de distintos autores, en base a sus usos medicinales y considerando el eje troncal de Bolivia. De toda esta revisión, inicialmente se consideró el departamento de Cochabamba, donde se seleccionaron 7 especies vegetales (*Schimus molle*, *Cestrum parqui* L'Hér, *Clinopodium bolivianum*, *Pluchea fastigiata* Griseb, *Baccharis dracunculifolia* DC, *Lepechinia Graveolens* y *Minthostachys Ovata*), que fueron recolectadas del Municipio de Tapacarí de las comunidades de Tres Cruces y Lambramani en el mes de mayo 2022. Posteriormente, se realizó el screening fitoquímico de los extractos vegetales crudos, obteniendo así de manera cualitativa una identificación preliminar de los metabolitos secundarios presentes en cada especie colectada. De estas muestras se seleccionaron 4 especies (*Schimus molle*, *Pluchea fastigiata* Griseb, *Baccharis dracunculifolia* DC, y *Minthostachys Ovata*), cuyos extractos crudos fueron sometidos a un proceso de irradiación gamma de una fuente de ⁶⁰Co, a una dosis de 6.5 kGy, y el efecto de la radiación en las muestras fue evaluado de manera cualitativa mediante Cromatografía en Capa Fina.

Los resultados de este trabajo son útiles como una primera aproximación a la aplicación de la irradiación gamma en extractos vegetales de Plantas Medicinales, ampliando el conocimiento y el uso potencial de la Tecnología Nuclear en Medicina Tradicional, permitiendo la utilización de los recursos naturales de nuestro país, como fuente de desarrollo regional y nacional.

Palabras Clave: Extracto vegetal, screening fitoquímico, metabolitos secundarios, irradiación gamma, Centro Multipropósito de Irradiación (CMI).

1. Introducción

En la medicina tradicional gracias a los conocimientos ancestrales que han pasado de generación en generación en nuestra población, existe una amplia variedad de especies vegetales que son utilizadas para el tratamiento de diversas enfermedades, considerando

a estas como plantas medicinales [1, 2]. En la actualidad, se está realizando una serie de investigaciones en todo el mundo sobre los metabolitos secundarios en plantas medicinales, ya que los mismos son una fuente de principios activos de medicamentos. Estos metabolitos secundarios se agrupan en cuatro clases principales: Terpenos (hormonas, pigmentos o aceites esenciales), Compuestos fenólicos (cumarinas, flavonoides, lignina y taninos), Glicósicos (saponinas, glicósidos y glucosinolatos) y Alcaloides [3]. Existe un principal interés en plantas medicinales que contengan compuestos fenólicos, debido a su actividad antioxidante. Los compuestos antioxidantes tienen la capacidad de inhibir o interrumpir las reacciones de transformación que causan daños a las biomoléculas. En los últimos años los antioxidantes naturales provenientes de plantas, por ejemplo, ácido ascórbico (vitamina C), α -Tocoferol (vitamina E), glutatión, carotenoides, y flavonoides, que han sido frecuentemente utilizados en diferentes campos de la industria farmacéutica, médica y en alimentos [4]. Así también hay un interés en especies que contengan compuestos esteroides y triterpenos, ya que estos compuestos son ampliamente utilizados en la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica por sus propiedades físico-químicas y farmacológicas, siendo esta última la de mayor relevancia para posteriores estudios.

Los rayos gamma de fuentes radiactivas naturales o artificiales, han sido ampliamente utilizados en la ciencia y la tecnología en diversas áreas [5]. Se ha demostrado que la exposición a la radiación gamma en una tasa de dosis determinada, podría incrementar o disminuir el contenido de algunos componentes activos presentes en las especies vegetales, principalmente las especies que presentan flavona, fenoles totales y taninos [6, 7, 8, 9].

Esta investigación tiene por objetivo realizar un análisis fitoquímico preliminar de las 7 especies de plantas medicinales seleccionadas del Municipio de Tapacarí, mediante un análisis cualitativo del contenido de componentes activos, a través de pruebas que se realizan mediante reacciones específicas para cada uno de los metabolitos secundarios: a) Identificación de alcaloides, b) Identificación de azúcares, c) Identificación de saponinas, d) Identificación de esteroides y triterpenos, e) Identificación de glicósidos cardiacos, f) Identificación de compuestos fenólicos, g) Identificación de taninos, h) Identificación de flavonoides, i) Identificación de proteínas y j) Identificación de aceites no volátiles [10, 11]. Como resultado, se seleccionaron 4 extractos, el extracto crudo de la especie *Minthostachys ovata* (Briq.) Epling, por la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides se seleccionaron los extractos crudos de *Pluchea fastigiata* Griseb y *Baccharis dracunculifolia* DC y debido a la presencia de esteroides, triterpenos y flavonoides se seleccionó el extracto crudo de *Schinus molle* L, para posteriormente evaluar la influencia de la radiación gamma con una fuente de ^{60}Co , mediante un estudio pre y post irradiación cualitativo, esto con el objetivo de incrementar la cantidad de metabolitos secundarios. Estos resultados se constituirán en la base para evaluar procesos de irradiación en plantas medicinales.

2. METODOLOGÍA

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica de las Plantas Medicinales más utilizadas en Bolivia (eje troncal), realizando una comparación de sus usos, modos de empleo y la posible composición que estas pudieran tener, y en base a este trabajo se seleccionaron 7 especies de Plantas Medicinales del departamento de Cochabamba (*Schinus molle*, *Cestrum parqui* L'Hér, *Clinopodium bolivianum*, *Pluchea fastigiata* Griseb, *Baccharis dracunculifolia* DC, *Lepechinia Graveolens* y *Minthostachys Ovata*). Es así que el material vegetal (hojas y tallos no afectadas por insectos o con signos de daños) se colectó en el Municipio de Tapacarí de

las comunidades de Tres Cruces y Lambramani en el mes de mayo 2022, después se realizó el proceso de análisis fitoquímico preliminar de las plantas colectadas, siguiendo la marcha que se detalla en la figura 1.

Posterior al proceso de análisis preliminar fitoquímico y en base al contenido de metabolitos secundarios de interés (Fenólicos, flavonoides, esteroles y triterpenos), se seleccionaron las especies: *Minthostachys ovata* (Briq.) Epling, *Pluchea fastigiata* Griseb, *Baccharis dracunculifolia* DC) y *Schinus molle* L., posteriormente se sometió a un proceso de exposición de radiación gamma con una fuente de Cobalto 60 en el Irradiador Autoblindado del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN). Se aplicó una tasa de dosis de radiación gamma de 6.5 kGy con un tiempo de exposición de 50 minutos a los 4 extractos seleccionados, tomando en cuenta las mediciones realizadas con el espectrómetro EPR (Marca: BRUKER, Modelo:MS-5000).

La evaluación del efecto de la exposición a la radiación gamma en los extractos fue realizó un análisis cualitativo mediante la técnica de Cromatografía en Capa Fina en placas de sílica gel con soporte de Aluminio, sembrando en la placa el extracto sometido a irradiación y al lado en comparación el extracto sin irradiar (blanco). Para la fase móvil la relación de solventes más óptima que llevó a una buena separación de los compuestos en la placa, fue de 70% de éter etílico y 30% de acetato de etilo, y para el revelado de las placas se utilizó H_2SO_4 al 5% y $FeCl_3$ al 5%, este último revelador permite observar los compuestos fenólicos presentes en los extractos obtenidos, esta comparación de extractos se observa en la sección de resultados y discusiones en la figura 2.

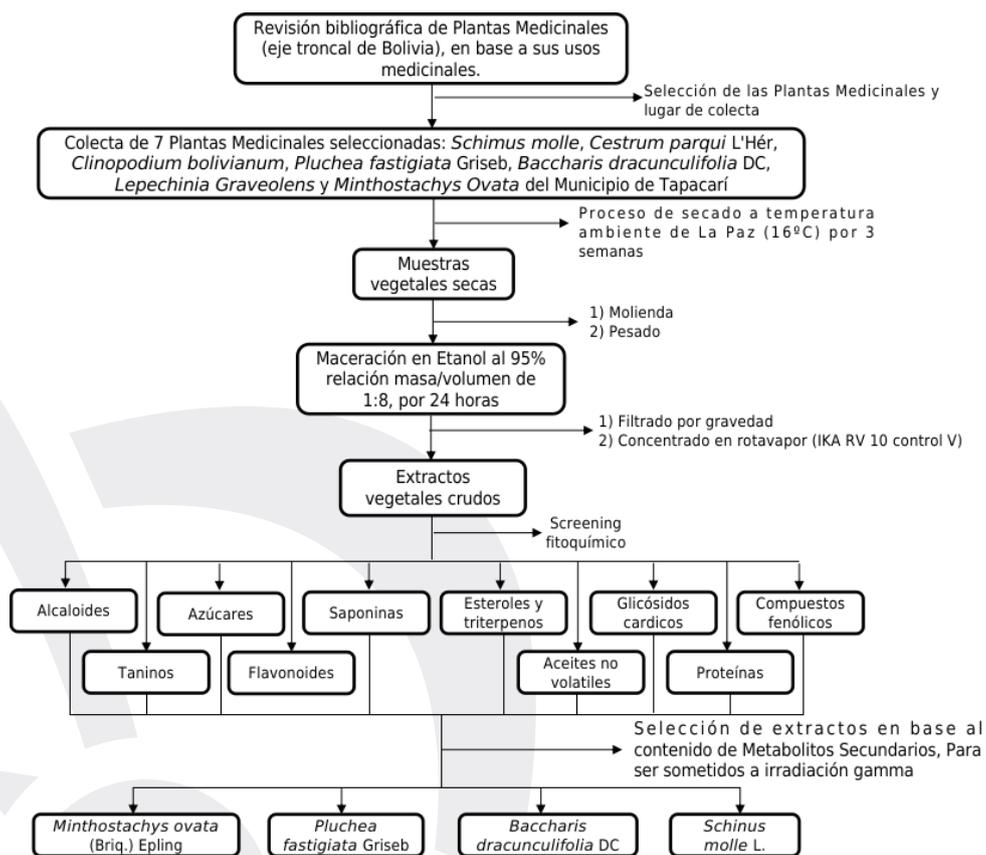


Figura 1. Proceso de análisis preliminar de metabolitos secundarios en extractos de especies vegetales seleccionadas del Municipio de Tapacarí.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como se puede observar en la tabla 1 los porcentajes de rendimiento de extracción por encima del 5% son para las especies *Pluchea fastigiata* Griseb, *Schinus molle* L, *Baccharis dracunculifolia* DC y *Lepechinia graveolens*, con un valor de 5.39%, 6.32%, 17.96% y 10.48% respectivamente, lo que señala que estas especies fueron beneficiadas con la extracción etanólica.

Tabla1. Porcentaje de rendimiento de extracción de las 7 especies de Plantas Medicinales colectadas.

Nº	Nombre común	Parte utilizada	Nombre científico	Masa de planta seca (g)	Masa obtenida del extracto (g)	% Rendimiento
1	Andres Waylla	Hojas	<i>Cestrum parqui</i> L'Hér	70.05	0.98	1.39
2	Ch'iñi Muña	Hojas	<i>Clinopodium bolivianum</i> (Benth.) Kuntze	70.05	1.93	2.76
3	Q'owa Muña	Hojas y tallos	<i>Minthostachys ovata</i> (Briq.) Epling	70.05	1.99	2.85
4	Molle	Hojas	<i>Schinus molle</i> L.	70.05	4.42	6.32
5	Uri Uri	Hojas	<i>Pluchea fastigiata</i> Griseb.	70.05	3.77	5.39
6	T'ola	Hojas	<i>Baccharis dracunculifolia</i> DC	70.05	12.58	17.96
7	La'pacha	Hojas	<i>Lepechinia graveolens</i>	70.05	7.34	10.48

Fuente: *Elaboración Propia*

Así también, en las tablas 2 y 3 se tienen los resultados de las distintas pruebas que se realizaron (screening fitoquímico cualitativo) para cada uno de los extractos obtenidos de las 7 especies colectadas, a partir de la identificación de metabolitos secundarios presentes en las mismas, se seleccionaron 4 extractos: El extracto crudo de la especie *Minthostachys ovata* (Briq.) Epling por la presencia de compuestos fenólicos, los extractos crudos de *Pluchea fastigiata* Griseb y *Baccharis dracunculifolia* DC por la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides, y debido a la presencia de esteroides y triterpenos se

seleccionó el extracto crudo de *Schinus molle* L. [4]. Los compuestos esteroides y triterpenos son ampliamente utilizados en la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica por sus propiedades físico-químicas y farmacológicas, la presencia de compuestos fenólicos es de interés farmacéutico y médico debido a la capacidad antioxidante que estos tienen. El contenido de compuestos flavonoides en plantas medicinales es de especial interés ya que las plantas que contienen este tipo de compuestos pueden ser potenciales candidatas para el estudio de lucha contra el cáncer, debido a que estructuras de este tipo han demostrado tener una actividad anticancerígena.

Con el objetivo de incrementar el contenido de estos compuestos mencionados y en base a revisión de estudios en los que la exposición a la radiación gamma ha tenido una influencia en el incremento de metabolitos secundarios de algunas especies vegetales, los 4 extractos vegetales crudos de plantas medicinales que fueron seleccionados por su contenido de metabolitos secundarios fueron sometidos a una prueba piloto de exposición a la radiación gamma proveniente de una fuente de Cobalto 60, en el equipo Irradiador Autoblindado LGU-12 del Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) con una dosis de 6.5 kGy.

Tabla2. Identificación de metabolitos secundarios

N°	Prueba		Alcaloides	Azúcares	Saponinas	Esteroides y triterpenos	Glicósidos cardiacos		
	Nombre común	Nombre científico					Test de Mayer	Test de fehling	Test de espuma
1	Andres Waylla	<i>Cestrum parqui</i> L'Hér	+	-	-	++	-	+	+++
2	Ch'iñi Muña	<i>Clinopodium bolivianum</i> (Benth.) Kuntze	++	-	+	++	-	+++	+++
3	Q'owa Muña	<i>Minthostachys ovata</i> (Briq.) Epling	+	+++	+	+	-	+	+
4	Molle	<i>Schinus molle</i> L.	++	+	-	+++	-	+	++
5	Uri Uri	<i>Pluchea fastigiata</i> Griseb.	+	-	-	+	-	+	+++
6	T'ola	<i>Baccharis dracunculifolia</i> DC	++	-	-	+	-	++	+
7	R'aqa R'aqa	<i>Lepechinia graveolens</i>	++	+	-	++	+	++	++

Fuente: Elaboración propia.

Tabla3. Identificación de metabolitos secundarios

N°	Prueba		Compuestos fenólicos	Taninos		Flavonoides	Proteínas	Aceites no volátiles
	Nombre común	Nombre científico	Test FeCl3	Test de Acetato de plomo	Test de Gelatina	Test de Shinoda	Test de Ninhidrina	Test de punto
1	Andres Waylla	Cestrum parqui L'Hér	++	+	+	-	-	-
2	Ch'iñi Muña	Clinopodium bolivianum (Benth.) Kuntze	+++	+	+	-	-	-
3	Q'owa Muña	Minthostachys ovata (Briq.) Epling	+++	+	+	-	-	-
4	Molle	Schinus molle L.	+	+	+	+	-	-
5	Uri Uri	Pluchea fastigiata Griseb.	+++	+	+	+	-	-
6	T'ola	Baccharis dracunculifolia DC	+++	+	+	++	-	+
7	R'aqa R'aqa	Lepechinia graveolens	+++	+	+	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

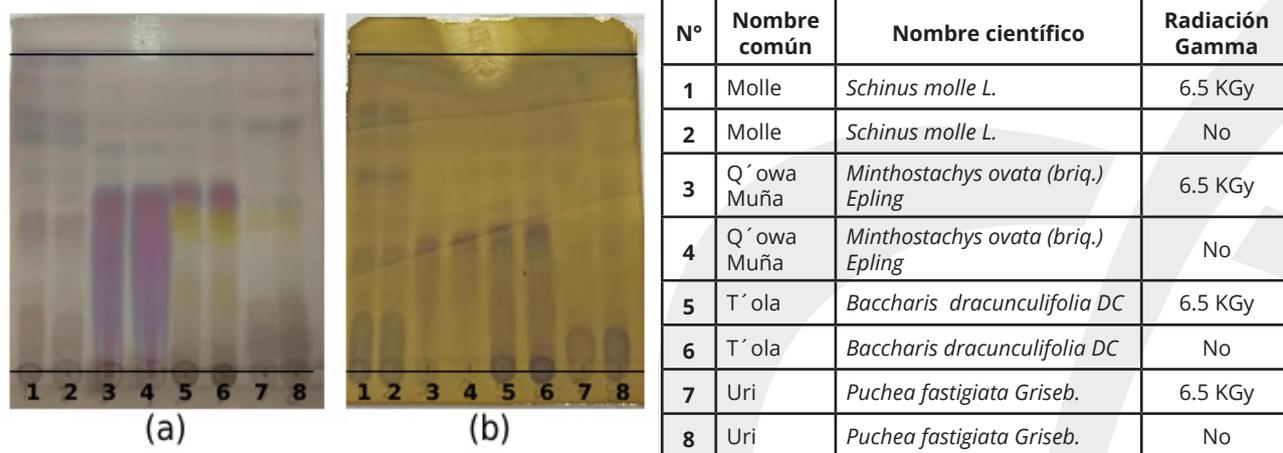


Figura 2. Comparación cualitativa de los extractos irradiados y sin irradiar, (a) Revelado en H_2SO_4 y (b) Revelado en $FeCl_3$

De manera cualitativa se podría decir que, como producto de exposición a la radiación gamma, el extracto de la especie *Schinus molle L* incrementa el contenido de compuestos, debido a que se observa en la placa mayor intensidad de coloración en el extracto irradiado

comparado con el blanco, lo que indicaría una mayor concentración de los compuestos. En los extractos de *Minthostachys ovata* (Briq.) Epling y de *Baccharis dracunculifolia* DC, no se observan cambios aparentes, al contrario, en el extracto de *Pluchea fastigiata* Griseb pareciera que el contenido de los compuestos en el extracto disminuye, ya que se ve menor intensidad en las manchas de extracto irradiado sembrado en la placa, sin embargo, para poder tener una afirmación de estos casos se debe realizar un análisis cuantitativo mediante técnicas como Cromatografía Líquida de Alta Resolución y así tener datos exactos, de igual manera se deben considerar dosis de irradiación gamma menores y mayores a 6,5 kGy que fue la que se aplicó en el presente estudio, para ver la influencia de la variación del mismo.

4. CONCLUSIÓN

Se obtuvieron 7 extractos etanólicos de las especies colectadas del Municipio de Tapacarí, que fueron seleccionadas en base a una exhaustiva revisión bibliográfica, tomando en cuenta su utilización en la Medicina Tradicional en Bolivia, enfocado este uso en principio en enfermedades de cáncer, de las cuales observó que 4 extractos (*Pluchea fastigiata* Griseb, *Schinus molle* L, *Baccharis dracunculifolia* DC y *Lepechinia*) presentaron un porcentaje de rendimiento de extracción por encima del 5%, con un valor de 5.39%, 6.32%, 17.96% y 10.48% respectivamente, lo que señala que estas especies fueron beneficiadas con la extracción etanólica.

En las pruebas preliminares observamos la composición cualitativa de los extractos y después de todo el tamizaje fitoquímico de las plantas medicinales seleccionadas de la comunidad de Tapacarí, y en función a la presencia de algunos componentes activos, se seleccionaron 4 extractos crudos de las siguientes especies: *Minthostachys ovata* (Briq.) Epling, *Pluchea fastigiata* Griseb, *Baccharis dracunculifolia* DC y *Schinus molle* L, para ser sometidos a un proceso de irradiación gamma.

Los efectos de exposición de la irradiación gamma de una fuente de Cobalto 60 en los extractos seleccionados a una dosis de irradiación gamma de 6.5 kGy, fue realizada por medio de un análisis cualitativo por Cromatografía en Capa Fina de los cuales, de cuales, en las especies *Minthostachys ovata* (Briq.) Epling y *Baccharis dracunculifolia* DC no se observaron cambios aparentemente significativos, sin embargo, en el extracto de la especie *Schinus molle* L pareciera incrementar el contenido de sus compuestos, por el contrario, en el extracto de *Pluchea fastigiata* Griseb pareciera que el contenido de los compuestos en el extracto disminuyen. Esto bajo una observación cualitativa en las placas de Cromatografía en Capa Fina.

Sin embargo, se sugiere trabajar con dosis de radiación en un intervalo mayor y menor a 6.5 kGy para cada extracto, y realizar el análisis cuantitativo mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC), para poder evaluar la modificación cuantitativa de los metabolitos secundarios de cada especie de extracto vegetal, así también se sugiere realizar la irradiación en una etapa de propagación in-vitro de la especie vegetal.

Estos estudios previos son una herramienta inicial de la aplicación de la irradiación gamma en extractos vegetales de Plantas Medicinales, ampliando el conocimiento y el uso potencial de la Tecnología Nuclear en Medicina Tradicional, permitiendo la utilización de los recursos naturales de nuestro país, como fuente de desarrollo regional y nacional.

5. REFERENCIAS

1. Agencia Boliviana de Energía Nuclear ABEN 2021. Plantas en Bolivia con Potencial uso Terapéutico.
2. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016. Plantas de Bolivia con potencial medicinal.
3. Rivas Pérez, Bernarda Nohemy, Leal Granadillo, Iván Antonio, Loaiza Cuauero, Luris Francis, Morillo, Yonatta Ernesto, & Colina Chirinos, Jean Carlos. (2017). Compuestos fenólicos y actividad antioxidante en extractos de cuatro especies de orégano. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 40(3), 134-142.
4. Karre, L., Lopez, K., & Getty, K. J. (2013). Natural antioxidants in meat and poultry products. Meat science, 94(2), 220-227.
5. Machi, S., "Prospects for the Application of Radiation Processing and the Activities of the IAEA", Radiation Physics and Chemistry, vol. 52, pp. 591- 597 (1998).
6. Moussaid, M.; Lacroix, M.; Nketsia-Tabini, J.; Boubekri, C., "Phenolic compounds and the colour of oranges subjected to a combination treatment of waxing and irradiation", Radiation Physics Chemistry, vol. 57, pp. 273-275 (2000).
7. Miranda, M.B.; Horii, J.; Alcarde, A.R., "Estudo do efeito da irradiação gama (60 Co) na qualidade da cachaça e no tonel de envelhecimento", Ciência e Tecnologia de Alimentos, vol. 26, pp. 772-778 (2006).
8. Ashouri A, 2016. The Effect of Gamma Irradiation on In vitro Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of *Ferula gummosa* Bioss.
9. Coronado G, Cauna P, 2018. Actividad antibacteriana in vitro de extractos hidroalcohólicos de *Plantago major* (LLANTEN) Y *Rumex crispus* (LENGUA DE VACA) sobre cepas ATCC de *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli* y *Pseudomona aeruginosa* – Puno 2017.
10. Cortés C, 2017. Estimación de dosis letal 50 en dos explantes de *Alstroemeria* SPP irradiados con rayos gamma.
11. Duarte S, Cárdenas C, 2007. Estudio de la variación circadiana de los metabolitos secundarios Volátiles obtenidos por destilación – extracción con solvente Simultánea, de hojas de *Lippia alba* (Fam. Verbenaceae).
12. Faezeh F, Salome D, 2014. Considering the antibacterial activity of *Zataria multiflora* Boiss essential oil treated with gamma-irradiation in vitro and in vivo systems.
13. Lopes A, 2014. Efectos de la irradiación gamma y de electrones en los parámetros físico-químicos de la castaña.
14. Mesa AM, Zapata S, Arana LM. 2015. Actividad antioxidante de extractos de diferente polaridad de *Ageratum conyzoides* L.
15. Mohamed A, 2009. Effect of Low Dose Gamma Irradiation on Some Phytochemicals and Scavenger Ability of in Vitro *Culantro* (*Eryngium foetidum* L.) Plantlets.
16. Polini G, Camaqui A. Plantas Medicinales de Bolivia Region Altiplano.
17. Radomir AM, 2021. Effect of gamma irradiation on bioactive compounds of medicinal plants.
18. Rivadeneira D, 2015. Potencial biosida del aceite esencial de *schinus molle* l. (molle) frente al gluconato de clorhexidina al 0.12% sobre *streptococcus mutans*, principal agente cariogénico. estudio in vitro.
19. Vardhan V, Shukla I, 2017. Gamma irradiation of medicinally important plants and the enhancement of secondary metabolite production.
20. Velasquez L., 2007. Actividad Antimicrobiana de Extractos de *Franseria Artemisioides*, *Rumex Palustris*, *Baccharis Latifolia*, *Cestrum Parqui* Y *Piper Asperifolium* frente a *Staphylococcus Aureus*, *Escherichia Coli*, *Pseudomonas Aeruginosa* Y *Enterococcus Faecalis*.

Producción de FDG y su aplicación en Medicina Nuclear

Susan Carolay Rodriguez Acha MSc.^{1*}

¹ Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: srodriguez@aben.gob.bo

RESUMEN

En la actualidad, el avance de la tecnología nuclear ha desempeñado un papel destacado para el diagnóstico oportuno y el tratamiento eficaz del cáncer. Para ello, el Complejo Ciclotrón Radiofarmacia y Preclínica (CCRP) cuenta en su instalación con un Ciclotrón Modular TR24 que tendrá la capacidad de producir radioisótopos para la producción de radiofármacos para su uso en Tomografía por Emisión de Positrones y Tomografía Computarizada por Emisión de fotón único (PET y SPECT), que es una técnica de medicina nuclear que permite estudiar la distribución in vivo de una molécula radiactiva. El principal radiofármaco utilizado en este tipo de procedimientos es el [¹⁸F]-2-fluoro-2-desoxi-D-glucosa (FDG). Este radiofármaco es utilizado en el área oncológica a nivel mundial para el diagnóstico, estadificación, valoración pronóstica, evaluación de la respuesta a la terapia, planificación de la radioterapia y verificación de la recurrencia o recidiva de la enfermedad.

Esta revisión pretende abordar aspectos relevantes de la producción del radionucleido ¹⁸F en el Ciclotrón Modular TR24 y del radiofármaco ¹⁸F-FDG en sus módulos de síntesis, el control de calidad a la liberación del lote y de la adquisición de las imágenes. Además, resume algunos principios relacionados con la preparación del paciente para el estudio de PET/CT con ¹⁸F-FDG.

Palabras Clave: Radiofármaco, Ciclotrón, Oncológico, Tomografías por Emisión de Positrones (PET), Tomografía Computada (CT).

1. Introducción

En los últimos años se han ido incrementando los estudios que avalan la utilidad de la técnica PET/CT para la valoración de diferentes patologías, las que suelen presentar aumento del metabolismo medible, existiendo una guía para el uso del ¹⁸F-FDG y en la práctica clínica, la tomografía por emisión de positrones fusionada a la tomografía computada (PET/CT) es una modalidad que se considera fundamental en los diferentes escenarios de los pacientes oncológicos [1].

Frente a esa necesidad, el Complejo Ciclotrón de Radiofarmacia Preclínica (CCRP) impulsará la producción de radiofármacos que serán empleados en medicina nuclear para realizar diagnósticos clínicos de identificación de diferentes tipos de tumores, enfermedades neoplásicas, estadificaciones y tratamientos de enfermedades oncológicas [2].

El CCRP cuenta con un Ciclotrón Modular con potencia de 16 a 24 MeV capaz de producir una variedad de radioisótopos, además de: salas de producción y control de calidad de

radiofármacos, también cuenta con un laboratorio de preclínica donde se desarrollarán nuevos radiofármacos para el diagnóstico médico mediante el empleo de cámaras de adquisición de imágenes de última generación.

Estos radiofármacos serán empleados en la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR) del país, que cuenta con equipos de Tomografía Computarizada por emisión de Fotón Único (SPECT) y Tomografía por Emisión de Positrones (PET), ambas combinadas en la modalidad híbrida con la Tomografía Computarizada (CT).

2. PRODUCCIÓN DEL RADIOFÁRMACO ^{18}F -FDG

La síntesis del FDG cuenta con dos etapas: la producción del radionucleido en el ciclotrón por medio de una reacción nuclear y la síntesis del radiofármaco en un módulo de síntesis blindado [3].

En el ciclotrón, el radionucleido ^{18}F puede obtenerse por dos vías: la nucleofílica y la vía electrofílica. La vía nucleofílica consiste en la reacción $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, utilizando H_2^{18}O como precursor, es decir, los átomos de oxígeno-18 impactados por protones, generan el radionucleido flúor-18 en forma de fluoruro, después, el radionucleido es transportado por medio de líneas de transferencia blindados a los módulos automatizados de síntesis, dentro de celdas blindadas, donde ocurre la síntesis del radiofármaco [3,4,5].

La síntesis nucleofílica del ^{18}F -FDG se basa en una reacción de sustitución molecular ($\text{S}_{\text{N}}2$) de un ion ^{18}F sobre el triflato de manosa (un azúcar precursor de la manosa). La reacción $\text{S}_{\text{N}}2$ tiene lugar en una única etapa $\text{S}_{\text{N}}2$ donde la adición y la eliminación ocurren simultáneamente. El ataque nucleofílico se lleva a cabo en el carbono 2 del azúcar precursor sobre el grupo triflato, ya que los grupos que se encuentran en el resto de carbonos están protegidos por grupos acetilo. La eliminación de los grupos acetilo se realiza mediante una hidrólisis posterior ya sea ácida con HCl o básica con NaOH [9] (ver Figura 1).

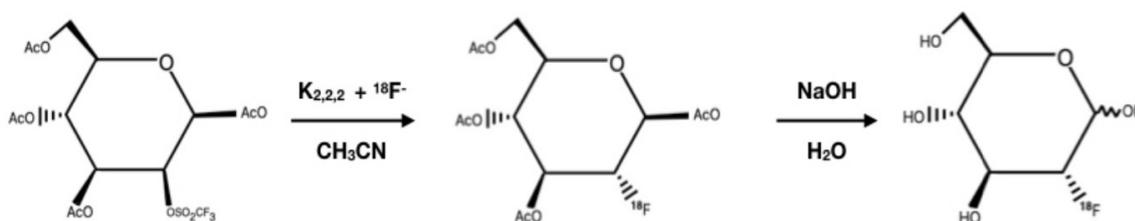


Figura 1. Síntesis química de ^{18}F -FDG

Posteriormente, el producto es purificado en diferentes cartuchos de extracción y es transferido a un vial estéril a través de un filtro de membrana de $0,22\ \mu\text{m}$, donde se procede a medir la actividad del producto final, se realiza la dispensación y etiquetado del radiofármaco [9].

Las celdas blindadas deben encontrarse dentro de un área blanca o limpia, donde se monitorea diferentes parámetros. Además, se debe cumplir con normas sanitarias internacionales como del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de autoridades sanitarias nacionales que han redactado instrumentos que guían a los centros

para el cumplimiento de buenas prácticas de manufactura [3,6,7,8].

3. CONTROL DE CALIDAD DEL RADIOFÁRMACO 18 F- FDG

Para su liberación, se debe realizar un control de calidad del fármaco [9]. Los resultados de los ensayos deben estar conformes a las especificaciones farmacopeicas. A continuación, se detallan generalidades de los ensayos exigidos por la Farmacopea de los Estados Unidos [4,5,11]:

- a. **Apariencia:** La solución debe ser clara, incolora o ligeramente amarilla y libre de partículas.
- b. **Determinación de pH:** El pH del [¹⁸F]-2-fluoro-2-desoxi-D-glucosa (FDG) debe estar en un rango de 4.5 - 7.5 de modo que garantice la estabilidad del fármaco y que minimice el malestar del paciente.
- c. **Identidad radionucleídica:** El periodo de semidesintegración $t_{1/2}$ debe estar entre 105 - 115 minutos. Generalmente, se realizan al menos tres mediciones de actividad utilizando un calibrador de dosis.
- d. **Identidad y pureza radioquímica:** La radiactividad del ¹⁸F-FDG no debe ser inferior al 90 % de la radiactividad total, siendo la radiactividad de la muestra debe corresponder a ¹⁸F-2-fluoro-2-desoxi-D- glucosa.
- e. **Pureza radionucleídica:** Es por medio de un Espectrómetro gamma donde las emisiones gamma no menor al 99,5% corresponda a los picos de 0,511 MeV, 1,022 MeV o que la dispersión Compton corresponda al ¹⁸F.
- f. **Pureza química:** Incluye métodos y límites para determinar impurezas potenciales relacionadas con el catalizador de transferencia de fase utilizado en la síntesis, así como relacionadas con el método de hidrólisis [11-30].
- g. **Solventes residuales:** Es medido por la cromatografía gaseosa con detector de ionización de llama para la determinación de etanol, éter y acetonitrilo en la formulación final. Los primeros dos solventes son de tipo 3, por lo que su concentración debe ser menor a 0,5%, mientras que el acetonitrilo por su toxicidad es de tipo 2 y debe hallarse a una concentración menor a 0,04%.
- h. **Endotoxinas bacterianas:** La administración de pirógenos como las endotoxinas es capaz de originar una respuesta fisiológica indeseable en el cuerpo como fiebre, escalofríos, malestar, leucopenia, dolor en las articulaciones, shock e incluso muerte, por lo que la farmacopea de los Estados Unidos exige efectuar el Ensayo del Lisado de Amebocitos del Limulus (LAL) en el producto terminado. Este ensayo es un método in vitro que permite la detección de endotoxinas bacterianas con gran sensibilidad. [4,5,11].
- i. **Test de esterilidad:** Para determinar la presencia o ausencia de microorganismos viables en la preparación final utilizando medios de cultivo adecuados. La prueba no garantiza que un lote sea estéril, pues esta garantía se consigue mediante la validación

del proceso o procesamiento aséptico. El ensayo requiere de condiciones asépticas y haber realizado pruebas de promoción de crecimiento.

Dado que este test requiere varios días para obtener el resultado, el mismo es realizado después de la liberación del lote del radiofármaco. Sin embargo, la farmacopea establece que para garantizar la esterilidad del producto deben cumplirse lineamientos en producción del inyectable que incluyen el correcto almacenamiento, desinfección de componentes, equipos de preparación del radiofármaco, controles ambientales periódicos, monitoreo de la campana de flujo, la técnica aséptica y la calificación del proceso de filtración [11].

- j. **Actividad:** La dosis a inyectar al paciente debe ser determinada con un calibrador de dosis y expresada en MBq o mCi por mL. Si la muestra del radiofármaco cumple en conformidad a las especificaciones, el radiofármaco es liberado para su uso en pacientes.

4. TÉCNICA PET/CT Y SUS APLICACIONES

El PET/CT es una técnica de imágenes híbridas que combina la tomografía por emisión de positrones (PET) y la tomografía computada (CT). Esto permite la integración y correlación de información anatómica de alta resolución espacial (brindada por la CT) con información metabólica y funcional (brindada por el PET). El objetivo de combinar estas tecnologías es obtener imágenes anatómicas, metabólicas y funcionales capaces de lograr diagnósticos más tempranos y precisos. [13-14-15]. A su vez, este tipo de imágenes puede utilizarse en la planificación y seguimiento de tratamientos de radioterapia, mejorando la calidad de los mismos (ver Figura 2).

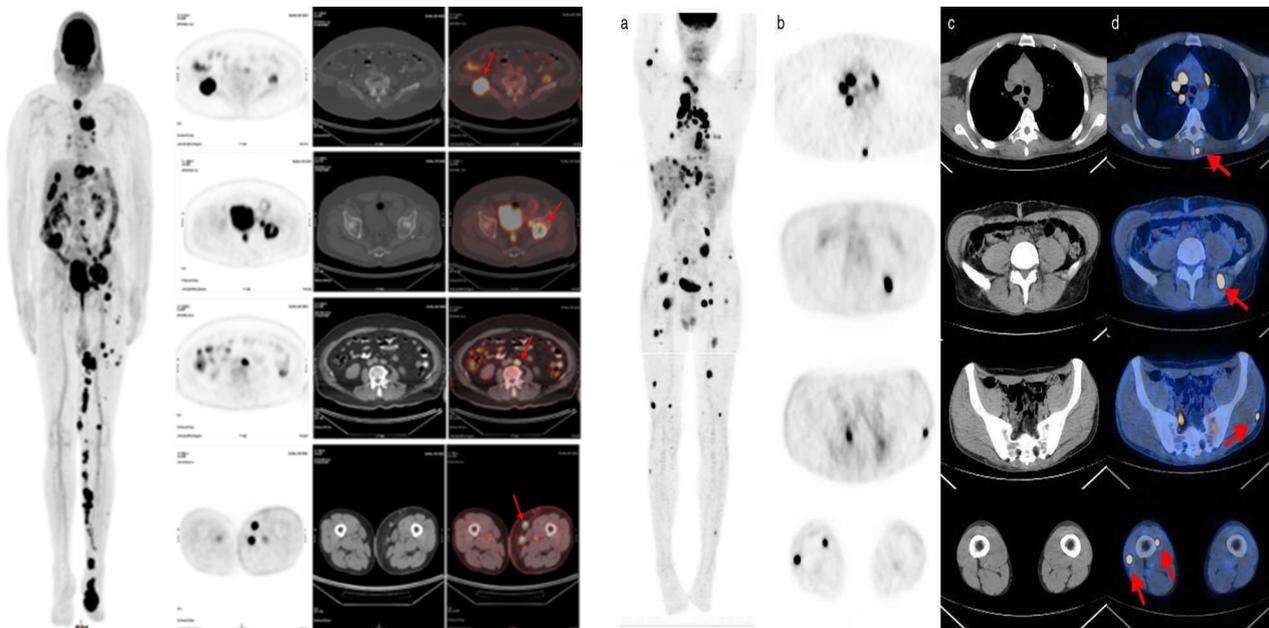


Figura 2. Imágenes de diagnóstico de melanoma con ^{18}F -FDG con el equipo PET/CT de un paciente del Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia de El Alto Fuente: ABEN

Si bien la técnica PET/CT tiene aplicaciones en neurología y cardiología es mayormente empleada en oncología; por ello, es vital conocer la historia clínica del paciente y el perfil

farmacológico previo a un estudio PET/CT y se recomienda que el estudio de FDG- PET/CT se realice al menos seis semanas después del último tratamiento de quimioterapia y/o radioterapia. [12,13,15]. En la tabla 1 se describe la indicación y preparación del uso de ¹⁸F-FDG en PET/CT (ver Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros clínicos para el empleo de ¹⁸F-FDG en el equipo PET/CT

PET/CT CORPORAL	
Radiofármaco	¹⁸ F-FDG (Fluorodeoxiglucosa)
Preparación del paciente	Ayunas 6 horas Glicemia < 200 mg./dl Contraindicaciones: Embarazo
Indicaciones	Estudio de neoplasias sólidas <ul style="list-style-type: none"> - Selección sitio de biopsia - Estadificación - Control de tratamiento - Seguimiento
	Diagnóstico diferencial tumores benignos vs malignos <ul style="list-style-type: none"> - Nódulo pulmonar solitario - Adenopatías en estudio - Tumor hepático - Nódulo suprarrenal - Lesión o lesiones óseas
	No oncológicas <ul style="list-style-type: none"> - Síndrome febril prolongado - SIDA - Estudio de complicación de prótesis articulares - Osteomielitis aguda o crónica - Estudio de pie diabético complicado - Evaluación de actividad en vasculitis o enfermedad inflamatoria intestinal

5. CONCLUSIONES

Debido a las políticas de implementación de tecnología nuclear en salud que viene implementando el Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia con la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR) en el país, es de importancia el desarrollo tecnológico del Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) que desarrollará diferentes radiofármacos que serán empleados en los CMNyR para cubrir las necesidades de Diagnóstico y Terapia en oncología, cardiología, neurología y en diferentes patologías.

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) cuenta con infraestructura y equipamiento para la producción de radiofármacos por medio del Ciclotrón Modular TR24 que permite la generación de diversos radioisótopos que, marcados con moléculas en la síntesis, generará diversos radiofármacos, entre ellos se destaca al ¹⁸F-FDG que es ampliamente utilizado en los servicios de Radiodiagnóstico y Medicina Nuclear a nivel

mundial, siendo de gran utilidad en diversas etapas de atención del paciente oncológico.

El ^{18}F -FDG conjuntamente con el PET/CT constituyen una importante herramienta de imagen molecular utilizado en el área oncológica para el diagnóstico, estadificación, valoración pronóstica, evaluación de la respuesta a la terapia, planificación de la radioterapia y verificación de la recurrencia o recidiva de la enfermedad y que de la mano de un equipo especializado multidisciplinario dé paso a una atención oportuna y el seguimiento al paciente brindará información importante para tomar medidas oportunas para el diagnóstico y seguimiento de muchos tipos de cáncer. Esto supone un importante reto para la Salud Pública en sus distintos ámbitos, principalmente por ser una problemática a nivel mundial y que una detección temprana puede mejorar significativamente la calidad de vida de los enfermos oncológicos.

6. REFERENCIAS

1. Ramírez-Sanabria, A. D., Valero, M. A., Mantilla-Hernández, R. D., & Ordóñez-Rubiano, E. G. (2021). El rol de la ^{18}F -FDG PET/TC para el diagnóstico de la enfermedad ósea de Paget con compromiso craneal y espinal: reporte de caso y revisión de la literatura. *Revista Colombiana de Reumatología*.
2. Fonti, R., Conson, M., & Del Vecchio, S. (2019). PET/CT in radiation oncology. *Seminars in oncology*, 46(3), 202–209. <https://doi.org/10.1053/j.seminoncol.2019.07.001>
3. International Atomic Energy Agency. *Cyclotron produced radionuclides: Guidelines for setting up a facility*. Vienna, Austria. 2012.
4. United States Pharmacopeia and National Formulary (USP 44-NF 39). Vol 2. Rockville, MD: United States Pharmacopeial Convention; 2021:2391-2392
5. *Cyclotron Produced Radionuclides: Guidance on Facility Design and Production of Fluorodeoxyglucose (FDG)* | IAEA. (s. f.). Recuperado 19 de septiembre de 2022, de <https://www.iaea.org/publications/8529/cyclotron-produced-radionuclides-guidance-on-facility-design-and-production-of-fluorodeoxyglucose-fdg>
6. Zhu, S., Mosessian, S., Kroeger, K. et al. Transformación de una instalación de radioquímica académica para el cumplimiento de cGMP de fármacos de tomografía por emisión de positrones. *Mol Imaging Biol* 22, 256–264 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11307-019-01395-6>
7. Herscovitch, P. Agencias reguladoras e imágenes PET/CT en la clínica. *Rep. Actual Cardiol* (2022). <https://doi.org/10.1007/s11886-022-01749-7>
8. Drucker, René, & López, Fred Alonso (2004). La radioquímica de la ^{18}F -FDG: la primera experiencia en México. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 7(2), 76-82. [fecha de Consulta 16 de Septiembre de 2022]. ISSN: 1405-888X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43270203>
9. Bruix, S. A., Pérez, A. R., Calabria, H. C., & Pizzi, M. N. (2018). Metodología de la PET/TC con ^{18}F -FDG cardíaca para el diagnóstico de la endocarditis protésica y de dispositivos intracardíacos. *Revista Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular*, 37(3), 163-171.
10. Tatar, G., Çermik, T. F., Alçın, G., Fenercioğlu, Ö. E., İnci, A., Beyhan, E., & Ergül, N. (2022). Contribución de las imágenes PET/TC con ^{18}F -FDG en el diagnóstico y manejo de pacientes VIH positivos. *Revista Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular*.

11. Obaya Valdivia, Adolfo, López López, Jesús, Vargas-Rodríguez, Yolanda Marina, & Camacho González, Oyuki. (2016). Producción de radiofármacos para tomografía por emisión de positrones (PET) y su aplicación en el diagnóstico de diversas enfermedades. *Educación química*, 27(4), 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.04.005>
12. Rodríguez-Alfonso, B. (2021, 1 marzo). PET/TC con 18F-FDG en la sospecha de infección asociada a dispositivos intracardiacos: rendimiento y utilidad diagnóstica *Revista Española de Cardiología*. Recuperado 20 de septiembre de 2022, de <https://www.revespcardiol.org/es-pet-tc-con-18f-fdg-sospecha-infeccion-articulo-S0300893220300476>
13. Casáns-Tormo, I. (2021, 1 noviembre). 18F-FDG PET/TC en infección e inflamación cardiovascular | *Revista Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular*. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-medicina-nuclear-e-125-articulo-18-f-fdg-pet-tc-infeccion-e-S2253654X21001700?referer=buscador>
14. Román, S. J. (2017, 1 enero). Metástasis musculares no sospechadas detectadas con 18F-FDG PET/TC | *Revista Argentina de Radiología*. <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-argentina-radiologia-383-articulo-metastasis-musculares-no-sospechadas-detectadas-S0048761917300066>
15. García Dávila, Rocío Elizabeth, Díaz Bello, Sergio, Villanueva Rodríguez, Raúl, René López, León, Valencia Vázquez, Jorge Luis, & Rivera-Bravo, Belén. (2020). Utilidad de la tomografía por emisión de positrones/ tomografía computada (PET/CT) en pacientes con diagnóstico de meduloblastoma. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 63(1), 34-41. Epub 05 de marzo de 2021. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2020.63.1.06>

Bolivia en el contexto internacional de los acuerdos de la no proliferación nuclear

Cristian Condori Tarqui MSc.^{1*}

¹ Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: ctarqui@aben.gob.bo

RESUMEN

En el presente artículo se hace la recopilación bibliográfica y descripción de los tratados y acuerdos de los cuales el Estado Plurinacional de Bolivia forma parte. Siendo la no proliferación de material nuclear y Acuerdos de Salvaguardia con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) los principales temas a tratarse.

Palabras Clave: Salvaguardias, proliferación, proscripción, multilateral, bilateral.

1. Introducción

El objetivo del presente artículo es dar a conocer los diferentes acuerdos y el compromiso que tiene el Estado Plurinacional de Bolivia sobre el uso correcto de las instalaciones y materiales nucleares realizando una descripción cronológica del Estado boliviano en el ámbito nuclear, abarcando hasta la suscripción del Acuerdo de Salvaguardias con el (OIEA).

Los Acuerdos de Salvaguardias son compromisos jurídicos concertados entre el OIEA con Estados no poseedores de armas nucleares, que son partes en el Tratado de No Proliferación (TNP) [1], las cuales están conformadas por medidas técnicas que el OIEA aplica a instalaciones y materiales nucleares. Es a través de estas medidas técnicas que el OIEA verifica de manera independiente que las instalaciones nucleares no se utilizan de manera indebida y que los materiales nucleares no se desvían de los usos pacíficos.

Las Salvaguardias son el medio por el cual el OIEA verifica los compromisos jurídicos contraídos por los Estados en virtud de sus respectivos Acuerdos de Salvaguardias con el OIEA y tiene por objetivo descubrir prontamente la desviación de cantidades importantes de material nuclear de actividades nucleares pacíficas hacia la fabricación de armas nucleares o de otros dispositivos nucleares explosivos o con fines desconocidos, y así evitar la desviación del material nuclear [2]. La aplicación de las Salvaguardias sigue un ciclo anual y consta de cuatro procesos principales:

a) Recopilación y evaluación de la información relevante para las Salvaguardias

El OIEA recopila, procesa y examina toda la información de importancia para las Salvaguardias disponible de un Estado a fin de evaluar la coherencia de las declaraciones del Estado sobre su programa nuclear.

b) Elaboración de un enfoque de Salvaguardias para un Estado

Un enfoque de Salvaguardias para un Estado incluye las medidas de Salvaguardias necesarias para alcanzar los objetivos técnicos que permitan verificar las declaraciones del Estado.

c) Planificación, realización y evaluación de las actividades de Salvaguardias

El OIEA elabora un plan donde se especifican las actividades de Salvaguardias que se llevarán a cabo en el Estado miembro, así como en la Sede del OIEA en Viena. Posteriormente, el OIEA evalúa el cumplimiento (alcance) de los objetivos técnicos e identifica cualquier incoherencia que podría requerir seguimiento.

d) Extracción de conclusiones de Salvaguardias

Las conclusiones de Salvaguardias que extrae el OIEA se basan en sus verificaciones y hallazgos independientes como resultado del ciclo anual de aplicación de Salvaguardias y proporcionan garantías verificables a la comunidad internacional de cumplimientos a las obligaciones del Acuerdo de salvaguardias.

2. DESARROLLO.

De acuerdo con la Constitución Política del Estado, Bolivia se constituye como un país pacífico, lo cual se describe en su Artículo 10 “Bolivia es un Estado Pacifista” y en el Artículo 344, parágrafo 1 que describe “Se prohíbe la fabricación y uso de armas químicas, biológicas y nucleares en el territorio boliviano, así como la internación, tránsito y depósito de residuos nucleares y desechos tóxicos”. Asimismo, en el marco de la Ley N° 1205 para las Aplicaciones Pacíficas de la Tecnología Nuclear de 1 de agosto de 2019 [3], el Estado Plurinacional de Bolivia asume una posición pacifista ante el mundo, lo cual se comprueba en los artículos 4, 33, 34 y 35 de la misma ley y con el reconocimiento de los compromisos respecto al TNP y otros tratados sobre la no proliferación de armas nucleares, así como instrumentos jurídicos internacionales de aplicación de las Salvaguardias del OIEA, como:

2.1 Tratado de Tlatelolco

El primer tratado suscrito por el Estado boliviano fue el “Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe (Tratado de Tlatelolco)”, realizado en fecha 14 de febrero de 1967 en México Distrito Federal, ratificado y aprobado por Bolivia mediante Ley N° 451, de 30 de diciembre de 1968.

El Tratado de Tlatelolco prohíbe el desarrollo, adquisición, ensayo y emplazamiento de armas nucleares en la región de la América Latina y el Caribe, y describe que la no proliferación de las armas nucleares depende del compromiso de los Estados miembros, la falta del mismo dificultaría enormemente todo acuerdo de desarme y aumentaría el peligro de que llegue a producirse un conflicto nuclear y que la existencia de armas nucleares en cualquier país de la América Latina y el Caribe lo convertiría en blanco de eventuales ataques nucleares.

Además, describe las obligaciones que los Estados miembros deben cumplir [4].

2.2 Tratado sobre la No Proliferación de Armas Nucleares (TNP)

El tratado fue aprobado y abierto a la firma en la Asamblea General de la Organización de

la Naciones Unidas (ONU) mediante Resolución N° 2373 de 12 de junio de 1968, firmado por el Estado boliviano el 1 de julio de 1968, siendo ratificado en Bolivia mediante Decreto Supremo N° 2373 el 26 de febrero de 1970, esta ratificación fue firmado el 26 de mayo de 1970 en Washington.

El tratado describe que los Estados que poseen armas nucleares u otros dispositivos nucleares explosivos no podrán traspasar tales armas a Estados no poseedores de armas nucleares. Además que cada Estado no poseedor de este tipo de armas se compromete a no recibir de nadie ningún tipo de armas nucleares u otros dispositivos de forma directa o indirecta, además a no fabricar o recibir ayuda para la fabricación de tales armas u otros dispositivos similares [5].

2.3 Acuerdo de Salvaguardias con el OIEA

El “Acuerdo entre la República de Bolivia y el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA, para la Aplicación de Salvaguardias en relación al Tratado para la Proscripción de la Armas Nucleares en la América Latina y el Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares” fue suscrito el 23 de agosto de 1974, ratificado y aprobado por ley N° 1581, de 03 de agosto de 1994.

Describe el derecho y las obligaciones que tiene el OIEA para cerciorarse de que las Salvaguardias se aplican correctamente, de conformidad con los términos del Acuerdo a todos los Estados miembros. También describe los temas de suministro de información, contabilidad y control de materiales, cuestiones financieras cese de las Salvaguardias y otros puntos importantes para aclarar las obligaciones de los Estados miembros y del Organismo Internacional de Energía Atómica [6].

2.4 Tratado de Prohibición de los Ensayos Nucleares (TPAN)

Bolivia firmó el Tratado sobre la Prohibición de las Armas Nucleares (TPAN) el 16 de abril de 2018 y lo ratificó el 6 de agosto de 2019, la cual contiene serios compromisos para la asistencia de zonas contaminadas. Además, proporciona vías de adhesión para todos los estados miembros, incluyendo los que poseen o tienen algún vínculo con las armas nucleares, por lo que establece prohibiciones como el uso o la amenaza empleando armas nucleares u otros dispositivos explosivos nucleares, al igual que realizar ensayos, producir, fabricar, adquirirlos de cualquier otro modo. Así también, prohíbe la transferencia o recepción, emplazamientos y la instalación de armas nucleares [7].

2.6 Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCEN)

Bolivia firmó el Tratado sobre la Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCEN) el 24 de septiembre de 1996 y lo ratificó el 4 de octubre de 1999, el cual describe como parte principal que los Estados miembros se comprometen a no efectuar ninguna explosión de ensayos de armas nucleares y a prevenir que terceros realicen explosiones nucleares en sus territorios y que cada uno de los Estados miembros cooperará con la Organización en el ejercicio de las funciones de conformidad con el presente Tratado [8].

2.7 Protocolo Adicional al Acuerdo de Salvaguardias (PASA) suscrito con el OIEA

En ese marco, en atención a los compromisos internacionales asumidos por Bolivia, se suscribió el 18 de septiembre de 2019 en la ciudad de Viena, República de Austria, el Protocolo Adicional al Acuerdo de Salvaguardias que fue ratificado por Ley 1581 del 3 de agosto de 1994 y demuestra el compromiso ampliado del país con la no proliferación de armas nucleares y ayuda a confirmar la ausencia de material nuclear y actividades no declaradas, para lo cual el OIEA puede acceder a las ubicaciones. Asimismo, establece herramientas adicionales al acuerdo adicional [9]. como:

1. Suministro de información por parte del país en materia de investigación y desarrollo que no involucre material nuclear, minería, actividades de fabricación, exportación de artículos relacionados con la industria nuclear y procedimientos de desechos.
2. Acceso complementario a locaciones adicionales de investigación y desarrollo, manufactura y la exportación/importación de ciertos equipos nucleares y materiales no nucleares, minas de uranio y plantas de concentración.
3. El estado de instalaciones y ubicaciones fuera de las instalaciones desmanteladas del material nuclear exento de Salvaguardias y ciertos desperdicios sobre los que han terminado las Salvaguardias.

Referente a los Acuerdos mencionados, es necesario aclarar que es muy importante suscribir las Ratificaciones, ya que cada una contiene actualizaciones que especifican mejor las obligaciones y privilegios de los Estados miembros y de la organización de los diferentes Acuerdos en cuanto al objetivo sobre no proliferación de armas nucleares.

3. DISCUSIÓN.

Es necesario tener en cuenta que los Acuerdos y Tratados intentan de alguna manera evitar la proliferación de armas nucleares, pero la mayor responsabilidad para cumplir con este objetivo recae en los países del mundo, en especial aquellos que están trabajando en el desarrollo de la tecnología nuclear.

En este sentido, el compromiso del Estado Plurinacional de Bolivia en el ámbito de la no proliferación de armas nucleares es importante para el país, porque, al estar suscrito a los Tratados y al Acuerdo, permite al Estado boliviano participar en un amplio intercambio de información científica para el desarrollo de las aplicaciones de la energía nuclear con fines pacíficos.

4. CONCLUSIONES.

El Estado Plurinacional de Bolivia mantiene sus compromisos respecto a la negociación de acuerdos multilaterales o bilaterales con el Organismo Internacional de Energía Atómica para la aplicación de las Salvaguardias.

Los Tratados, el Acuerdo y sus ratificaciones demuestran el compromiso que tiene el Estado boliviano en el ámbito de la no proliferación de armas nucleares. Además, la ratificación del Protocolo Adicional del Acuerdo de Salvaguardias con el OIEA contribuirá al desarrollo de las

aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos, ya que el país viene desarrollando el Programa Nuclear Boliviano (PNB).

La comunidad internacional podrá tener la garantía de que las aplicaciones de la tecnología nuclear se aplican con fines pacíficos y no existen desviaciones del material nuclear, dado que las atribuciones del OIEA sobre los estados miembros tienen el propósito de que se verifique la inexistencia de proliferación nuclear, de acuerdo con lo dispuesto en el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP).

5. REFERENCIAS.

1. OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica, Acuerdos de Salvaguardias, Viena.
2. OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica, Orientaciones para los Estados que aplican Acuerdos de Salvaguardias amplias y protocolos adicionales pág. 8, Viena, 2015.
3. La Asamblea Legislativa Plurinacional, Ley 1205, Ley Para la Aplicaciones Pacíficas de la Tecnología Nuclear, La Paz, 2019.
4. Organismo para la Proscripción de las Armas, Nucleares en América Latina y el Caribe, Tratado de Tlatelolco, Ciudad de México, 1985.
5. OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica, Tratado sobre la No Proliferación de Armas Nucleares, Londres, Moscú, Washington, 1970.
6. OIEA, Organización Internacional de Energía Atómica, «Estructura y contenido de los acuerdos entre los Estados y el Organismo requeridos en relación con el TNP», 1971.
7. Naciones Unidas, “Tratado de Prohibición de Armas Nucleares”. Nueva York, 2017.
8. Comisión Preparatoria para la Organización TPCEN, Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares, Viena, 1996.
9. OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica, Modelo de Protocolo Adicional Para las Aplicaciones de Salvaguardias, Viena, 1997.

Nuevas tecnologías y perspectivas futuras de reactores nucleares

Marco Augusto Herbas López MSc.^{1*}

¹ Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia.

*Correo electrónico: mherbas@aben.gob.bo

RESUMEN

El Foro Internacional de Reactores de IV Generación (GIF) identificó 6 conceptos de reactores nucleares innovadores a ser desarrollados en los siguientes años con el objeto de hacer sostenible el uso de combustible nuclear e incrementar la seguridad y confiabilidad durante la operación en comparación con los reactores nucleares actuales, es en este sentido que en los últimos años se vienen investigando y desarrollando estos conceptos para implementarlos a escala comercial en la siguiente década. En el presente artículo se presenta una descripción breve de cada concepto junto con sus características, ventajas y desventajas principales recopiladas de bibliografía consultada (artículos científicos, libros, reportes); por otro lado, se identifican las perspectivas futuras sobre su implementación, retos y aplicaciones futuras (generación de electricidad y cogeneración). Se concluye que aún se debe continuar investigando para resolver los inconvenientes identificados; sin embargo, su implementación es fundamental en los próximos años principalmente para la mitigación del cambio climático y la gestión eficiente del combustible nuclear y desechos radiactivos.

1. Introducción

Actualmente, 437 reactores nucleares se encuentran en operación suministrando cerca del 10% de la electricidad generada a nivel mundial, constituyéndose en la segunda fuente en lo que respecta a generación libre de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que 56 unidades se encuentran en construcción en diferentes países (IAEA, 2022).

Entre los reactores en operación, el 96% (IAEA, 2022) emplean agua como refrigerante (ligera o pesada), perteneciendo a la II y III/III+ 2¹ generación de reactores nucleares; sin embargo, estos cuentan con algunos inconvenientes como la aceptación social, eficiencia en el uso de recursos, gestión del combustible gastado y residuos asociados (es importante mencionar que la gestión del combustible gastado no es un problema como tal, puesto que existen soluciones seguras y a largo plazo comprobadas para el almacenamiento seguro de residuos nucleares que garantizan su correcto manejo).

Como alternativas de solución a estos inconvenientes se están desarrollando distintos conceptos de reactores nucleares, denominados de IV generación, en concreto, seis conceptos fueron seleccionados por el Foro Internacional de IV Generación (GIF por sus siglas en inglés) para su desarrollo e implementación en la próxima década.

1 La III+ generación corresponde a diseños evolucionados de la III generación.

En la Figura 1 se presenta la cronología de desarrollo de reactores nucleares.

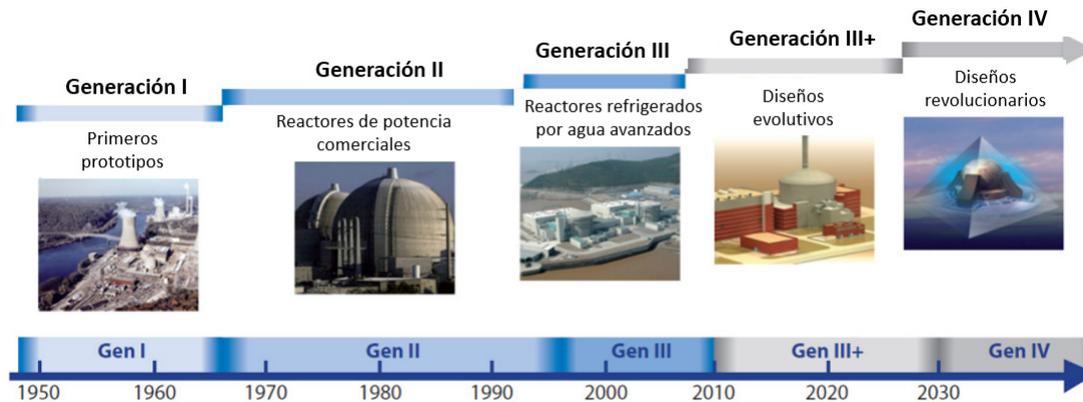


Figura 1. : Cronología en el desarrollo de reactores nucleares. Fuente: (OECD/IEA, 2014)

Entre los conceptos seleccionados de reactores de IV generación se tienen (GIF, 2022d):

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

En el presente artículo se describirán los conceptos de reactores mencionados anteriormente, así como las perspectivas futuras sobre su implementación.

2. REACTORES DE IV GENERACIÓN

Las características principales en los reactores de IV generación son las siguientes: (OECD/IEA, 2014).

- Mayor eficiencia en el uso de combustible nuclear respecto a los reactores de II y III/III+ generación.
- El diseño debe evitar la liberación de material radiactivo en caso de accidente.
- El ciclo de combustible debe ser diseñado de tal manera que el uranio y plutonio no se separen, reduciendo la posibilidad de proliferación.

Como se observa, el objetivo principal de estos nuevos diseños es mejorar las características de seguridad, sustentabilidad, eficiencia durante la operación y costos de operación. Aún se requiere investigación y desarrollo desde el punto de vista operativo y de materiales para considerar su implementación; asimismo, se debe tener en cuenta cambios y actualizaciones en la regulación actual. No obstante, a la fecha se presentan avances alentadores en el desarrollo y futura implementación de los reactores de IV generación. A continuación, se describen brevemente las características de los conceptos mencionados.

2.1 Reactor rápido refrigerado por gas (GFR)

Es un concepto de reactor de espectro rápido de neutrones refrigerado por helio capaz de operar a altas temperaturas (entre 800-850°C) y cerrar el ciclo del combustible nuclear. Por sus características podrá producir energía eléctrica, hidrógeno y calor para procesos industriales.

Una de las características más atractivas es la operación en el espectro neutrónico rápido (neutrones sin moderar) capaz de cerrar el ciclo del combustible, es decir que podrá emplear de manera más eficiente el combustible nuclear (los reactores actuales consumen aproximadamente el 5% del uranio en el combustible) o transmutar actínidos menores, reduciendo su radiotoxicidad (efectos biológicos adversos en humanos de material radiactivo en combustible nuclear gastado).

El concepto se basa en reactores refrigerados por gas (GCR, por sus siglas en inglés) como el Magnox británico.

Ventajas

Las principales son (Gougar, 2018; OECD/IEA, 2014):

- Una eficiencia cercana al 48%.
- Buena compatibilidad química con agua y material estructural.
- El refrigerante es "transparente" facilitando las inspecciones visuales.
- El reactor puede operar como un reactor reproductor (breeder).

Desventajas

- Entre los retos se identifican (Gougar, 2018; OECD/IEA, 2014):
- Se requiere una mayor potencia de bombeado para refrigerar el núcleo.
- El sistema debe presurizarse para garantizar las características de refrigeración.
- La velocidad alta de flujo de refrigerante puede causar vibraciones en las varillas de combustible.

2.2 Reactor rápido refrigerado por plomo (LFR)

Concepto de reactor con espectro rápido de neutrones refrigerado por plomo (Pb) o una aleación eutéctica de plomo-bismuto (LBE), ambos refrigerantes tienen la característica de baja absorción neutrónica y de reflector de neutrones, reduciendo la fuga de neutrones, incrementando la economía de neutrones. En cuanto a la potencia de los conceptos, se manejan 3 rangos, pequeño, entre 50-150 MWe, mediano entre 300-400 MWe y grande a 1200 MWe (Allen & Crawford, 2007).

Respecto al combustible se realizaron distintos experimentos en los que se verificó que una de las mejores opciones es el combustible de nitruro. Estos tienen características de conductividad térmica y densidad similares a las aleaciones metálicas además de tener una mayor temperatura de fusión respecto a combustibles metálicos; sin embargo, aún requieren mayor investigación y desarrollo para ser implementados (Allen & Crawford, 2007).

Ventajas

Los beneficios del LFR son (OECD/IEA, 2014; Piro & Duffey, 2018):

- Mayor temperatura de ebullición (respecto al sodio).
- Aleaciones de plomo no reaccionan exotérmicamente con agua y aire.
- El espectro rápido permite usar el reactor como reproductor de material fisible o como quemador de actínidos menores.

Desventajas

Los retos identificados son (Alemberti et al., 2014; Tuček et al., 2006):

- Se pueden presentar problemas de corrosión en el material debido a las altas temperaturas y caudal elevado.
- La temperatura de fusión del plomo ronda los 327°C; por tanto, el circuito primario debe mantenerse encima de esta temperatura para evitar solidificación del refrigerante.
- El plomo es un elemento opaco, lo cual dificulta la inspección del reactor y muy denso, traduciéndose en un sistema pesado.

2.3 Reactor de sales fundidas (MSR)

El empleo de sales fundidas en reactores nucleares no es un concepto completamente nuevo, este fue estudiado hace más de 50 años (Oak Ridge National Laboratory, 2022). Estos reactores pueden dividirse en 2 subclases (GIF, 2022a), en la primera subclase, a diferencia de los conceptos mencionados anteriormente, el combustible se encuentra mezclado con el refrigerante en una matriz de sal fundida (estado líquido), mientras que en la segunda subclase el refrigerante es la sal fundida y el combustible se encuentra en estado sólido en forma de una esfera recubierta (combustible TRISO). Esta subclase generalmente se denomina como reactor de alta temperatura refrigerada por sal fluorada (FHR por sus siglas en inglés), este concepto es similar a los reactores de muy alta temperatura (VHTR) que se describirá en las siguientes secciones (OECD/IEA, 2014).

Las sales en el circuito primario generalmente son sales fluoradas (o sales cloradas) con uranio y/o torio, fluoruro de litio-berilio (FLiBe) y fluoruro de litio (LiF), estas permanecen a presión atmosférica y en estado líquido entre 500 – 1400°C, con una temperatura promedio de operación en torno a los 700°C, temperaturas aptas para generación de electricidad y procesos de cogeneración.

Ventajas

Entre las ventajas se tienen (Touran, 2022; University of Calgary, 2022):

- Diseño a baja presión (paredes de la vasija más delgadas).
- Disipación de calor pasiva.
- Dependiendo del diseño pueden presentar el espectro térmico o rápido de neutrones.
- El combustible se puede procesar durante su operación.

- Mayor eficiencia del combustible, debido a que el mismo no se encuentra al interior de varillas de combustible, puede emplear torio.
- Las sales fundidas no reaccionan con el aire o agua.

Desventajas:

Las desventajas identificadas son (Locatelli et al., 2013; OECD/IEA, 2014):

- El estado de desarrollo es menor respecto a otros diseños de IV generación.
- Los radionucleidos disueltos en la mezcla combustible/refrigerante pueden entrar en contacto con componentes críticos como bombas, intercambiadores de calor o la vasija del reactor ocasionando degradación del material.
- Debido a que el combustible se puede procesar durante la operación es relativamente fácil obtener material nuclear apto para la fabricación de armas nucleares.
- El procesamiento de productos de fisión y actínidos menores requiere sistemas complejos y costosos.

2.4 Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR)

Es considerado el concepto de IV generación más investigado (Locatelli et al., 2013), el diseño prevé operar con el espectro neutrones rápidos, lo cual permitirá convertir material fértil en fisil, mejorando la eficiencia en el consumo de recursos radiactivos (mejora la eficiencia de uso hasta en 50 veces (Locatelli et al., 2013), con dos configuraciones principales, el diseño puede ser de tipo piscina o ciclo compacto.

El reactor operará con sodio en estado líquido a baja presión como refrigerante a temperaturas entre 500-550°C, el combustible a ser empleado depende del tamaño del reactor, se propone óxido de uranio-plutonio para reactores entre 600-1500 MWe, combustible metálico u óxido para reactores entre 300-1500 MWe o una aleación metálica de uranio-plutonio-actínidos menores y zirconio para reactores con potencia entre 50-150 MWe. (GIF, 2022b)

Ventajas

Se encuentran: (Bonin, 2020; Fanning, 2007)

- Es el diseño más próximo a su implementación para gestión de actínidos menores.
- El sodio tiene un bajo efecto de moderación sobre los neutrones.
- La temperatura de fusión del sodio es de 98°C.
- El sodio protege al acero de la corrosión.

Desventajas

Entre los principales retos se tiene (Fanning, 2007; GIF, 2018):

- Reactividad química del sodio con el agua y aire.
- Posibles fugas, ocasionando incendios.
- El sodio puede ser activado mediante la absorción de neutrones, convirtiéndose

radiactivo; sin embargo, el período de semidesintegración del sodio radiactivo es de 15 horas.

2.5 Reactor refrigerado por agua supercrítica (SCWR)

Este concepto en esencia es un reactor refrigerado por agua (el único entre los conceptos de IV generación que emplea agua), que se estima opere a altas temperaturas (entre 510 – 625°C) y presión (encima de 374°C y 218 atmósferas o 22.1 MPa el agua se encuentra en la fase supercrítica) (Buongiorno & MacDonald, 2003), respecto a los reactores refrigerados por agua. Por la energía promedio de los neutrones, algunos autores clasifican al reactor dentro del espectro epitérmico de neutrones. (GIF, 2022c).

Las características del agua supercrítica eliminan la necesidad de algunos componentes como el presurizador, generadores de vapor, bombas de recirculación del refrigerante, secadores y separadores de vapor, simplificando el diseño. Los materiales empleados deben ser diseñados especialmente debido a las condiciones de mayor temperatura y presión.

Ventajas

Se identifican (Krivit et al., 2012; OECD/IEA, 2014):

- La eficiencia térmica estimada será de aproximadamente 45%, traduciéndose en un mejor uso del combustible nuclear.
- El diseño de SCWR será de diseño directo, es decir el “vapor” se enviará directamente a la turbina (similar a los BWR).
- Puede operar con espectro térmico o rápido de neutrones, dependiendo del diseño y refrigerante empleado (agua ligera o agua pesada).
- El refrigerante (agua) es fácil de conseguir y de bajo costo.

Desventajas

Entre los inconvenientes (Krivit et al., 2012):

- Aún se requiere investigación sobre el comportamiento del agua supercrítica y materiales en contacto bajo condiciones de irradiación.
- Debido a que es un diseño nuevo, durante las primeras décadas, los fabricantes y experticia serán pocos.
- El modelado termohidráulico del reactor es complejo, puesto que se debe considerar el agua supercrítica.

2.6 Reactor a muy alta temperatura (VHTR)

Es un concepto de reactor térmico refrigerado por helio en estado gaseoso y moderado por grafito, capaz de operar a temperaturas entre 900 y 1000°C, debido a las altas temperaturas, la eficiencia durante la operación se incrementa y es posible emplearlo para producción de hidrógeno y cogeneración (Zohuri, 2020).

Respecto al diseño del núcleo, en la actualidad existen 2 alternativas: pebble-bed y bloques

prismáticos (prismatic block). Según la investigación actual, la alternativa preferida es el núcleo pebble-bed, el primer reactor de este tipo en operación es el HTR-PM (high temperature reactor – Pebble-bed module de China) alcanzando criticidad en septiembre del 2021 (GIF, 2022e).

Ventajas

Las principales ventajas son (GIF, 2022e; OECD/IEA, 2014)

- Eficiencia térmica estimada entre 47 y 50%.
- En el caso de la configuración pebble-bed, las esferas de combustible TRISO retienen productos de fisión y soportan mayores temperaturas que en caso de producirse un accidente no llegan al punto de fusión.
- El diseño cuenta con un coeficiente de temperatura negativo de reactividad, que evita incrementos de temperatura indeseados en caso de condiciones anómalas.
- Compatibilidad respecto al uso de combustible, el VHTR puede operar con el ciclo de combustible U-Pu, Pu, MOX y U-Th.

Desventajas

Se identifican las siguientes (De Andrade et al., 2022; OECD/IEA, 2014):

- Se requiere mayor investigación en los materiales a ser usados debido a las altas temperaturas. Recientes investigaciones determinaron que el rango de temperaturas óptimo se encontraría entre 700-950°C, mitigando la degradación del material.
- El combustible esférico TRISO aún no puede ser reciclado, se requiere investigación sobre el tratamiento y disposición final del combustible gastado.

En la Figura 2 y Tabla 1 se presentan los esquemas y comparación de los diseños descritos anteriormente.

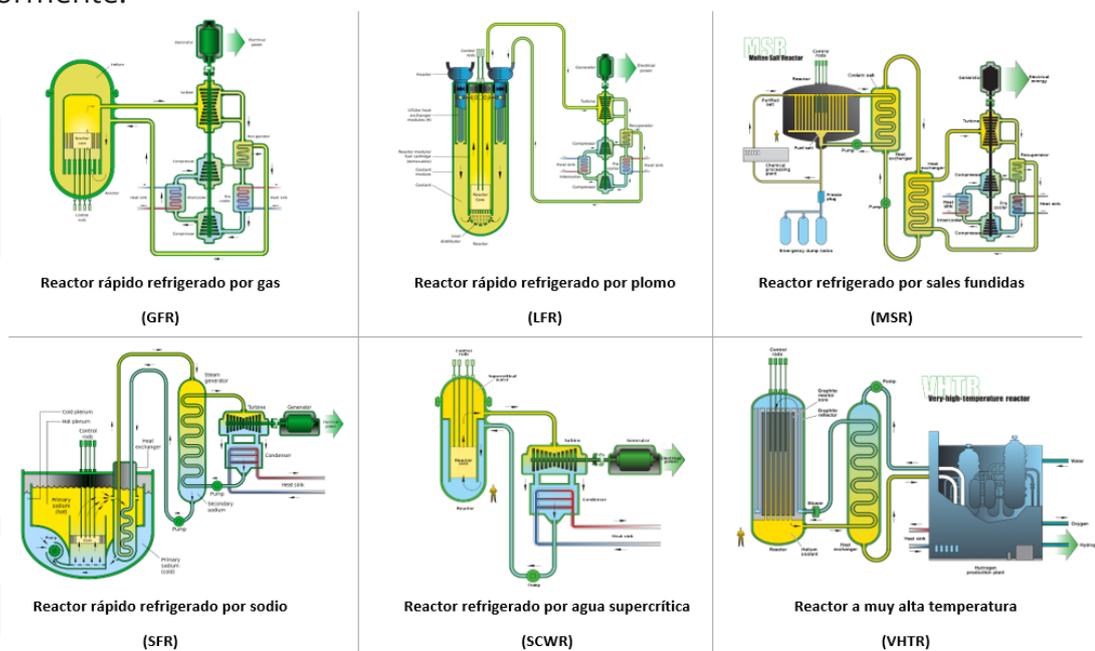


Figura 2. : Esquemas de reactores de IV Generación (OECD/IEA, 2014)

Tabla 1: Cuadro comparativo de los reactores de IV generación

Concepto reactor	Abreviación	Espectro neutrónico	Refrigerante	Temperatura operación (°C)	Ciclo del combustible	Eficiencia estimada (%)
Reactor rápido refrigerado por gas	GFR	Rápido	Helio / CO ₂	800-850°C	Cerrado	≈48%
Reactor rápido refrigerado por plomo	LFR	Rápido	Pb / LBE	480-800°C	Cerrado	≈42-50%
Reactor refrigerado por sales fundidas	MSR	Epitérmico	Sal fluorada	700-800°C	Cerrado	≈48%
Reactor rápido refrigerado por sodio	SFR	Rápido	Sodio	500-550°C	Cerrado	≈45%
Reactor refrigerado por agua supercrítica	SCWR	Térmico / rápido	Agua	510-625°C	Abierto/ Cerrado	≈45%
Reactor a muy alta temperatura	VHTR	Térmico	Helio	900-1000°C (700-950°C)*	Abierto/ Cerrado	≈47-50%

3. PERSPECTIVAS FUTURAS SOBRE LOS REACTORES DE IV GENERACIÓN

En la sección anterior se describieron las características, ventajas y desventajas de los 6 conceptos aprobados por el GIF. En esta sección se discutirán las perspectivas futuras sobre su implementación y potenciales aplicaciones.

3.1 Investigación y desarrollo (I&D)

Todos los conceptos de IV generación aún se encuentran en fase de desarrollo, con excepción del HTR-PM, en operación desde diciembre de 2021 (News, 2021); sin embargo, se requiere mayor investigación enfocada principalmente en los inconvenientes identificados en cada concepto. Uno de los retos más grandes se encuentra asociado a los materiales, debido a que estos nuevos conceptos trabajan a diferentes temperaturas, presiones y tipos de refrigerante, se requiere desarrollar materiales capaces de prevenir corrosión, desgaste, resistencia a la irradiación y garantizar un período de vida extenso.

Se estima que los primeros reactores de IV Generación se implementarán a mediados de la siguiente década, esto dependerá mucho sobre los avances en I&D.

Regulación

La modificación y elaboración de normativa regulatoria específica para los reactores de IV Generación es fundamental, puesto que se establecerán los requerimientos técnicos para su implementación. Algunas instancias como la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC) solicitó a los países que se encuentran desarrollando estos reactores, considerar requerimientos comunes con el fin de que los estándares regulatorios puedan compatibilizarse. (World Nuclear Association, 2022).

Para que estos conceptos puedan ser implementados se requiere la aprobación por parte de las entidades reguladoras del país donde se pretende operar el concepto.

Cambio climático

La generación de energía representa casi el 75% de las emisiones de GEI a nivel mundial (Climate Watch, n.d.). Según el IPCC, para limitar el incremento de la temperatura global promedio a 1.5°C, se deben reducir las emisiones actuales alrededor del 40% para el año 2030 (IPCC, 2019).

Una de las fuentes de generación continua (carga base) y libre de emisiones de GEI es la nuclear, esta debe complementar a las fuentes intermitentes como la fotovoltaica y eólica con objeto de acelerar la transición energética, junto con los reactores actuales en operación (II y III generación). Los reactores de IV generación están llamados a cumplir un rol fundamental en la descarbonización de la matriz energética por sus características de mejor consumo de recursos, reducción en la generación de residuos nucleares, elevada seguridad y aplicaciones de cogeneración (provisión de calor, hidrógeno, entre otras).

Costos y Cogeneración

Conforme el avance de desarrollo de los conceptos, se tendrá un panorama más claro sobre los costos asociados a la operación, se espera que estos sean menores respecto a otras fuentes existentes; asimismo, que cuenten con un nivel de riesgo financiero similar a otras tecnologías, con objeto de incentivar la inversión para su implementación (OECD/IEA, 2014).

Sobre la cogeneración se refiere a la capacidad de integrar una central nuclear con otros sistemas y aplicaciones (IAEA, n.d.), lo cual incrementa la eficiencia del reactor. El calor generado en estas centrales puede ser empleado para aplicaciones alternativas a la producción de electricidad como la provisión de calor para aplicaciones industriales como la petrolera, fabricación de acero y producción de hidrógeno, entre otras, además de provisión de calor domiciliario y desalinización de agua. A diferencia de los reactores nucleares actuales, los de IV generación operan a mayores temperaturas permitiendo un uso más amplio en cogeneración.

Mediante las aplicaciones de cogeneración se complementará a la sección anterior, puesto que las emisiones por uso industrial y domiciliario representan una parte importante de las emisiones por generación de energía.

Aceptación pública

Uno de los grandes inconvenientes de la generación nucleoelectrónica actual y futura es la aceptación del público en general debido en gran parte a los accidentes nucleares ocurridos en el pasado.

Los conceptos de IV generación se centran en mejorar la eficiencia en el uso de recursos de combustible nuclear, reducción de desechos radiactivos, mayor resistencia a la proliferación y seguridad, incorporando características de seguridad pasivas (no requieren suministro de energía externo) y en caso de falla, la característica walkaway safe, evitando la liberación de material radiactivo al medio ambiente y la necesidad de operadores para controlar el reactor, se espera que mediante la implementación de estas características de seguridad, la aceptación social mejore, considerando también las características de generación eléctrica limpia, requerida en la actualidad para la mitigación del cambio climático.

4. CONCLUSIÓN

Con lo expuesto anteriormente, se espera que en un futuro los reactores de IV generación cumplan un rol fundamental en la descarbonización de la matriz energética mundial reduciendo la emisión de GEI permitiendo cumplir las metas trazadas en el Acuerdo de París; sin embargo, aún queda investigación y desarrollo por realizar enfocada en estos conceptos para su implementación a partir de la siguiente década.

Con su implementación, el uso de recursos de combustible nuclear será más eficiente, presentando mejor y mayor utilización de uranio fértil (^{238}U), la posibilidad de uso de combustible nuclear gastado o la transmutación de actínidos menores. Asimismo, estos conceptos consideran características de seguridad pasiva y un diseño walkaway safe que evitará la liberación de material radiactivo al medio ambiente en caso de accidente.

Debido a que las temperaturas de operación serán mayores permitirán un uso más amplio de cogeneración respecto a los reactores nucleares actuales, requerida en diversas industrias y para la producción de hidrógeno. Esto representa un reto, puesto que se deben estudiar y desarrollar materiales capaces de soportar elevadas temperaturas, radiación, corrosión y desgaste prematuro, garantizando un período de vida extenso.

BIBLIOGRAFÍA

- Alemberti, A., Smirnov, V., Smith, C. F., & Takahashi, M. (2014). Overview of lead-cooled fast reactor activities. *Progress in Nuclear Energy*, 77, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.11.011>
- Allen, T. R., & Crawford, D. C. (2007). Lead-Cooled Fast Reactor Systems and the Fuels and Materials Challenges. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2007(June 2015), 1–11. <https://doi.org/10.1155/2007/97486>
- Bonin, B. (2020). Le nucléaire expliqué par des physiciens. In *Le nucléaire expliqué par des physiciens*. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-0938-7>
- Buongiorno, J., & MacDonald, P. (2003). Supercritical water reactor (SCWR). ... Development of the SCWR in the US, ..., 1–38. http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/scwr_annual_progress_report_gen-iv_fy-03.pdf
- Climate Watch. (n.d.). Global greenhouse emissions by sector. Retrieved March 24, 2022, from <https://www.wri.org/initiatives/climate-watch>
- De Andrade, D. A., De Almeida, M. C., Alonso, V. M., Paixão, C. M., Arquinto, J., Kotani, P. O., & Marinho, T. C. (2022). Very high temperature reactor (VHTR) - a proposal to generation IV reactors / Reactor a temperatura muito elevada (VHTR) - uma proposta para reatores da geração IV. *Brazilian Journal of Development*, 8(3), 17576–17588. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-139>
- Fanning, T. (2007). Sodium as a Fast Reactor Coolant. Topical Seminar Series on Sodium Fast Reactors. US http://www.nuclear.energy.gov/pdfFiles/SodiumCoolant_NRCpresentation.pdf
- GIF. (2018). GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems 2018 Update. Nuclear Energy.
- GIF. (2022a). Molten Salt Reactors. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42150/molten-salt-reactor-msr
- GIF. (2022b). Sodium Fast Reactors. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42152/sodium-cooled-fast-reactor-sfr
- GIF. (2022c). Super Critical Water Reactors. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr
- GIF. (2022d). Technology Systems. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40486/technology-systems
- GIF. (2022e). Very High Temperature Reactors. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr
- Gougar, H. D. (2018). Gas-cooled Fast Reactor Research and Development Roadmap. Idaho National Laboratory (INL), May. <http://www.inl.gov>
- IAEA. (n.d.). Industrial Applications and Cogeneration. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/industrial-applications-and-nuclear-cogeneration>
- IAEA. (2022). Power Reactor Information System. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
- IPCC. (2019). Summary for policy makers.
- Krivit, S. B., Lehr, J. A. Y. H., & Editor, S. (2012). Nuclear energy encyclopedia: science, technology, and applications. In *Choice Reviews Online* (Vol. 49, Issue 05). <https://doi.org/10.5860/choice.49-2419>
- Locatelli, G., Mancini, M., & Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, 61, 1503–1520. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.101>

News, W. N. (2021). Demonstration HTR-PM connected to grid. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demonstration-HTR-PM-connected-to-grid>

Oak Ridge National Laboratory. (2022). Time Warp: Molten Salt Reactor Experiment—Alvin Weinberg’s magnum opus. <https://www.ornl.gov/molten-salt-reactor/history>

OECD/IEA. (2014). Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. Gen IV International Forum, 1–66. <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>

Pirola, I., & Duffey, R. (2018). Current and future nuclear power reactors and plants. In *Managing Global Warming: An Interface of Technology and Human Issues*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00004-1>

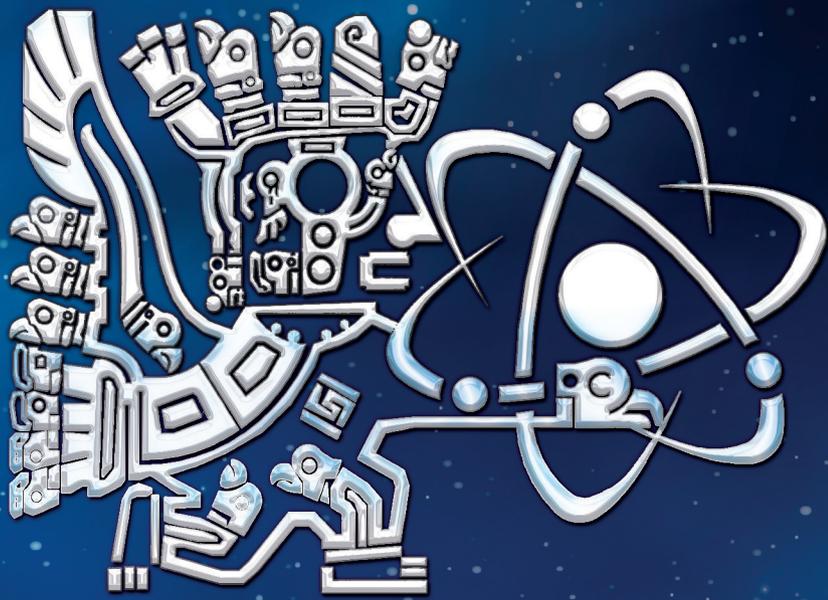
Touran, N. (2022). Molten Salt Reactors. <https://whatisnuclear.com/msr.html>

Tuček, K., Carlsson, J., & Wider, H. (2006). Comparison of sodium and lead-cooled fast reactors regarding reactor physics aspects, severe safety and economical issues. *Nuclear Engineering and Design*, 236(14–16), 1589–1598. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.04.019>

University of Calgary. (2022). Molten Salt Reactors. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Molten_salt_reactor

World Nuclear Association. (2022). Generation IV nuclear reactors. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

Zohuri, B. (2020). Generation IV nuclear reactors. In *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818483-7.00006-8>



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: Laboratorios de la Radiobiología y Radioecología.....	53
Resumen del taller: Importancia de los minerales Radiactivos y Tierras Raras	58
Resumen del taller: Generalidades de Fusión Nuclear	63
Resumen de taller: Protección Radiológica y las Norm	69



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



Resumen del Taller: Laboratorios de la Radiobiología y Radioecología

Teresa Maya Pacheco M.^{1*}

Lucia Alanoca ^{2*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).

Dirección de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico (DPIDT)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

Correo electrónico: (1*) tpacheco@aben.gob.bo (2*) lualanoca@aben.gob.bo

LABORATORIOS DE RADIOBIOLOGÍA Y RADIOECOLOGÍA

TEMARIO:

- ¿Qué es la Radiobiología y qué es la Radioecología?
- ¿Qué son los laboratorios de Radiobiología y Radioecología?
- Campo de aplicación



DISERTANTE:

M. Sc. Teresa Maya Pacheco Machicado
Magíster en Scientiarum en Ciencias Químicas,
UMSA - Bolivia.
Máster en Química Avanzada, Universidad de
Burgos - España.
Capacitación en:
- Bases Físicas y Químicas de la
Radiofarmacia PET, Universidad de la
República - Uruguay.



DISERTANTE:

Lucia Alanoca PhD.
PhD. en Ciencias de la Tierra y Planetas
Sólidos, Universidad Paul Sabatier, Toulouse,
Francia.
Master en Ciencias Tecnología y Salud, Paul
Sabatier (UPS), Francia.
Capacitación en:
- Protección radiológica y operación en
instalaciones Clase I, Fundación Centro
Diagnóstico Nuclear - Argentina.

RESUMEN

Los laboratorios de Radioecología y Radiobiología forman parte del Complejo Multipropósito de Irradiación (CMI) y tienen el objetivo de llevar a cabo servicios de control de calidad en productos irradiados del CMI, servicios de análisis de elementos estables y radioactivos en diferentes tipos de muestras. En estas instalaciones también se tendrá la capacidad para realizar investigación en diferentes campos de la ciencia utilizando radiotrazadores producidos en el Reactor Nuclear de Investigación (RNI) aplicados a la industria, agricultura e investigación.

El Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) emplazado en la ciudad de El Alto, La Paz, tiene entre sus componentes tecnológicos al Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) que empleará fuentes de Co-60 para irradiación de alimentos, productos congelados y tubérculos, esto con el fin de extender la vida útil de anaquel. Además de esterilización de insumos médicos y farmacéuticos, material herbolario y homeopático, envases y cosméticos y apoyará a la preservación de patrimonio cultural e histórico. El monitoreo de dosis de radiación

en alimentos, productos agrícolas se hará en los laboratorios de Radioecología y Radiobiología que también está emplazado en las instalaciones del CIDTN.



Figura 1. Productos que son sometidos a procesos de irradiación. (Imagen: INFOBAE)

LABORATORIO DE RADIOECOLOGÍA



Figura 2. Laboratorio de Radioecología del Organismo Internacional de Energía Atómica.

El laboratorio de Radioecología empleará técnicas físicas, químicas, biológicas y conceptos de protección radiológica en estudios para determinar las dosis de radiación efectiva en alimentos irradiados. Además, en el laboratorio se evaluarán las consecuencias de contaminación radiactiva en el medio ambiente y llevará a cabo investigaciones con radiación ionizante empleando fuentes selladas.

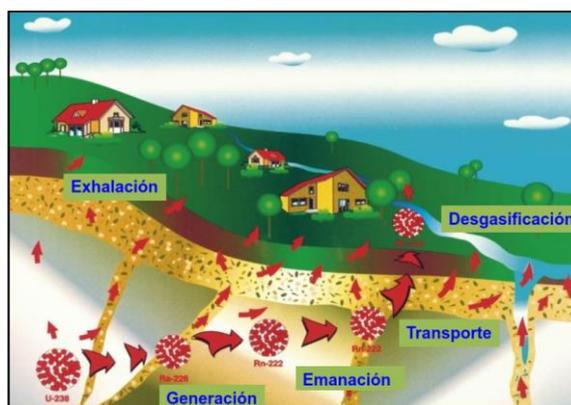


Figura 3. Rutas de generación de isótopos estables.

En el área de hidrología, el Laboratorio de Radioecología efectuará estudios de investigación para la determinación de recarga de cuerpos de agua empleando los radioisótopos de ^{24}Na y ^{82}Br como radiotrazadores. Se empleará isótopos del nitrógeno para medir fuentes de contaminación en el agua, como ser: con el isótopo natural ^{14}N determinará el grado de eutrofización en cuerpos de agua y determinación del déficit de oxígeno.

Además, se harán estudios para la datación de aguas jóvenes, medición de la recarga de artificial y determinación del tiempo de residencia de los cuerpos de agua empleando equipos como el RAD-7 a través de la medición de isótopos naturales como el ^{222}Rn (Radón - 222)



Figura 4. Especialistas de la ABEN realizando trabajo de campo para la medición de Radón-222. Foto: ABEN

Por otro lado, en el laboratorio de radioecología llevará acabo investigación sobre el uso apropiado de fertilizantes, suelos y monitoreo de productos agrícolas empleando radioisótopos que producirá el Reactor Nuclear de investigación (RNI)

LABORATORIO DE RADIOBIOLOGÍA

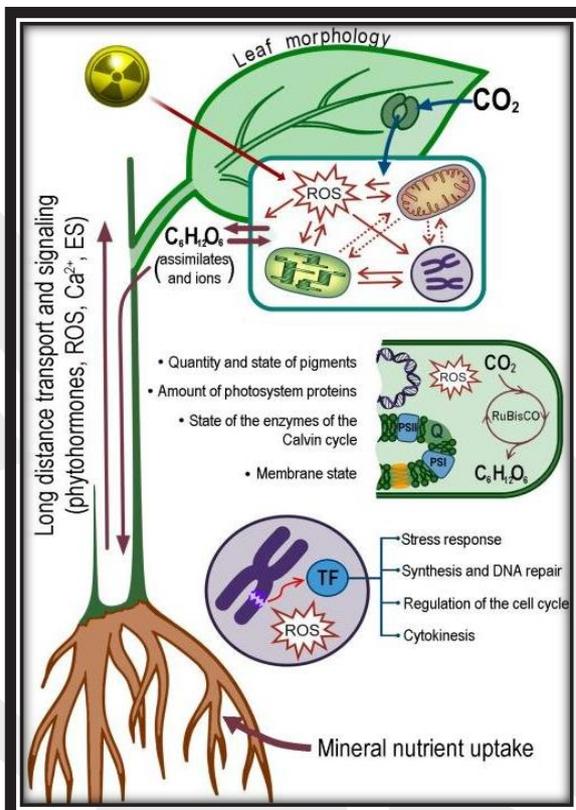


Figura 5. Mecanismo de acción de la radiación en una hoja.

El Laboratorio de Radiobiología estudia los efectos de distintos tipos de radiación sobre la materia viva. Esta disciplina estudia la respuesta biológica, los mecanismos y las modificaciones y/o lesiones que se producen luego de la absorción de distintos tipos de radiación ionizante o no ionizante.

Para interpretar los efectos biológicos de las radiaciones se pueden emplear diferentes enfoques. Primeramente, consiste en estudiar las modificaciones o lesiones que podrían ocurrir a nivel molecular y posteriormente predecir lo que podría pasar en el organismo completo. Entonces, en el Laboratorio de Radiobiología se realizará el estudio del metabolismo en plantas empleando

radiotrazadores y efectuarán estudios de los efectos de la radiación en especies vegetales y plagas.

El Laboratorio de Radiobiología realizará estudios de manera conjunta con el Complejo Multipropósito de Irradiación (CMI) como ser el estudio para la aplicación de la Técnica del Insecto Estéril (TIE) para el control de plagas. Esta técnica consiste en irradiar pupas de insecto macho hasta volverlos estériles y posteriormente liberarlos al medio ambiente y de esta forma controlar la población de insectos (plaga) que afectan a los cultivos.

Lo que beneficiará en una mejor salud vegetal, animal y humana, un medio ambiente más limpio, un aumento de la producción agrícola y pecuaria en los sistemas agrícolas, y un desarrollo económico más rápido.

El Laboratorio de Radiobiología contará con grupos de trabajo, como los Grupos de Fitopatología y Entomología, que llevarán a cabo investigaciones sobre la aplicación de la radiación para la desinsectación de cereales y granos, como ser: trigo, cebada, arroz, avena, maíz, frutos secos, y otros. Además, realizará estudios para combatir las enfermedades que afectan a las plantas, como es el caso del *Mildu* en quinua y en otros vegetales.

Además, en el grupo de investigación del Laboratorio de Radiobiología vegetal llevará a cabo estudios de fitomejoramiento de plantas. Esta técnica consiste en mejorar las

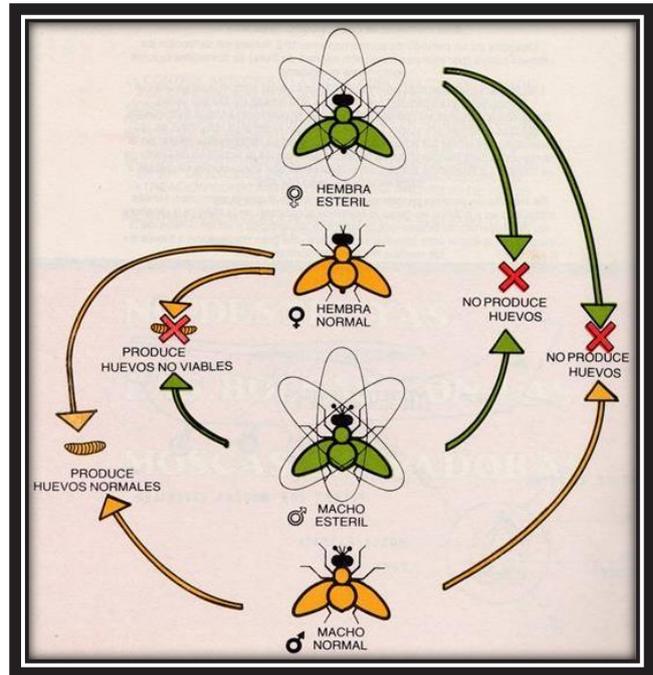


Figura 5. Mecanismo de aplicación de la Técnica del Insecto Estéril (TIE).

Por otro lado, desarrollarán investigación sobre la aplicación de la tecnología nuclear en la conservación de alimentos principalmente en aquellos que son de interés de exportación.



haciendo simultáneamente estudios de mutagénesis y fitotecnia para la determinación de las mutaciones aleatorias del ADN en las plantas para posteriormente realizar la selección de los genotipos prometedores para el mejoramiento del cultivo de plantas

En gestiones pasadas, el Laboratorio de Servicios Nucleares de la ABEN desarrolló estudios preliminares sobre el mejoramiento de semillas de trigo y quinua, en los que seleccionaron tres genotipos mutantes tolerantes a bajas temperaturas (G1, G2, G3 y G4) de las cuales el genotipo mutante de la Muestra 4 (M4) aumento rendimiento para la tolerancia a heladas.



Figura 7. Cultivos de trigo tratados con un proceso de fitomejoramiento.

Resumen del Taller: Importancia de los Minerales Radiactivos y Tierras Raras

Marco Augusto Herbas López^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear. Unidad de Materias Primas y Radioactivas
La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

*Correo electrónico: mherbas@aben.gob.bo

IMPORTANCIA DE LOS MINERALES RADIATIVOS Y TIERRAS RARAS

TEMARIO:

- Contexto histórico del uranio en Bolivia.
- Aplicaciones de minerales radioactivos y tierras raras.
- Perspectivas a futuro a nivel mundial.



DISERTANTE:

MARCO AUGUSTO HERBAS LÓPEZ

JEFE DE UNIDAD DE MATERIAS PRIMAS RADIATIVAS - ABEN

- Maestría en Ingeniería Nuclear con mención en Centrales de Generación Nuclear en el Politécnico de Milán - Italia.
- Curso en Salvaguardia Nuclear y No Proliferación en el Centro Conjunto de Investigación Europeo en Ispra - Italia.
- Capacitación "Vida de un transformador de potencia" - Doble Engineering Company - California EEUU.

RESUMEN

Los reactores nucleares térmicos y de potencia tienen la cualidad de generar energía limpia, libre de gases de efecto invernadero. Empleando principalmente minerales radioactivos como el Uranio y Torio como material combustible, por lo que se prevé que la demanda de esos minerales radioactivos se incremente a nivel mundial.

Por otro lado, el desarrollo de tecnología electrónica en celulares, autos eléctricos, computadoras, turbinas eólicas y otros componentes eléctricos de alta tecnología se debe a los Elementos de Tierras Raras (ETR). Estos minerales se encuentran en concentraciones relativamente bajas en la corteza terrestre. Es debido a la versatilidad de los ETR por su amplia gama de aplicaciones que su demanda se ha incrementado en los últimos 20 años.

ELEMENTOS RADIOACTIVOS: URANIO Y TORIO

En la naturaleza, los únicos elementos radioactivos naturales son el potasio (K), uranio (U) y torio (Th) y están presentes en diferentes minerales, como se muestran en las figuras 1-3.

Los isótopos del uranio y torio cuentan con un período de semidesintegración largo ($^{235}\text{U}=7.04\times 10^8$ años; $^{238}\text{U}=4.468\times 10^9$ años; $^{232}\text{Th}=1.40\times 10^{10}$ años). Siendo el uranio y torio generalmente empleados como combustible en los reactores nucleares de potencia y de investigación.



Figura 1. Mineral de Autunita ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{-}12\text{H}_2\text{O}$)



Figura 2. Mineral de Silvina (KCl).



Figura 3. Mineral de Monacita ((Ce,La,Pr,Nd,Th,Y)PO₄).

Imágenes de Desayuno con fotonos

CONTEXTO HISTÓRICO DEL URANIO

El uranio fue descubierto en 1789, sus isótopos más comunes son: ^{238}U (99,27%) y ^{235}U (0,72%). El isótopo de ^{238}U es denominado material fértil, mientras que al isótopo de ^{235}U es denominado material fisil, ya que éste favorece a las reacciones nucleares en cadena y por ese motivo es empleado como componente principal del combustible nuclear en reactores de investigación y de potencia. En la figura 4 se detalla las mayores reservas de uranio en el mundo, encabezado por Australia y Kazakstán y como los mayores productores de uranio están Kazakstán y Canadá.

Mayores productores:

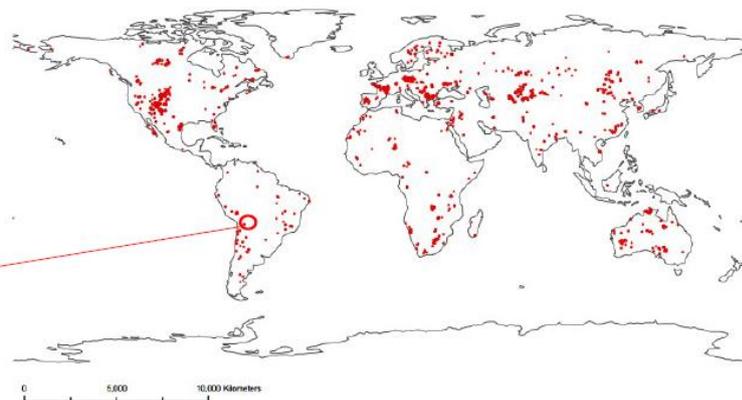
- Kazakstán 42%
- Canadá 13%
- Australia 12%

Países con mayores reservas:

- Australia 28%
- Kazakstán 15%
- Canadá 12%

Depósitos conocidos en Bolivia:

- Cotaje, clasificación: volcánico, rango 1-300 tU.



Fuente: IAEA

Figura 4. Mapa con los depósitos de uranio en el mundo.

En 1970, la Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN) incursionó en los trabajos de exploración de minerales radioactivos en el Cerro Cotaje en el departamento de Potosí y efectuaron procesos de lixiviación y procesaron “yellow cake” (U_3O_8). En 1983 entró en operación la planta piloto en Cotaje y produjeron aproximadamente 60 kg de U_3O_8 con un enriquecimiento al 60%. Sin embargo, debido a falta de financiamiento no se continuaron con los

trabajos de producción de “yellow cake” (Bustos, 2017)



Figura 5. Prospección de mineral de uranio. Imagen: U238

CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

Como se indicó en la anterior sección, el uranio forma parte principal del combustible nuclear. En la figura 6 se explica los procesos de la producción de combustible, que inicia con la extracción del mineral, conversión a “yellow cake” UF_6 . Posteriormente sigue el proceso de enriquecimiento para convertir UF_6 a UO_2 . Por otro lado, de forma paralela se fabrica los elementos combustibles, consecuentemente, se ensambla los minerales enriquecidos con los elementos combustibles que serán empleados como combustible en reactores de potencia o de investigación. Finalmente, una vez gastado el combustible nuclear es reprocesado para recuperar uranio y el resto pasa a deposición final.



Figura 6. Ciclo de combustible nuclear. Fuente: www.foronuclear.org

Las plantas de energía nuclear se caracterizan por no emitir gases de efecto invernadero; además, producen mayor energía a comparación de otras fuentes

energéticas tradicionales, (Fig.7) como ser un elemento de combustible de uranio que es del tamaño de un pellet libera energía equivalente a 481 m³ de gas natural o 564 litros de petróleo o una tonelada de carbón.



Figura 7. Comparación de un pellet de uranio con otras fuentes de producción de energía.
Fuente: www.energy.gov

CONTEXTO HISTÓRICO DEL TORIO

El torio fue descubierto en 1828, es tres veces más abundante que el uranio. En la naturaleza se encuentra como ²³²Th es material fértil que, combinado con el material fisil como el plutonio es empleado como combustible nuclear que es empleado en reactores de sal fundida que pertenece a la línea de reactores de potencia de IV Generación. Este tipo de reactores han demostrado tener un mejor aprovechamiento de las reacciones nucleares y una disminución en la producción de desechos radiactivos.

Las mayores reservas de torio en el mundo se encuentran en India, Australia, USA y Brasil, hasta la fecha, en Bolivia no se realizaron estudios de prospección de torio.

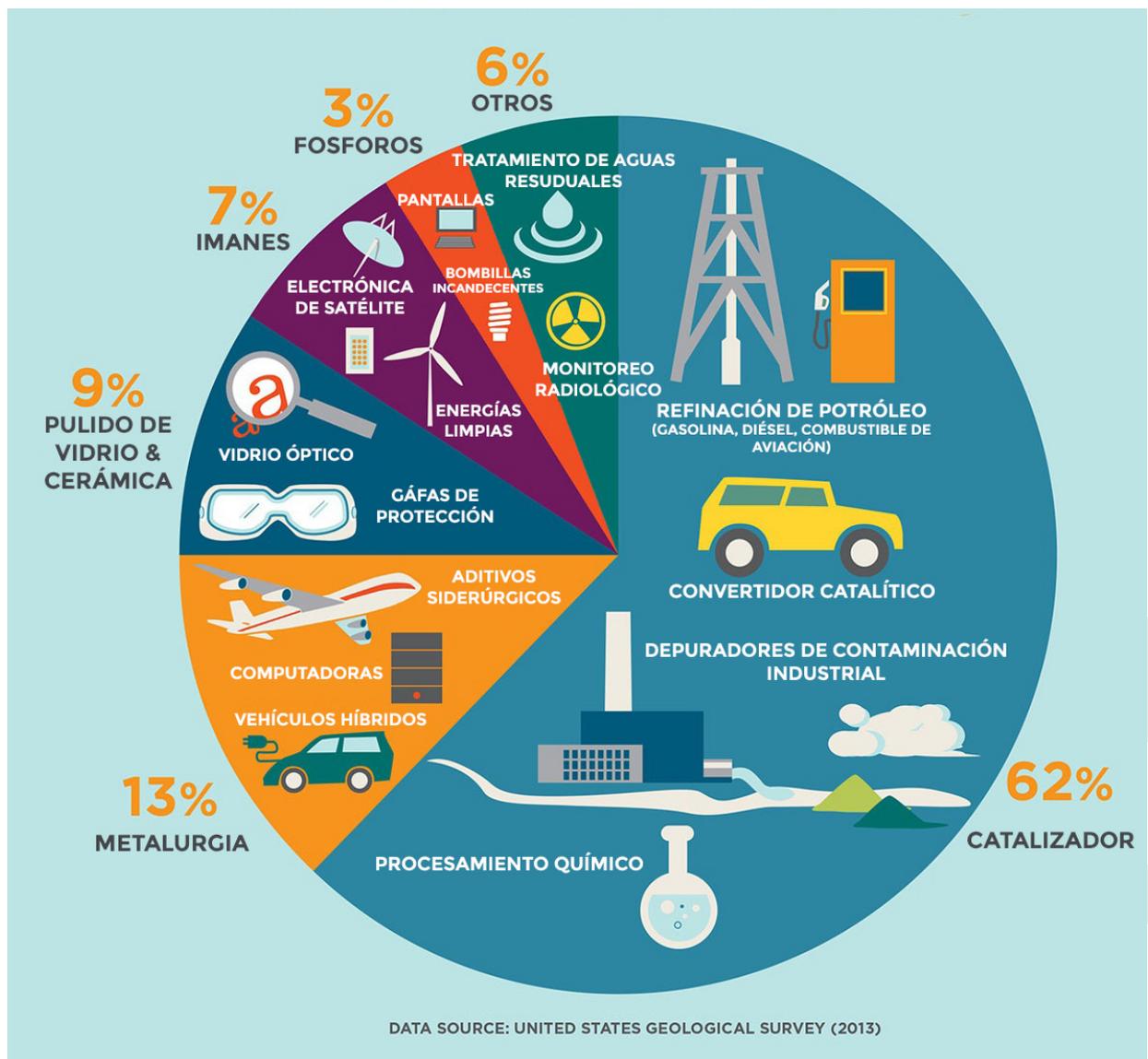
ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (ETR)

Comúnmente llamado tierras raras, comprende 17 elementos químicos que son: escandio, itrio, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio, como se muestran a continuación.

1																	2																											
H																	He																											
3	Li	4											5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																				
11	Na	12	Mg											13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																			
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr									
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe									
55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn									
87	Fr	88	Ra	89	Ac	104	Unq	105	Unp	106	Unh	107	Uns	108	Uno	109	Uue	110	Uun																									
																	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
																	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr

Figura 8. Tabla periódica indicando los elementos de tierras raras. Imagen: ECYT-AR

Las aplicaciones de los ETR van desde materiales luminiscentes en láseres, en equipos de resonancia magnética nuclear (RMN), equipos de rayos X, automóviles eléctricos, celulares y equipos computación, entre otros. En la figura 9 se muestra los usos de las tierras raras en la industria. Dada su amplia gama de aplicaciones, China lideró la producción mundial de tierras raras desde 1985 hasta 2005, fue a partir del 2010 que diferentes países comenzaron a explotar estos minerales. Es gracias a la versatilidad que tienen las tierras raras que permite el desarrollo de tecnología con la que contamos a diario.



Resumen del Taller: Generalidades de la Fusión Nuclear

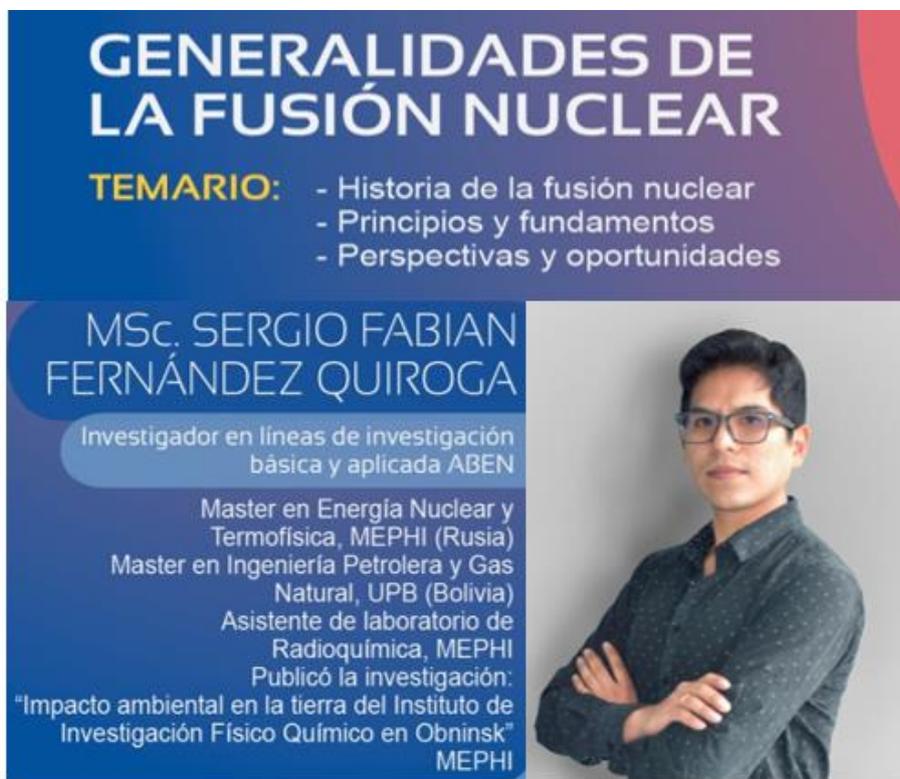
Sergio Fabián Fernández Quiroga^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear.

Dirección de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico (DPIDT)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

*Correo electrónico: sfernandez@aben.gob.bo



GENERALIDADES DE LA FUSIÓN NUCLEAR

TEMARIO:

- Historia de la fusión nuclear
- Principios y fundamentos
- Perspectivas y oportunidades

MSc. SERGIO FABIAN FERNÁNDEZ QUIROGA

Investigador en líneas de investigación básica y aplicada ABEN

Master en Energía Nuclear y Termofísica, MEPHI (Rusia)
Master en Ingeniería Petrolera y Gas Natural, UPB (Bolivia)
Asistente de laboratorio de Radioquímica, MEPHI
Publicó la investigación: "Impacto ambiental en la tierra del Instituto de Investigación Físico Químico en Obninsk" MEPHI



RESUMEN

La colisión de elementos ligeros como son deuterio y tritio da como resultado la fusión nuclear que libera una gran cantidad de energía, este es un proceso natural que se da en el espacio siendo el sol un reactor nuclear de fusión. Sin embargo, es debido a la gran cantidad de energía liberada, la producción mínima de desechos radioactivos y la no generación de gases de efecto invernadero que varios países han desarrollado estudios en reactores nucleares de fusión como son los TOKAMAK e ITER además de otros proyectos relacionados con la fusión nuclear, por lo que se prevé que en unos años los nuevos reactores de fusión desplacen a los reactores nucleares de potencia ya que son más efectivos.

HISTORIA DE LA FUSIÓN NUCLEAR

El desarrollo de la tecnología de fusión nuclear inicia desde 1920, cuando F. Aston descubre el mecanismo de producción de la energía del sol, fusionando cuatro átomos de hidrógeno. Estudios posteriores efectuados por Tamm y Sakharov propusieron en 1951 el primer diseño de un dispositivo de fusión magnética el Tokamak, en 1956 Lev Artsimovich realizó los primeros experimentos en Tokamak.

En 1985, los líderes de Estados Unidos y URSS, Ronald Reagan y Mijail Gorbachov, respectivamente, firmaron el acuerdo sobre el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (Acuerdo ITER); el 2007 se inició la construcción del ITER, siendo principalmente financiado por siete socios: Euratom, Estados Unidos, Federación Rusa, Japón, China, Corea del Sur e India.

Por otro lado, en España se están ejecutando proyectos para llevar a cabo pruebas de materiales para los reactores termonucleares con Actividades de Validación y Diseño de Ingeniería (sus siglas en inglés IFMIF).

FUSIÓN NUCLEAR

El proceso de fusión nuclear consiste en colisionar dos átomos ligeros como son los isótopos del hidrógeno (deuterio [D] y tritio [T]) generando un átomo más pesado Helio [He] y la liberación de energía. En el espacio exterior, la fusión nuclear se da continuamente en las explosiones de estrellas y en el sol.

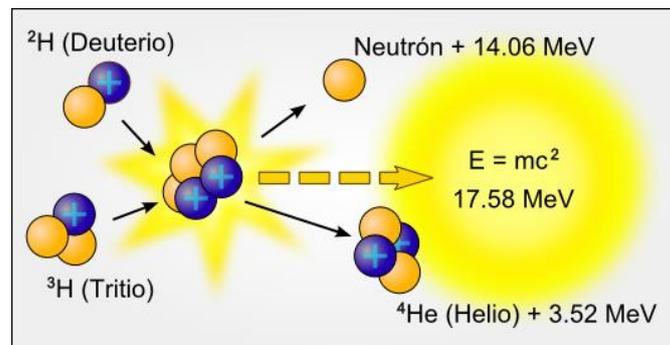


Figura 1. Reacción de fusión de isótopos de hidrógeno.

Fuente: <https://sputnik87.wordpress.com/2011/01/06/la-fusion-nuclear- un-sueno-posible/>

La energía liberada por un kilogramo de una reacción de fusión deuterio – Tritio (D-T) equivale a 94×10^6 kWh, mientras que una reacción de fusión nuclear de uranio (^{235}U) equivale a 24×10^6 kWh. Por otro lado, la energía liberada por carbón equivale a de 9 kWh. A simple vista se evidencia mayor producción de energía por la reacción de fusión nuclear.

A continuación, se detallan los requisitos para que se efectúe la reacción nuclear de fusión:

Temperatura (T). La reacción de fusión a altas temperaturas en la cavidad del reactor de fusión para producir la reacción. requiere de temperaturas muy elevadas, de modo que los átomos lleguen a ser una masa gaseosa (plasma) de forma que esté compuesta por electrones libres y átomos altamente ionizados.

Densidad de partículas (n). La densidad del plasma debe ser lo suficiente alta para que los núcleos estén cerca unos a otros y facilite a la reacción de fusión.

Tiempo de confinamiento (τ). Es decir, el tiempo para confinar y controlar el plasma

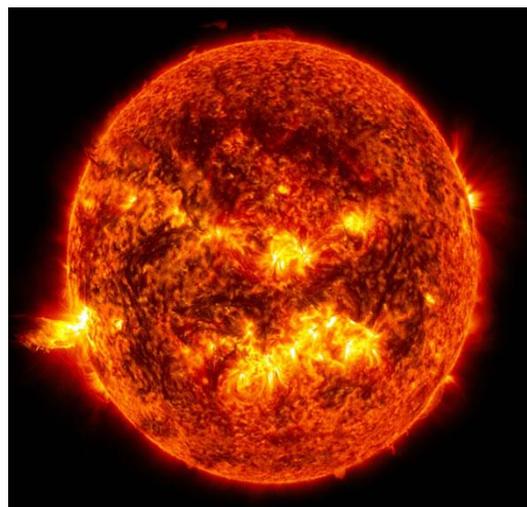


Figura 2. Reacciones de fusión presentes en el sol.
Imagen: Ecodiario El Economista.

El balance de energético para que los tres parámetros consigan producir más energía de la suministrada es llamado el criterio de Lawson.

MÉTODOS DE FUSIÓN NUCLEAR

Los métodos empleados para fusión nuclear son:

Fusión por Confinamiento Inercial (FCI). Este método consiste en impactar en una pequeña cápsula del combustible (Hohlraum de Deuterio-Tritio) con 192 haces de rayos láser a fin de incrementar el choque de las partículas y vencer la barrera de Coulomb para que de ese modo se pueda producir la reacción nuclear de fusión.

Este es un proceso de fusión natural que se da en el sol, consiste en confinar partículas en un medio tan denso de modo que no tenga posibilidad de escapar sin chocar entre sí.

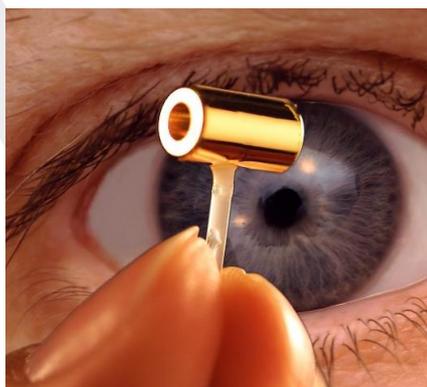


Figura 3. Cápsula de Hohlraum.

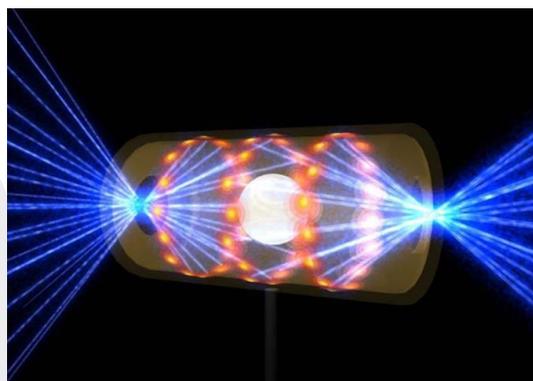


Figura 4. Impacto de rayos láser a la cápsula de combustible.

Fusión por Confinamiento Magnético (FCM). Consiste en acelerar y calentar un gas (deuterio y tritio) en una cámara toroidal con bobinas magnéticas hasta que el gas llegue

a un estado de plasma. El dispositivo más desarrollado es el TOKAMAK, por sus siglas en ruso.

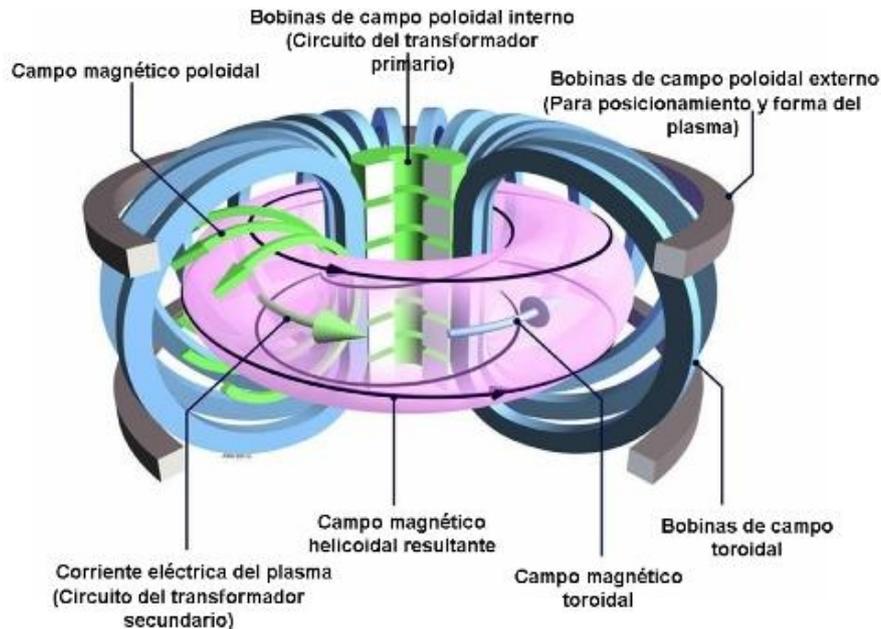


Figura 5. Diseño de un reactor TOKAMAK.
Imagen: <https://www.inin.gob.mx>

PROYECTOS DE FUSIÓN NUCLEAR

La fusión nuclear ha llamado la atención de varias instituciones e incluso países, por lo que el Proyecto de Reactor Termonuclear Experimental Internacional (sus siglas en inglés ITER) está siendo implementado principalmente con el financiamiento de siete socios: Euratom, Estados Unidos, Federación Rusa, Japón, China, Corea del Sur e India.



Figura 6. Logo de International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). *Imagen:* www.iter.org

Este proyecto científico tiene por objeto desarrollar todos los elementos necesarios para la construcción y funcionamiento de un reactor nuclear de fusión, además de producir plasma de fusión que tenga 10 veces más de potencia térmica y demostrar la factibilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear. Actualmente, el ITER se está construyendo en Caradache (Francia) y tendrá un costo de 24 000 millones de euros.

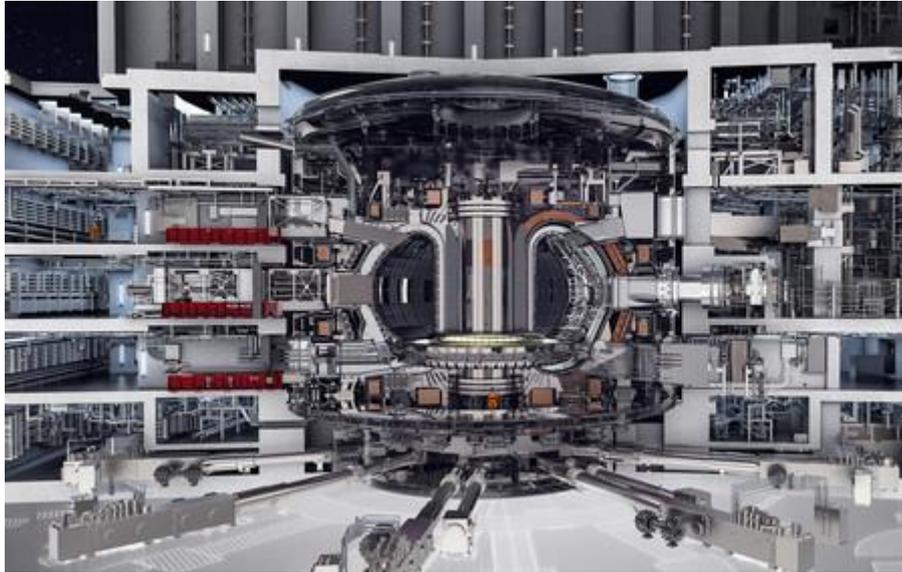


Figura 7. Esquema del ITER. Reactor Termonuclear que planea producir 500 MW de energía a partir de 50 MW.

El proyecto Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión - Fuente de Neutrones Orientada a la Demostración (por sus siglas en inglés IFMIF-DONES) con sede en Granada, España, realiza prueba de materiales para los reactores termonucleares para determinar el daño de neutrones para los reactores termonucleares de fusión, ya que estos materiales serán sometidos a una energía de 14 MeV y así verificar la seguridad de los componentes del Reactor Termonuclear.



Figura 8. Logo de International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)-DONES
Imagen: www.ifmif.org

El proyecto Helion consiste en desarrollar la tecnología de fusión nuclear empleando dos tipos de confinamiento el magnético e inercial, emplea como combustible Helio-3 y Deuterio. De acuerdo con su diseño emplea una bobina magnética de 10 Teslas que al momento de fisurar los núcleos la reacción es mantenida por el confinamiento magnético. Fig. 9.

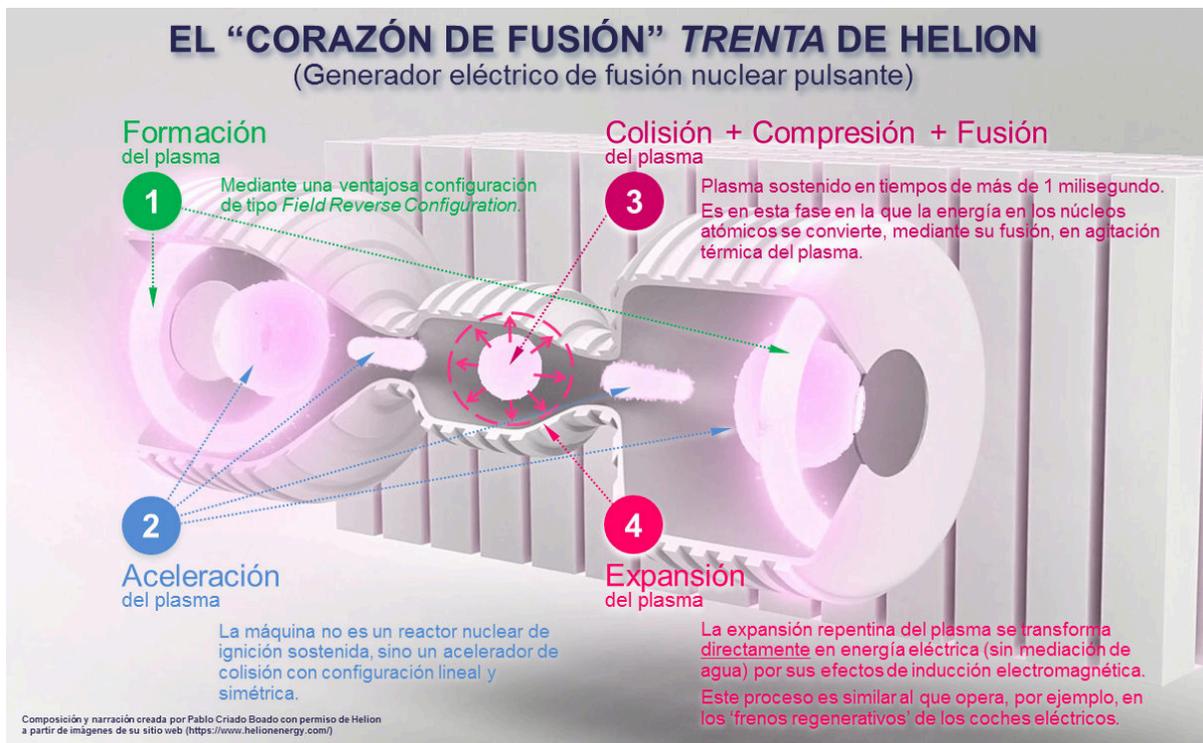


Figura 9. Esquema de funcionamiento del proyecto Helion. *Imagen:* www.helionenergy.com

El proyecto de la compañía privada de Zap Energy propone emplear el prototipo modificado de sistemas de contención magnética de Z-Pinch. Este tipo de reactores de fusión usa pulsos de energía eléctrica para generar un campo magnético que comprime y calienta una columna de gas ionizado hasta conseguir la reacción de fusión. De acuerdo con su planificación este proyecto estará en operación el 2026.



Figura 10. Visualización 3D del reactor antes de iniciar la reacción de fusión. *Imagen:* Zap Energy.

PERSPECTIVAS DE LA FUSIÓN NUCLEAR

La fusión nuclear es una fuente de energía limpia, segura, renovable, de gran rendimiento y libre de gases de efecto invernadero. Es el futuro de una fuente de energía que en menos de 30 años podrá ser accesible económicamente.

Sin embargo, la fusión nuclear sigue desarrollándose continuamente y requiere de investigación en áreas de física nuclear, física de plasma, ciencia nuclear de materiales, simulaciones, sistemas eléctricos, entre otros. Siendo la principal aplicación de la fusión nuclear la producción de energía libre de gases de efecto invernadero.

Resumen del Taller: Protección Radiológica y las Norm

Manuel Rosales Villegas^{1*}

Agencia Boliviana de Energía Nuclear.

Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear (DATN)

La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

*Correo electrónico: mrosales@aben.gob.bo

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y LAS NORM

TEMARIO: - Aspectos importantes de la protección radiológica
- Qué son las NORM
- Protección del trabajador respecto a las NORM

LIC. MANUEL ROSALES VILLEGAS

Especialista en protección Radiológica y Seguridad Nuclear

Especialista en Protección Radiológica y Seguridad Nuclear de la Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear - **ABEN.**
Licenciado en Física
Universidad Autónoma Tomás Frías

Especialista en Protección Radiológica y Seguridad de Fuentes Radiactivas
Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.
Especialista en Seguridad Nuclear
Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.
Docente Extraordinario en la Carrera de Física
Universidad Autónoma Tomás Frías.
Inspector y Evaluador en la Unidad de Radioprotección de Instalaciones del "Centro de Protección y Seguridad Radiológica"

RESUMEN

La radiación ionizante está presente en el diario vivir en forma de radiación ionizante (α , β) y radiación indirectamente ionizante (γ , Rayos X, neutrones). Para cada uno de estos tipos de radiación existen diferentes medidas de atenuación, que varía de materiales desde una hoja de papel hasta gruesos bloques de concreto, por lo que se diseñó diferentes medidas de protección radiológica con el objetivo de proteger al trabajador ocupacional expuesto (TOE), al público en general y al medio ambiente.

Por otro lado, el TOE en actividades mineras puede estar expuesto a minerales radioactivos de origen natural (NORM), por lo que en las diferentes fases de extracción del mineral radioactivo se aplican diferentes medidas de protección radiológica.

y, siendo la radiación indirectamente ionizante con el cual se debe tomar medidas de protección radiológica de mayor consistencia la que

con características únicas desde la luz del sol, hasta en reacciones nucleares de fisión y/o fusión, por lo que existen diferentes tipos de radiación ionizante, es en ese sentido que la protección radiológica que se debe adoptar son diferentes medidas, todo con el objetivo de proteger la integridad de la persona expuesta.

GENERALIDADES SOBRE RADIACIÓN IONIZANTE

La materia en sus cuatro estados, sólido, líquido, gaseoso y plasma, está compuesto por átomos y moléculas. Los átomos son la parte más pequeña de la materia y se pueden describir como una nube electrónica que en su capa externa se encuentran los electrones (carga negativa) que envuelve el núcleo, que está compuesto de protones (carga positiva) y neutrones (sin carga), como se muestra en la figura 1. Las reacciones nucleares se dan a nivel atómico.

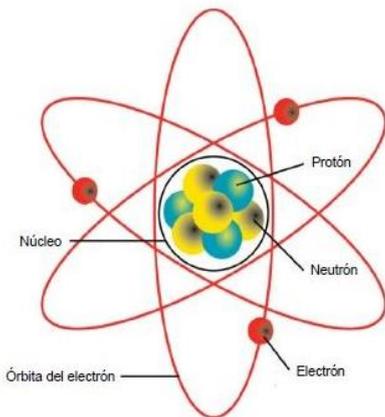


Figura 1. Modelo de configuración del átomo.

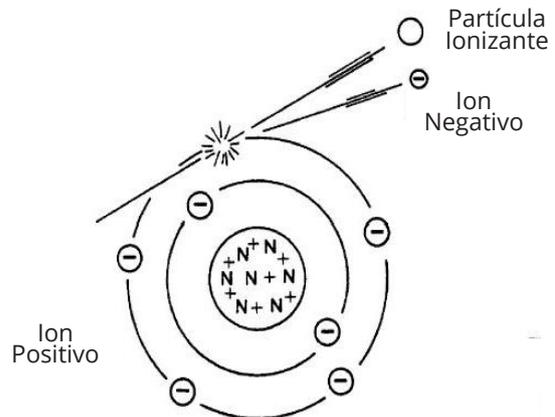


Figura 2. Proceso de ionización que consiste en remover un electrón del átomo.

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones). En la figura 2 se muestra la ionización del átomo con la remoción de un electrón de la nube electrónica. Esta propagación de partículas materiales se da por mecanismos de transmisión de calor por emisión de energía electromagnética desde un cuerpo caliente.

La radiación electromagnética está formada por ondas electromagnéticas (fotones) que se propagan en el espacio, resultantes de perturbaciones en campos eléctricos o magnéticos, este grupo incluye a toda aquella radiación del espectro electromagnético con una energía muy elevada debido a su alta frecuencia, capaz de ionizar los átomos y romper los enlaces moleculares.



Figura 3. Espectro electromagnético.

TIPOS DE RADIACIÓN IONIZANTE

La característica fundamental de las radiaciones ionizantes es que su energía asociada es tal que la colisión entre éstas y el átomo son capaces de arrancar electrones de la capa externa, pudiendo romper los enlaces moleculares. Por lo que el medio que es atravesado por las radiaciones ionizantes presenta una elevada concentración de iones y las grandes moléculas características de los tejidos orgánicos (ADN, proteínas, etc.) son fragmentadas o rotas a veces de forma irreversible. La velocidad inicial que llevan las partículas antes del impacto está directamente asociada a la energía de la radiación.

El tipo de radiación y su energía asociada son los parámetros básicos a la hora de evaluar la protección necesaria contra el tipo de radiación.

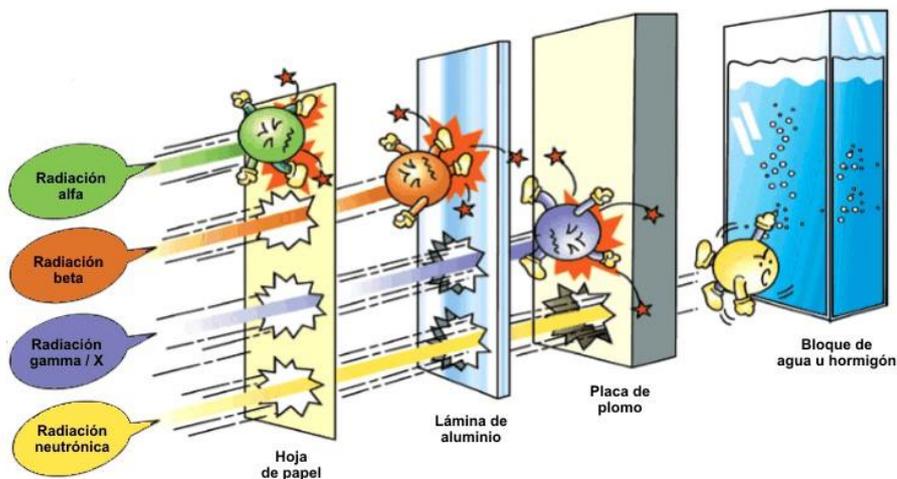


Figura 4. Grados de penetración de los diferentes tipos de radiación.

DIRECTAMENTE IONIZANTE

- Radiación α : Son partículas cargadas, con alta probabilidad de interacción, se atenúa rápidamente al atravesar barreras. Una hoja de papel es suficiente para anular prácticamente todo el haz de una radiación de estas características.
- Radiación β : Tiene un poder de penetración mil veces mayor que las partículas α . Unos pocos milímetros de lámina metálica o unos pocos metros de aire es suficiente para reducir este tipo de radiación a niveles insignificantes.

INDIRECTAMENTE IONIZANTE (Radiación electromagnética)

- Radiación γ : Son partículas que no tienen masa ni carga eléctrica, su capacidad de penetración es muy elevada, por lo que para atenuar la radiación gamma es necesario hormigón o plomo en gruesos bloques.
- Rayos X: La menor energía que en general está asociada a los Rayos X respecto a los rayos gamma hacen que éstos no sean capaces de atravesar grosores muy elevados de un material de elevada densidad. Placas delgadas de plomo son suficientes.
- Radiación neutrónica (n) son neutrones libres producidos como resultado de reacciones nucleares como la fisión o fusión nuclear, a partir

de moléculas e isótopos estables, estos neutrones reaccionan con los núcleos de otras moléculas estables y forman nuevos isótopos a partir de moléculas no isotópicas. Las medidas de atenuación para la radiación neutrónica más efectivos son agua, polietileno, cera de parafina o hormigón.

TIPOS DE DAÑO EFECTUADOS POR LA RADIACIÓN IONIZANTE

La radiación ionizante puede actuar sobre las moléculas biológicas causando ionización y excitación, produciendo dos tipos de efecto:

a) Efecto directo: La radiación tiene una acción directa en moléculas vitales de la célula (ADN, por ejemplo) rompiendo enlaces entre átomos.

b) Efecto indirecto: Ionización de moléculas no vitales (por ejemplo, moléculas de agua) que producen especies químicas muy

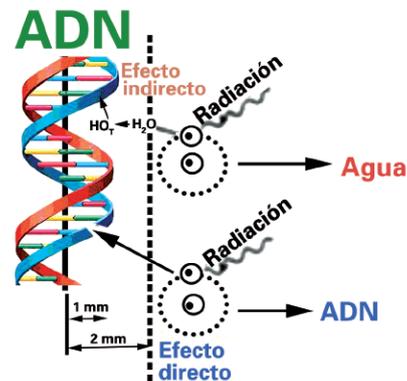


Figura 5. Daño de la radiación al ADN. Imagen: ARAN

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

El objetivo de la protección radiológica es de mantener un adecuado nivel de protección a las personas sin limitar indebidamente las prácticas beneficiosas que dan lugar a la radiación ionizante. Los principios de la protección radiológica son:



Justificación: Ninguna práctica con radiaciones ionizantes debe ser autorizada si no existen evidencias de que la misma producirá, para los individuos o la sociedad, beneficios que compensen el posible detrimento que puedan generar.



Optimización: Análisis y decisión de la magnitud de los recursos que se considera razonable destinar a Protección Radiológica a fin de reducir el detrimento colectivo asociado a una determinada práctica (teniendo en cuenta factores económicos y sociales).



Limitación de dosis: Las dosis aplicadas están dirigidas a los trabajadores ocupacionalmente expuestos y a los miembros del público (se aplica a la dosis promedio del grupo crítico).

LÍMITE DE DOSIS APLICABLE

a) **Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE).** Toda exposición sufrida por los trabajadores en el curso de su trabajo, con la excepción de las exposiciones excluidas y las exposiciones debidas a prácticas o fuentes exentas.

b) Miembros del público. Exposición sufrida por miembros de la población a causa de fuentes de radiación, excluidas cualquier exposición ocupacional o médica y la exposición a la radiación natural, pero incluida la exposición debida a las fuentes y prácticas autorizadas.

c) Prácticas médicas. Exposición sufrida por los pacientes como parte de su propio diagnóstico médico o de su tratamiento.



Figura 6. Trabajador Ocupacionalmente Expuesto.



Figura 7. Exposición de la radiación en consultas médicas.

Los elementos de protección radiológica son:

Tiempo: Menor tiempo en presencia de una fuente, menor radiación recibida.

Distancia: A mayor distancia, menor radiación recibida.

Blindaje: Utilización de blindaje, menor radiación recibida.

Las fuentes de radiación que recibe la población en general provienen de fuentes naturales: (Rayos cósmicos, radón, radiación interna), como artificiales: (médicas, plantas nucleares, pruebas nucleares atmosféricas, entre otras). La dosis anual promedio de la población mundial es aproximadamente de 2,8 mSv.

MATERIAL RADIOACTIVO DE ORIGEN NATURAL (sus siglas en inglés NORM)



Figura 9. Letrero de precaución en plantas de procesamiento de minerales

Los minerales y materias primas que contienen radionucleidos de origen natural y terrestre Comúnmente son

denominados radionucleidos primordiales, siendo de interés las series de desintegración de ^{238}U y ^{232}Th y ^{40}K . Las concentraciones de actividad de estos radionucleidos en rocas y suelos normales son variables, generalmente bajas; sin embargo, en algunas operaciones de minería, procesamiento de minerales y en ambientes de trabajo, pueden presentarse niveles importantes de dosis de radiación, representando un riesgo para los trabajadores, el público o el medio ambiente. La fuente más importante de radiactividad en los NORM se debe a la presencia de los isótopos producto del decaimiento del uranio y el torio.

PROCESAMIENTO DE MINERALES Y COMPORTAMIENTO DE RADIONUCLEIDOS

1. Extracción y trituración de minerales.
2. Procesos de separación física de minerales.
3. Procesos de extracción química y húmeda.
4. Procesos térmicos para la extracción, procesamiento y combustión de minerales.

GENERACIÓN DE RESIDUOS NORM

Las actividades y procesos industriales citados en la anterior sección, tienen el potencial de generar residuos NORM en diferentes tipos y cantidades. Siendo éstos de dos categorías: (i) Residuos con concentraciones de actividad moderadas, a menudo generados en grandes cantidades. (ii) Residuos con concentraciones de actividad más altas, generalmente generados en pequeñas cantidades.



Figura 10. Extracción de minerales.

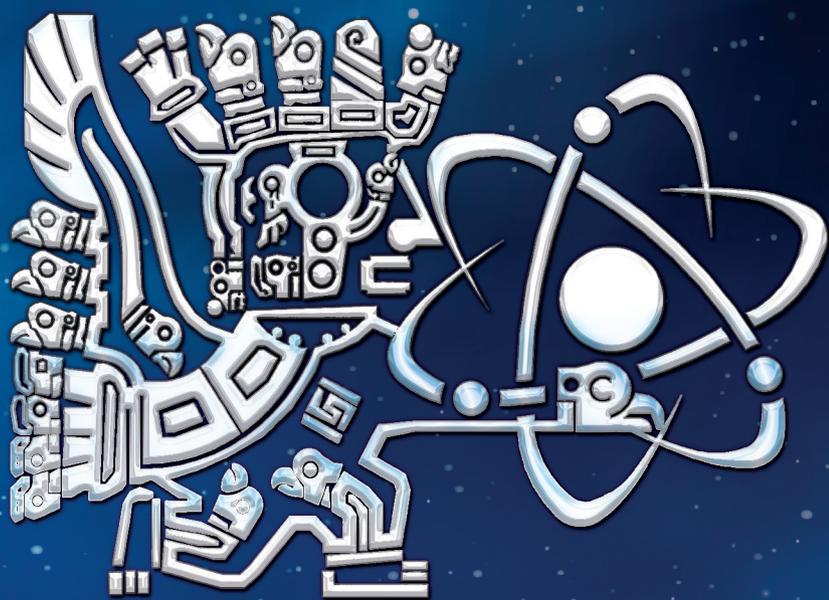
TIPOS DE SITUACIONES DE EXPOSICIÓN

Si la concentración de todos los radionucleidos en las series de desintegración de ^{238}U y ^{232}Th son igual o menor a 10 Bq/g, el material no se considera NORM; entonces, se aplica requisitos para las situaciones de exposición existente.

Si la concentración de todos los radionucleidos en las series de desintegración de ^{238}U y ^{232}Th es mayor a 10 Bq/g, el material se considera NORM; entonces, se debe adoptar medidas de exposición planificadas.

Independientemente si un residuo de NORM en el proceso se recicla o es utilizado como subproducto, o eliminado como desecho, es necesaria una atención reglamentaria acorde al nivel de riesgo radiológico. Además, muchos residuos de NORM contienen componentes no radiológicos que pueden ser nocivos para la salud humana y/o el medio ambiente y deben ser controlados por normas ambientales.

N O T I C I A S



“BOLIVIANAMENTE”

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



SECCIÓN 4. NOTICIAS

Noticia 1.
Inauguración del Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia en El Alto
Página..... 79

Noticia 2.
La Agencia Boliviana de Energía Nuclear firma acuerdos con instituciones médicas para fortalecer la atención de pacientes con cáncer
Página..... 80

Noticia 3.
Inauguración del segundo Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia en Santa Cruz
Página..... 81

Noticia 4.
La ABEN convoca a profesionales a capacitarse en el área de salud y aplicaciones de la tecnología nuclear
Página..... 82

Noticia 5.
Retornan cuatro médicos nucleares especializados en Argentina con el programa de becas ABEN
Página..... 83

Noticia 6.
Bolivia mejora la seguridad Física Nuclear de las nuevas instalaciones de irradiación
Página..... 84

Noticia 7.
La ABEN firma acuerdos con la CNEA de Argentina para la cooperación científica para el uso pacífico de energía nuclear
Página..... 85

Noticia 8.
Laboratorio de Servicios Nucleares de la ABEN
Página..... 86



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

La Paz, 06 de marzo 2022

INAUGURACIÓN DEL CENTRO DE MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA EN LA CIUDAD DE EL ALTO



El presidente Luis Arce y autoridades inaugurando el CMNyR El Alto. Foto: ENUIa

Durante el trigésimo séptimo aniversario de la efeméride cívica alteña, el presidente del Estado Plurinacional, Luis Arce, inauguró el Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR) en el Distrito 8. *“Hermanos, ahora tenemos a disposición de los bolivianos este Centro y ya no habrá necesidad de salir al Brasil, Argentina o Chile para hacernos tratamientos. Han pasado muchos años para lograr esta soberanía en tratar esta enfermedad”*, declaró Arce en su discurso de inauguración.

El ministro de Salud y Deportes, Jeyson Auza, indicó: *“Nos sentimos realmente orgullosos en este aniversario de El Alto de dar este regalo, pero no solo a El Alto, sino al pueblo boliviano. Con este equipamiento que tenemos en este centro público de salud se va a atender mediante el Sistema Único de Salud (SUS) a nuestra población”*.

El proyecto comenzó en 2018 cuando la ABEN y la estatal argentina INVAP firmaron un contrato para edificar tres centros de medicina nuclear en

El Alto, La Paz y Santa Cruz, con una inversión de 150 millones de dólares financiados por el Estado boliviano.

La directora de la ABEN, Hortensia Jiménez, señaló que el Centro cuenta con dos equipos de última generación: un tomógrafo de positrones (PET) y un tomógrafo por emisión de fotón simple (SPECT-CT) que pueden detectar con precisión tumores por más pequeños que sean, identificación de trastornos cerebrales, cardíacos y óseos.

Por otra parte, el Centro tiene tres áreas para el tratamiento contra el cáncer: 1) Radioterapia externa, donde existen dos aceleradores lineales. 2) Braquiterapia de alta tasa de dosis, que utiliza cobalto 60 como fuente de irradiación que reduce el tiempo de tratamiento de cáncer de cuello uterino de 72 horas continuas a menos de una hora y, por último, 3) Quimioterapia, donde los médicos oncólogos prepararán y suministrarán medicamentos y anticuerpos al paciente para el tratamiento de cáncer.



Bolivia, 2022

LA AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR FIRMA ACUERDOS PARA FORTALECER LA ATENCIÓN DE PACIENTES CON CÁNCER

El Ministerio de Hidrocarburos y Energías, en coordinación con la ABEN y los técnicos del CMNyR–El Alto, llevaron a cabo acuerdos con diferentes Seguros y Cajas de Salud del país, con el fin de abrir los servicios de los Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR) a pacientes con cáncer.

En la inauguración del CMNyR El Alto, el ministro de Salud, Jeyson Auza, indicó que el Centro atenderá gratuitamente a todas las personas que pertenezcan al Sistema Único de Seguro. Entonces, la ABEN hizo convenios con la Caja Petrolera de Salud, la Caja Nacional de Salud, la Caja Cordes y el Seguro Social Universitario de los departamentos de La Paz, Tarija, Potosí y Cochabamba.



Firma de convenio entre las instituciones del COSSMIL y la ABEN. Foto: Separata Institucional MHyE.

De igual forma, a inicios de octubre del 2021 la directora de la ABEN, Hortensia Jiménez, y el director General de la Caja Bancaria Estatal de Salud (CBES), Abdel Tango, firmaron un acuerdo que permitirá trabajar en un programa de prevención del cáncer y la estadística sobre esta enfermedad.



Personal médico del CMNyR El Alto atendiendo a un paciente. Foto: ABEN



Firma de convenio entre CBES y ABEN. Foto: CBES. Foto: ABEN

En junio de 2021, la ABEN y la Corporación del Seguro Social Militar (COSSMIL) firmaron un acuerdo interinstitucional para que los pacientes oncológicos de COSSMIL sean atendidos en los Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR) de las ciudades de El Alto y Santa Cruz, de modo que los asegurados reciban servicios de diagnóstico y tratamiento con medicina nuclear, radioterapia y oncología médica.

“La Caja Bancaria Estatal felicita esta revolución tecnológica que permite la investigación y el tratamiento de enfermedades relacionadas con el cáncer”, enfatizó Tango. Cabe resaltar que la CBES atiende a 132 pacientes oncológicos, de los cuales 62 son atendidos en la ciudad de La Paz.

La Paz, 06 de marzo 2022

INAUGURACIÓN DEL SEGUNDO CENTRO DE MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA EN LA CIUDAD DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA



El presidente Luis Arce y autoridades cruceñas inaugurando el CMNyR Santa Cruz. Foto: ABEN

Durante la efeméride cruceña, el 23 de septiembre el presidente del Estado, Luis Arce Catacora; la directora general de la ABEN, Hortensia Jiménez, y líderes del departamento cruceño inauguraron el segundo Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia en Santa Cruz (CMNyR - Santa Cruz). El presidente Arce declaró: *“No hay nada que nos detenga en la lucha contra el cáncer. A partir de hoy con el Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia que inauguramos vamos a salvar vidas en el oriente boliviano”*.

El CMNyR - Santa Cruz está emplazado en la zona Pampa de la Isla, Distrito 6 de la capital cruceña y al igual que el CMNyR – El Alto está equipado con equipos para diagnóstico y tratamiento de cáncer más avanzados de Sudamérica. El Centro tiene áreas de medicina nuclear para el diagnóstico temprano de las enfermedades a través de equipos Tomografía por Emisión de Positrones (PET) y Tomografía Computarizada por Emisión de fotón único (SPECT). El área de

radioterapia cuenta con dos aceleradores lineales, además de áreas de quimioterapia, braquiterapia, consultorios, farmacias, laboratorios, enfermería y salas de inyección.

La capacidad de atención será de 100 a 120 pacientes por día en los servicios de diagnóstico, medicina nuclear, radioterapia, quimioterapia y oncología clínica, con el fin de dar una atención integral en la lucha contra el cáncer. Por otro lado, a través del Sistema Único de Salud (SUS) los pacientes oncológicos de la Caja Nacional, Caja Petrolera, Caja de Salud Cordes, Seguro Social Universitario de los departamentos de La Paz, Tarija, Potosí y Cochabamba, COSSMIL y la Caja Estatal Bancaria podrán ser atendidos en los Centros de Medicina Nuclear de Santa Cruz y de El Alto. *“Iniciamos con el Centro de Medicina Nuclear en El Alto y en menos de seis meses ya ha salvado a más de 5.000 pacientes; ahora, tenemos este centro para los pacientes con cáncer de Santa Cruz”*, dijo el presidente Luis Arce en la entrega del moderno centro de salud.

Bolivia, 2022

LA ABEN CONVOCA A PROFESIONALES A CAPACITARSE EN ÁREAS DE SALUD Y APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR



Especialistas médicos bolivianos trabajando en el CMNyR-El Alto. Foto: Ahora El Pueblo

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) ejecuta el Proyecto del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) y la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR). La ABEN, durante 2022 continuó ofreciendo becas de estudio para los diferentes componentes del CIDTN y CMNyR, como son:

1. Convocatoria de becas para el área de salud en Medicina Nuclear y Radioterapia para los Centros de Medicina Nuclear de El Alto, Santa Cruz y La Paz invitando a bachilleres, estudiantes universitarios y profesionales titulados a diferentes áreas de formación. El periodo de capacitación en la República de Argentina abarca desde 12 hasta 41 meses para los diferentes puestos, ofertando 21 plazas.
2. Convocatoria de becas para el área de Investigación y Aplicaciones Nucleares para el Reactor Nuclear de Investigación, invitando a profesionales de Licenciatura o Ingeniería en Física, Maestrantes en Física y Tecnología Nuclear o ramas afines. El tiempo de formación en la Federación Rusa abarca un período de 12 meses, ofertando 8 plazas.

3. Convocatoria de becas para el área de salud en Medicina Nuclear y Radioterapia para los Centros de Medicina Nuclear de El Alto, Santa Cruz y La Paz, invitando a licenciados en el área médica y a licenciados o ingenieros en Física. El periodo de capacitación en la República de Argentina abarca desde 36 hasta 41 meses, ofertando 8 plazas.

4. Primera Convocatoria de becas para el área de Investigación y Aplicaciones Nucleares para los Laboratorios de Radiobiología y Radioecología, invitando a profesionales de Técnico Superior en Química, Ingeniería o Licenciatura en Química, maestrantes en Biotecnología Agroquímica y a doctorados en Biología o Ecología. Con un período de capacitación de 6 meses en la Federación Rusa, ofertando 16 plazas. Debido a que no hubo suficientes postulantes, la ABEN volvió a lanzar una segunda convocatoria ampliando la invitación a profesionales en Técnico Superior en Química, Química Industrial o Química de Procesos; Ingeniería en Química, Licenciatura en Cs. Químicas, Físicas, Agronomía, Biología, Ecología, Bioquímico, Agrónomo; maestrantes en Microbiología, Radioecología, Biotecnología o Doctorados en Radiobiología o Radioecología.

Cabe aclarar que en la gestión 2023, la ABEN continuará ofreciendo becas para los diferentes componentes del CIDTN y CMNyR, y éstas serán publicadas en la página institucional de la ABEN: www.aben.gob.bo.

La Paz, septiembre 2022

RETORNAN CUATRO MÉDICOS NUCLEARES ESPECIALIZADOS EN ARGENTINA CON EL PROGRAMA DE BECAS ABEN



Médicos especialistas que retornaron al país, junto a la Directora General de la ABEN. Foto: Abya Yala

Como resultado del Programa de Capacitación de la ABEN retornaron al país cuatro médicos que realizaron su especialidad en Medicina Nuclear y Física Médica en la República de Argentina. Ellos son Henry Diego Patty Flores, Rosario Pamela Urquieta Ovando, Risselly María Balboa Morón y Gaby Angulo Montaña. Estos profesionales se beneficiaron con las becas ABEN para la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR).

La directora general de la ABEN, Hortensia Jiménez, declaró: *“Bueno, es una gran satisfacción tenerlos, de que ellos hayan cumplido exitosamente todos sus estudios (...) Realmente es un orgullo para nosotros que vuelvan con éxito y con ganas de prestar servicio al país”*.

Añadió que la ABEN cuenta con 120 becas para la operación de la Red de CMNyR y varios beneficiados ya retornaron y trabajan desde marzo de este año en los CMNyR de El Alto y Santa Cruz, y otros se mantienen aún en proceso de formación en el exterior.

La médica nuclear Risselly Balboa Morón expresó su emoción porque su especialización se hizo con “excelentes profesores” que forman a profesionales de toda Latinoamérica y que ella representó dignamente al país. *“Hemos aprobado esta especialidad para poder venir y difundirla acá en nuestro país”*, destacó.

La médica nuclear Pamela Urquieta manifestó su alegría por volver para aplicar todo lo aprendido en el territorio nacional en beneficio del pueblo y recomendó a los jóvenes que puedan postularse a las becas que ofrece la ABEN. *“Es una gran oportunidad para nosotros como médicos que no tenemos muchos beneficios en ese campo”*, sostuvo.

El médico nuclear Diego Patty agradeció a la ABEN por las becas, ya que provee la formación de profesionales bolivianos en el exterior para que aporten en *“mejorar el estándar de vida de la población boliviana en general”*.



Especialistas médicos del CMNyR El Alto revisando imágenes del PET-CT. Foto: ABEN

BOLIVIA, 2022

BOLIVIA MEJORA LA SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR DE LAS NUEVAS INSTALACIONES DE IRRADIACIÓN



Expertos del OIEA y del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear de La Paz (Bolivia) determinan posibles capas de seguridad alrededor del irradiador polivalente. Foto: ABEN

La ABEN trabaja de manera conjunta con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para las instalaciones del CIDTN, del cual se está ultimando detalles para la selección e integración de las medidas de protección física para posibles actos dolosos en la nueva instalación de irradiación (CMI), por lo que la ABEN gestionó la asistencia del OIEA a través del Plan integrado de Apoyo a la Seguridad Nuclear (sus siglas en inglés INSSP) para mejorar la protección física del nuevo irradiador gamma multipropósito antes de recibir fuentes radiactivas de alta actividad.

El OIEA envió expertos a las instalaciones del CMI y se reunió con los técnicos de la ABEN para apoyar el establecimiento de medidas de protección física en el emplazamiento, dando como resultado el diseño de sistemas de seguridad física. El órgano regulador boliviano (AETN) y la ABEN trabajan estrechamente con expertos del OIEA para definir los sistemas de

protección física adecuados que comprendan vigilancia por circuito cerrado de televisión, cerraduras, controles de acceso y detectores de intrusión, a fin de proteger el material radiactivo frente a robos y actos de sabotaje. Esta colaboración complementó el apoyo prestado en el marco del programa de cooperación técnica del OIEA para facilitar la transferencia de tecnología nuclear con fines pacíficos.

“El nuevo Complejo Multipropósito de Irradiación Gamma contribuirá a la inocuidad alimentaria, lo que redundará positivamente en la productividad agroindustrial, las exportaciones y la conservación de alimentos, el mejoramiento de las semillas y el control de plagas (...) garantizar la seguridad de las fuentes radiactivas que se emplearán en la instalación es una prioridad tanto para nosotros como para el órgano regulador”, explicó la directora general ejecutiva de la (ABEN), Hortensia Jiménez Rivera.

Argentina, 28 de julio 2022

ABEN FIRMA ACUERDO CON EL CNEA DE ARGENTINA PARA LA COOPERACIÓN CIENTÍFICA PARA EL USO PACÍFICO DE LA ENERGÍA NUCLEAR



La directora de la ABEN, Hortensia Jiménez, y la presidenta de la CNEA, Adriana Serquis. Foto: ABEN

En territorio argentino, autoridades bolivianas, entre ellas el ministro de Hidrocarburos y Energías, Franklin Molina, participaron del acto de firma del acuerdo que estuvo a cargo de la directora de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), Hortensia Jiménez, y la presidenta de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Adriana Serquis.

El acuerdo permite el desarrollo de actividades a nivel interinstitucional en las áreas de investigación básica y aplicada, formación de recursos humanos, aplicaciones de la tecnología nuclear en las áreas de salud, agricultura, industria y minería, seguridad tecnológica, física y monitoreo radiológico-ambiental.

El ministro de Hidrocarburos y Energías, Franklin Molina Ortiz, subrayó que la suscripción del documento refuerza el trabajo que desarrollan el presidente de Bolivia, Luis Arce Catacora, y su homólogo en Argentina, Alberto Fernández, en el afán de *“seguir avanzando para desarrollar ciencia y tecnología”* de manera conjunta para el beneficio de sus naciones. *“Este acuerdo encamina los objetivos de Bolivia que pronto incursionará en la aplicación de la tecnología nuclear para el fortalecimiento de la producción agrícola, ya que uno de los objetivos del Gobierno nacional es potenciar el agro para incrementar la producción y así consolidar la soberanía alimentaria”*, aseguró.

LABORATORIO DE SERVICIOS NUCLEARES DE LA ABEN



Fig. 1 Laboratorio de Servicios Nucleares. Foto: ABEN

El laboratorio de Servicios Nucleares de la ABEN se encuentra en la ciudad de Viacha y ofrece los siguientes servicios en:

1. Laboratorio de Dosimetría Personal y calibración de monitores de radiación

Permite que los usuarios desempeñen una adecuada vigilancia radiológica del personal ocupacionalmente expuesto. Además, el servicio cuenta con la Certificación de Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes - Universidad Federal de Pernambuco LMRI-DEN/UFPE de Brasil, reconocido por el OIEA como Laboratorio Secundario de calibración Dosimétrica.

Los servicios que ofrece son:

- Servicio de Calibración de Monitores de Radiación
- Servicio de Análisis Radiométrico
- Servicio de Dosimetría

- Servicio de Dosimetría Personal y Ambiental Termoluminiscente (TLD)

2. Laboratorio de química analítica y ambiental

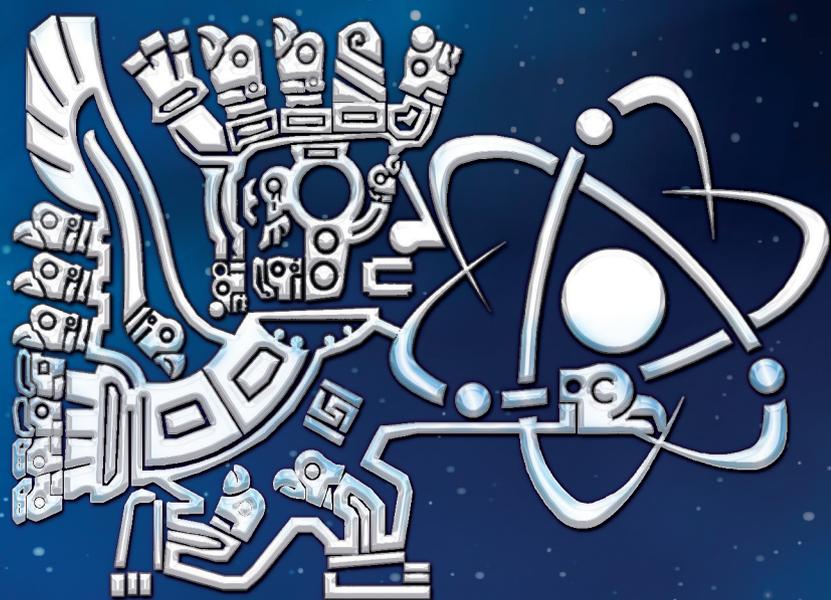
Con más de 35 años de experiencia, el laboratorio ofrece servicios de análisis y realiza proyectos de investigación por medio de la aplicación de técnicas analíticas convencionales y nucleares en la evaluación, protección y prevención de problemas ambientales. Además, es miembro de la Red Mundial de Laboratorios de Suelo (GLOSOLAN) y de la Red de Laboratorios de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Los servicios que ofrece son:

- Técnicas de Colorimetría Volumétrica, Gravimetría, Espectrofotometría, Potenciometría, Digestión de muestras en sistema abierto y cerrado, Espectrometría de Absorción Molecular UV-VIS, Espectrometría de Absorción Atómica (FAAS), Absorción electrotérmica (GFAAS), Generación de Hidruros (HGAAS), Fluorescencia de rayos X, Espectrometría Gamma, Espectrometría Láser, Microbiología por filtración de membrana, Extracción criogénica.
- Servicios de Análisis de Aguas
- Servicios de Análisis de Suelos
- Servicios de Análisis Orgánico (vegetal, fertilizante y abono entre otros)

Para solicitar los servicios del laboratorio de servicios nucleares favor de revisar en la página institucional de la ABEN www.aben.gov.bo

P R O Y E C T O S



“BOLIVIANAMENTE”

REVISTA
CIENTÍFICA
NUCLEAR



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

SECCIÓN 5. PROYECTOS

PROYECTO BOL 7005

Desarrollo de la gestión integral de los recursos hídricos en la provincia Sud Lípez, empleando hidrología isotópica.

Contraparte: Gabriela Patricia Flores Avilés

Página..... 91

PROYECTO RLA 5077

Mejora de la eficiencia del uso del agua asociada a estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático en la agricultura.

Contraparte: Maya Teresa Pacheco Machicado.

Página..... 95

PROYECTO RLA 5078

Mejora de los cultivos mediante la integración de genotipos de cultivo eficientes en cuanto a nutrientes, biofertilizantes y gestión de nutrientes para mejora de la seguridad alimentaria.

Contraparte: Maya Teresa Pacheco Machicado

Página..... 100



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



PROYECTO BOL 7005: DESARROLLO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA PROVINCIA SUD LÍPEZ, EMPLEANDO HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

Responsable del proyecto: Gabriela P. Flores Avilés¹

Dirección de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico (DPIDT)

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN)

¹Correo electrónico: gflores@aben.gob.bo



Figura 1. Laguna Verde, provincia Sud Lípez, Bolivia. **Fuente:** La República.

OBJETIVO

Contribuir al aprovechamiento racional y sustentable de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en el Suroeste de Bolivia (Potosí, provincia Sud Lípez), a través de la caracterización hidrogeológica y aplicación de las técnicas isotópicas e hidroquímicas.

La escasez de agua dulce es un problema latente a nivel mundial, particularmente en regiones áridas y semiáridas donde los recursos hídricos se ven amenazados por el cambio climático y el crecimiento continuo de la población. Este es el caso de la Laguna Colorada,

importante fuente de suministro de aguas subterráneas de la región sud del Altiplano boliviano. Investigaciones previas a nivel local y regional han desarrollado estudios sobre las características geotérmicas de la Laguna Colorada; sin embargo, todavía se tiene comprensión limitada sobre la dirección, magnitud y procesos geológicos de los flujos subterráneos, así como los límites del sistema acuífero y sus mecanismos de recarga y descarga. Por lo que resulta importante el desarrollo de un modelo hidrogeológico que controlan la cantidad de las aguas subterráneas en esta región.

PRINCIPALES RESULTADOS

En el marco del proyecto de 7005, la ABEN realizó desde el 2020 la gestión de adquisición de equipos, capacitación de personal técnico y campañas científicas, como se detalla a continuación:

Gestión para la adquisición de equipos y capacitación de personal técnico

En las gestiones 2020 y 2021, la ABEN gestionó por medio del OIEA la adquisición de equipos especializados, además de la capacitación del personal técnico de la ABEN para el laboratorio de hidrología isotópica que se encuentra en las instalaciones del laboratorio de Servicios Nucleares de la ciudad de Viacha. Los equipos adquiridos son: Equipo RAD 7 DURRIDGE y un kit de materiales de laboratorio para el desarrollo de estudios analíticos de radioisótopos de Radón en aire, suelo y agua (RAD Aqua) y Torio, ver Figura 2.



Figura 2. Montaje del equipo RAD-7 DURRIDGE, realizado por el equipo técnico de la ABEN. **Fuente:** ABEN

Un equipo Espectrómetro Láser PICARRO y materiales de laboratorio para proporcionar estudios analíticos de isótopos estables de agua oxígeno-18 y deuterio (18O y 2H), además de un kit de laboratorio de material de referencia y dispensadores con accesorios para el análisis de isótopos estables en aguas naturales. Además de material de laboratorio para muestreo de Carbono-14 para uso exclusivo para Campañas de Muestreo.



Figura 3. Componente del Espectrómetro Láser PICARRO. **Fuente:** ABEN



Figura 4. Kit de reactivos de laboratorio para las campañas de muestreo. **Fuente:** ABEN

Campañas científicas para el levantamiento de datos científicos de los recursos hídricos

Misión Científica de Campo, efectuada en agosto del 2021, liderada por investigadores de la ABEN y un equipo multidisciplinario de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) y la Universidad Autónoma Tomas Frías (UATF). Esta misión realizó mediciones in-situ y colectaron muestras en ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos localizados en la microcuenca de la Laguna Colorada para que con la ayuda de las aplicaciones de la energía nuclear los científicos puedan comprender los componentes del ciclo del hidrológico, con el fin de evaluar la cantidad, la calidad y la sostenibilidad del agua en esa región. De este modo aportar datos para la gestión de los recursos hídricos según los planes de desarrollo del Estado.



Figura 5. Misión Científica de Campo 2021: Mediciones in-situ en un piezómetro de monitoreo "Zona Piloto Laguna Colorada"



Figura 6. Equipo de investigadores de la ABEN y equipo multidisciplinario de UMSA y la UATF. **Fuente:** ABEN

En mayo de 2022 se llevó a cabo la misión científica de "Prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en zonas transfronterizas piloto de las tres regiones hidrográficas de Bolivia, mediante la aplicación de

la hidrología isotópica” en la ciudad de Cobija, del departamento de Pando. En la figura 7 se puede apreciar la participación de varias instituciones como la Unidad de Gestión de Riesgos del Gobierno Autónomo Departamental de Pando (GADP), el Gobierno Autónomo Municipal de Cobija (GAMC), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI - Regional Pando) y la Universidad Amazónica de Pando (UAP).

Actualmente, el equipo técnico de la ABEN está haciendo el tratamiento e interpretación de datos científicos de la Misión Científica 2021 a través de modelos matemáticos que permitirá profundizar el conocimiento científico sobre el funcionamiento del Sistema Acuífero de la Laguna Colorada, además están elaborando un documento que resume la evaluación de los recursos hídricos realizada en el área de estudio utilizando técnicas isotópicas para comprender los aspectos dinámicos hidrogeológicos /tasas de recarga del acuífero, conexiones de aguas subterráneas poco profundas y velocidades de flujo de agua.



Figura 7. Investigador de la ABEN junto con los técnicos del GADP y el grupo de científicos de la UAP realizando mediciones *in situ* de fuentes de agua. **Fuente:** ABEN

PROYECTO RLA 5077: MEJORA EN LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA ASOCIADA A ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AGRICULTURA

Responsable del proyecto: Teresa Maya Pacheco Machicado¹

Dirección de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico (DPIDT)
Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN)

¹Correo electrónico: tpacheco@aben.gob.bo



Figura 1. Campo de cultivo afectado por el cambio climático **Foto:** Gobierno de México.

OBJETIVO

El proyecto Regional RLA 5077 cuenta con la participación del Estado Plurinacional de Bolivia y de países de América Latina y el Caribe. El objetivo del proyecto es mejorar la producción agrícola de alimentos haciendo un uso eficiente del agua y trabajar de acuerdo con las metas establecidas para la región como parte del Perfil Estratégico Regional (PER) para los períodos 2016-2021 y contribuir a la gestión apropiada del agua.

El proyecto regional RLA 5077 reúne conocimientos de diferentes campos como el riego, el uso de cultivos de cobertura, técnicas isotópicas, modelado y equipos complejos, entre otros, por lo que la ABEN junto con otros países de la Región y el OIEA gestionó la capacitación de personal técnico y la adquisición de equipamiento técnico para ayudar a abordar la importancia de la eficiencia del uso del agua desde el punto de vista de la gestión del agua, el uso eficiente de fertilizantes (minimizando las pérdidas) y la mejorando del rendimiento. El proyecto RLA 5077 permitirá el intercambio de técnicas y capacitación que aportará un gran beneficio a la región e impulsará el desarrollo de áreas de investigación en el Estado Plurinacional de Bolivia sobre las aplicaciones de la tecnología nuclear respecto a técnicas isotópicas, rastreo de la efectividad de los fertilizantes y la evapotranspiración de los cultivos.

PRINCIPALES RESULTADOS

La ABEN forma parte del proyecto regional RLA 5077 desde el 2018 y por medio del OIEA gestionó cursos de capacitación para el personal técnico del laboratorio de Servicios Nucleares de Viacha, además de la adquisición de equipos especializados para el equipamiento del Laboratorio. A continuación, se detalla las actividades realizadas en el marco del proyecto RLA 5077:

1. Gestión para la capacitación de personal técnico especializado.

- Curso de capacitación regional en el uso de isótopos estables (^{18}O y ^2H) para la evaluación del uso eficiente del agua. Curso efectuado del 19 al 23 de noviembre de 2018.
- Curso de capacitación regional en el Uso del Modelo AquaCrop para mejorar el uso eficiente del agua y la Productividad de Corte. Curso realizado del 11 al 16 de marzo de 2019.
- Curso de capacitación nacional en modalidad virtual en “Fisiología de los cultivos del agua del estrés hídrico y la gestión de la sequía de los experimentos realizados en el campo y los invernaderos” y el curso de “Teledetección del uso eficiente de agua”. Efectuado del 25 de octubre al 5 de noviembre de 2021.
- Capacitación virtual del curso para “Implementación de la técnica de extracción criogénica en matrices sólidas para el análisis de isótopos estables en agua y su aplicación en la mejora de la eficiencia del agua en los cultivos” efectuado del 11 al 21 de abril de 2022.



Figura 2. Primera reunión de coordinación del proyecto RLA 5077. **Foto:** Marilyn Agüero

2. Gestión para la adquisición de equipo técnico

En el marco de la mejora de los medios de subsistencia mediante una mayor eficacia en el uso del agua vinculada a estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático en la agricultura, la ABEN gestionó la estación meteorológica con accesorios: medidor de humedad y tubos de acceso. Además de un sistema criogénico de extracción de agua. Ver figura 3.



Figura 3. Sistema criogénico de extracción de agua. **Foto:** ABEN

Ensayos realizados en los previos del Laboratorio de Viacha

En las instalaciones de los laboratorios de Servicios Nucleares de la ABEN en la ciudad de Viacha, El Alto, se llevó a cabo los ensayos en cultivos de papa y se implementó el equipamiento para los experimentos del uso eficiente de agua. Las muestras de suelo y vegetales son preparadas para medir su proporción de agua en el Sistema criogénico de extracción de agua de la figura 3 para realizar el análisis de ^{18}O y ^2H .



Figura 4 y Figura 5. Siembra de semillas de papa en los previos de las instalaciones de los laboratorios de Servicios Nucleares de la ABEN. **Foto:** ABEN



Figura 6. Crecimiento de las semillas de papa.
Foto: ABEN



Figura 7. Toma de muestras de agua de lluvia por medio del colector por precipitación. **Foto:** ABEN



Figura 8. Medición de la humedad del suelo.
Foto: ABEN



Figura 9. Toma de temperatura del suelo.
Foto: ABEN



Figura 10. Toma de muestra de suelo. **Foto:** ABEN



Figura 11. Toma de muestra vegetal. **Foto:** ABEN

PROYECTO RLA 5078: MEJORA DE LOS CULTIVOS MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE GENOTIPOS DE CULTIVOS EFICIENTES EN CUANTO A NUTRIENTES, BIOFERTILIZANTES Y GESTIÓN DE NUTRIENTES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

Responsable del proyecto: Teresa Maya Pacheco Machicado*

Dirección de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico (DPIDT)

Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN)

*Correo electrónico: tpacheco@aben.gob.bo



Figura 1. Semillas de trigo que fueron sometidas a investigación para mejoramiento de su productividad

Foto: Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT)

OBJETIVO

El objetivo del proyecto regional RLA 5078 es mejorar la producción agrícola mediante el uso de genotipos eficientes, además de las prácticas de manejo del suelo a través de un uso eficiente de fertilizantes, agua y microorganismos. El proyecto es una prioridad en el Plan Estratégico Regional para América Latina y el Caribe, ya que en la región existe una gran dependencia de los fertilizantes importados que solo están disponibles para los agricultores a altos costos.

La aplicación de fertilizantes para fortalecer la agricultura tiene múltiples ventajas; sin embargo, el abuso de su aplicación conlleva consecuencias adversas. Por ejemplo, si un fertilizante se aplica de forma incorrecta genera el crecimiento de malas hierbas, el ataque de plagas y daño al ambiente. La consecuencia más grave es que puede empobrecer el suelo y disminuir su fertilidad.

En ese sentido, para el desarrollo del proyecto RLA 5078 se elaboró el Plan de Trabajo donde se estableció la línea base de los países participantes en el proyecto y se identificaron las necesidades de comunicación, y se acordó realizar iniciativas nacionales e internacionales de divulgación. Finalmente, se acordó la realización de cuatro cursos de capacitación regional.

PRINCIPALES RESULTADOS

La ABEN forma parte del proyecto regional RLA 5078 que inició el 2018 y por medio del OIEA gestionó inicialmente cursos de capacitación y paralelamente la adquisición de equipos para así aplicar el conocimiento en campo.

Gestión para la capacitación de personal técnico especializado.

- Curso avanzado de capacitación regional en el Uso de N-15 para la evaluación de la eficiencia del fertilizante nitrogenado y de agentes de crecimiento de plantas, que se efectuó del 26 al 30 de agosto de 2018.
- Curso de capacitación regional para la gestión de biofertilizantes para mejorar la eficiencia de los nutrientes y la productividad de los cultivos en condiciones de campo, que se llevó a cabo del 15 al 19 de octubre de 2018.
- Curso de capacitación regional en N-15 de técnicas para mejorar la eficiencia de los nutrientes y la productividad de los cultivos en condiciones de campo - básicas, que se realizó del 22 al 26 de octubre de 2018.

Gestión para la adquisición de equipos y materiales de laboratorio.

En el marco de las mejoras de las prácticas en el uso de fertilizantes en cultivos mediante el uso de genotipos eficientes, macronutrientes y bacterias promotoras del crecimiento de las plantas, la ABEN en coordinación del OIEA gestionó un Kit de análisis de suelos Visocolor, un GPS-GPSMAP 66s con soporte de red multisatélite, una cámara de secado ED 260 Avantgarde Line y un Medidor de clorofila modelo CM-A.M6

Ensayos realizados en los previos del Laboratorio de Viacha

En las instalaciones de los laboratorios de Servicios Nucleares de la ABEN en la Ciudad de Viacha, El Alto, se llevó a cabo los ensayos de fertilizantes minerales de Nitrógeno 15 (N-15) en semillas de trigo Tepoca T89 (*Triticum aestivum* L.) y una selección de trigo mutante (Línea 3, generación M5). Los resultados indicaron que la línea mutante de trigo tiene mejor comportamiento frente al testigo.



Figura 2. Sembrado de las semillas de trigo
Fuente: ABEN



Figura 3. Aplicación de fertilizante a la siembra de trigo. **Fuente:** ABEN



Figura 4. Cultivos de trigo establecido en diferentes tratamientos. **Fuente:** ABEN



Figura 5. Equipo medidor de clorofila. **Fuente:** ABEN

Los resultados de las primeras pruebas indicaron que la línea mutante de trigo tiene mejor comportamiento frente al testigo, además se hicieron pruebas con el fertilizante del radioisótopo de nitrógeno 15 (N-15) en las semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.).

Por otro lado, se realizaron las gestiones para llevar a cabo el análisis de nutrientes en las siembras del trigo mutante en laboratorios del extranjero, pero debido a la pandemia del Covid-19 de las gestiones 2020 y 2021 no se obtuvieron las autorizaciones correspondientes para el envío. Sin embargo, en las instalaciones del Laboratorio de Servicios Nucleares se reactivará el proyecto de mejoramiento de semillas en colaboración del Complejo

Multipropósito de Irradiación (CMI), que es una de las instalaciones del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN).





ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

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