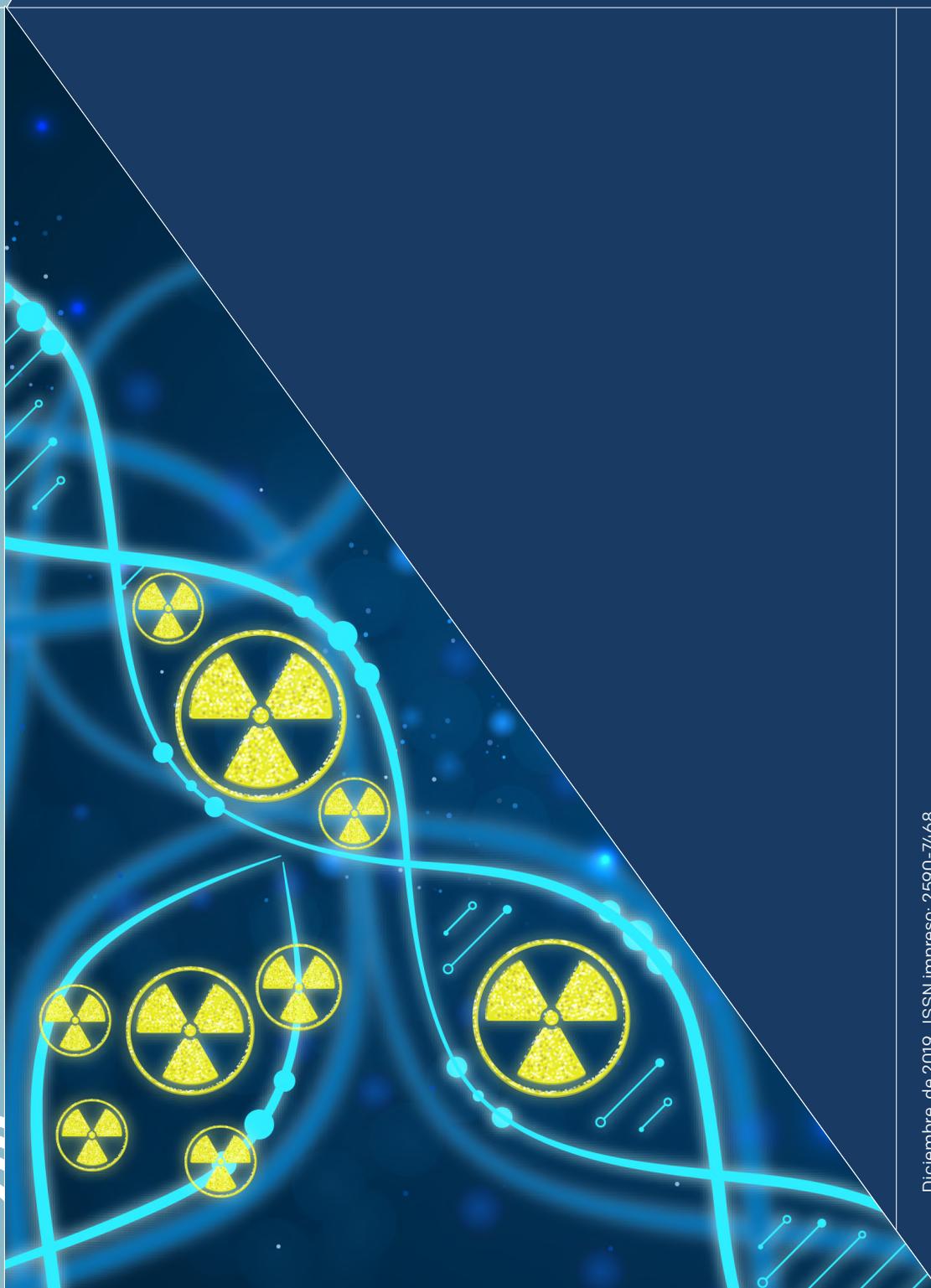


REVISTA

3

IAN

INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES



Diciembre de 2019 ISSN impreso: 2590-7468



INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares
Núm. 3, 2019
Periodicidad anual
ISSN impreso: 2590-7468
ISSN digital: 2711-1326
© Servicio Geológico Colombiano

Oscar Paredes Zapata
Director General

Hernán Olaya Dávila
Editor Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares
Director de Asuntos Nucleares

Margarita Bravo Guerrero
Directora de Gestión de Información

Marta Lucia Calvache Velasco
Directora de Geoamenazas

Gloria Prieto Rincón
Directora de Recursos Minerales

Mario Andrés Cuéllar
Director de Geociencias Básicas

Hernando Camargo
Director de Laboratorios

Humberto Andrés Fuenzalida
Director de Hidrocarburos

COMITÉ EDITORIAL INSTITUCIONAL

Virgilio Amarís
Presidente

Integrantes
Viviana Dionicio
Julián Escallón
Armando Espinosa
Juan Guillermo Ramírez
Teresa Duque

COMITÉ EDITORIAL Y CIENTÍFICO Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares

Ovidio Almanza
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

David Leonardo Alonso
Instituto Nacional de Salud
Bogotá – Colombia

Patricia Bedregal
Instituto Peruano de Energía Nuclear
Lima – Perú

Mauricio Bermúdez
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso – Colombia

Héctor Fabio Castro Serrato
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

Niurka González Rodríguez
Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones
La Habana – Cuba

Charles Grant
University of the West Indies
Kingston – Jamaica

Florencia Malamud
Universidad Nacional de San Martín
Buenos Aires – Argentina

Segundo Agustín Martínez Ovalle
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja – Colombia

Victor Manuel Pabón
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá – Colombia

Guillermo Parrado Lozano
Servicio Geológico Colombiano
Bogotá – Colombia

Rita Plá
Centro Atómico Ezeiza
Buenos Aires – Argentina

José Antonio Sarta
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá – Colombia

Luz Stella Veloza
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

Corrección de estilo
Édgar Ordóñez

Diseño y diagramación
Diana Paola Abadía

Editora general
Carolina Hernández

Imagen de carátula
Instituto Nacional de Salud

© Servicio Geológico Colombiano
Diciembre de 2019

Contenido

3	Editorial
5	Resultados e interpretación al aplicar la técnica de matriz de riesgo en braquiterapia Results and interpretation for the application of the risk matrix method in brachytherapy Diana Carolina Herrera, Mauricio Arciniegas Álvarez y José Alberto Gómez
12	Aplicación de protocolos de control de calidad en equipos de fluoroscopia en las ciudades de Tunja (Boyacá) y Bogotá Application of quality control protocols for fluoroscopy equipment in the cities of Tunja (Boyacá) and Bogotá Mercy Natalia González Sánchez y Hernán Olaya Dávila
28	Simulación de la reacción de captura neutrónica por gadolinio por medio de GEANT4 Simulation of the gadolinium neutron capture reaction using GEANT4 Diego Alexander Téllez, Robinson Steven Medina, José A. Sarta, Edwin Munévar y José Alfonso Leyva
36	Temperature and heat flux calculations for the maximum power channel of the TRIGA IAN-R1 research reactor Cálculos de temperatura y flujo de calor para el canal de máxima potencia del reactor de investigación TRIGA IAN-R1 José Antonio Sarta y Luis Álvaro Castiblanco
40	Desempeño satisfactorio de la Planta de Irradiación Gamma en el ensayo de aptitud, programa INTERLAB N-DO-02 Satisfactory performance of the Gamma Irradiation Plant on program N-DO-02 of the INTERLAB proficiency test Jormagn Israel Abril Murillo, Giovanni Andrés Vela Guzmán y Azarías de Jesús Moreno Machado
49	Una aproximación a la implementación de los estudios de futuro en el Servicio Geológico Colombiano An approach to the implementation of future studies in the Colombian Geological Survey Guillermo Parrado Lozano
69	Política editorial

El 20 de enero del año 2020 se conmemorarán 55 años de la inauguración, durante la presidencia de Guillermo León Valencia, de nuestro reactor de investigación IAN-R1, que se constituyó en el símbolo del comienzo de la era nuclear en Colombia. Desde entonces han pasado alrededor de tres generaciones de profesionales especializados en las áreas de la física, química, ingeniería nuclear, ingeniería química, ingeniería electrónica e ingeniería de sistemas. En la última década se han incorporado otras áreas afines, como geología, ingeniería minera, ingeniería industrial e ingeniería ambiental. La participación de este gran espectro de disciplinas ha dinamizado la investigación y ampliado los horizontes del uso pacífico de los materiales nucleares y radiactivos en el país.

Muchos de los que trabajamos en la investigación y aplicaciones de materiales nucleares y radiactivos hemos ingresado en el campo motivados por múltiples circunstancias de la vida, sea por la información de familiares, amigos de la universidad, prensa o radio, entre otras. Particularmente, cuando era niño me enteré de que existía un Instituto de Asuntos Nucleares por mi vecino Rafael Müller, quien fue técnico del reactor y conversaba con los chicos de la cuadra de estos temas de una forma tan deslumbrante como se difundían las misiones de la NASA.

Hoy en día la información que llega al público sobre las aplicaciones nucleares y radiactivas es abundante y diversa, lo que ha permitido que nos enteremos de este tema por los tratamientos médicos con radiaciones ionizantes aplicados a familiares y conocidos, la divulgación de la página web del Servicio Geológico Colombiano, las noticias de prensa y radio relacionadas con tráfico ilícito de materiales radiactivos, los accidentes de Chernobyl y Fukushima, que llamaron la atención sobre las operaciones del reactor nuclear IAN-R1 en Colombia, la divulgación de las actividades de la Dirección Técnica de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano en el Ministerio de Minas y Energía, las visitas guiadas de los colegios a las instalaciones nucleares y radiactivas de la sede del CAN y el reciente Simposio Internacional de Aplicaciones Nucleares, celebrado en la ciudad de Bogotá, han hecho posible que más personas conozcan nuestro campo de acción y nuestra misión, lo que fomenta que las nuevas generaciones sigan nuestros pasos y sean los próximos líderes de las ciencias nucleares en nuestro país.

Desde la inauguración del reactor nuclear han ocurrido muchos cambios positivos en las aplicaciones nucleares y radiactivas en el país. Entre los más destacados figuran la consolidación de una autoridad reguladora sólida ejercida por el Ministerio de Minas y Energía con el Servicio Geológico Colombiano como entidad delegada, la implementación de nuevos laboratorios de activación neutrónica y neutrones retardados, la ampliación de los servicios de radiometría ambiental y la consolidación del centro de geocronología e isotopía más desarrollado de Suramérica, además de la acreditación de ensayos de los Laboratorios de Datación de U/Pb, Laboratorios de Análisis de Isótopos Estables en muestras líquidas/

sólidas y procedimientos de calibración del Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica, sin precedentes en la institución. Estos grandes logros han sido posibles gracias a la gestión institucional para acceder a los recursos de regalías y al desarrollo de proyectos aprobados por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

El hecho de que la *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, sucesora de la *Revista Nucleares* del Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, publique este tercer número en consonancia con las políticas de ciencia y tecnología del Servicio Geológico Colombiano y con el reconocimiento de Colciencias de nuestro grupo de investigación, nos permite afianzarnos y proyectarnos aún más hacia la investigación en las ciencias nucleares y enfocarnos en la publicación de nuevos artículos producto de los proyectos de investigación que llevan a cabo las universidades y los centros de investigación, además de los proyectos que se generan en nuestra institución. Para nuestro próximo número extenderemos a nuestros pares de otros países la invitación a participar, para así posicionarnos como un referente nacional e internacional.

El presente número contiene seis artículos sobre temas relevantes en la investigación y aplicación de los procesos nucleares y radiactivos, como la simulación de procesos ocurridos en el reactor nuclear, las evaluaciones de seguridad en la práctica de radioterapia, la simulación de reacciones nucleares de utilidad en tratamientos contra el cáncer, la calidad de las imágenes diagnósticas en equipos de fluoroscopia y el papel que podría desempeñar el Servicio Geológico Colombiano en el desarrollo del país.

Finalmente, es importante resaltar el excelente y arduo trabajo realizado por el Comité Editorial del Servicio Geológico Colombiano, gracias al cual, a partir de este año, contamos con una política editorial oficializada que contribuye a mejorar el proceso de convocatoria, difusión y evaluación por pares, para garantizar la calidad científica y técnica de los artículos de la revista.

Hernán Olaya Dávila

DIRECTOR TÉCNICO DE ASUNTOS NUCLEARES
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Resultados e interpretación al aplicar la técnica de matriz de riesgo en braquiterapia

Results and interpretation for the application of the risk matrix method in brachytherapy

Diana Carolina Herrera¹, Mauricio Arciniegas Álvarez², José Alberto Gómez³

Citación: D. C. Herrera, M. Arciniegas y J. A. Gómez, "Resultados e interpretación al aplicar la técnica de matriz de riesgo en braquiterapia", *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 5-11, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.506>

Recibido: 30 de septiembre de 2019

Aceptado: 23 de diciembre de 2019

Publicado en línea: 30 de diciembre de 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.506>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos al aplicar la técnica de matriz de riesgo, con la aplicación SEVRRRA, en braquiterapia, y además las precauciones que se deben tomar en su aplicación y en la interpretación de los resultados. Para este fin se realizó el análisis de riesgo de una instalación de braquiterapia de alta tasa de dosis utilizando el software SEVRRRA y con una herramienta desarrollada en base en el método de matriz de riesgo en una hoja de cálculo. Los resultados del segundo cribado mostraron discrepancias entre el perfil de riesgo obtenido con la aplicación SEVRRRA y la herramienta propia. El porcentaje de sucesos iniciadores con riesgo alto con la aplicación SEVRRRA fue de 6%, y con la herramienta propia de 14%. Luego de un análisis de cada suceso se observó que las discrepancias se deben a que la ponderación de la robustez de las barreras de seguridad en SEVRRRA es inconsistente con las definidas en la técnica de matriz de riesgo. Estos resultados tienen profundas implicaciones en función de la aceptabilidad del riesgo planteada en la metodología. Adicionalmente, se encontró que la metodología de matriz de riesgo no tiene en cuenta los riesgos inherentes a la práctica. A pesar de las inconsistencias observadas, se reconoce el potencial de la herramienta SEVRRRA para la evaluación de riesgo de instalaciones radiactivas, por ser de fácil uso; sin embargo, se recomienda la revisión de la robustez de algunas barreras, con el fin de obtener el perfil de riesgo de acuerdo con la metodología. De esta forma en base a los resultados, se podrán priorizar las medidas que deben adoptarse para garantizar la seguridad radiológica de las instalaciones.

Palabras clave: evaluación del riesgo, braquiterapia, seguridad radiológica.

ABSTRACT

The objective of this study is to present the results obtained with the risk matrix method using the SEVRRRA application in brachytherapy and the precautions that should be taken when applying this approach and interpreting the results. Risk analysis was performed for a high-dose-rate brachytherapy facility using the SEVRRRA software and a tool developed based on the risk matrix method in a spreadsheet. The results of the second screening showed discrepancies between the risk profiles obtained with the SEVRRRA application and with the custom tool. The percentages of high-risk initiating events obtained with the

¹ Universidad Nacional Abierta y a Distancia

² Hospital Universitario San Ignacio

³ Radsolutions SAS

Email de correspondencia: diana.herrera@unad.edu.co

SEVRRRA application and the custom tool were 6% and 14%, respectively. After analysis of each event, it was observed that discrepancies occur because the weighting of the robustness of the safety barriers in SEVRRRA is inconsistent with that defined in the risk matrix method. These results have profound implications regarding the risk acceptability set in the method. Additionally, it was found that the risk matrix method does not consider the risks inherent to practice. Despite the observed inconsistencies, the potential of the SEVRRRA application for risk assessment of radiotherapy facilities is recognized, given that this application is easy to use; however, review of the robustness of certain barriers to obtain the risk profile according to the risk matrix method is recommended. Based on the results, it will be possible to prioritize measures that must be adopted to guarantee the radiological safety of radiotherapy facilities.

Keywords: risk assessment, brachytherapy, radiological safety

1. INTRODUCCIÓN

La braquiterapia de alta tasa de dosis (braquiterapia HDR) se realiza con radiaciones ionizantes, de modo que el tejido del paciente es irradiado directamente con tasas de dosis > 12 Gy/h [1]. La aplicación de esta técnica implica una serie de etapas en las que participan distintos profesionales, lo que incrementa el riesgo de tener un incidente o accidente. Por esta razón, las normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación (BSS) [2] disponen que en este tipo de prácticas se realice un análisis de riesgo, consistente en investigar los riesgos de los posibles eventos que impliquen potenciales exposiciones, y en concordancia con los resultados, se adopten medidas para prevenirlos.

Teniendo en cuenta este requerimiento, en Colombia, a partir de la vigencia de la Resolución 90874 del 2014 del Ministerio de Minas y Energía [3], es requisito realizar el análisis de riesgo en instalaciones de braquiterapia HDR, con el fin de obtener la autorización para el manejo de fuentes radiactivas. Desde que entró en vigencia esta reglamentación, el Organismo Internacional de Energía Atómica ha impartido capacitaciones al personal del ente regulador y al de las instalaciones radiactivas. En las capacitaciones se recomienda utilizar la metodología denominada *matriz de riesgo* para realizar la evaluación de riesgo de las instalaciones radiactivas.

El método de matriz de riesgo surgió en el marco del Programa de Seguridad Radiológica, Nuclear y Física en Iberoamérica, de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) [3], en respuesta a la necesidad de prevenir las exposiciones potenciales en radioterapia. Este método plan-

tea un análisis de riesgo sistemático y proactivo que permite determinar el perfil de riesgo de una instalación en cada una de las etapas de operación, considerando no solo eventos que hayan ocurrido en el pasado, sino también los que puedan ocurrir durante la operación normal de los equipos. La técnica de matriz de riesgo, en contraste con el método de modo y efecto de fallas (AMEF o FMEA, por sus siglas en inglés) [5-6], o la evaluación probabilística de seguridad [6-8], presenta una metodología de fácil uso e interpretación de resultados.

Debido al gran número de sucesos iniciadores (SI) asociados a las prácticas de radioterapia, por encima de 100 SI para braquiterapia HDR, se desarrolló la herramienta informática SEVRRRA (System of Evaluation of Risk in Radiotherapy) [9]; con el objetivo de facilitar el análisis de riesgo utilizando la técnica de matriz de riesgo. La herramienta SEVRRRA se ha aplicado a diferentes instalaciones de radioterapia, en especial, instalaciones de braquiterapia HDR [10, 11]. El análisis de riesgo mediante esta herramienta ha permitido obtener el perfil de riesgo de varias instalaciones de braquiterapia, y en función de la aceptabilidad de riesgo de la metodología, las instalaciones han podido priorizar las medidas que deben adoptarse con el objetivo de disminuir el riesgo a niveles aceptables.

En este trabajo se presenta el análisis de riesgo, con la metodología de matriz de riesgo, de una instalación de braquiterapia HDR. Dicho análisis se realizó utilizando la aplicación SEVRRRA y una aplicación desarrollada en una hoja de cálculo. Ambas aplicaciones se basan en el método de matriz de riesgo [3]. Se presenta el perfil de riesgo obtenido con cada aplicación y se analizan las diferencias observadas. Adicionalmente, se discute la aceptabilidad del riesgo planteada en la metodología de matriz riesgo con base en los resultados obtenidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El método de matriz de riesgo [4] es semicuantitativo, y con él se determina el perfil de riesgo de una práctica mediante el estudio del nivel de riesgo de una lista de situaciones potenciales que son activadas por eventos iniciadores asociados a cada etapa de operación de la práctica. La lista de eventos iniciadores para braquiterapia se ha realizado con base en publicaciones de accidentes o incidentes ocurridos en el pasado [12], e identificando qué puede fallar en cada una de las etapas de operación.

Cada situación potencial consiste en un evento iniciador que tiene una frecuencia de ocurrencia asociada (f). El evento iniciador se produce por el fallo de las funciones de seguridad previstas en la práctica. Las funciones de seguridad pueden ser errores humanos o fallos de equipo que tienen una probabilidad de fallo asociada (P). El fallo de las barreras conduce a que pacientes, trabajadores relacionados con los equipos, personal o público resulten expuestos a radiación. Dependiendo de la severidad de la exposición y del tipo de personal implicado el suceso iniciador tendrá un nivel de consecuencia asociado (C).

El riesgo (R) se determina combinando tres variables: frecuencia del evento iniciador (f), probabilidad de fallo de las funciones de seguridad (P) y el nivel de consecuencia (C). Este último se determina planteando un escenario de exposición conservador donde todas las funciones de seguridad han fallado. En cada variable de la ecuación de riesgo ($R = f \times P \times C$) se tienen cuatro niveles: muy alto (MA), alto (A), medio (M) y bajo (B). La combinación de las tres variables se realiza mediante la denominada matriz de riesgo, que se presenta en la referencia [4]; de esta forma se determina el nivel de riesgo de cada evento iniciador.

El método plantea dos cribados. En el primero se tienen en cuenta el número de reductores de frecuencias y barreras; de esta forma, el nivel de riesgo de cada suceso iniciador es moderadamente conservador. Este primer análisis permite identificar las secuencias de mayor riesgo, lo que posibilita realizar un análisis detallado de esas secuencias. En el segundo cribado, aplicado a las secuencias con riesgo alto, se tiene en cuenta la robustez de las barreras y el número de reductores de frecuencia, lo que conduce bajo ciertas condiciones a realizar una reclasificación de la probabilidad de fallo (P) y de la frecuencia del suceso iniciador (f) y por lo tanto a reducir el nivel de riesgo de ciertas secuencias.

Teniendo en cuenta el resultado del perfil de riesgo obtenido luego de aplicado el segundo cribado, la metodología plantea criterios de aceptabilidad de riesgo y acciones correctoras para cada caso. Según la aceptabilidad de riesgo, si dentro del resultado se obtienen secuencias con riesgo muy alto (MA) se requiere paralizar la práctica y tomar medidas para reducir el riesgo antes de retomarla. En las secuencias con riesgo alto (A) se requieren tomar medidas inmediatas para reducir el riesgo cuando el suceso conlleva a consecuencias altas (A) o muy altas (MA). En las secuencias con consecuencias medias y bajas se requieren medidas a mediano plazo. En los demás casos, el nivel de riesgo es tolerable (riesgo medio) o despreciable (riesgo bajo), y las medidas que se tomen dependen del criterio costo/beneficio.

2.1. Aplicación del método de matriz de riesgo a una instalación de braquiterapia HDR

En base a la metodología de matriz de riesgo se realizó el análisis de riesgo con el software SEVRRRA y con una aplicación desarrollada en una hoja de cálculo. En ambos casos se analizaron los mismos SI y se contó con las mismas funciones de seguridad. Se debe destacar que se adicionaron nuevas funciones de seguridad propias de la instalación, tanto para la aplicación SEVRRRA como para la aplicación desarrollada.

Para determinar el nivel de riesgo de cada suceso iniciador con el método desarrollado en la hoja de cálculo, se siguió una metodología para asignar el nivel de consecuencia. La asignación de este nivel se realiza con el planteamiento de un escenario conservador —así se puede realizar la estimación de dosis de cada suceso iniciador— y con base en una escala definida para trabajadores ocupacionalmente expuestos y personas del público se asigna el nivel de consecuencia. Esta metodología se describe en detalle en el trabajo [13].

La descripción de los recursos de la instalación de braquiterapia HDR estudiada en este trabajo (*BHDR-I*), se expone en la tabla 1. Se debe destacar que la carga de trabajo definida en la tabla 1 (1.560 pacientes por año y cuatro recambios de la fuente radiactiva) se tiene en cuenta para estimar el nivel de frecuencia de los sucesos iniciadores según como se indica en la técnica de matriz de riesgo [4]. El nombre de la instalación bajo estudio no se revela con el objetivo de reservar sus datos.

Tabla 1. Descripción de los recursos de la instalación de braquiterapia de alta tasa de dosis, denominada en este documento como *BHDR-I*.

Recurso humano	
a)	Un oficial de protección radiológica con nivel de cualificación de físico
b)	Un físico médico (adicional al OPR)
c)	Un médico especialista en radioterapia
d)	Una enfermera de braquiterapia
e)	Un tecnólogo en radioterapia
Recursos físicos	
a)	Un equipo de carga diferida automática
b)	La simulación de los pacientes se realiza usando un equipo de rayos X
c)	El servicio cuenta con una cámara de pozo para la verificación de la actividad de la fuente
d)	El servicio cuenta con sistema de planificación dosimétrica (TPS)
e)	La fuente es provista por una empresa de desarrollo exclusivo del modelo de fuente para el equipo de carga diferida
f)	El servicio de recambio lo realiza la empresa con representación exclusiva en el país
Carga de trabajo BHDR-I	
a)	Se realiza la atención de 1.560 pacientes por año
b)	Se realizan cuatro recambios de fuente por año

3. RESULTADOS

En la figura 1 se muestra el resultado del perfil de riesgo de la instalación de braquiterapia HDR BHDR-I, obtenido con la aplicación SEVRRRA en contraste con el obtenido con la aplicación propia. Como se puede observar, el perfil de riesgo es considerablemente diferente, excepto para SI con riesgo muy alto, donde para las dos aplicaciones se obtiene un 0% de sucesos. Sin embargo, el porcentaje de sucesos con riesgo alto es de 6% (5 sucesos) con la aplicación SEVRRRA, y con la aplicación propia, 14% (10 SI). El porcentaje de SI con riesgo medio es de 71% (56 SI) con SEVRRRA, y 70% (55 SI) con la aplicación propia. Finalmente, con riesgo bajo, para la aplicación SEVRRRA se obtiene un 23% (18 SI), en contraste con el 16% (13 SI) para la aplicación propia.

Para las etapas de operación con sucesos con riesgo alto se observa la distribución de los sucesos en la figura 2, para la aplicación SEVRRRA y la aplicación propia. En las etapas 1 y 2 (instalación inicial de los equipos y aceptación y puesta en servicio) no se obtienen sucesos de riesgo alto con la aplicación SEVRRRA; en contraste, con la aplicación propia se encuentra 1 suceso con riesgo alto para la etapa 1 (Instalación inicial de los equipos) y 5 sucesos con riesgo alto para la etapa 2 (aceptación y puesta en servicio).

Para determinar la causa de las discrepancias encontradas se realizó un estudio detallado del nivel de riesgo en todos los sucesos iniciadores, y se encontró que las diferencias se deben a que la robustez asignada a las barreras en la aplicación SEVRRRA no coincide con la definida en el método de matriz de riesgo. En particular, el nivel de riesgo alto obteni-

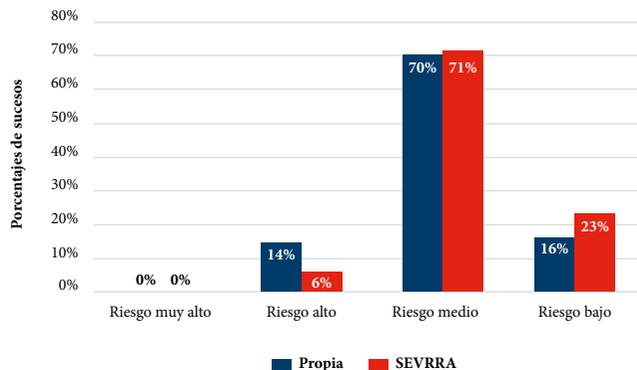


Figura 1. Comparación del perfil de riesgo de una instalación de braquiterapia BHDR-I, realizado con en base a la técnica de matriz de riesgo, utilizando la aplicación SEVRRRA y una aplicación propia.

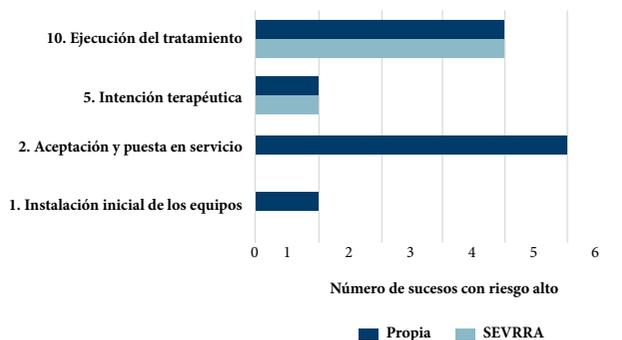


Figura 2. Distribución de sucesos iniciadores con riesgo alto por etapa de operación, en la instalación de braquiterapia BHDR-I. Se debe resaltar que solo aparecen las etapas de operación para las que se obtienen secuencias con riesgo alto.

do en los seis sucesos, en las etapas 1 y 2 (instalación inicial de los equipos y aceptación y puesta en servicio) se debe a que para la barrera “Calibración de la fuente durante la puesta en servicio y comparación del resultado con el valor de tasa de kerma que consta en el certificado”, en la aplicación propia se asignó una robustez de 4, mientras en la aplicación SEVRRRA se asignó una robustez de 32. Esto difiere a lo estipulado en el método de matriz de riesgo, donde en los apéndices [14] se asigna a esta barrera una robustez de 4, valor igual al asignado para esta barrera en la aplicación propia.

De esta forma, la diferencia del perfil de riesgo en las dos aplicaciones se debe a la diferencia de robustez asignada a algunas barreras, como se evidencia en la tabla 2. Adicionalmente, en dicha tabla se muestra la robustez asignada en los apéndices del método de matriz de riesgo [14]. Como se puede observar, se encuentran diferencias entre la robustez asignada en cada método a ciertas barreras; esto se debe a la interpretación equivocada del tipo de barreras, lo que ha sido reportado en anteriores trabajos [11].

Tabla 2. Barreras en las que la aplicación SEVRRRA tiene una robustez diferente a la asociada en la metodología de matriz de riesgo del TECDOC-1685/S [13]

Descripción de la barrera	Robustez en SEVRRRA	Robustez en apéndices TECDOC-1685/S	Robustez en este trabajo
Calibración de la fuente durante la puesta en servicio y comparación del resultado con el valor de tasa de kerma que consta en el certificado	32	4	4
Confrontación de los datos importados por el panel de control con los reportados por el TPS, que han sido registrados en el plan de tratamiento	32	4	4
Experiencia del operador relativa a los tiempos ordinarios de tratamiento	8	No reporta	4
Monitoreo redundante del paciente utilizando un detector portátil de radiación	8	16	4

La interpretación equivocada podría atribuirse a que el usuario puede asociar a barreras tipo 2 (alarmas) una robustez de una barrera tipo 4 (procedimientos), cuando la alarma hace parte de un procedimiento realizado por una persona, lo que no corresponde con la definición en el método de matriz de riesgo.

El hecho de asociar diferente robustez tiene un gran impacto, ya que puede causar un efecto considerable en el perfil de riesgo de la instalación, como se evidencia en este trabajo. Esto sugiere que en la metodología de matriz de riesgo se debería realizar una definición más amplia de cada tipo de barrera, con el fin de que las instalaciones puedan asignar el nivel adecuado de robustez.

4. ACEPTABILIDAD DE RIESGO

Para realizar el análisis de la aceptabilidad del riesgo se tomaron los resultados del perfil de riesgo obtenidos con la aplicación propia. En la tabla 3 se encuentran descritos los sucesos iniciadores con nivel de riesgo alto, así como el nivel de consecuencia para dichos sucesos. Como se puede observar, todos estos sucesos tienen consecuencias altas o muy altas, por lo que, según la aceptabilidad del riesgo de la metodología, se deberían tomar medidas inmediatas para reducir el riesgo. Por ello, en la mencionada tabla se presentan las medidas de seguridad que se deberían tomar en la instalación de braquiterapia para reducir el riesgo. Para los sucesos asociados a las etapas 1 y 2 (instalación inicial de los equipos y aceptación y puesta en servicio) así como en la etapa 5 (intención terapéutica), para reducir el riesgo se deben introducir barreras de verificación redundante, que se describen a continuación:

Verificación de los resultados de la calibración, de manera independiente redundante, por otro físico médico y con otro sistema dosimétrico.

Verificación de los cálculos resultantes de la planificación dosimétrica del tratamiento mediante cálculo inde-

pendiente realizado por un físico-médico diferente del que planificó el caso.

Por otra parte, para reducir el riesgo del SI BH-DR-PAC9.11 se deben introducir, como reductor de frecuencia, el registro en las planillas para la recogida y reporte de información del tratamiento.

Estas funciones de seguridad permitirían reducir el nivel de riesgo de nivel alto a medio en estos sucesos, con lo que se lograría ajustar la instalación al criterio de aceptabilidad de riesgo del método de matriz de riesgo.

Como se ha evidenciado, se deben introducir barreras de seguridad de tipo verificación redundante; sin embargo, se debe destacar que la aplicación de estas funciones de seguridad en instalaciones pequeñas ubicadas en zonas poco pobladas del país, y con limitado personal, no es viable en la mayoría de los casos, si se considera el criterio de costo/beneficio. Esto implicaría que estas instalaciones no podrían seguir operando. Por esta razón se debe buscar otro tipo de barreras, con el fin de que sea viable la operación segura de esta clase de instalaciones y de garantizar su operación en el nivel de tolerabilidad del riesgo.

Es importante destacar que la metodología de matriz de riesgo no contempla el riesgo inherente a cada práctica en el marco de la aceptabilidad de riesgo. Esto puede tener consecuencias negativas cuando los reguladores de los países se basen en la aceptabilidad de riesgo para emitir o negar autorizaciones de manejo de material radiactivo. Como evidencia en este trabajo, para tres SI (BHDR-PAC9.6, BHDR-PAC9.13 y BHDR-PAC9.15) no se puede mitigar el riesgo, ya que no es posible reducir la frecuencia ni la probabilidad de fallo. Específicamente, en estos tres sucesos no se conocen barreras, tal como se pone en evidencia en los apéndices del método de matriz de riesgo [14]. El riesgo inherente a la práctica indicaría 4% de sucesos iniciadores con nivel de riesgo alto (3 SI de un total de 79 SI analizados).

Tabla 3. Secuencias con riesgo alto obtenidas con la aplicación propia

Descripción del suceso	Nivel de consecuencia	Medidas que se deben adoptar
BHDR-PAC1.3. Error en el certificado del fabricante de la fuente	MA	Verificación redundante
BHDR-PAC2.1. Error de calibración de la cámara y el electrómetro (en el laboratorio de patrones de dosimetría)	MA	Verificación redundante
BHDR-PAC2.2. Error de calibración de la cámara y el electrómetro (en el laboratorio de patrones de dosimetría)	MA	Verificación redundante
BHDR-PAC2.4. Error de interpretación de las cifras decimales del temporizador del equipo de braquiterapia y/o electrómetro durante la calibración de la fuente	MA	Verificación redundante
BHDR-PAC2.5. Utilización de valores incorrectos de decaimiento de la fuente	MA	Verificación redundante
BHDR-PAC2.7. Error en la determinación de la tasa de kerma en aire en condiciones de referencia	MA	Verificación redundante
BHDR-PAC4.3. Registrar por error un valor de dosis total de tratamiento, dosis por fracción o fraccionamiento diferente del valor prescrito en la hoja de tratamiento	A	Verificación redundante
*BHDR-PAC9.6. Desconexión de la fuente del cable de transferencia al efectuar un tratamiento	A	Reducir las consecuencias
BHDR-PAC9.11. Error al registrar los datos de la sesión diaria en la hoja de tratamiento	A	Introducir reductor de frecuencia
*BHDR-PAC9.13. Desconexión de la fuente del cable de transferencia, permaneciendo en un implante intracavitario o superficial, tras finalizar el tratamiento	A	Reducir las consecuencias
*BHDR-PAC9.15. Atascamiento de la fuente tras finalizar el tratamiento, permaneciendo fuera del paciente y del blindaje	A	Reducir las consecuencias

*Sucesos para los que no se puede mitigar el riesgo.

5. CONCLUSIONES

La aplicación del método de matriz de riesgo permite la evaluación del perfil de riesgo en la práctica de braquiterapia HDR. Debido al número elevado de sucesos iniciadores en la práctica (> 70), es necesario usar aplicaciones que faciliten la evaluación del perfil de riesgo de las instalaciones. El software SEVRRRA, aún en desarrollo, facilita considerablemente esta labor. Presenta una interfaz amigable que permite evaluar los resultados y estudiar la eficacia de las funciones de seguridad. Sin embargo, deben tomarse precauciones en su aplicación, ya que en la versión actual algunas barreras no tienen la robustez considerada en la metodología de matriz de riesgo.

Como se expuso en este trabajo, los resultados del perfil de riesgo con la aplicación SEVRRRA no coincidieron con los obtenidos con la herramienta propia, a pesar de que las dos aplicaciones están basadas en la misma metodología. La diferencia encontrada, se debe a que la robustez asignada para algunas barreras por el software SEVRRRA es más alta que la definida por la técnica de matriz de riesgo. Este problema puede ser fácilmente solucionado por los diseñadores de la aplicación SEVRRRA cambiando la robustez de las barreras, o por los usuarios, creando nuevas barreras con la misma descripción, pero asignando la robustez correspondiente de tal forma que coincida con la definida por la metodología de matriz de riesgo.

Otra precaución que se debe tener en cuenta para utilizar el método de matriz de riesgo se centra en la interpretación de los resultados, debido a que la metodología plantea una aceptabilidad de riesgo conservadora. Sin embargo, esta consideración no tiene en cuenta los riesgos inherentes a la práctica, esto es, sucesos iniciadores que hasta el momento no tengan barreras conocidas y que podrían tener riesgo alto. El ente regulador o evaluador debe tener en cuenta este hecho a la hora de analizar el perfil de riesgo de una instalación.

Se debe destacar que el método de matriz de riesgo ha permitido la determinación del perfil de riesgo de instalaciones de braquiterapia en el país, gracias a esto las instalaciones han fortalecido sus sistemas de calidad y de seguridad física. Adicionalmente, las instalaciones han reconocido la importancia de las capacitaciones del personal, tanto en protección radiológica como en actividades asociadas a la operación normal de la práctica, así como en la respuesta a situaciones accidentales que surgen en la práctica.

Referencias

- [1] S. C. B. Esteves, A. C. Z. de Oliveira, and L. F. de A. Feijó, "Braquiterapia de alta taxa de dose no Brasil," *Radiologia Brasileira*, vol. 37, no. 5, pp. 337-341, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-39842004000500007>

- [2] IAEA, *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards*. IAEA Safety Standards Series No. GSR, Part 3, Viena: IAEA, 2014.
- [3] Ministerio de Minas y Energía (Colombia), *Resolución 90874 de 2014*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/0/90874.pdf/ba4e5ee5-dc42-41d0-8593-1f83fa59f3b4>
- [4] IAEA, *Aplicación del método de matriz de riesgo a la radioterapia*. Viena: IAEA-TECDOC 1685/S, Organismo Internacional de Energía Atómica, 2010. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1685_S_CD/PDF/Appendix.pdf
- [5] D. H. Stamatis, *Failure modes and effects analysis*. Milwaukee, WI: American Society for Quality Control, 1995.
- [6] P. Ortiz López, “Tools for risk assessment in radiation therapy,” *Annals of the ICRP*, vol. 41, no. 3-4, pp. 197-207, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.06.025>
- [7] IAEA, *Case studies in the application of probabilistic safety assessment: Techniques to radiation sources*. IAEA TECDOC, no. 1494. Viena: International Atomic Energy Agency, 2006.
- [8] IAEA, *Análisis probabilista de seguridad de tratamientos de radioterapia con acelerador lineal*. IAEA TECDOC, no. 1670/S. Viena: International Atomic Energy Agency, 2012.
- [9] Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores y Nucleares, “SEVRRRA”. [Online]. Disponible en <https://www.foroiberam.org/sevrra>. (Consultado en 2018).
- [10] D. J. McDonnell, S. B. Papadópulos, A. B. Paz, R. López Morones y F. Ramírez Pérez, “Aplicación de SEVRRRA para la evaluación de condiciones de riesgo en braquiterapia HDR”, Presentado en el IX Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. Río de Janeiro, Brasil, 15 al 19 de abril, 2013.
- [11] C. Duménigo *et al.*, “Application of the risk matrix approach in radiotherapy: An Ibero-American experience”. Presentado en el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, 2014.
- [12] IAEA, *Lessons learned from accidental exposures in radiotherapy*. SRS n.º 17. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica, 2002.
- [13] M. Arciniegas Álvarez, D. C. Herrera, J. A. Gómez y A. Estrada Molina, “Análisis de riesgo de instalaciones de radioterapia y medicina nuclear en Colombia con el método de matriz de riesgo”. Presentado en el XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, La Habana, Cuba, 16-20 de abril, 2018.
- [14] IAEA, *Aplicación del método de matriz de riesgo a la radioterapia*. IAEA-TECDOC 1685/S: Apéndices. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica, 2012.

Aplicación de protocolos de control de calidad en equipos de fluoroscopia en las ciudades de Tunja (Boyacá) y Bogotá

Application of quality control protocols for fluoroscopy equipment in the cities of Tunja (Boyacá) and Bogotá

Mercy Natalia González Sánchez, Hernán Olaya Dávila¹

Citación: M. N. González Sánchez y H. Olaya Dávila, “Aplicación de protocolos de control de calidad en equipos de fluoroscopia en las ciudades de Tunja (Boyacá) y Bogotá”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 12-27, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.507>

Recibido: 16 de septiembre de 2019

Aceptado: 18 de diciembre de 2019

Publicado en línea: 30 de diciembre de 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.507>

RESUMEN

La obtención de imágenes de calidad en fluoroscopia depende, entre otros factores, de la habilidad del tecnólogo, del procedimiento radiográfico y, en especial, del desempeño del equipo utilizado. Para este último se han desarrollado diferentes protocolos de control de calidad que establecen un conjunto de pruebas para evaluar diferentes parámetros de calidad de la imagen y de la dosis recibida por el paciente. La realización de estas pruebas requiere de equipos detectores de radiación para evaluar los parámetros eléctricos y la cantidad de radiación recibida por el paciente, así como fantasmas que permiten simular al paciente. Estos dispositivos son muy costosos y no tienen oferta en el mercado nacional, por lo que se evaluó el desempeño de los equipos de varios centros médicos ubicados en Tunja (Boyacá) y Bogotá, D. C., usando prototipos de fabricación nacional bajo las recomendaciones de la Asociación Americana de Física en Medicina, AAPM por sus siglas en inglés, para fantasmas craneales en adultos y con base en relaciones antropométricas. Ejecutados los protocolos, con los prototipos de fantasmas se encontró que todos los equipos cumplen con los límites de tolerancia y niveles de referencia establecidas en ambos protocolos, con la excepción del equipo telecomandado, que no cumplió con la tolerancia para resolución espacial. La mejor calidad de imagen de los equipos evaluados, en términos generales, se obtiene del angiógrafo, y el que menor dosis entrega al paciente es el del fabricante Philips. Adicionalmente, se logró establecer y documentar por primera vez la configuración específica para el desarrollo de las pruebas de control de calidad en equipos de angiografía.

Palabras clave: fluoroscopia, control de calidad, fantasmas, angiografía.

ABSTRACT

Obtaining quality images in fluoroscopy depends, among other factors, on the skill of the technologist, the radiographic procedure and, especially, the performance of the equipment used. Regarding equipment performance, various quality control protocols have been developed that establish a set of tests to evaluate different parameters related to image quality and the dose received by the patient. The execution of these tests requires radiation detection equipment to evaluate electrical parameters and the quantity of radiation received by the pa-

¹ Servicio Geológico Colombiano
Email de correspondencia: holaya@sgc.gov.co

tient as well as phantoms that allow for simulation of patients. These devices are quite expensive and are not available in the domestic market. Therefore, the performance of the equipment of several medical centers located in Tunja (Boyacá) and Bogotá, Capital District, was evaluated using prototypes manufactured domestically according to the recommendations of the American Association of Physicists in Medicine (AAPM) for skull phantoms in adults and based on anthropometric relationships. Execution of quality control protocols with the phantom prototypes indicated that all of the equipment performed in accordance with the tolerance limits and reference levels established in both protocols, with the exception of remote control equipment, which did not exhibit the desired spatial resolution tolerance. In general, among the evaluated equipment, the angiograph produced the best image quality, and the one that delivered the lowest dose to the patient was manufactured by Philips. Additionally, we established and documented for the first time a specific configuration for the development of quality control tests for angiography equipment.

Keywords: fluoroscopy, quality control, phantoms, angiography

1. INTRODUCCIÓN

La fluoroscopia es la obtención de imágenes diagnósticas en tiempo real. Los fotones producidos en un tubo de rayos X atraviesan el tejido humano; parte de los fotones incidentes interactúan con el paciente, mientras que los demás llegan al detector. Estos últimos aportan información sobre la anatomía del paciente, que es mostrada en una pantalla de televisión.

La imagen formada es construida en cada punto a partir del número de fotones que llegan al detector sin interactuar con el paciente. Este número depende del número Z promedio y la densidad electrónica del material absorbente, así como de la energía de los fotones incidentes. La intensidad vista desde el detector en cada punto se expresa mediante esta ecuación:

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

en donde:

N_0 es el número de fotones a la entrada del detector en ausencia del paciente.

N es el número de fotones a la entrada del detector estando presente el paciente.

μ es el coeficiente de atenuación lineal, que depende del número atómico promedio, la densidad del material absorbente y la energía de los fotones incidentes.

x es el espesor del material atenuante.

Con el fin de obtener una buena calidad de imagen con la menor dosis posible de radiación es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

1. El área del campo de irradiación incidente no debe ser mucho más grande que el área de la superficie del detector, con el fin de no suministrar radiación en regiones innecesarias.
2. Usar la energía más apropiada de los fotones incidentes de forma que las diferencias de absorción en distintas regiones de la estructura que se quiere observar sean suficientes para obtener un buen contraste de la imagen. Para esto es necesario variar la diferencia de potencial en el tubo de rayos X.
3. Limitar el número de fotones de baja energía que pueden entregar dosis al paciente, pero que tienen una baja probabilidad de llegar al detector, algo que se logra mediante el uso de filtros.
4. Restringir las tasas de dosis al paciente de acuerdo a su contextura, para evitar riesgos radiobiológicos.
5. Cuantificar la imagen. Esto se hace con el objetivo de proporcionarle al médico una buena calidad de imagen para obtener un diagnóstico exacto del paciente o para valorar la respuesta a algún tratamiento.

En Colombia, la Resolución 482 de febrero de 2018, del Ministerio de Salud y Protección Social [1], exige que los equipos emisores de radiación ionizante de uso médico sean sometidos a controles bienales de calidad, pero también se deben realizar estudios en las barreras estructurales de las instalaciones; denominados cálculos de blindajes para

obtener licencia de operación, para obtener licencia de operación, tema que se ha tomado como objetivo de este trabajo. Dicha norma se ha ido implementando en equipos convencionales, como tomógrafos computarizados, mamógrafos, equipos de densitometría ósea y radiología dental, entre otros. El personal autorizado (profesionales con especialización en física médica o física radiológica) para realizar el control de calidad en los diferentes equipos deben registrarse por los protocolos y normas establecidos por distintos países, como, por ejemplo, el Protocolo Español de Control de Calidad en Radiodiagnóstico (PECCR) [2], la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), el Arcal XLIX [3] y la Asociación Americana de Física en Medicina (AAPM). En el caso de los equipos fluoroscópicos, existe un procedimiento general de evaluación reflejado en los protocolos nombrados anteriormente; sin embargo, en la bibliografía no hay un protocolo detallado para equipos de angiografía digital, dada la aplicación particular, en rangos de energía y resolución espacial. Por tal razón, es importante tener una propuesta de protocolo de control de calidad en angiografía, en la que se especifiquen las pruebas que deben realizarse con instrumentación nueva, como la que posee el Laboratorio de Radiaciones Nucleares de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

En el mercado de nuestro país no existen herramientas de control de calidad que posibiliten realizar una evaluación integral del desempeño de un angiógrafo. Como estas herramientas son costosas en otros países, la razón de este trabajo es llegar a la fabricación de dichos objetos de prueba y crear prototipos propios que tengan el mismo desempeño y la misma calidad que los ofertados en el extranjero, para poder validar el desempeño de los simuladores físicos.

Las pruebas de control de calidad se hacen con el fin de verificar el desempeño adecuado de los equipos fluoroscópicos (arco en C, telecomandado y angiógrafo) utilizados en prácticas de intervención médica. Para sustituir satisfactoriamente a los pacientes de anatomía promedio se construyen simuladores físicos (fantomas), que permiten atenuar y dispersar la radiación. Los fantomas son dispositivos que están contruidos según las recomendaciones de la Asociación Americana de Física en Medicina (AAPM). Se elaboran dos simuladores de la región anatómica craneal (pediátrico y adulto) para evaluar el sistema de control automático de

exposición (CAE). En el diseño y construcción del fantoma para angiografía cerebral se determinan las dimensiones con base en las medidas antropométricas aportadas por estudios que se han realizado en la Universidad Nacional de Colombia, sede de Bogotá, que ofrecen con exactitud las medidas promedio de extremidades, cabeza, cuello y tórax de adultos y niños, así como su peso. A partir de esto se podrá obtener el respectivo fantoma [4].

Además del simulador físico se utilizan objetos de prueba para medir parámetros como la resolución espacial y el rendimiento de bajo y alto contraste de la imagen. Estas herramientas son posicionadas contra el haz de rayos X para la evaluación respectiva. A partir de los resultados obtenidos se realiza una comparación con las tolerancias permitidas en los protocolos existentes, para verificar que los equipos cumplan con los estándares de control de calidad.

2. ASPECTOS GENERALES

En la fluoroscopia, los fotones atraviesan el tejido humano y son detectados para obtener una imagen que permitirá al médico determinar el diagnóstico del paciente. Cuando el fotón interactúa con el medio puede absorberse, transmitirse o dispersarse cambiando su dirección de desplazamiento. Los tres procesos por los que los fotones entregan su energía a la materia son el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares. Los equipos fluoroscópicos que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo manejan rangos de energía de rayos X de entre 50 y 150 keV. Por lo tanto, los dos tipos de interacciones que predominan son el efecto fotoeléctrico y la dispersión Compton [5].

Efecto fotoeléctrico. Este tipo de interacción ocurre cuando un electrón unido a un átomo absorbe un fotón [6]. El electrón orbital se expulsa con energía cinética E_K y toma el nombre de fotoelectrón.

La energía cinética E_K del fotoelectrón expulsado es igual a la energía del fotón incidente $h\nu$, menos la energía de enlace del electrón orbital.

$$E_K = h\nu - E_B \quad (1)$$

En la emisión de un fotoelectrón se origina una vacante ocupada por un electrón de una capa superior. La energía de

transición se emite como un fotón característico (fluorescencia). Cuando la energía del fotón es mayor que la energía de enlace en la capa K (E_K), el 80 % de las absorciones fotoeléctricas ocurren con electrones de la capa K, y 20 % ocurre con los electrones de capas superiores [7].

Efecto Compton. La interacción ocurre cuando un fotón con energía $h\nu$ y momento $h\nu/c$ choca con un electrón estacionario y libre. Luego de la colisión, el fotón se dispersa en un ángulo θ con energía $h\nu'$ y momento $h\nu'/c$. El electrón retrocede en un ángulo ϕ con energía E_e total y momento P_e .

$$E_e = m_e c^2 + E_K \quad (2)$$

$$P_e = c^{-1} \sqrt{E_K(E_K + 2m_e c^2)} \quad (3)$$

Por conservación de energía, usando series de Taylor y aproximaciones clásicas para la energía cinética, se tiene que la energía del fotón dispersado en función de la energía del fotón incidente $h\nu$ y el ángulo de dispersión θ es:

$$h\nu' = h\nu \left(\frac{1}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta)} \right) \quad (4)$$

donde

$$\varepsilon = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

La energía cinética del electrón en retroceso, que depende de la energía del fotón incidente y el ángulo del fotón dispersado [7], es:

$$E_K = h\nu - h\nu' \left(\frac{1}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta)} \right) \quad (5)$$

La fluoroscopia es una técnica que genera imágenes con rayos X en tiempo real [8], lo que es útil para el médico, debido a la producción de una imagen continua que permite observar órganos en movimiento dentro de un paciente o el flujo de un medio de contraste a través de los vasos sanguíneos. El sistema fluoroscópico consta de dos componentes principales, generalmente alineados: un tubo de rayos X, encargado de emitir haces de fotones, y el sistema de detección. Los fotones de rayos X que atraviesan al paciente interactúan con el sistema de detección (intensificador de imagen o panel plano), y generan una imagen que es procesada y mostrada en una cámara de televisión. Los equipos fluoroscópi-

cos modernos contienen medidores de producto dosis-área, filtración automática, fluoroscopia pulsada y sistemas de control automático de exposición (CAE), de manera que los parámetros de tensión y corriente se ajustan de acuerdo al modo de imagen (fluoroscopia baja, normal o alta), al campo de visión y al grosor del paciente [9].

En este trabajo se evalúan equipos usados en radiología intervencionista (fluoroscópicos), como el telecomandado mostrado en la figura 1, dos angiogramas mostrados en las figuras 8 y 9, y adicionalmente se estudian dos arcos en C, que se pueden observar en las figuras 2 y 3, ubicados en diferentes centros hospitalarios de Boyacá y Cundinamarca.

2.1. Equipos telecomandados

Tabla 1. Especificaciones del equipo telecomandado

Telecomandado de marca Toshiba	
Servicio	Radiodiagnóstico
Equipo	
Modelo del equipo	DBZK-HGHEAD
Serie del equipo	99A09Z2361
Marca del tubo	Toshiba
Modelo del tubo	BLF-15B
Serie del tubo	J3A09X2761
Datos técnicos del equipo	
Kilovoltaje máximo	150 kVp
Corriente máxima de tubo	4 mA
Filtración mínima	1,2 mm Al a 70 kV
Filtración total	2,5 mm Al a 70 kV
Potencia del tubo	10,5 W
Número de monitores	2
Modos de operación	Radio/fluoro
Uso	
Los equipos telecomandado se utilizan como guía para el estudio convencional contrastado en urografías, uretrrocistografía, del tracto esófago-gastrointestinal. También es utilizado como guía en procedimientos de radiología.	



Figura 1. Equipo Telecomandado Toshiba

2.2. Arco en C

Tabla 2. Especificaciones del Arco en C Philips

Servicio	Radiodiagnóstico
Equipo	
Modelo del equipo	BV Pulsera
N.º del modelo del equipo	718095
Serie del equipo	469
Marca del tubo	PHILIPS
Serie del tubo	22042
Datos técnicos del equipo	
Kilovoltaje máximo	120 kVp
Corriente máxima de tubo	100 mA
Frecuencia	50/60 Hz
Filtración agregada	3,0 mm Al + 0,1 mmCu
Filtración inherente	1,0 Al eq.
Fluoroscopia continua:	
Rango de voltaje	40 a 120 kV
Rango de corriente en fluoro de dosis baja	0,10 a 8,3 mA
Rango de corriente en fluoro de alta definición	0,24 a 20,0 mA
Fluoroscopia pulsada:	
Rango de voltaje	40 a 120 kV
Rango de corriente pico	0,4 - 12 mA
Uso	
Es un sistema de fluoroscopia móvil que se utiliza en procedimientos quirúrgicos e intervencionistas para capturar la anatomía en movimiento y ver dentro del paciente. Los procedimientos e intervenciones son procedimientos cardiovasculares, cirugía ortopédica, cirugía abdominal, procedimientos neuroquirúrgicos y cirugía torácica.	

Tabla 3. Especificaciones del arco en C Siemens

Servicio	Radiodiagnóstico
Equipo	
Modelo del equipo	Arcadis Orbic 3D
N.º del modelo del equipo	08079233
Serie del equipo	25036
Marca del tubo	Siemens
N.º del modelo del tubo	07721710
Serie del tubo	9373
Fecha de fabricación	Septiembre de 2014
Datos técnicos del equipo	
Kilovoltaje máximo	110 kVp
Corriente máxima de tubo	23 mA
Rango de mAs ^{<sup><sup>}	1-150 mAs
Filtración agregada	1,5 mm Al-75 kV
Potencia máxima del tubo	2,3 kW a 100 kVp
Tiempo de exposición	5-10 s
Número de monitores	2
Modos de operación	Radio/fluoro
Uso	
Es un sistema de fluoroscopia móvil que se utiliza en procedimientos quirúrgicos e intervencionistas para capturar la anatomía en movimiento y ver dentro del paciente. Estos son los procedimientos e intervenciones: procedimientos cardiovasculares, cirugía ortopédica, cirugía abdominal, procedimientos neuroquirúrgicos, cirugía torácica.	



Figura 2. Arco en C Philips

Fuente <https://questimagingolutions.com/news/2721/an-in-depth-look-into-surgical-c-arms-what-to-buy-2/>



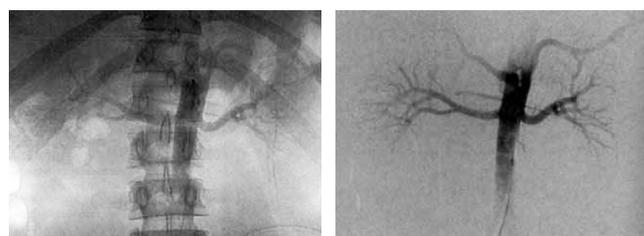
Figura 3. Arco en C Siemens

Fuente <https://www.siemens-healthineers.com/es/surgical-c-arms-and-navigation/mobile-c-arms/arcadis-orbic-3d>

3. ANGIOGRAFÍA

La angiografía es el estudio de los conductos sanguíneos (arterias, venas y capilares) por medio de la fluoroscopia y de la incorporación de medios de contraste, que por lo regular son líquidos que aumentan la densidad de la sangre temporalmente sin dejar efectos secundarios. Estos líquidos son inyectados justo en la zona que se desea estudiar, por medio de un catéter que, de igual manera, es incorporado vía intravenosa para ser observado en los monitores de TV.

Los sistemas de angiografía con sustracción digital (DSA) se usan en las aplicaciones vasculares y en la angiografía moderna. La figura 4a muestra una imagen sin substraer y



a. Columna lumbar b. Sustracción

Figura 4. Angiografía con sustracción digital

la figura 4b, una imagen con sustracción. Se basa en la adquisición digital de imágenes antes y después de la inyección del medio de contraste en el sistema circulatorio. Las imágenes obtenidas sin contraste, también denominadas *imágenes de máscara*, son restadas píxel a píxel de las obtenidas con contraste para resaltar el cambio en la atenuación de los rayos X debido a la presencia del medio de contraste (solución con yodo) en la sangre [9].

En la angiografía se utilizan corrientes pequeñas y tiempos prolongados; por lo tanto, para mantener una calidad de imagen alta se utiliza fluoroscopia pulsada en lugar de continua. En las unidades de hemodinamia en las que se realizan exploraciones del árbol coronario del corazón es común utilizar tasas de fluoroscopia y adquisición alta para evitar la pérdida de resolución espacial por el movimiento del corazón. Por el contrario, en los equipos de radiología vascular no son tan críticas las tasas de adquisición, y sí el tamaño del receptor de imagen (intensificador o panel plano, en los equipos más modernos), ya que muchas de las exploraciones se realizan en la zona abdominal o en el tronco del paciente [9].

El equipo de angiografía mostrado en las figuras 5 y 6 consta de un arco en C suspendido del techo, que incorpora el tubo de rayos X y el sistema receptor de imagen. El brazo en C puede moverse en casi todas las direcciones para permitir la mayor cantidad posible de proyecciones del paciente. Consta de una mesa elevable, con un tablero plano, flotante y deslizante que permite el acceso fácil al paciente. También contiene monitores de TV que posibilitan al especialista seguir la imagen en tiempo real mientras realiza la exploración [9]. Es necesario someter estos equipos a un proceso de esterilización antes de usarlos, o adaptarles una cobertura plástica esterilizada.

Las especificaciones de los angiógrafos evaluados en los diferentes centros hospitalarios de Colombia se encuentran a continuación:



Figura 5. Angiógrafo Philips

Fuente: <https://www.philips.com.co/healthcare/product/HC722029NE/allura-xper-fd20-10-sistema-de-rayos-x-de-neuroradiologia-biplano>



Figura 6. Angiógrafo Siemens

Tabla 4. Especificaciones del angiógrafo Philips

Servicio	Radiodiagnóstico	
	Equipo	
Modelo del equipo	Allura XPER FD 20	
Serie del equipo	222	
Marca del tubo	Philips	
Serie del tubo	22061	
Fecha de fabricación	2016	
Datos técnicos del equipo		
Kilovoltaje máximo	125 kVp	
Corriente máxima de tubo	60 mA	
Filtración agregada	1,0 mm Al-70 kV	
Potencia del generador	100 kW	
Potencia del tubo	32-68 kW	
Número de monitores	4	
Modos de operación	Radio/fluoro	
Uso		
Los angiógrafos son utilizados en procedimientos de cardiología (arterias, corazón pediátrico), vascular (carótidas) y neurovascular.		

Tabla 5. Especificaciones del angiógrafo Siemens

Servicio	Radiodiagnóstico
Equipo	
Modelo del equipo	Axion Artis
N.º del modelo del equipo	5764522
Serie del equipo	777011692
Marca del tubo	Siemens
N.º del modelo del tubo	3800351
Serie del tubo	975591506
Fecha de fabricación	Marzo de 2012
Datos técnicos del equipo	
Kilovoltaje máximo	125 kVp
Corriente máxima del tubo	60 mAs
Filtración agregada	1,5 mm Al-75 kV
Número de monitores	2
Modos de operación	Radio/fluoro
Uso	
Los angiógrafos son utilizados en procedimientos de cardiología (arterias, corazón pediátrico), vascular (carótidas) y neurovascular.	

4. DETECTORES, FANTOMAS Y HERRAMIENTAS

Los instrumentos necesarios en la evaluación del comportamiento de los equipos fluoroscópicos se detallan a continuación:

4.1. Detectores de radiación

El Diavolt Universal PTW es un dispositivo diseñado para medir tiempo de exposición y tensión del tubo en equipos emisores de rayos X de uso clínico (radiografía, CT, fluoroscopia, mamografía). En el control de calidad de un equipo de an-

giografía, el Diavolt se utiliza siempre con la aplicación RAD/FLU. A la hora de medir la tensión, el dispositivo debe estar en el centro del campo de radiación para ser expuesto totalmente.

El detector semiconductor DiadosT60004 conectado a un electrómetro Diados E T11035 permite medir carga, dosis, tasa de dosis, pulso en aplicaciones radiológicas para equipos de rayos X en el rango de 40 a 150 kV. En este trabajo, la magnitud de trazabilidad es el valor de carga; los valores de dosis o tasa de dosis se obtienen según el factor de corrección, dependiendo de la energía del haz (N_K) y la posición del detector, junto con el factor de calibración del detector (K_Q). En la **cámara de ionización abierta** se obtienen valores de dosis teniendo en cuenta la corrección por presión y temperatura (K_{PT}).

4.2. Construcción de fantasmas

Los fantasmas mostrados en la figura 7 son elaborados en el Laboratorio de Radiaciones Nucleares de la UPTC. El fantoma adulto se construyó bajo las recomendaciones de la AAPM [10]. El fantoma pediátrico se elaboró teniendo en cuenta la medida promedio de la masa encefálica de un niño estándar (3 kg) y de un adulto (6,5 kg) [4]. De acuerdo con la relación entre las masas se estipula que el fantoma correspondiente al niño debe ser el 46% menos grande que el correspondiente al adulto.

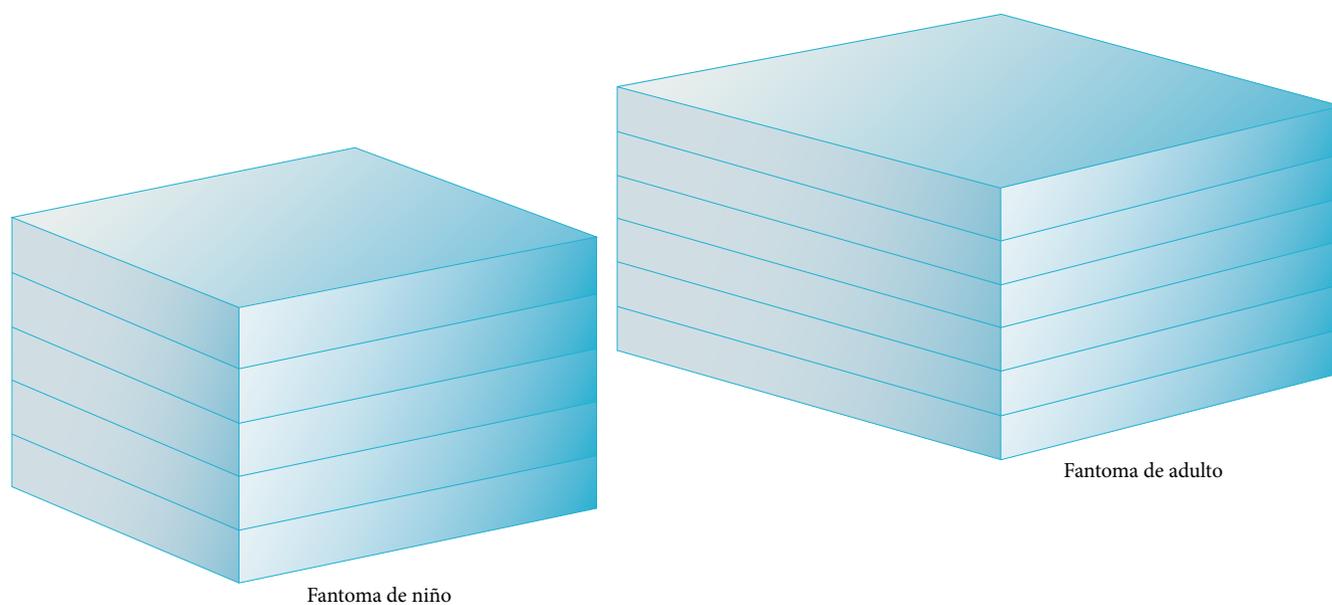


Figura 7. Fantasmas

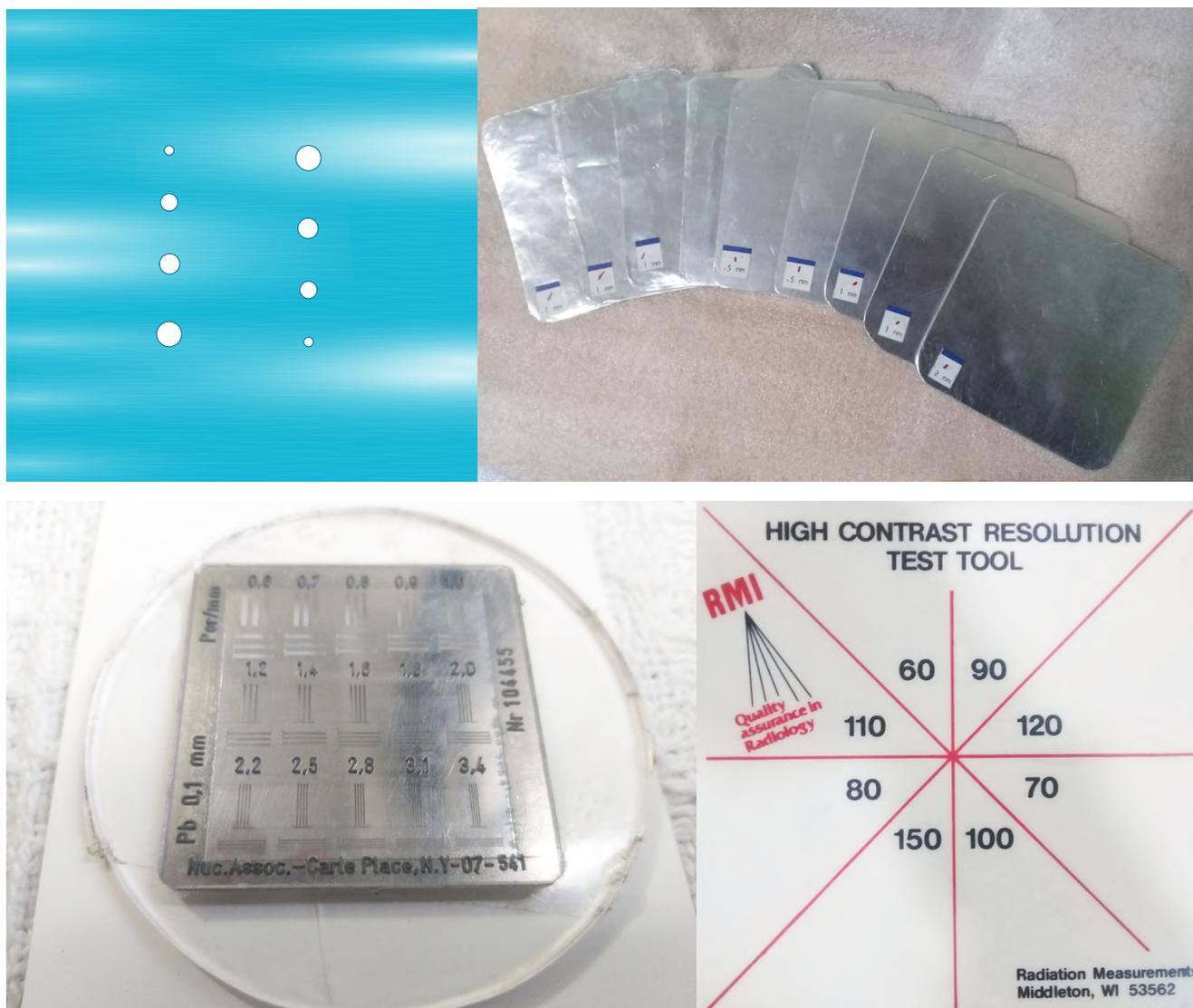


Figura 8. Herramientas

1. Lámina de aluminio con múltiples perforaciones elaborada para evaluar la resolución de bajo contraste en la imagen; 2. Conjunto de filtros de aluminio utilizados para determinar la capa hemirreductora (CHR) del haz de rayos X; 3. Patrón de barras de plomo utilizado para estimar la resolución espacial en diferentes tamaños de campo de radiación, 4. Placa con mallas de cobre utilizada para evaluar la resolución de alto contraste en salas de cardiología.

4.3. Herramientas

En la figura 8 se muestran las herramientas recomendadas por los estándares nacionales e internacionales [11] para evaluar la calidad de la imagen en el monitor anclado al equipo emisor de rayos X.

5. METODOLOGÍA

El desempeño de los equipos fluoroscópicos se evalúa mediante las pruebas de control de calidad. Estas son: coincidencia del campo de radiación con el detector, exactitud del valor nominal de la tensión del tubo de rayos X, filtración del haz, compensación del control automático de exposición

(CAE) para distintos espesores, tasa de dosis a la entrada del paciente con CAE, resolución espacial, resolución de bajo contraste y resolución de alto contraste de la imagen. A continuación se expone el protocolo detallado que se implementa en los equipos de angiografía, teniendo en cuenta los protocolos [2, 3] que recomienda la resolución 482 de 2018 del Ministerio de Salud y Protección Social [1] para los equipos arco en C y telecomandado.

5.1. Coincidencia del campo de radiación con el detector

Tolerancias: La relación entre el área del campo de radiación (A_{RX}) y el área de la superficie del detector (A_D) no debe ser mayor a 1,15.

Material: Chasis cargado con película de rayos X.

Objetivo: Establecer las áreas reales del campo de radiación, con el fin de no irradiar partes innecesarias del cuerpo humano.

Procedimiento: Mantener el foco y el detector de imagen a una distancia de 120 cm, con el colimador abierto al máximo. Ubicar un chasis cargado a la entrada del detector del angiógrafo. El tamaño del chasis debe ser mayor que la superficie del detector. A continuación se expone la película, y a partir de su revelado se miden los lados del cuadrado para calcular el área del campo de radiación. El valor nominal del campo a la entrada del detector es el ajustado por el equipo y se usa con el objetivo de calcular la relación entre el área del campo de radiación y el área de la superficie del detector.

5.2. Exactitud del valor nominal de la tensión del tubo

Tolerancias: Exactitud $< \pm 10\%$

Material: Kilovoltímetro PTW Diavolt, 6 Placas de PMMA o acrílico (fantoma).

Objetivo: Obtener un estimativo real del kilovoltaje nominal para no sobredosificar las exposiciones al paciente.

Procedimiento: El kilovoltímetro y el atenuador deben ubicarse dentro del haz de rayos X del angiógrafo, de tal forma que no afecte el sistema de CAE.

Hay que interponer cuatro espesores diferentes con las placas de acrílico del fantoma para obtener cuatro valores distintos de tensión. Las placas deben encontrarse cerca al detector del angiógrafo, para la respectiva medición. Se deben registrar los valores de tensión y corriente que asigna el equipo de angiografía para cada placa del fantoma que se superpone en la camilla. Para cada kV hay que realizar de tres a cinco exposiciones, con un tiempo recomendado de 10 s. Hay que registrar los valores de tensión obtenidos por el kilovoltímetro.

5.3. Filtración del haz

Tolerancias: Según especificaciones del fabricante.

Material: Detector semiconductor Diados T60004, electrómetro Diados E, placas de acrílico, conjunto de filtros

de aluminio, placa de aluminio para proteger el detector y cinta métrica.

Objetivo: Estimar la calidad del haz de radiación que se va a utilizar en los procedimientos intervencionistas de radiología.

Procedimiento: El angiógrafo no permite ajustar el voltaje de forma manual; por lo tanto, es necesario interponer siete placas de acrílico para obtener el valor de tensión deseado (70 kV). Este material tiene una densidad similar a la del tejido blando del cuerpo humano, lo que permite que la perturbación del haz sea igual que cuando se tiene a una persona en la camilla del angiógrafo. Hay que ubicar las placas entre el detector Diados T60004 y el detector del equipo (II o panel plano) a una distancia de 10 cm entre el detector (II o panel plano) y el fantoma acorde con el angiógrafo. Debe cubrirse el detector del angiógrafo con una lámina de aluminio, para que no sufra daños. Hay que ubicar filtros de aluminio a la salida del colimador del tubo de rayos X y realizar entre tres y cinco exposiciones por cada lámina de aluminio (nueve filtros con espesores entre 0,1 mm y 2 mm), con un tiempo recomendado de 10 s por exposición, y registrar los valores de dosis. Esto, con el fin de encontrar el espesor de aluminio, que permite que la intensidad de radiación se reduzca a la mitad (CHR).

5.4. Compensación del CAE para distintos espesores

Tolerancia: $\leq \pm 20\%$

Material: Detector semiconductor Diados T60004, electrómetro Diados E, fantoma (seis placas de acrílico), cinta métrica.

Objetivo: Evaluar de manera automática la técnica radiológica expresada en potencial eléctrico y producto corriente-tiempo, reduciendo las dosis en pacientes.

Procedimiento: Hay que posicionar el detector semiconductor a la entrada del detector (II o panel plano) y las placas de acrílico de distintos espesores, entre 2,5 y 15 cm. La distancia del tubo de rayos X al detector (II o panel plano) debe ser de 120 cm. Hay que registrar la distancia del fantoma al Diados T60004. Para cada espesor de acrílico se deben usar los modos de operación más comunes. Hay que realizar de tres a cinco exposiciones y registrar los valores de tensión, corriente, filtración, tiempo y dosis.

5.5. Tasa de dosis a la entrada del paciente con CAE

Tolerancias: Cuando la prueba se realiza con un fantoma de 20 cm de acrílico, estos deben ser los valores máximos de tasa de dosis: fluoroscopia en modo normal ± 50 mGy/min, fluoroscopia de alta tasa de dosis ± 100 mGy/min. En modo de adquisición no hay tolerancias.

Material: Fantoma (seis placas de acrílico), detector semiconductor Diados T60004, electrómetro Diados E, cinta métrica.

Objetivo: Verificar que las dosis en pacientes se encuentran por debajo de los niveles de referencia.

Procedimiento: Ubicar el Diados T60004 1 cm por encima de la camilla del angiógrafo. Sobre el Diados T60004 deben interponerse espesores de acrílico de 2,5 a 15 cm, de tal forma que no tengan contacto, para evitar daños en el detector semiconductor. Para la primera placa de 2,5 cm se realizan tres o cuatro exposiciones; para cada una se recomienda un tiempo de 10 s. Hay que registrar los valores de tensión, corriente y tasa de dosis. A continuación, se coloca otra placa de acrílico y se registran los valores mencionados, y así sucesivamente hasta completar el fantoma de 15 cm de espesor.

5.6. Resolución espacial

Tolerancias: En los intensificadores de imagen con tamaño de campo de 36 cm se deben observar conjuntos de pares de líneas mayores o iguales a 0,9 pl/mm ($\geq 0,9$ pl/mm); de 30 cm $\geq 1,12$ pl/mm; de 23 cm $\geq 1,2$ pl/mm; de 15 cm o inferiores $\geq 1,6$ pl/mm. En los paneles planos, según especificaciones del fabricante dado en unidades de pl/mm.

Material: Fantoma (seis placas de acrílico), cinta métrica, patrón de barras de plomo con espesor de 0,1 mm, con diferentes grupos de líneas, y resoluciones entre 0,2 pl/mm y 3,4 pl/mm.

Objetivo: Verificar el tamaño de punto focal reportado por el fabricante.

Procedimiento: Se coloca el patrón de barras en tres posiciones —debajo del fantoma, a la mitad del fantoma y a la

entrada del detector del angiógrafo sin fantoma—, a una distancia foco-detector de 120 cm. Se realiza una exposición en modo normal de operación en cada posición del patrón y se identifica hasta qué conjunto de pares de líneas es visible en la imagen.

5.7. Resolución de bajo contraste

Tolerancias: En la imagen almacenada en el monitor de TV se deben identificar todos los agujeros de la herramienta de prueba.

Material: Fantoma (seis placas de acrílico), cinta métrica, lámina de aluminio de 1 mm de espesor, multiperforada (objeto de prueba).

Objetivo: Reportar el funcionamiento del equipo mediante la identificación de detalles en la imagen sobre la herramienta de prueba.

Procedimiento: Se ubica la lámina de aluminio en las mismas posiciones mencionadas en la prueba de resolución espacial, a una distancia foco-detector de 120 cm. De igual forma, se realiza una exposición en modo normal de operación por cada posición del patrón y se identifica qué agujeros son visibles en la imagen.

5.8. Resolución de alto contraste

Tolerancias: En detectores de panel plano se deben visualizar las mallas de 80 a 110 agujeros por pulgada. En los intensificadores de imagen se deben visualizar las mallas de 70 a 90 agujeros por pulgada.

Material: Patrón de cobre perforado, fantoma (seis placas de acrílico), cinta métrica.

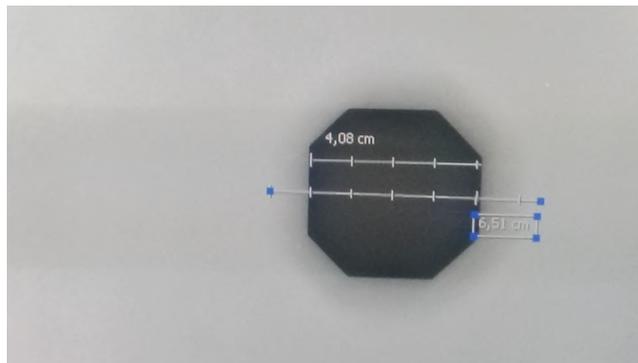
Objetivo: Reportar el funcionamiento del equipo mediante la identificación de detalles en la imagen sobre la herramienta de prueba.

Procedimiento: Se ubica la lámina a la entrada del detector, a una distancia foco-detector de 120 cm. Se realiza una exposición en modo normal de operación. Se identificar el tipo de malla de cobre que se observa en la imagen sobre el monitor.

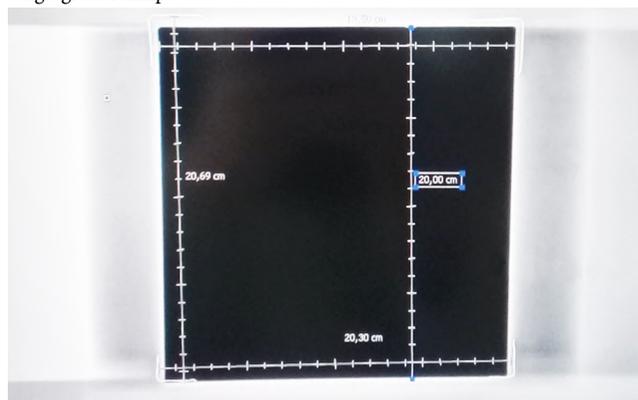
6. RESULTADOS

6.1. Coincidencia del campo de radiación con el detector

En la figura 9 se muestra la imagen almacenada del campo de radiación por el angiógrafo Philips y el equipo telecomandado.



Angiógrafo Phillips



Telecomando

Figura 9. Imagen del campo de radiación en el angiógrafo Philips y el equipo telecomandado

Las medidas en la imagen corresponden a la longitud de los lados del campo de radiación. En la tabla 6 se exponen las dimensiones del campo luminoso y de radiación.

El error que se registra en el equipo telecomandado de 0,1 indica la penumbra que existe entre el campo luminoso y el tamaño de campo seleccionado en la colimación del haz. La tolerancia permitida en la coincidencia del campo de radiación con el detector del equipo emisor de rayos X debe ser menor de 1,15 ($\frac{A_{RX}}{A_D} < 1,15$). Por lo tanto, se cumple.

Tabla 6. Relación del campo de radiación con el detector correspondiente al angiógrafo Philips y el equipo telecomandado

Equipo	C. de radiación	C. detector	A_{RX}/A_D
Angiógrafo Philips	4,08 cm x 4,08 cm	4 cm x 4 cm	1,04
Equipo telecomandado	19,50 cm x 20,00 cm	20 cm x 20 cm	0,975 ± 0,1

6.2. Exactitud del valor nominal de la tensión del tubo

Tabla 7. Desviación máxima del valor nominal de la tensión del tubo en el angiógrafo Philips

Producto (mAs) = 25; DFD = 120 cm; DFS Diavolt = 60 cm; tiempo de exp. = 5 ± 0,1 s		
Kilovoltaje nominal (kV)	Kilovoltaje medido (kV)	Desviación máxima
58,7	59,2 ± 0,5	0,85%
65,4	66,4 ± 0,5	1,53%
72,6	73,1 ± 0,6	0,69%
85,0	86,2 ± 0,5	1,41%

Tabla 8. Desviación máxima del valor nominal de la tensión del tubo en el angiógrafo Siemens

Producto (mAs) = 20; DFD = 120 cm; DFS Diavolt = 60 cm; tiempo de exp. = 5 ± 0,1 s		
Kilovoltaje nominal (kV)	Kilovoltaje medido (kV)	Desviación máxima
65,7	64,3 ± 0,5	2,13 %
77,2	75,1 ± 0,4	2,72 %
86,4	88,9 ± 0,3	2,89 %
98,2	100,6 ± 0,4	2,44 %

Tabla 9. Desviación máxima del valor nominal de la tensión del tubo para el arco en C Philips

Producto (mAs) = 30; DFD = 100 cm; DFS Diavolt = 90 cm; tiempo de exp. = 5 ± 0,1 s		
Kilovoltaje nominal (kV)	Kilovoltaje medido (kV)	Desviación máxima
56,5	57,01 ± 0,4	0,9 %
66,2	66,85 ± 0,5	1,0 %
74,4	75,43 ± 0,4	1,4 %
88,5	89,28 ± 0,5	0,9 %

Tabla 10. Desviación máxima del valor nominal de la tensión del tubo en el arco en C Siemens

Producto (mAs) = 30; DFD = 100 cm; DFS Diavolt = 90 cm; tiempo de exp. = 5 ± 0,1 s		
Kilovoltaje nominal (kV)	Kilovoltaje medido (kV)	Desviación máxima
55,22	56,19 ± 0,6	1,76 %
64,17	64,17 ± 0,6	1,51 %
72,15	72,15 ± 0,7	1,34 %
81,14	81,14 ± 0,5	2,01 %

Se puede observar que la desviación máxima entre los valores de tensión nominales y medidos en los angiógrafos y arcos en C fue del 2,89 %. Este valor se encuentra en el rango de la tolerancia permitida (< 10 %) en esta prueba. Los valores de tensión ajustados por el arco en C Siemens son mayores que los de los otros equipos evaluados.

6.3. Filtración del haz

En la gráfica de la figura 10 se observa que la intensidad de radiación disminuye de forma exponencial a medida que aumenta la filtración de aluminio. A partir del ajuste exponencial de los datos, encontramos que el espesor del filtro de aluminio que reduce la dosis de radiación a la mitad (CHR) es de 0,98 mm. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la filtración total del angiógrafo marca Philips debe ser de 1 mm Al a 70 kV, lo que permite demostrar que el equipo se encuentra funcionando correctamente.

En la gráfica de la figura 11 se encuentra la intensidad de radiación en función del filtro de aluminio correspondiente a diferentes valores de tensión.

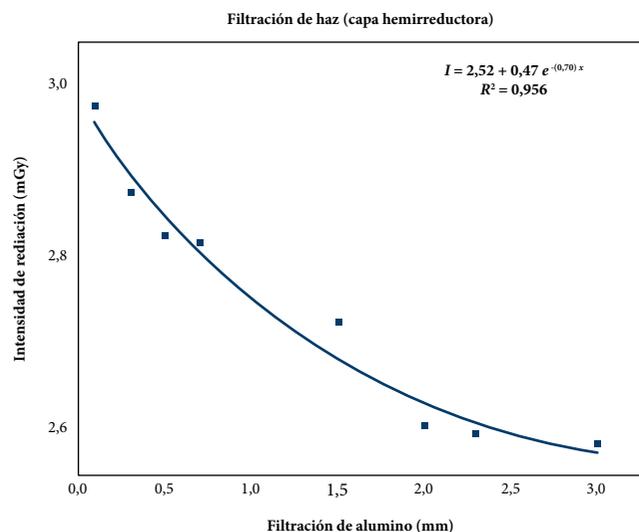


Figura 10. Capa hemirreductora de radiación correspondiente al angiógrafo Philips

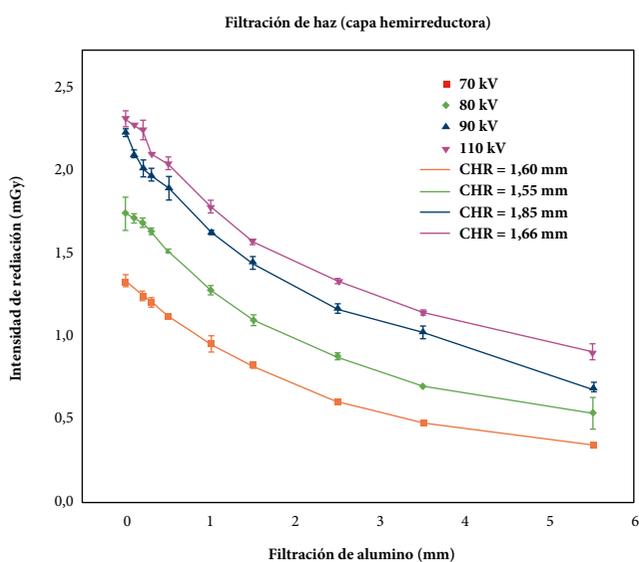


Figura 11. Capa hemirreductora de radiación en el equipo telecomandado

En el equipo telecomandado, según las especificaciones del fabricante, la filtración mínima es de 1,2 mm Al a 70 kV, y la filtración total es de 2,5 mm Al a 70 kV. En el ajuste exponencial de los datos obtenidos para este valor de tensión se determina que la capa hemirreductora es de 1,60 mm Al. Por lo tanto, se puede concluir que la capa hemirreductora se encuentra dentro de los límites de aceptabilidad.

6.4. Compensación del CAE para distintos espesores

Las dosis absorbidas a la entrada del detector de los angiografos Philips y Siemens, dependiendo del espesor del acrílico interpuesto entre el tubo y el detector, se encuentran a continuación:

Tabla 11. Dosis absorbidas a la entrada del detector del angiógrafo Philips

DFD = 120 cm; DFS cámara de ionización = 119 cm; tiempo de exp. = 30 ± 0,2 s; $K_{pr} = 1,342$

Espesor (cm)	Tensión (kV)	Corriente (mA)	Dosis (mGy)	Desvia. Max.
0	57,5	35,3	0,23 ± 0,04	8,3 %
2,5	58,0	40,4	0,41 ± 0,04	7,1 %
5	60,3	45,5	0,57 ± 0,05	11,1 %
7,5	61,8	45,5	0,71 ± 0,04	3,0 %
10	67,2	52,5	0,90 ± 0,05	6,0 %
12,5	69,0	53,4	1,10 ± 0,06	5,3 %
15	70,4	56,4	1,35 ± 0,06	8,5 %
17,5	71,2	57,2	1,82 ± 0,05	7,0 %

Tabla 12. Dosis absorbidas a la entrada del detector del angiógrafo Siemens

DFD = 120 cm; DFS cámara de ionización = 119 cm; tiempo de exp. = 30 ± 0,2 s; $K_{pr} = 1,342$

Espesor (cm)	Tensión (kV)	Corriente (mA)	Dosis (mGy)	Desvia. Max.
0	58,0	87,0	0,11 ± 0,05	7,1 %
2,5	58,0	121,0	0,21 ± 0,06	6,2 %
5	59,2	156,8	0,29 ± 0,06	11,3 %
7,5	61,2	169,8	0,44 ± 0,06	4,5 %
10	66,0	85,0	0,62 ± 0,05	6,4 %
12,5	66,0	119,4	1,03 ± 0,06	9,4 %
15	68,2	159,5	1,37 ± 0,07	6,5 %
17,5	68,8	164,5	1,92 ± 0,06	8,7 %

La desviación máxima encontrada de los valores obtenidos de dosis absorbidas, tras comparar ambos angiografos, fue de 11,3 %. Este valor se encuentra dentro de la tolerancia aceptada de $\leq \pm 20 \%$ para los equipos emisores de rayos X fluoroscópicos.

6.5. Tasa de dosis a la entrada del paciente con CAE

Las tasas de dosis a la entrada del paciente fueron medidas de la siguiente manera:

En el angiógrafo Philips, en el equipo telecomandado y en los arcos en C, el dispositivo de medida fue el detector Diados T6004 a la entrada del fantoma. Los valores de tasa de dosis se obtienen a partir del valor de carga que arroja el electrómetro Diados E, multiplicado por un factor de corrección de acuerdo con la calidad del haz y un factor de calibración del dispositivo, dividido por el tiempo de exposición de la radiación.

En el angiógrafo Siemens, el dispositivo de medida fue la cámara de ionización abierta. Los valores de tasa de dosis se obtienen a partir del valor de dosis absorbida arrojado por la cámara, que se divide por el tiempo de exposición a la radiación.

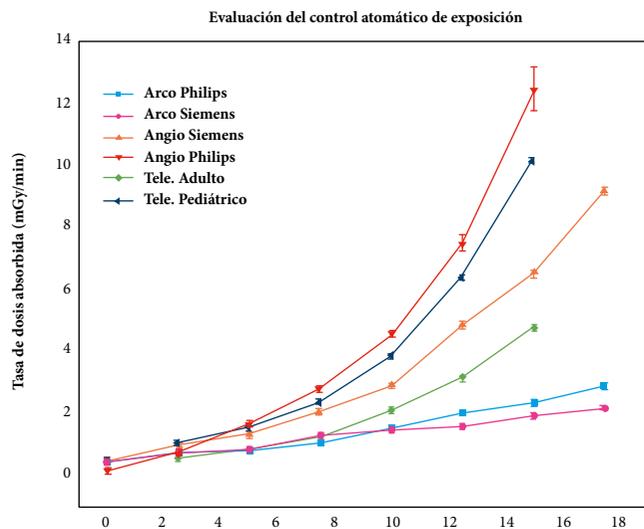


Figura 12. Evaluación del control automático de exposición de todos los equipos

En la gráfica de la figura 12 se puede observar que a medida que aumenta el espesor del acrílico, la tasa de dosis absorbida aumenta de forma exponencial. Este comportamiento se replica cuando se tiene a un paciente interpuesto entre el tubo de rayos X y el detector del equipo, ya que si es de textura gruesa, se requerirá de altas tasas de dosis para obtener buena calidad de imagen. Si se hace una comparación entre equipos, se puede notar en la gráfica que las tasas de dosis son mayores en los equipos de marca Philips.

En el equipo telecomandado, cuando se usa el fantoma correspondiente a niños, las tasas de dosis son mayores que

las que se registran con el fantoma de adulto. Esto se debe a que el tamaño de campo es menor.

Si se comparan los angiogramas, la tasa de dosis máxima en distintos espesores fue de $13,20 \pm 0,24$ mGy/min para un espesor de 15 cm de acrílico y un tiempo de exposición de 10 s, a lo que corresponde un valor aceptable en el rango de la tolerancia permitida (50 mGy/min para un espesor de acrílico de 20 cm). La tasa de dosis máxima en distintos espesores, comparando los arcos en C, fue de $2,90 \pm 0,08$ mGy/min para un espesor de 17,5 cm de acrílico, y un tiempo de exposición de 30 s, y corresponde a una pequeña tasa de dosis, si se compara con la tolerancia permitida, debido al tiempo de exposición, que fue mayor que el usado con los angiogramas.

La tasa de dosis máxima para distintos espesores de acrílico del fantoma de adulto en el equipo telecomandado fue de $4,80 \pm 0,12$ mGy/min, para un tamaño de campo de 25×25 cm, y con el fantoma de niño fue de $10,20 \pm 0,08$ mGy/min para un tamaño de campo de 17×17 cm, con un tiempo de exposición de 15 s. El valor corresponde a una tasa de dosis pequeña debido a que el tiempo de exposición es mayor y existen variaciones en la colimación del haz.

6.6. Resolución espacial

Las imágenes almacenadas por los cinco equipos emisores de rayos X del patrón de barras de plomo se muestran en la figura 13. El tamaño de campo de los angiogramas y el equipo telecomandado fue de 10×10 cm, y en los arcos en C, de 17×17 cm.

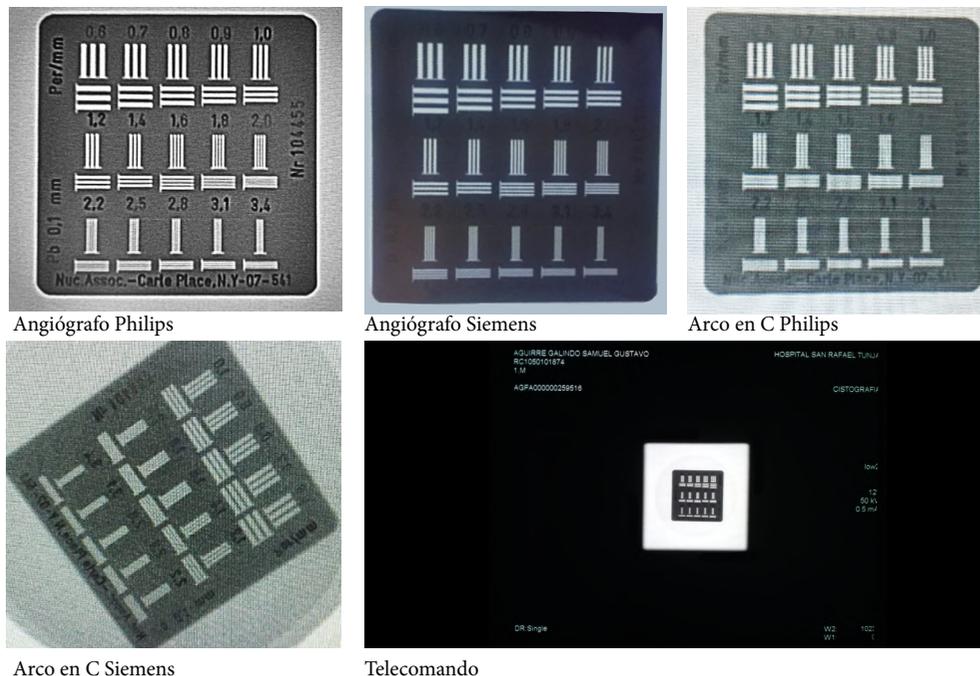


Figura 13. Imágenes del patrón de barras en cada uno de los equipos

Las imágenes obtenidas fueron evaluadas sobre la pantalla del monitor de TV, donde se pudo observar que en los angiográficos, el conjunto de pares de líneas más pequeño que se puede resolver fue de 1,6 pl/mm; en el arco en C Philips fue de 1,4 pl/mm; en el arco en C Siemens, de 1,2 pl/mm, y en el equipo telecomandado no fue posible identificar las barras de la herramienta debido a una complicación en el software para acercar la imagen. Las variaciones son mínimas en los parámetros eléctricos que ajustan los equipos con el patrón de barras interpuesto entre el tubo de rayos X y el detector (II o panel plano).

Los conjuntos de pares de líneas observados se encuentran dentro de los márgenes de aceptabilidad, ya que, para tamaños de campo ≤ 15 cm se deben identificar conjuntos $\geq 1,6$ pl/mm, y para tamaños de campo menores de 23 cm y mayores de 15 cm los conjuntos que deben identificarse deben ser $\geq 1,2$ pl/mm.

6.7. Resolución de bajo contraste

Las imágenes almacenadas por los cinco equipos emisores de rayos X de la lámina de aluminio con múltiples perforaciones se muestra en la figura 14.

Las imágenes obtenidas fueron evaluadas sobre la pantalla del monitor de TV, donde se pudo observar que todos los agujeros de la herramienta de prueba fueron identificados; por lo tanto, se determinó que los equipos funcionan correctamente. En el angiógrafo Philips, la resolución de bajo contraste se evaluó en los dos casos en que la herramienta se ubica sobre la camilla sin fantoma y con fantoma. En las imágenes almacenadas por el equipo se identificaron los agujeros con la diferencia de que con fantoma se aprecia ruido, debido a que el detector recibe mayor cantidad de fotones X.

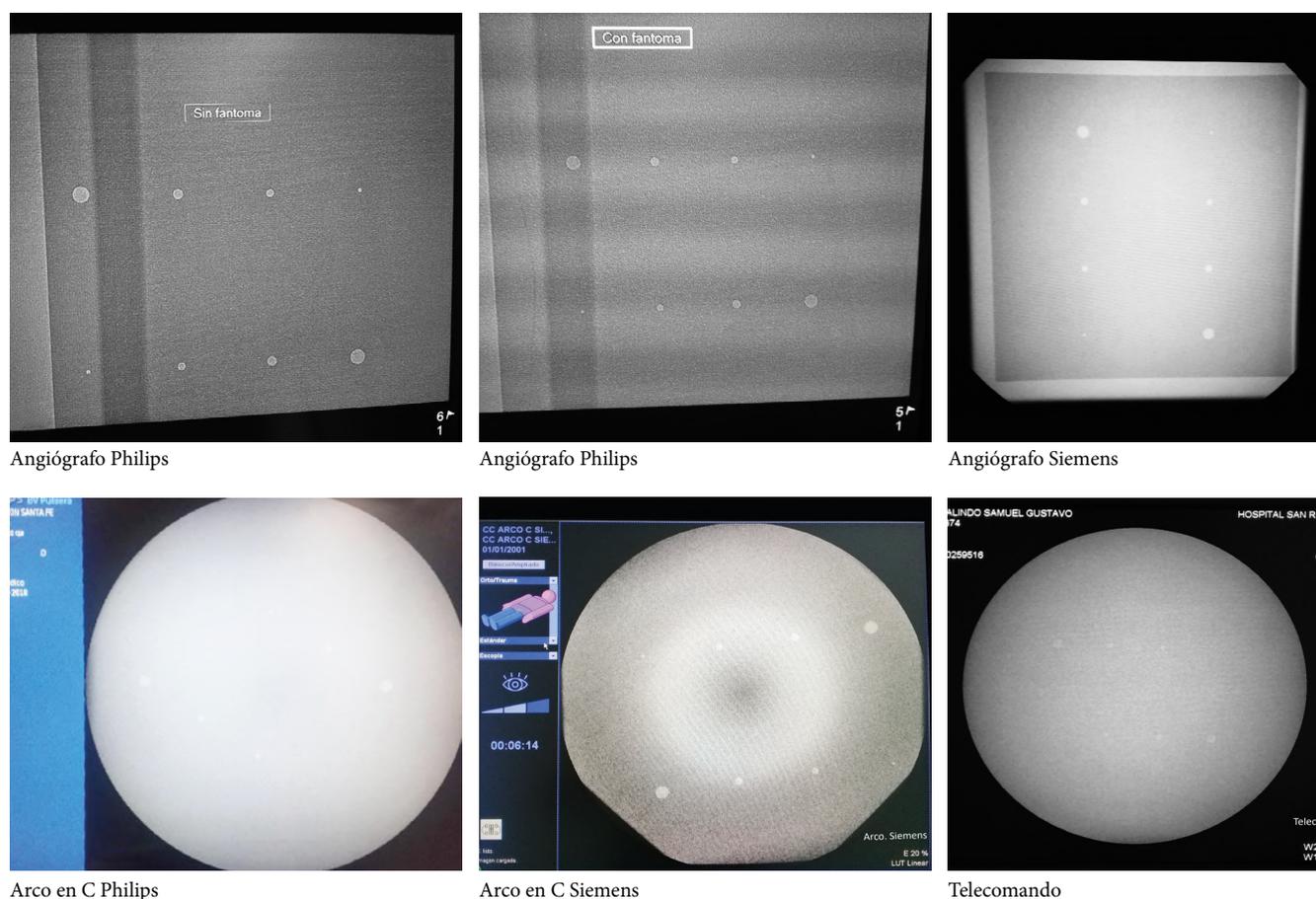


Figura 14. Imágenes de la lámina de aluminio correspondiente a cada uno de los equipos fluoroscópicos

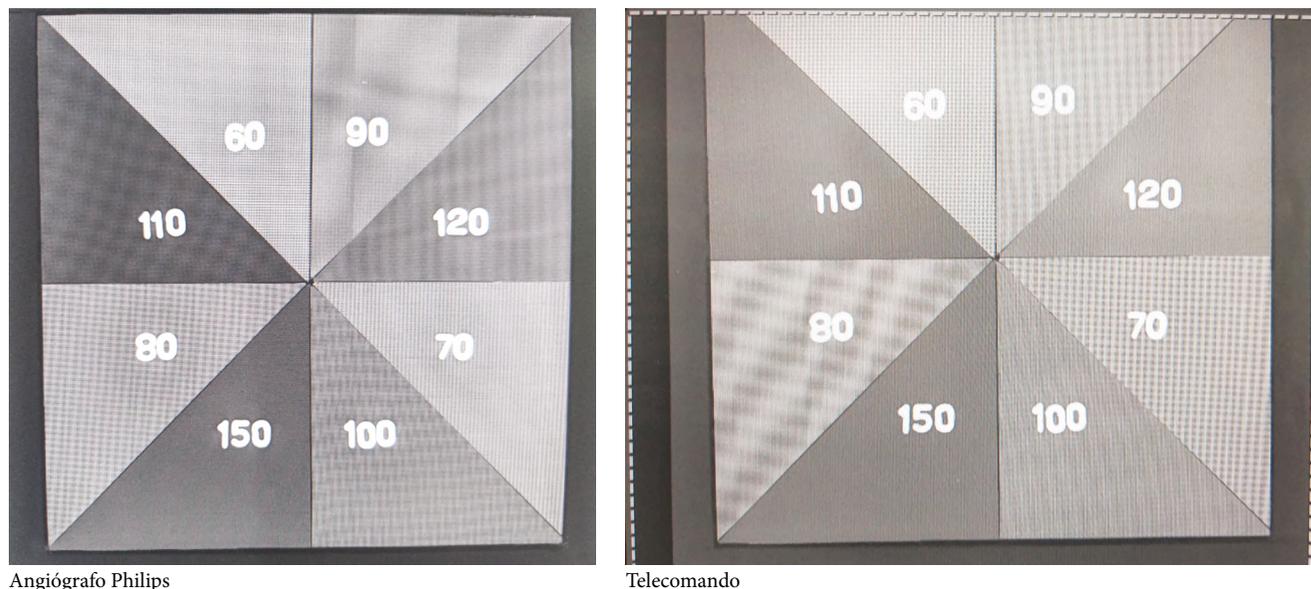


Figura 15. Imagen de la placa con mallas de cobre en el angiógrafo Philips y el equipo telecomandado

6.8. Resolución de alto contraste

Esta prueba se realizó en el equipo telecomandado y el angiógrafo Phillips. Las imágenes se muestran en la figura 15.

Las imágenes obtenidas fueron evaluadas sobre la pantalla del monitor de TV, donde se pudo observar que los números de malla visibles en la imagen almacenada por el angiógrafo Philips son los de 80 y 100 agujeros por pulgada. En el equipo telecomandado los números de malla visibles son los de 70 y 90 agujeros por pulgada. Por consiguiente, se puede concluir que las mallas visualizadas en la imagen se encuentran dentro de los márgenes de aceptabilidad, ya que para los intensificadores de imagen las mallas que se deben resolver en la imagen van de 70 a 90 agujeros por pulgada, y en los detectores de panel plano van de 80 a 110 agujeros por pulgada.

7. CONCLUSIONES

1. Los equipos evaluados en los diferentes centros hospitalarios de Colombia cumplieron con los estándares de control de calidad exigidos en la Resolución 482 de 2018 del Ministerio de Salud y Protección Social [1], ya que las pruebas evaluadas en cuanto a parámetros geométricos, calidad del haz, dosis al paciente y calidad de imagen según las recomendaciones de los protocolos se encontraron dentro de los márgenes de aceptabilidad.
2. Se identificó que en el equipo telecomandado no se cumplieron las tolerancias permitidas en la prueba de

resolución espacial; por lo tanto, se informó en el servicio de especialidades médicas del hospital correspondiente que se deben hacer las correcciones pertinentes.

3. El prototipo de fantoma para angiografía cerebral construido permitió la completa realización de las pruebas que constituyen los protocolos de control de calidad.
4. Se observó que los parámetros medidos en las pruebas de control de calidad varían de forma significativa, dependiendo del fabricante del equipo. Haciendo una comparación entre equipos de angiografía y arcos en C se observa que el fabricante Philips arroja mayor cantidad de tasas de dosis. Cuando se tienen un espesor de 15 cm de acrílico y un tiempo de exposición de 10 s, el angiógrafo Philips brinda una mayor tasa de dosis (de $13,20 \pm 0,24$ mGy/min), con una energía de 80 kV y un producto de corriente-tiempo de 16 mAs.
5. Este trabajo es un aporte importante a los protocolos existentes en la bibliografía en cuanto a los detalles metodológicos en los equipos de angiografía, debido a la generalidad con la que se establece el desarrollo de las pruebas de control de calidad en equipos fluoroscópicos. Además, los fantomas construidos no son muy comunes en el país, debido a sus elevados costos, y son de gran utilidad porque seguirán siendo utilizados en diferentes centros médicos que requieran el servicio de actualización de licencias en la práctica médica, mediante el cual se permite el uso de los equipos emisores de radiación.

Referencias

- [1] Ministerio de Salud y Protección Social. Resolución 482 “Por la cual se reglamenta el uso de equipos generadores de radiación ionizante, su control de calidad, la prestación de servicios de protección radiológica y se dictan otras disposiciones”, Bogotá, 2018.
- [2] Sociedad Española de Física Médica, Sociedad Española de Protección Radiológica y Sociedad Española de Radiología Médica, “Protocolo Español de calidad en radiodiagnóstico”. Revisión 2011 (Aspectos Técnicos), 2011, pp. 47-61.
- [3] Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nuclear en Latinoamérica y el Caribe (ARCAL) XLIX, “Implementación de las normas Básicas de Seguridad Internacionales en las Prácticas Médicas, Protocolos de Control de Calidad en Radiodiagnóstico”, 2001, pp. 54-71.
- [4] M. R. Ruiz. *Tablas antropométricas infantiles*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Artes, 2008.
- [5] W. R. Hendee, “X rays in medicine”, *Physics Today*, vol. 48, n.º 11, pp. 48-51, 1995. <https://doi.org/10.1063/1.881440>
- [6] J. E. Turner, “Interaction of Photons with Matter”, En *Atoms, radiation, and radiation protection*. Third Edition. Wiley-VCH, 2008, pp. 173-177. <https://doi.org/10.1002/9783527616978.ch8>
- [7] E. B. Podgorsak, “Interactions of Photons with Matter”, En *Radiation physics for medical physicists*. Springer-Verlag, 2006, pp. 277-355. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00875-7>
- [8] Organismo Internacional de Energía Atómica, Protección radiológica de los pacientes: fluoroscopia [Online]. Disponible en https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/HealthProfessionals/1_Radiology/Fluoroscopy.htm.
- [9] A. Brosed (ed.), *Fundamentos de física médica*. Vol. 2: *Radiodiagnóstico: bases físicas, equipos y control de calidad*. Madrid : SEFM, Universidad Internacional de Andalucía. 2004, p. 2.
- [10] R. Y. L. Chu, J. Fisher, B. R. Archer, B. J. Conway, M. M. Goodsitt, S. Glaze, J. E. Gray, K. J. Strauss, “Standardized Methods for Measuring Diagnostic X-ray Exposures”. American Institute of Physics; New York, NY, USA: AAPM Report 31, 1990.
- [11] A. Schreiner-Karoussou, “Review of image quality standards to control digital X-ray systems”. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 117, no. 1-3, pp. 23-25, 2005. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci722>

Simulación de la reacción de captura neutrónica por gadolinio por medio de GEANT4

Simulation of the gadolinium neutron capture reaction using GEANT4

Diego Alexander Téllez¹, Robinson Steven Medina¹, José A. Sarta², Edwin Munévar¹ y José Alfonso Leyva²

Citación: D. A. Téllez, R. S. Medina, J. A. Sarta, E. Munévar y J. A. Leyva., “Simulación de la reacción de captura neutrónica por gadolinio por medio de GEANT4”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 28-35, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.508>

Recibido: 27 de septiembre de 2019

Aceptado: 11 de diciembre de 2019

Publicado en línea: 30 de diciembre de 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.508>

RESUMEN

El uso de nucleidos de gadolinio como agentes de captura de neutrones en la terapia de cáncer por captura neutrónica es de gran interés debido principalmente a su alta sección eficaz de 225.000 barns. El espectro del estado final de la reacción contiene 158-gadolinio (158Gd), emisión de fotones (rayos X y rayos gamma) y electrones (conversión interna y Auger). Este espectro ofrece una física muy rica y de enorme potencial para la eliminación de células tumorales debido a su alta transferencia lineal de energía. En este trabajo presentamos simulaciones de este proceso, realizadas en las últimas seis versiones de Geant4 (10.00.p04, 10.01.p03, 10.02.p03, 10.03.p03, 10.04.p03 y 10.05.p01). Tomando en cuenta que para este trabajo nos interesan particularmente los neutrones de baja energía (energías < 20 MeV), usaremos el paquete G4NeutronHP. Finalmente obtenemos el conteo de eventos, la energía promedio y las distribuciones angulares (theta y phi) de las partículas en el estado final, encontrando, de esta manera, que para neutrones de baja energía, el estudio de la reacción de captura neutrónica por 158Gd es viable con Geant4.

Palabras clave: gadolinio, captura neutrónica, electrones Auger, LET

ABSTRACT

The use of gadolinium nuclides as neutron capture agents in neutron capture cancer therapy is of great interest, mainly because of these nuclides' high cross-section of 225,000 barns. The final state spectrum of the reaction contains gadolinium-158 (Gd-158), photon emission (X-rays and gamma rays) and electrons (internal conversion and Auger electrons). This spectrum offers very rich physics and enormous potential for the elimination of tumor cells due to high linear energy transfer. In this article, we present simulations of this process performed using the last six versions of Geant4 (10.00.p04, 10.01.p03, 10.02.p03, 10.03.p03, 10.04.p03 and 10.05.p01). Given that we are particularly interested in low-energy neutrons (energies <20 MeV) in this work, we used the G4NeutronHP package. Finally, we obtained the event count, the average energy and the angular distributions (theta and phi) of particles in the final state and find that for low-energy neutrons, study of the neutron capture reaction by Gd-158 with Geant4 is viable.

Keywords: gadolinium, neutron capture, Auger electrons, LET

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Proyecto Curricular de Licenciatura en Física, Bogotá, Colombia

² Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Física, Bogotá, Colombia
Email de correspondencia: leyvaa@javeriana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En 1935, Goldhaber y Taylor [1] describieron de manera teórica la captura de neutrones por medio de núcleos, procedimiento que posteriormente se propuso como posible terapia (NCT, por sus siglas en inglés) contra el cáncer [2]. Esta terapia, de carácter no invasiva, se desarrolla mediante un proceso binario focalizado a partir del uso de fármacos o portadores de isótopos como 10-Boro (^{10}B) y/o 157-gadolinio (^{157}Gd), que se almacenan principalmente en los tejidos cancerígenos y, en una menor proporción, en el tejido sano circundante. Los portadores son entonces irradiados con un haz de neutrones de baja energía que incide en la zona de interés, con lo cual se logra que la terapia se focalice aún más, reduciendo así el posible daño a los tejidos sanos [3] [4] [5] [6].

De los portadores de isótopos, el más utilizado en NCT es el ^{10}B , que tiene una sección eficaz de captura neutrónica, de aproximadamente 3.840 barns [7]. La reacción de captura neutrónica con ^{157}Gd , por su parte, cuenta con una sección eficaz mucho más alta, de aproximadamente 225.000 barns [7]. El estado final de esta reacción (véase la figura 1) se da a través de un núcleo en retroceso de 158-gadolinio (^{158}Gd) y la emisión de rayos γ y electrones de conversión interna

(IC, por sus siglas en inglés). Con posterioridad a la emisión de electrones IC se producen fotones (rayos X) y/o electrones Auger. Debido a su transferencia lineal de energía (linear energy transfer, o LET, por sus siglas en inglés) de aproximadamente $300 \text{ keV}/\mu\text{m}$, los electrones Auger emitidos son altamente capaces de eliminar células tumorales. Esta es una de las razones por las cuales la terapia por captura neutrónica con ^{157}Gd permite lograr distribuciones de dosis y efectos biológicos comparables con aquellos obtenidos a partir de ^{10}B [7] [8] [9] [10].

Lo anterior demuestra el uso potencial y eficiente del ^{157}Gd como agente portador en la terapia por captura neutrónica. Los procesos complejos implicados en dicha captura dejan ver la necesidad de llevar a cabo estudios de simulación que puedan elucidar aún más detalles de la reacción. El objetivo de este trabajo se centra en simular, con Geant4, la reacción de captura neutrónica por ^{157}Gd . Para esto se evalúan cantidades como el número promedio de partículas por captura neutrónica y el correspondiente espectro de energía, que pueden ser contrastadas con trabajos previos, tanto en términos de experimentación como de simulación. Adicionalmente, se determinan las distribuciones angulares de los productos de la reacción, con el fin de verificar qué tan completa es la información concerniente a estas.

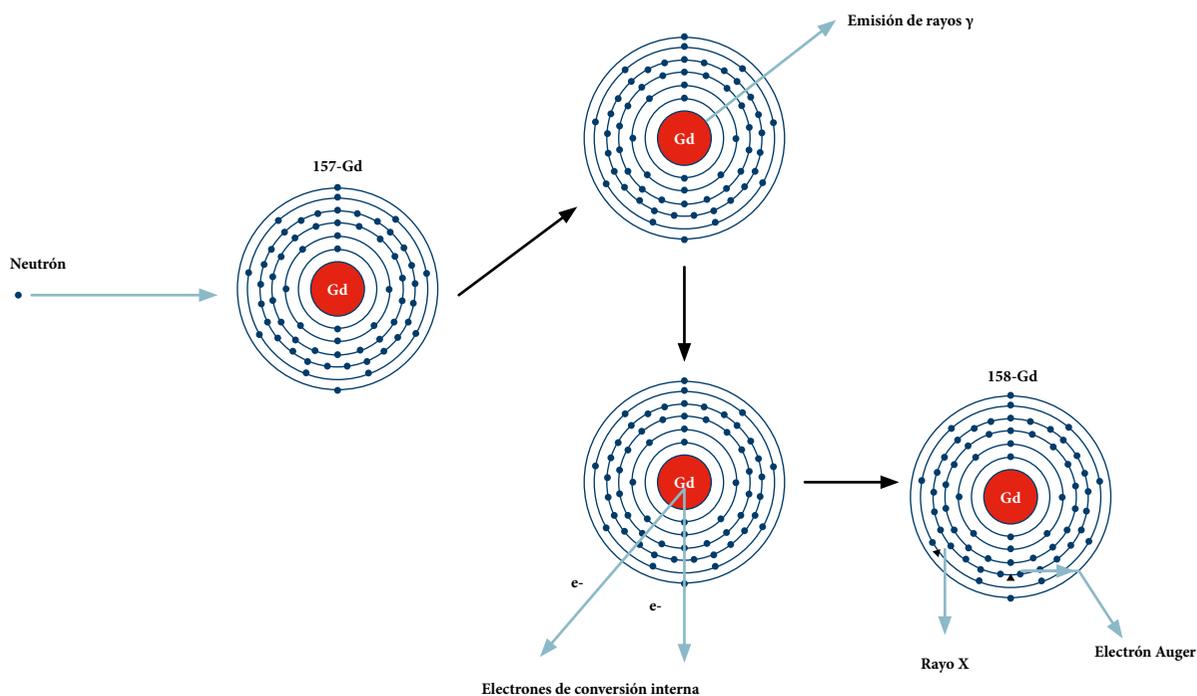


Figura 1. Representación de la reacción GdNC. Reacción producida por la captura de neutrones por ^{157}Gd .

Fuente: Realizada con base en la representación del GdNCT de [7].

2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA REACCIÓN $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$

Los estudios previos de la reacción de captura neutrónica por ^{157}Gd están enfocados en el número promedio de partículas producidas y su energía promedio. Entre estos estudios se destaca el trabajo de Sakurai y Kobayashi [11], en el que se determina experimentalmente el espectro de rayos γ y rayos X. Los picos más prominentes se observan a energías de 79,5 keV, 182 keV y 6.750 keV. Con base en este espectro, los autores determinan de manera indirecta el espectro energético de electrones IC y Auger. El espectro de rayos γ también es medido en [16]. En el espectro se observan picos prominentes en 181, 1.187, 5.903 y 6.750 keV. La medición del espectro de los electrones IC se encuentra en el trabajo de Kandlakunta [12]. Allí se observa un espectro discreto que está relacionado principalmente con transiciones a partir de los dos niveles de energía más bajos del núcleo excitado de $^{158}\text{Gd}^*$. Dependiendo de la capa en la que se encuentren los electrones IC (K, L o M), se observa emisión de electrones en el rango de 29 a 228 keV; el pico de mayor intensidad está centrado en 71 keV [12]. Goorley y Nikjoo [7] y Stepanek [9] determinan el espectro de fotones y electrones en la reacción a partir de Montecarlo. Los resultados de estos dos trabajos se muestran en la tabla 1. Como se puede observar, los valores obtenidos con rayos γ y electrones IC son consistentes en ambos trabajos. Por

el contrario, los valores derivados de rayos X y electrones Auger difieren significativamente en los dos trabajos.

Tabla 1. Resultados computacionales obtenidos por Goorley y Nikjoo [7] y Stepanek [9] sobre el número promedio por captura y energía promedio de los núcleos y partículas presentes en el estado final de la reacción $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$

	[7]	[9]
Rayos gamma (keV)	1.330	1.420
N.º productos (yield)	1,83	1,56
Rayos X (keV)	12,77	32,28
N.º productos (yield)	0,84	0,32
Electrones IC (keV)	66,5	70,1
N.º productos (yield)	0,69	0,649
Electrones Auger (keV)	0,85	0,426
N.º productos (yield)	4,93	9,71

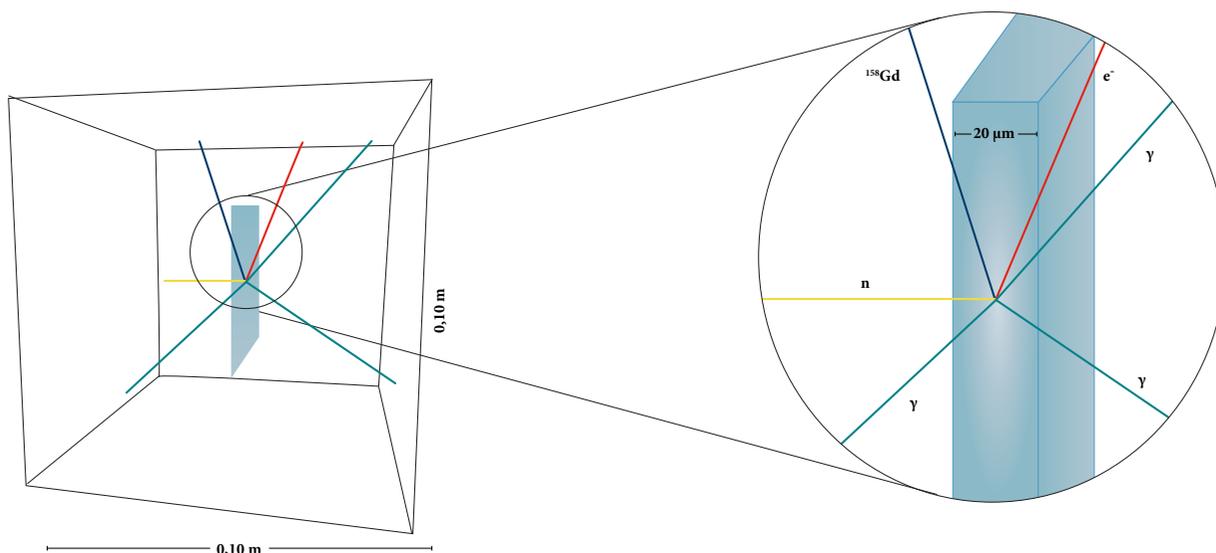
3. SIMULACIÓN CON GEANT4

3.1. Geometría y materiales

La simulación con Geant4 implementa una geometría específica formada por un cubo o volumen principal (*world volume*) de 0,10 m de lado. Dentro de este volumen se ubica el blanco de 0,01 m \times 0,01 m \times 20 μm con una de sus caras laterales ubicada en el origen del volumen principal (véase en la figura 2A el panel superior). El espesor del blanco (20 μm) se estableció con el fin de asegurar que ocurra la captura neutrónica en cada evento.

La selección de este valor se justifica con base en la máxima distancia recorrida (profundidad) por el neutrón incidente dentro del blanco antes de ser capturado (figura 2B).

A



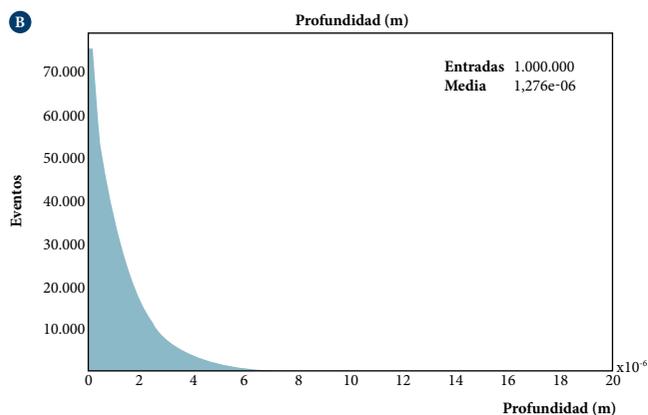


Figura 2. A: Visualización de la geometría de la simulación. El volumen principal corresponde a una caja de 0,10 m de lado hecha de vacío; el blanco, ubicado en el centro del volumen principal, tiene un espesor de 20 μm y está hecho de ^{157}Gd . El haz de neutrones (color amarillo) incide por la izquierda, perpendicularmente al blanco, y produce tres rayos γ (color verde), un electrón (color rojo) y el núcleo de ^{158}Gd en retroceso (color azul). B: Profundidad de penetración del haz de neutrones en el blanco. No se observa captura neutrónica más allá de los 20 μm .

3.2. HAZ DE NEUTRONES

El haz incidente corresponde a un haz de neutrones monoenergético de 0,025 eV¹ y unidireccional dirigido a lo largo del eje z.

3.3. Procesos físicos

Un correcto modelado de reacciones nucleares en simulaciones de Montecarlo requiere el uso de bases de datos especiales que contienen valores recomendados basados en resultados disponibles a nivel experimental y/o teórico para las cantidades físicas relevantes asociadas con la reacción nuclear específica. Para el caso de neutrones de baja energía ($E_n < 20$ MeV) estas bases de datos, llamadas *librerías* o *archivos de datos nucleares evaluados* (ENDF, por sus siglas en inglés), se implementan en Geant4 a partir del paquete G4NeutronHP [14]. Para habilitar el proceso de captura neutrónica, este paquete tiene disponibles librerías como G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP, G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP, G4HadronPhysicsQGSP_BERT_HP, entre otras. Comparaciones entre las tres librerías (con una misma versión de Geant4) no mostraron diferencias significativas en cuanto al número promedio de partícu-

las producidas por captura neutrónica y la correspondiente energía cinética promedio de cada una. Por tanto, en este trabajo se escogió de manera arbitraria la librería G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP.

Las librerías de captura neutrónica generan por defecto únicamente la parte del estado final relacionada con fotones y ^{158}Gd . Para generar electrones en la captura neutrónica de ^{157}Gd se definió la variable G4NEUTRONHP_USE_ONLY_PHOTONEVAPORATION = 1. Adicionalmente, el uso de la librería G4RadioactiveDecayPhysics permitió extender el rango de energía de los electrones hasta un valor mínimo de 29 keV. Se debe mencionar que las ENDF no satisfacen la conservación de momento y energía en algunas reacciones nucleares; por el contrario, estas librerías están construidas con el fin de preservar cantidades promedio generales como energía promedio liberada y número promedio de partículas secundarias, entre otras. Para evitar una conservación forzada de momento y energía a partir de la producción de rayos gamma artificiales se utilizó la variable G4NEUTRONHP_DO_NOT_ADJUST_FINAL_STATE = 1 [14].

4. RESULTADOS

Geant4 cuenta con la funcionalidad de “scorers” para extraer información sobre cantidades físicas. Esta funcionalidad está restringida a cantidades como longitud de trayectoria, energía y dosis depositadas, flujo y número de partículas secundarias. Para tener más independencia y control sobre la simulación y, al mismo tiempo, acceso completo a cualquier cantidad física, se utilizó en su lugar la clase G4UserSteppingAction. Además del número promedio de partículas y núcleos producidos, esta clase permite reconstruir a nivel del vértice primario de la reacción, la energía cinética y distribución angular de las partículas provenientes del estado final de la captura neutrónica por ^{157}Gd .

4.1. Número promedio de partículas y núcleos

La complejidad de la simulación del proceso de captura neutrónica usando ^{157}Gd se revela en el alto grado de variación de los resultados, según cuál sea la versión de Geant4 utilizada. Para cada núcleo y partícula presentes en el estado final (^{158}Gd , fotones y electrones) se hizo una comparación del número promedio producido por captura neutrónica con su respectiva energía promedio, usando las últimas seis ver-

¹ El valor de 0,025 eV corresponde a la energía más probable asociada con un conjunto de neutrones térmicos, que siguen una distribución tipo Maxwell-Boltzmann.

siones de Geant4 (tabla 2). En cada caso se ejecutó un total de dos millones de eventos. Los valores obtenidos difieren significativamente entre cada versión. La versión 10.01 no produjo resultados satisfactorios para el número promedio de electrones, por lo cual no se considera confiable. Se observa estabilidad en los resultados únicamente entre las versiones 10.03 y 10.04.

Según [12] y [15], en la reacción de captura neutrónica se libera, en promedio, un número de 3,29 rayos γ por captura en un rango amplio de energía, con una media de 2,39 MeV. En [7] se obtiene un número promedio de 1,83 rayos γ con energía promedio de 1,33 MeV, mientras que [9] establece 1,56 rayos γ por captura con energía promedio de 1,42 MeV. Las versiones 10.00 y 10.05 son las que producen resultados más cercanos a los reportados por [12] y [15]. No se observa, sin embargo, similitud en ninguna de las versiones con los resultados de [7] y [9].

En [15], el número promedio estimado de electrones IC por captura es de 0,73, con una energía promedio de 91,0 keV; los resultados en [7] y [9] indican un número promedio de electrones IC de 0,69 y 0,65, con energías promedio de 66,5 keV y 70,1 keV, respectivamente. En este caso, las versiones 10.02, 10.03 y 10.04 producen resultados consistentes con [7], [9] y [12]. El valor para el número promedio de electrones por captura obtenido en la versión 10.00 es consistente con el sugerido en [12], de 0,60. La versión 10.05 produce un número promedio muy por debajo de los obtenidos en los otros trabajos.

En general, no se observa uniformidad entre los resultados de los trabajos reportados previamente ni tampoco entre

los resultados de las simulaciones hechas en este trabajo con diferentes versiones de Geant4. Las versiones más consistentes con trabajos previos son 10.00, 10.03, 10.04 y 10.05. Dado que la versión 10.05 contiene los datos de librerías evaluadas más recientes, se usó esta versión como referencia para determinar el espectro de energías de fotones y electrones.

4.2. Multiplicidad y espectro de energía

Para estudiar la multiplicidad y el espectro de energía de la reacción nuclear de captura neutrónica $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ se generó un total de cinco millones de eventos usando la versión 10.05.p01 de Geant4. La figura 3 muestra la multiplicidad en el caso de los fotones y electrones producidos en el estado final de la captura neutrónica. Se observa una tendencia de producción de eventos con tres fotones; en los eventos que contienen electrones en el estado final (existen muchos eventos con ausencia de electrones) se producen primordialmente aquellos con un electrón.

En la figura 4 se observa el espectro continuo de energía en el núcleo de ^{158}Gd . La energía asociada con el retroceso de ^{158}Gd cubre un rango de 0,0017 a 242,88 eV, con un valor medio de 102,93 eV.

La figura 5 presenta el espectro discreto de energía de los fotones emitidos en la simulación. Se dividió el espectro en tres rangos, en los que se aprecian algunos de los picos característicos a 181, 1.187, 6.420, 6.750 y 7.937 keV, reportados en [16]. Si bien es cierto que aparecen la mayoría de los picos característicos, son opacados por otros de mayor intensidad que no aparecen de manera predominante en los datos experimentales.

Tabla 2. Valores para el número promedio por captura y energía promedio de los núcleos y partículas presentes en el estado final de la reacción $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ obtenidos en este trabajo usando las seis versiones de Geant4 más recientes (con la versión 10.06 liberada el 6 de diciembre de 2019 se obtuvieron resultados similares a los de la versión 10.05.p01)

	Geant4 10.00.p04	Geant4 10.01.p03	Geant4 10.02.p03	Geant4 10.03.p03	Geant4 10.04.p03	Geant4 10.05.p01	
^{158}Gd	Número promedio	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
	Energía promedio (eV)	74,454 ± 0,115	106,467 ± 0,072	210,737 ± 0,007	79,504 ± 0,040	79,623 ± 0,078	102,939 ± 0,017
Fotones	Número promedio	3,567 ± 0,002	2,511 ± 0,001	1,120 ± 0,001	3,999 ± 0,003	4,001 ± 0,001	2,938 ± 0,001
	Energía promedio (MeV)	2,212 ± 0,001	3,161 ± 0,002	7,036 ± 0,003	1,967 ± 0,001	1,966 ± 0,001	2,699 ± 0,001
Electrones	Número promedio	0,567 ± 0,001	< 0,0001	0,723 ± 0,001	0,749 ± 0,001	0,752 ± 0,001	0,105 ± 0,001
	Energía promedio (keV)	62,414 ± 0,099	77,793 ± 3,250	58,437 ± 0,060	73,992 ± 0,221	73,709 ± 0,070	84,602 ± 0,033

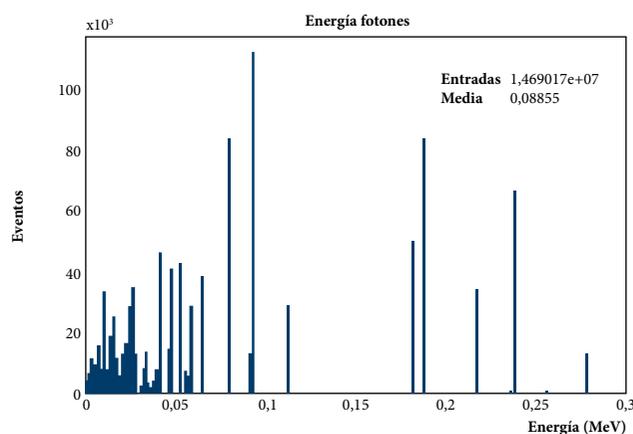
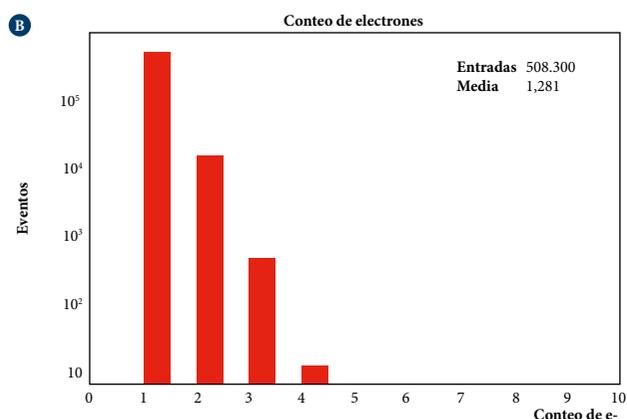
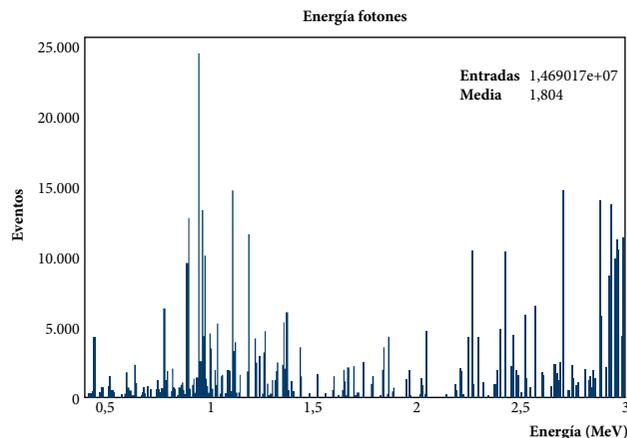
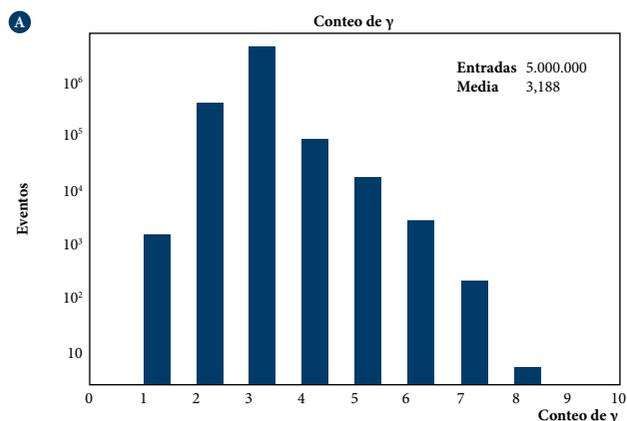


Figura 3. A: Número de fotones emitidos en cada reacción de captura neutrónica. B: Número de electrones emitidos en cada reacción de captura neutrónica. Número de electrones emitidos en cada reacción de captura neutrónica, obtenidos a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01. Nótese la escala logarítmica en el eje vertical de cada gráfica.

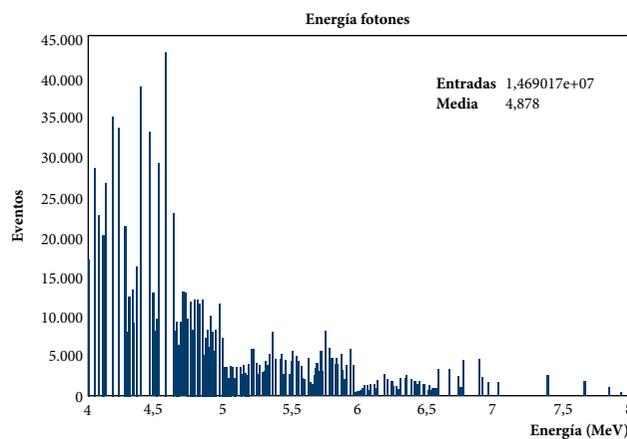
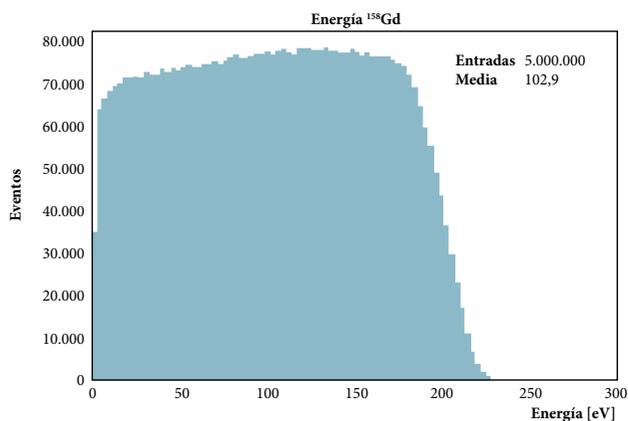


Figura 5. Espectro de energía correspondiente a los fotones emitidos en la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenido a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01. Arriba: Rango entre 0 y 300 keV. Medio: rango entre 400 keV y 3 MeV. Abajo: Rango entre 4 MeV y 8 MeV.

Figura 4. Espectro continuo de energía correspondiente al núcleo en retroceso de ^{158}Gd , producto de la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenido a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01.

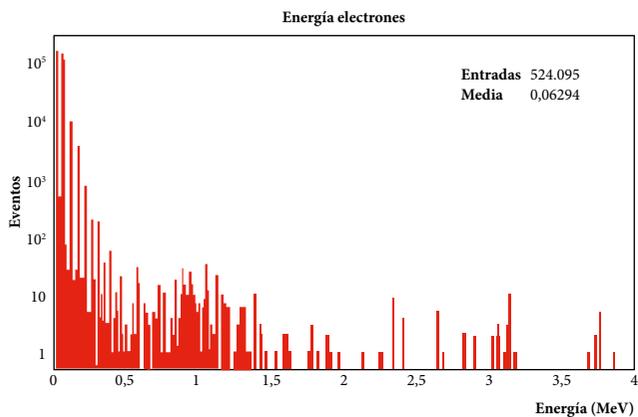


Figura 6. Espectro de energía correspondiente a los electrones emitidos en la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenido a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01. Nótese la escala logarítmica en el eje vertical.

Para el caso de los electrones, el espectro de energía se muestra en la figura 6. Se produce un rango amplio de electrones con energías entre 29,264 keV y 3,833 MeV con un valor medio de 62,21 keV. De igual manera, una inspección cercana al espectro muestra la presencia de los picos característicos reportados en [12]; entre ellos están 29, 71, 78, 131, 173 y 180 keV. Similar al caso de los fotones, los picos característicos aparecen, pero no coinciden en la intensidad reportada en la literatura, por lo cual se ven disminuidos por picos aparentemente no encontrados en los datos experimentales.

4.3. Distribución angular

Las distribuciones angulares (θ y ϕ) de los productos del estado final, generadas con un total de cinco millones de eventos y usando la versión 10.05.p01 de Geant4, se muestran en la figura 7 para ^{158}Gd , fotones y electrones, respectivamente. En los tres casos se aprecia que la distribución en el ángulo polar θ tiene un máximo en 1,57 radianes (90 grados). De igual forma, la distribución en el ángulo azimutal ϕ muestra un comportamiento uniforme en los tres casos. Estas distribuciones muestran que los ángulos de emisión de los fotones y electrones, al igual que el retroceso de ^{158}Gd son generados isotrópicamente en $\cos\theta$ y ϕ .

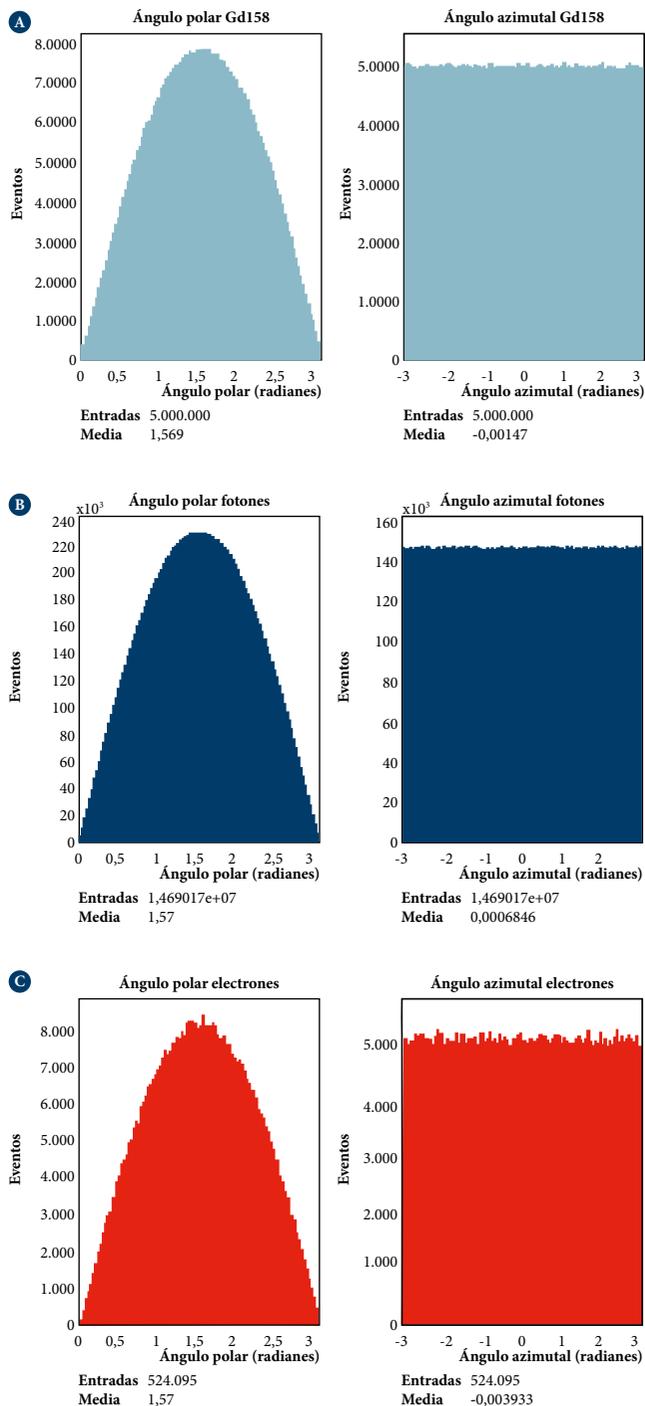


Figura 7. Distribución angular del ángulo polar θ (izquierda) y del ángulo azimutal ϕ (derecha) correspondiente al núcleo en retroceso de ^{158}Gd (A), los fotones emitidos (B) y los electrones emitidos (C) en la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenidas a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01.

5. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la simulación de la reacción de captura neutrónica por ^{157}Gd usando la herramienta computacional Geant4. Esta herramienta permite simular el estado final de la captura neutrónica, que incluye ^{158}Gd , fotones y electrones. Aunque los resultados obtenidos con diferentes versiones de Geant4 no muestran en general consistencia entre sí, se observa que los espectros de energía obtenidos con fotones y electrones contienen la mayoría de picos representativos reportados en la bibliografía. Si bien este estudio representa un primer acercamiento a la simulación de esta reacción, los resultados hasta ahora obtenidos muestran que Geant4 es una herramienta viable para simular la captura neutrónica por ^{157}Gd .

Referencias

- [1] H. J. Taylor y M. Goldhaber, "Detection of nuclear disintegration in a photographic emulsion [2]", *Nature*, vol. 135, n.º 3409. Nature Publishing Group, p. 341, 1935. <https://doi.org/10.1038/135341a0>
- [2] G. Locher, "Biological effects and therapeutic possibilities", *The American Journal of Roentgenology*, vol. 36, pp. 1-13, 1936.
- [3] G. A. Miller Jr., N. E. Hertel, B. W. Wehring y J. L. Horton, "Gadolinium neutron capture therapy", *Nuclear Technology*, vol. 103, n.º 3, pp. 320-331, 1993. <https://doi.org/10.13182/NT93-A34855>
- [4] A. Deagostino *et al.*, "Insights into the use of gadolinium and gadolinium/boron-based agents in imaging-guided neutron capture therapy applications", *Future Medicinal Chemistry*, vol. 8, n.º 8, pp. 899-917, 2016. <https://doi.org/10.4155/fmc-2016-0022>
- [5] J. T. Masiakowski, J. L. Horton y L. J. Peters, "Gadolinium neutron capture therapy for brain tumors: A computer study", *Medical Physics*, vol. 19, n.º 5, pp. 1277-1284, 1992. <https://doi.org/10.1118/1.596761>
- [6] G. De Stasio *et al.*, "Gadolinium in human glioblastoma cells for gadolinium neutron capture therapy", *Cancer Research*, vol. 61, n.º 10, pp. 4272-4277, 2001.
- [7] T. Goorley y H. Nikjoo, "Electron and photon spectra for three gadolinium-based cancer therapy approaches", *Radiation Research*, vol. 154, n.º 5, pp. 556-563, 2000. [https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2000\)154\[0556:E-APSFT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2000)154[0556:E-APSFT]2.0.CO;2)
- [8] S. A. Enger, V. Giusti, M.-A. Fortin y H. Lundqvist, "Dosimetry for gadolinium neutron capture therapy (Gd-NCT)", *Radiation Measurements*, vol. 59, pp. 233-240, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.05.009>
- [9] J. Stepanek, "Emission spectra of gadolinium-158", *Medical Physics*, vol. 30, n.º 1, pp. 41-43, 2003. <https://doi.org/10.1118/1.1528176>
- [10] B. N. Fasni, Y. Sardjono y B. P. Lapanporo, "Dose analysis of gadolinium neutron capture therapy (GdNCT) on cancer using SHIELD-HIT12A", *ASEAN Journal on Science & Technology for Development*, vol. 35, n.º 3, pp. 209-212, 2018. <https://doi.org/10.29037/ajstd.543>
- [11] Y. Sakurai y T. Kobayashi, "Experimental verification of the nuclear data of gadolinium for neutron capture therapy", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 39, n.º sup2, pp. 1294-1297, 2002. <https://doi.org/10.1080/00223131.2002.10875341>
- [12] P. Kandlakunta, L. Cao y P. Mulligan, "Measurement of internal conversion electrons from Gd neutron capture", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 705, pp. 36-41, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.077>
- [13] S. Agostinelli *et al.*, "Geant4: a simulation toolkit", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 506, n.º 3, pp. 250-303, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [14] GEANT4 Collaboration, *Book for application developers*, release 10.5 March 2019. Disponible en <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/BackupVersions/V10.5-2.0/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>
- [15] G. A. Miller Jr., N. E. Hertel, B. W. Wehring y J. L. Horton, "Gadolinium neutron capture therapy", *Nuclear Technology*, vol. 103, n.º 3, pp. 320-331, 1993. <https://doi.org/10.13182/NT93-A34855>
- [16] Iwa Ou *et al.*, "Measurement of the energy, multiplicity and angular correlation of γ -rays from the thermal neutron capture reaction $\text{Gd}(n,\gamma)$ using JPARC-ANNRI", *AIP Conference Proceedings* 1594, 351, 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4874094>

Temperature and heat flux calculations for the maximum power channel of the TRIGA IAN-R1 research reactor

Cálculos de temperatura y flujo de calor para el canal de máxima potencia del reactor de investigación TRIGA IAN-R1

José Antonio Sarta¹, Luis Álvaro Castiblanco²

Citación: J. A. Sarta y L. A. Castiblanco, "Temperature and heat flux calculations for the maximum power channel of the TRIGA IAN-R1 research reactor", *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 36-39, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.509>

Received: August 23, 2019

Accepted: December 16, 2019

Available online: December 30, 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.509>

ABSTRACT

With cooperation of the International Atomic Energy Agency (IAEA), thermal-hydraulic calculations were carried out for conversion of the IAN-R1 Reactor from MTR-HEU fuel to TRIGA-LEU fuel. To establish thermal-hydraulic calculation and analysis research in Colombia, this program was carried out and included training, acquisition of hardware, software and natural convection flow calculations for the TRIGA IAN-R1 research reactor operating at 100 kW. The purpose of the study is to validate the steady state thermal hydraulic analysis that has been carried out by means of the NATCON code. This paper presents the results of the maximum axial temperature distribution for fuel, clad, and coolant. In addition, the Bernath critical heat flux with pool water temperature as a parameter is presented.

Keywords: temperature, heat flux, departure from nucleate boiling.

RESUMEN

En cooperación con el Organismo Internacional de Energía Atómica, se realizaron cálculos termo-hidráulicos en la conversión del Reactor IAN-R1, de combustible MTR de alto enriquecimiento a combustible TRIGA de bajo enriquecimiento. Para establecer investigación y cálculos termo-hidráulicos en Colombia, se adelantó un programa incluyendo entrenamiento, adquisición de equipos y códigos con la realización de cálculos de convección natural para el reactor TRIGA IAN-R1 operando a 100 Kw. El propósito del presente estudio es validar el análisis termo-hidráulico en estado estacionario realizado con el código NATCON. Este artículo presenta los resultados de la distribución axial de la temperatura máxima para el combustible, su revestimiento y el refrigerante. Adicionalmente se presenta el flujo de calor crítico de Bernath con la temperatura del agua como parámetro.

Palabras clave: temperatura, flujo de calor, partida de ebullición nucleada.

¹ Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Física, Bogotá, Colombia

² Technology and Nuclear Science, Bogotá, Colombia
Email de correspondencia: sartaj@javeriana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

IAN-R1 is a pool-type research reactor that was initially fueled with MTR-HEU enriched to 93 % U-235 [1] and has been in operation since 1965 at 10 kW (t); the reactor was upgraded to 30 kW(t) in 1980. In 1997, General Atomics (GA) converted the HEU fuel to LEU fuel, TRIGA ($\text{UzrH}_{1.65}$) type, and upgraded the reactor power to 100 kW(t) [2].

This paper describes the thermal-hydraulic evaluations made for the IAN-R1 TRIGA reactor operating at 100 kW with cooling from natural convection flow around the fuel elements. To validate the calculations, the results have been compared with the thermal hydraulic analysis carried out by General Atomics (GA), who used the one-dimensional STAT code during the conversion of HEU fuel to LEU TRIGA fuel [3].

For a single channel of TRIGA IAN-R1 reactor operating at steady conditions, the exit coolant temperature, outlet coolant velocity, coolant flow rate, maximum wall temperature and fuel temperature are calculated. The maximum channel heat flux at which there is departure from nucleate boiling (DNB) and the transition to film boiling begins was also evaluated. All the values were obtained using the NATCON code [4].

2. CALCULATIONS

The TRIGA-LEU fuel is composed of a mixture of uranium and zirconium hydride $\text{UZrH}_{1.65}$. The uranium loading is 12.75 wt % of the fuel material, and ^{235}U is enriched to 19.7 %. A 3.15 mm radius hole is drilled through the center of the fuel and filled with a solid zirconium rod. The fuel rods have a radius of 16.929 mm and a length of 381 mm. Each fuel rod is clad with stainless-steel Type 304 with a 34.9 mm diameter [5]. For this analysis, it is assumed that the core is loaded with 54 rods.

The hydraulic flow parameters calculated for this work are listed in Table 1., and the channel used is a square array of fuel elements, as illustrated in Figure 1.

Table 1. Hydraulic flow parameters

Flow area	527.7 mm ² /elem.
Wetted perimeter	109.7 mm/elem.
Hydraulic diameter	19.2 mm
Fuel element diameter	34.9 mm
Fuel surface area (mm ²)	4.18 x 10 ⁴ mm ²

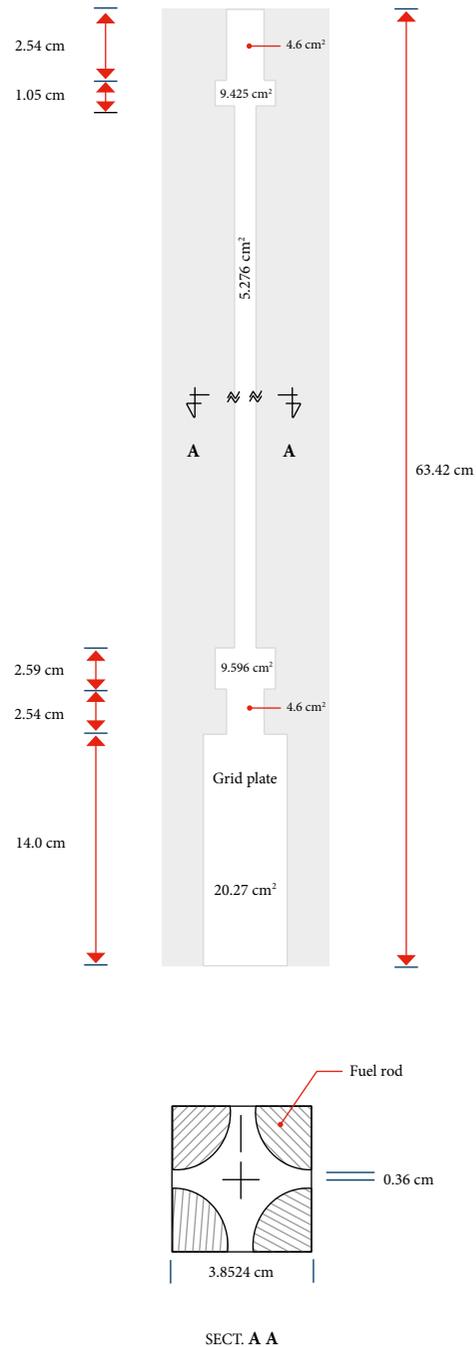


Figure 1. Channel configuration and dimensions.

The NATCON code computes the natural convection conditions for a single channel in a research reactor that operates at steady conditions. Buoyant forces are computed based upon density differences between the channel and the pool, which are computed from the water temperature. The steady velocity is obtained from an iteration in which buoyant and friction forces are balanced [6].

The heat generation rate in the fuel element is distributed axially in a cosine distribution such that the maximum power generation in a fuel rod relative to the average rod power generation is 1.44 and the axial peak-to-average ratio is 1.26, with an overall peak-to-average power density ratio of 1.8 [7].

Two correlations are used for the determination of temperatures for fuel, clad and coolant. The first is from Gnielinski, and the second is given by Colburn [8], which gives a higher value for the temperatures. The model was evaluated for 20 axial nodes through the fueled length with thermal conductivities for the fuel and cladding of 18 W/m °C and 15 W/m °C, respectively [7]. The inlet coolant temperature is 32.2 °C, and the distance from the pool surface to the bottom of the reactor is 4.22 m. The heat flux at which there is a departure from nucleate boiling and the transition to film boiling begins was calculated with the correlation from Bernath [9].

3. RESULTS

Since the Reynolds number calculated for this work was 2.265, the correlation given by Colburn was used together with the NATCON code to calculate the temperatures and heat flux as a function of the axial position for the maximum power channel. The temperatures of the fuel (length of 381 mm), cladding and coolant are displayed in Figure 2 for 100 kW operation.

The results of the NATCON code analysis for the hottest fuel element when the IAN-R1 TRIGA reactor is operating at 100 kW are as follows: exit coolant temperature 43.7 °C, outlet coolant velocity 91.33 mm/s, flow rate 0.0477 kg/s, maximum wall temperature 120 °C, maximum fuel temperature 157 °C, and maximum heat flux 8.0 W/cm².

Figure 3 shows the maximum channel heat flux calculated with Bernath's correlation and the pool water temperature as a parameter. With an inlet water temperature of 32.2 °C, the maximum heat flux is 154 W/cm². For an inlet water temperature of 32.2 °C, the DNB ratio of the allowable heat flux to the maximum heat flux for the hottest fuel element is 19.25.

Although the GA channel configuration does not include a grid plate, the comparison between GA results and this work establishes the following: the maximum heat flux ob-

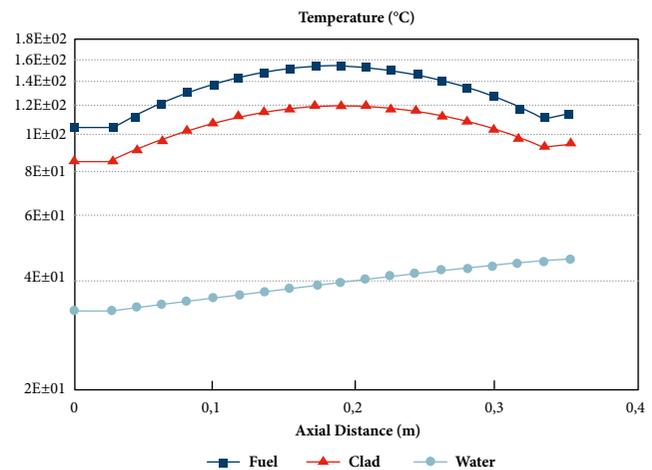


Figure 2. Temperatures of the fuel, cladding and coolant as a function of the axial position

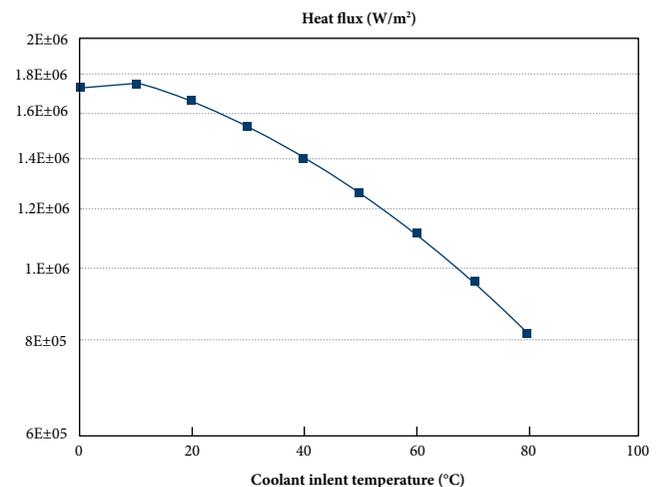


Figure 3. Maximum channel heat flux as a function of the pool water temperature

tained (8.0 W/cm²) is the same for both, and the maximum wall temperature differs by 3.4 %. On the other hand, the exit coolant temperature and its velocity differ by 2.06 % and 13.3 %, respectively.

4. CONCLUSIONS

The results of this study indicate that the NATCON code has an error of less than 3.4 % for the maximum values with respect to the GA calculations. Regarding mean values, the difference between the GA values and this study are 13.3 %. For mean values, it is necessary to perform additional calculations including other channels in the core to improve the validation.

The analysis indicates a safe operation of the IAN-R1 TRIGA reactor at 100 kW with 54 fuel rods in the core and 32.2 °C as the inlet water temperature. The maximum fuel temperatures calculated for the fuel and cladding are below the temperature safety limit of 1150 °C for U-ZrH_{1.6} fuel when the cladding temperature is 500 °C.

For the IAN-R1 TRIGA reactor at 100 kW with 54 fuel rods in the core, with 32.2 °C as the inlet water temperature and an overall peak-to-average power density ratio of 1.8, the allowable heat flux corresponds to a maximum reactor power of 1930 kW.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the IAEA (International Atomic Energy Agency) and the Servicio Geológico Colombiano (before Ingeominas –Instituto Colombiano de Geología y Minería–). We thank Mrs. Alicia Vertullo for her helpful discussions.

References

- [1] Lockheed Nuclear Products. Summary Report and Hazard Analysis. Nuclear Training Reactor for the Instituto de Asuntos Nucleares ER-688. Bogotá, Colombia, April 1964.
- [2] J. A. Sarta, L. A. Castiblanco y J. Razvi, “Conversion of the IAN-R1 Reactor from MTR HEU Fuel to TRIGA LEU Fuel”, Proceeding of 1997 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Jackson Hole, p. 1-6, 1997. Available: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:35089146
- [3] PETERSEN, J. F., STAT – A Fortran Program for Calculating the Natural Convection Heat Transfer – Fluid Flow in an Array of Heated Cylinders, General Atomics, July, 1989.
- [4] R. S. Smith y W. L. Woodruff, “A computer code, NAT-CON, for the analyses of steady state thermal-hydraulics and safety margins in plate-type research reactors cooled by natural convection”. Report ANL/RERTR/TM-12, Argonne National Laboratory (1988). Available: <https://www.osti.gov/biblio/6571231>
- [5] J. A. Sarta y L. A. Castiblanco, “Neutronic calculations in core conversion of the IAN-R1 from MTR to TRIGA LEU fuel”, in Proceedings of the 2003 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, pp. 361-366, October 2003. Available: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:35066258
- [6] M. Prakash, O. F. Turan y G. R. Thorpe, Program NAT-CON: For the numerical solution of buoyancy-driven laminar and turbulent flows in differentially heat cavities. July 2006. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/10826390.pdf>
- [7] General Atomics, “Safety analysis report for the Research Reactor conversion to TRIGA LEU fuel at Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas”, 1995.
- [8] J. G. Collier y J. R. Thome, *Convective Boiling and Condensation*. Third Edition. Oxford University Press. USA 1996.
- [9] Bernath L. “A theory of local-boiling burnout and its application to existing data”, *Chemical Engineering Progress Symposium*, Series No. 30, Volume 56, 1960, pp.95-116.

Desempeño satisfactorio de la Planta de Irradiación Gamma en el ensayo de aptitud, programa INTERLAB N-DO-02

Satisfactory performance of the Gamma Irradiation Plant on program N-DO-02 of the INTERLAB proficiency test

Jormagn Israel Abril Murillo¹, Giovanni Andrés Vela Guzmán¹,
Azarías de Jesús Moreno Machado¹

Recibido: 16 de octubre de 2019

Aceptado: 19 de diciembre de 2019

Publicado en línea: 30 de diciembre de 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.511>

Citación: J. I. Abril Murillo, G. A. Vela Guzmán y A. J. Moreno Machado, “Desempeño satisfactorio de la Planta de Irradiación Gamma en el ensayo de aptitud, programa INTERLAB N-DO-02”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 40-48, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.511>

RESUMEN

La Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano, única en el país, participó en el programa Ensayo De Aptitud por Comparaciones Interlaboratorio, N-DO-02 dirigido por la División Gestión de Interlaboratorios (INTERLAB) de la Comisión de Energía Atómica de Argentina, como parte fundamental del proceso de aseguramiento de la calidad relacionado con los procesos de irradiación y de dosimetría de rutina propios de la instalación. Los resultados fueron satisfactorios para todos los valores de dosis asignados en el ensayo de aptitud.

ABSTRACT

The Colombian Geological Survey's Gamma Irradiation Plant, the only one in the country, participated in Interlaboratory Proficiency Comparison Test program N-DO-02, directed by the Interlaboratory Management Division (INTERLAB) of the Atomic Energy Commission of Argentina, as an essential part of quality assurance related to the facility's irradiation and routine dosimetry processes. The results were satisfactory for all dose values assigned in the proficiency test.

Palabras clave: ensayos de aptitud, comparaciones interlaboratorio, dosis de radiación, aseguramiento de la calidad.

Keywords: proficiency testing, interlaboratory comparisons, radiation dose, quality assurance

¹ Planta de Irradiación Gamma, Dirección de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano
Email de correspondencia: jabril@sgc.gov.co

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de aptitud son, en términos generales, una herramienta de aseguramiento de la calidad que permite a los laboratorios comparar su desempeño con sus pares, detectar tendencias y, consecuentemente, tomar cualquier acción preventiva o correctiva necesaria para asegurar su competencia técnica y mejora continua [1]-[3].

Pueden ser de dos tipos [4]:

- » Programa de comparación de mediciones
- » Programa de comparaciones interlaboratorio

El primer tipo es más utilizado para evaluar el desempeño de patrones de calibración, en tanto que el segundo tipo es utilizado comúnmente por diferentes laboratorios de ensayo para demostrar su competencia, y será el que se tratará en este documento.

En esta evaluación, de manera complementaria y paralela a las actividades propias del ensayo, se establece una valoración real del nivel de implementación del sistema de gestión, que en este caso se aplica a la Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

A nivel institucional, el Servicio Geológico Colombiano cuenta con un sistema integrado de gestión fundamentado, entre otras normas, en la norma ISO 9001:2015 [5]. Los lineamientos de la norma ISO/IEC 17025:2005 [6] rigen de modo transversal en las distintas instalaciones de la Dirección de Asuntos Nucleares (DAN). En su conjunto, la implementación se encuentra entre un 85% y 95%, y su objeto es acreditar el método de ensayo de la dosimetría de rutina propia de la instalación.

El programa de Ensayo de Aptitud de la División de Gestión de Interlaboratorios (INTERLAB) N-DO-X fundamenta sus criterios de evaluación en lo establecido por la norma ISO/IEC 17043:2014, “Evaluación de la conformidad: requisitos generales para ensayos de aptitud”. A pesar de que el alcance de la acreditación es solo para la “Determinación del contenido de uranio en agua”, el sistema de gestión acreditado es transversal a todos los ensayos que se trabajan en INTERLAB, lo que valida el ejercicio ante la Organización de Acreditación Argentina (OAA) [7] y por diferentes acuerdos de reconocimiento mutuo internacional ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) [8].

En el ensayo se participó junto con más de diez instalaciones de países latinoamericanos, cuya fuente de irradiación es exclusivamente del tipo de emisores gamma, pues en este caso no se realizó el ejercicio con irradiadores de haz de electrones o de rayos X.

A continuación, se describen los resultados obtenidos por la planta de irradiación en el ejercicio ensayo de aptitud programa N-DO-02.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

El ejercicio se realizó atendiendo todas las instrucciones establecidas por INTERLAB en el programa “FO-Interlab-30 RV.12, Programa N-DO-02 junio 2018” [3], así como los lineamientos procedimentales internos de la Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano. El mismo se desarrolla a partir de la evaluación de dos aspectos:

- » **Primera parte:** La capacidad de los participantes para cumplir con valores de dosis preestablecidos (dosis objetivo), comparando el resultado de cada participante con el valor asignado, utilizando límites determinados por la variabilidad de los resultados de todos los participantes.
- » **Segunda parte:** La capacidad de los participantes para medir las dosis efectivamente aplicadas. Se realiza al comparar el resultado de cada participante con el valor asignado, utilizando la propia incertidumbre de medición del participante.

2.1. Materiales

El proceso de irradiación gamma fue llevado a cabo en el irradiador panorámico tipo IV de Cobalto-60 (^{60}Co) de almacenamiento de la fuente en húmedo [9], perteneciente al SGC.

El sistema dosimétrico de rutina empleado por la Planta de Irradiación es el de polimetilmetacrilato (PMMA), basado en la norma ASTM 51276-96 [10], tanto en los dosímetros tipo Amber 3042 Perspex, para dosis de 1 kGy a 30 kGy, y Red 4034 Perspex, para dosis de 5 kGy a 50 kGy.

Los dosímetros de referencia de alanina son del tipo pellet lote BF 616 y fueron remitidos por la Comisión Nacional de Energía Atómica e INTERLAB (Centro Atómico de Constituyentes, Buenos Aires, Argentina), cada pastilla en un recipiente individual de plástico de poliestireno transparente de alta densidad (figura 1).

Se utilizan las curvas de calibración (Absorbancia vs Dosis) para los lotes de dosímetros de rutina a evaluar dadas por el fabricante Harwell

Se utilizó el espectrofotómetro Genesys 20 de ThermoScientific®, instrumento capaz de determinar la absorbancia óptica en la longitud de onda del análisis. Para asegurar el control analítico instrumental y el rendimiento de los diferentes parámetros del sistema espectrométrico se realiza una verificación de rutina, en el marco de aseguramiento de la calidad analítica, empleando un juego de filtros estándar Spectronic, trazables a NIST, para los parámetros:

- » Energía radiante difusa en la longitud de onda de 340 nm y 400 nm
- » Transmitancia en 0%
- » Exactitud de absorbancia en 10% T y 50% T a 590 nm
- » Exactitud de longitud de onda en 527,4 nm

Se midió el espesor de cada pellet de PMMA con un micrómetro digital de exteriores NSK-Digitrix Mark III, verificado previamente con un bloque patrón Mitutoyo de 3 mm de espesor, en el marco de aseguramiento de la calidad analítica (figura 2).

La temperatura a la cual se realizó la irradiación de los ítems de ensayo se determinó por medio de un termómetro digital de punzón calibrado, midiendo inmediatamente antes y después del proceso de irradiación (figura 3).

El personal responsable del proceso de irradiación construye el fantoma conforme a la descripción dada en la norma ISO/ASTM 51261, “Guía estándar para la selección y calibración de sistemas dosimétricos para procesos de radiación” [11], que son las mismas especificaciones del fantoma descritas en el programa N-DO-02. Este se construyó con láminas de polimetilmetacrilato (PMMA) de 1 cm de espesor y con una tapa hermética, para garantizar equilibrio electrónico dentro del mismo y asegurar que no existieran diferencias significativas en las dosis absorbidas entre los dosímetros insertados (figura 4).

Se utiliza una curva de dosis (kGy) vs. distancia (cm) (gráfica 1), construida con datos experimentales recolectados previamente con dosimetría de rutina y desarrollada en el eje perpendicular al centro geométrico de la fuente radiactiva, desde la superficie de contacto con la lámina de aluminio hasta 50 cm de distancia, la cual se ajusta con base en el decaimiento de la fuente, y es propia de la operación.

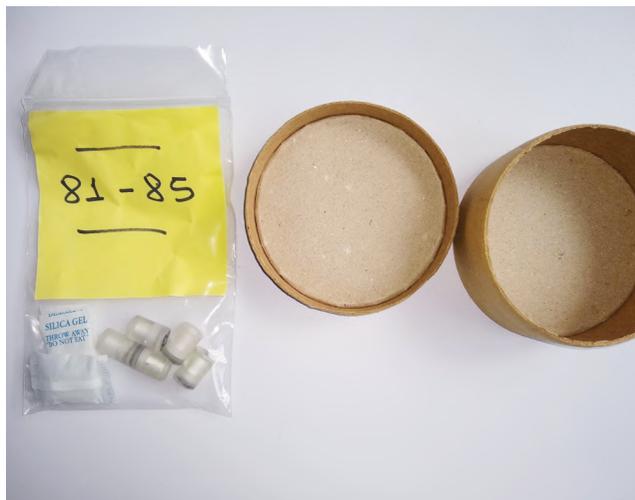


Figura 1. Sistema de dosímetros remitido por INTERLAB



Figura 2. Micrómetro de precisión utilizado en el ensayo de aptitud.



Figura 3. Termómetro de punzón utilizado en el ensayo de aptitud.

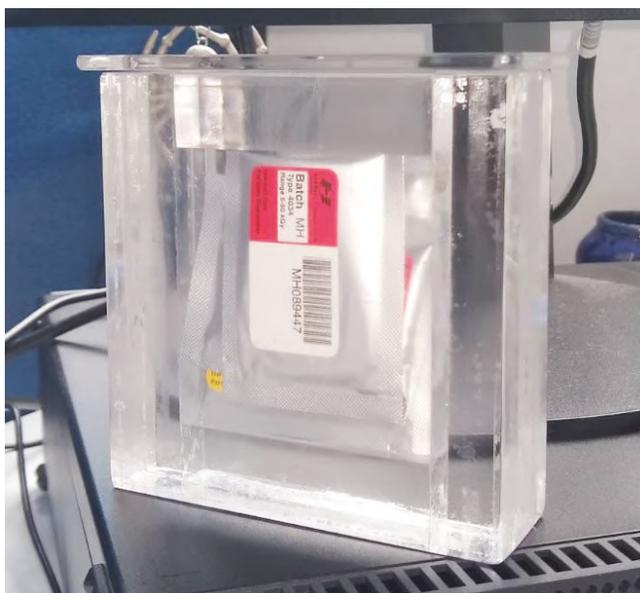


Figura 4. Fantoma construido por el personal para irradiación gamma de los dosímetros.

La captura de datos se realizó de manera digital, mediante formatos que corresponden a los empleados con el método de ensayo, de conformidad con la evaluación de necesidades identificadas durante el desarrollo del ensayo de aptitud.

2.2. Condiciones ambientales

Los ítems de ensayo se mantuvieron sellados y protegidos de la luz del sol en el empaque mostrado en la figura 1, a temperaturas por debajo de los 25 °C y humedad controlada con bolsas de desecante, mientras permanecieron bajo la custodia de la Planta de Irradiación. Las dosis de rayos X recibidas en las inspecciones aduaneras no afectaron significativamente la información de las dosis de rayos gamma aplicadas en el ejercicio de intercomparación.

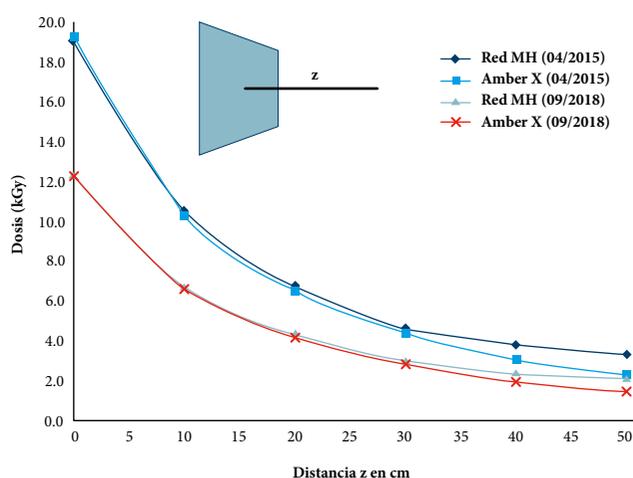
2.3. Parámetros que se midieron

Los organizadores del programa de intercomparación evalúan las dosis entregadas a los dosímetros de alanina con radiación gamma y las incertidumbres $U(x_{pt})$ asociadas a cada valor objetivo. Las dosis objetivo son x_{pt} : [1 kGy, 5 kGy, 10 kGy y 25 kGy].

2.3. Protocolo para el proceso de irradiación

2.3.1. Selección de la tasa de dosis

Siguiendo los lineamientos identificados en [12], se eligió aplicar las dosis definidas a una tasa de 1,5 Gy/s (5,4 kGy/h), valor que está en el rango de tasas de dosis usadas en el es-



Gráfica 1. Perfiles de dosis experimental absorbida y calculada en la fecha del ensayo con dosímetros PMMA, correspondiente al eje transversal a la fuente radiactiva (z). La distancia 0 cm corresponde al punto de contacto con la barrera protectora de aluminio.

tudio del mismo autor y es una de las tasas utilizadas por Harwell para calibrar los dosímetros de PMMA en condiciones normales (20 °C).

Por otro lado, el irradiador podía impartir dicha tasa a 15 cm del centro geométrico de la fuente, medidos perpendicularmente desde la barrera de protección de aluminio. Dicha distancia equivale a la del centro de una caja estándar de producto que pueda ser ubicada en el sistema de transporte, y es representativa de las condiciones normales de producción.

Este dato experimental se obtuvo con el perfil de dosis en el mismo eje perpendicular a la fuente radiactiva, el cual se ajustó con base en el decaimiento alcanzado justo el día del ensayo (gráfica 1).

2.3.2. Montaje del fantoma

Según cuál sea la tasa de la dosis requerida, descrita en el numeral anterior, se diseña un montaje (detallado en la figura 5) para garantizar, durante los diferentes ensayos que se realizarán, la repetibilidad en las condiciones de operación, para una ubicación constante del fantoma con los sistemas dosimétricos en el espacio del irradiador.

2.3.3. Estimación de los tiempos de irradiación

Experimentalmente se ha configurado un área geométrica sobre la superficie de la lámina de la barrera de aluminio, en donde, con los años de experiencia, se ha identificado un área con la mayor contribución de dosis, que es el área

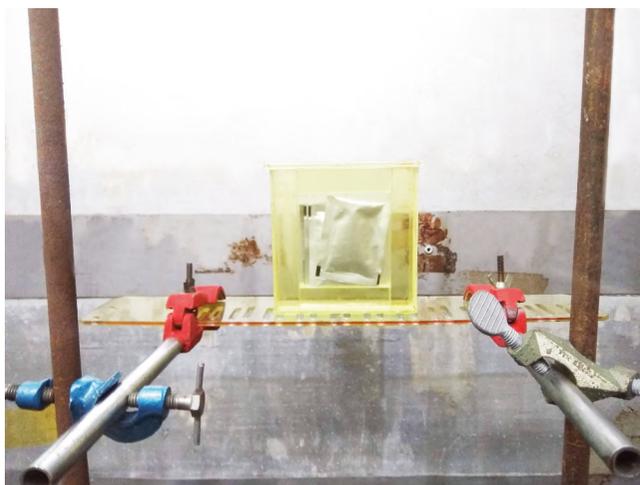
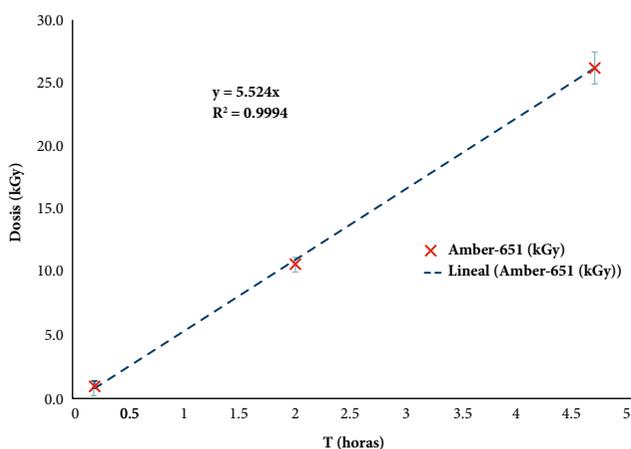


Figura 5. Montaje para irradiar los ítems de ensayo.



Gráfica 2. Dosis experimental contrastada con tiempo de irradiación en el punto establecido para el ensayo.

requerida para determinar experimentalmente los tiempos de dosis. Esta área es la misma descrita en el numeral 1.

En lo que respecta a la tasa de dosis obtenida experimentalmente en el punto físico definido a 15 cm de la barrera de aluminio y perpendicular al centro geométrico de la fuente, se procedió a irradiar tres dosímetros de rutina dentro del fantoma, para verificar los tiempos asociados a las dosis que se aplicarían y para cada sistema dosimétrico que se evaluaría, en los puntos 1 kGy, 10 kGy y 25 kGy, por triplicado.

Se determina la tasa de dosis promedio obtenida en una hora como producto de la medición de cada sistema dosimétrico de rutina por triplicado. Estos son los resultados obtenidos:

- » Dosímetros Amber lote X = $5,32 \pm 0,25$ kGy/h
- » Dosímetros Red lote MH = $5,50 \pm 0,33$ kGy/h

Se grafica la dosis (kGy) contrastada con el tiempo (h) de los datos promedio de la tasa de dosis dada por los dosímetros tipo Amber, para estimar los tiempos de irradiación necesarios para alcanzar las dosis objetivo x_{pt} (gráfica 2 y tabla 1).

Tabla 1. Tiempos estimados de irradiación para las dosis objetivo x_{pt} en el punto establecido para el ensayo.

Dosis objetivo (kGy)	Dosis promedio Amber (651 nm) (kGy)	CV%*	Tiempo estimado de irradiación (h)
1	1,0	5,3	0,19
5	—	—	0,94
10	10,7	4,3	1,88
25	25,3	5,7	4,70

CV% es el coeficiente de variación porcentual.

Estos tiempos son dados al operador para llevar a cabo la irradiación de las dosis objetivo x_{pt} .

Finalizado el proceso de irradiación, se evalúan las dosis irradiadas siguiendo el procedimiento descrito en el método de ensayo interno ME-TNU-PG, “Determinación de la dosis absorbida por dosimetría PMMA” [13].

Con los resultados obtenidos, presentados en la gráfica 2, se determina si existe dosis de tránsito alguna por extrapolación al tiempo $t = 0$ horas, causada por el paso de la fuente radiactiva a su posición izada, valor el cual resulta despreciable para el rango de dosis validado.

Se realiza la misma determinación con el sistema dosimétrico Red Perspex a 640 nm identificando un error por encima del 200% ($x_i > 2$ kGy) en una dosis teórica de 1 kGy. Este sistema dosimétrico no está validado para valores de dosis por debajo de 5 kGy; por tanto, se decide emplear como sistema dosimétrico para el ensayo el sistema Amber Perspex a 651 nm.

2.3.4. Análisis de las dosis de radiación gamma impartidas

Se realizó el control de rutina al sistema espectrométrico de lectura. Se determinó la absorbancia específica y las dosis irradiadas en cada dosímetro, control llevado a cabo por dos dosimetristas, de manera aleatoria, el mismo día, al día siguiente, al quinto día, al sexto, octavo, hasta el decimosegundo día.

La evaluación estadística de los resultados experimentales presentados en la tabla 1 indica que la metodología de cálculo en las actividades definidas y descritas en el numeral 3 es correcta en las dosis objetivo x_{pt} .

Se confirmó que el sistema Red Perspex no puede leer dosis tan bajas como 1 kGy (da un valor más alto que el calculado), en contraste con el sistema Amber Perspex, que sí está validado para dicho valor de dosis.

2.4. Irradiación en el sistema dosimétrico en el ensayo de aptitud

Se procedió a irradiar los dosímetros de alanina, lote BF 616, junto con los dosímetros Amber Perspex 3042, lote X seleccionado.

Establecido el tiempo y posicionamiento del fantoma para irradiación del sistema dosimétrico de alanina, se identifica cada uno de los cinco *pellets* de alanina, cuatro con una de las dosis objetivo, y uno como “testigo”, que no es irradiado.

Durante el proceso de irradiación individual se montan conjuntamente dentro del fantoma cuatro dosímetros de rutina Amber 3042 Perspex, lote X.

En cada uno de los ensayos se estima la temperatura de irradiación, midiendo la temperatura mínima de irradiación antes del inicio, y la temperatura máxima a la que llega el conjunto de dosímetros en el fantoma al final del proceso de irradiación.

3. CÁLCULOS

El programa de ensayo de aptitud fundamenta sus criterios de aceptación en lo establecido por la norma ISO/IEC 17043:2014, “Evaluación de la conformidad: Requisitos generales para ensayos de aptitud” [2].

Los parámetros que se deben determinar para el ejercicio ensayo de aptitud por comparaciones interlaboratorio para irradiación y medición de la dosis se subdividen en dos partes [3]:

Parte 1: Dosis de irradiación entregada a los dosímetros. Las dosis objetivo son x_{pt} : [1 kGy, 5 kGy, 10 kGy y 25 kGy].

El evaluador del desempeño es el parámetro z-score:

$$z_i = \frac{(x_i - x_{pt})}{\sigma_{pt}} \quad (1)$$

Donde:

- » x_i es el valor irradiado por el participante (obtenido por el Laboratorio de Dosimetría de Altas Dosis [LDAD] de

la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina de los dosímetros de alanina). x_{pt} es el valor asignado (dosis dada: 1 kGy, 5 kGy, 10 kGy y 25 kGy)

- » σ_{pt} es la desviación estándar del ejercicio, según lo indicado en el anexo D.1.4 de la norma ISO 13528:2015 [14]

El criterio de aceptación [2] es:

- » Si $|z| \leq 2$, el resultado se considera aceptable
- » Si $2 < |z| < 3$, el resultado se considera cuestionable
- » Si $|z| \geq 3$, el resultado se considera no aceptable

Parte 2: Dosis de irradiación medida por cada participante

El evaluador del desempeño es el parámetro E_n :

$$(E_n)_i = \frac{(x_i - x_{pt})}{\sqrt{U^2(x_i) + U^2(x_{pt})}} \quad (2)$$

Donde:

- » x_i es el valor reportado por cada laboratorio a partir de su dosimetría de rutina
- » x_{pt} es el valor asignado, igual al obtenido por el LDAD (en la ecuación 1, este valor equivale a x_i)
- » $U(x_i)$ es la incertidumbre expandida del valor x_i
- » $U(x_{pt})$ es la incertidumbre expandida del valor asignado obtenido por el LDAD

El criterio de aceptación [2] es:

- » Si $|E_n| < 1$, el resultado se considera aceptable
- » Si $|E_n| \geq 1$, el resultado se considera no aceptable

3.1. Estimación de la incertidumbre

Para estimar la incertidumbre del ensayo de aptitud se siguió estrictamente la metodología conocida como *bottom up* o componente por componente [15], [16], que se enfoca en una serie de pasos sistemáticos, donde el responsable de la estimación descompone todas las operaciones (analíticas-operativas) en actividades primarias. Seguidamente se combinan o agrupan en actividades comunes y se hace una estimación de su contribución al valor combinado de incertidumbre del proceso de medición (incertidumbre relativa – μ) [15], [17]. Estas fuentes se combinan para dar como resultado una incertidumbre expandida (U), [15], [17].

Este método exige un conocimiento exacto de todo el proceso, tanto analítico como operativo. Su principal ventaja

es que proporciona una clara comprensión de las actividades analíticas que suponen una importante contribución a la incertidumbre de la medición y que, por consiguiente, pueden asignarse como puntos críticos de control para reducir o dirigir la estimación de la incertidumbre de la medición en las aplicaciones futuras para el proceso de dosimetría de rutina.

Se enuncian las principales contribuciones identificadas y su respectivo peso en la estimación de la incertidumbre para el punto a $x_{pt} = 25$ kGy:

3.1.1. Incertidumbre tipo A

- Variabilidad del método (precisión intermedia). Aporta el 18,9% de la μ .
- Variabilidad del tiempo de la lectura posirradiación de los dosímetros (precisión intermedia). Aporta el 25,1% de la μ .
- Variabilidad del espesor del dosímetro (precisión intermedia). Aporta el 4,8% de la μ .

3.1.2. Incertidumbre tipo B

- Precisión del espectrofotómetro (longitud de onda). Aporta el 1,5% de la μ .
- Precisión del micrómetro. Aporta el 0,2% de la μ .
- Cambio de temperatura del dosímetro. Aporta el 11,6% de la μ . La incertidumbre de la variación de la temperatura se considera como la variación reportada por el conjunto del fantoma y los dosímetros, y se le asigna una distribución rectangular.
- Coefficiente de expansión térmica por diferencia de temperaturas del dosímetro. Aporta el 0,001% de la μ . La incertidumbre del coeficiente de expansión térmica en diferentes materiales se estima como un 10% del valor del coeficiente, y se le asigna una distribución rectangular. El coeficiente del PMMA es 77×10^{-6} ($^{\circ}\text{K}^{-1}$). Se determina con la expresión de la expansión térmica lineal de los cuerpos.
- Interpolación en la curva de calibración. Aporta el 37,8% de la μ .

La variabilidad del método y la variabilidad del tiempo de medición posirradiación de los dosímetros, que corresponden concretamente a las actividades propias analíticas del ensayo por espectrometría visible, y la interpolación de la dosis irradiada en la curva del sistema dosimétrico PMMA,

representan la mayor contribución en el aporte a la estimación de la incertidumbre.

Esto quiere decir que el punto de control de mayor rigurosidad y atención se encuentra en el proceso de dosimetría de rutina. Aquí el término *control* hace referencia a las actividades realizadas que permitirán asegurar la calidad de los resultados de las mediciones dosimétricas de rutina, enmarcadas en un sistema de gestión.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se da cumplimiento al protocolo establecido por INTERLAB: cada uno de los dosímetros de alanina es irradiado individualmente en las dosis objetivo, en las condiciones propias de operación de la instalación, junto con cuatro dosímetros del sistema de rutina empleado por la Planta de Irradiación Gamma (dosímetro Amber 3042 Perspex). Los rangos de temperatura no superaron los $1,1^{\circ}\text{C}$ y se mantuvieron en los valores recomendados para el sistema PMMA [12].

Los resultados de dosis aplicadas a los sistemas dosimétricos de ensayo y reportadas a INTERLAB, así como los resultados de los parámetros de estudio dados en [3], se presentan en la tabla 2.

La calificación final corresponde al contraste de los parámetros calculados en el modelo para el tratamiento estadístico planteado por INTERLAB con los criterios de aceptación mencionados en el numeral anterior, a partir de lo cual se eligen como evaluadores de desempeño los parámetros z (z -score), que corresponden al sesgo del resultado respecto al valor de referencia, y E_n , que corresponde a la evaluación de la incertidumbre estimada.

Se observa que todos los valores de los parámetros de desempeño evaluados en cada dosis impartida están en el rango determinado por los criterios de aceptación; por lo tanto, la calificación final para la Planta de Irradiación Gamma es satisfactoria o aceptable.

En la tabla 3 se tabula el porcentaje de laboratorios participantes que obtuvieron calificación satisfactoria en cada una de las dosis objetivo.

Los porcentajes evidencian el rigor del ejercicio y la capacidad del Laboratorio de Dosimetría de Rutina de la Planta de Irradiación para reportar los datos de dosis, con una incertidumbre que se mantiene en el rango de desempeño aceptable en todas las dosis objetivo del ejercicio. Es evidente la mayor dificultad para obtener un valor de E_n en el rango

aceptable en todos los laboratorios participantes; de hecho, para 5 kGy, la Planta de Irradiación obtuvo valores en el rango, y fue una de las que se mantuvieron en el estrecho margen del 33% de participantes que lo lograron.

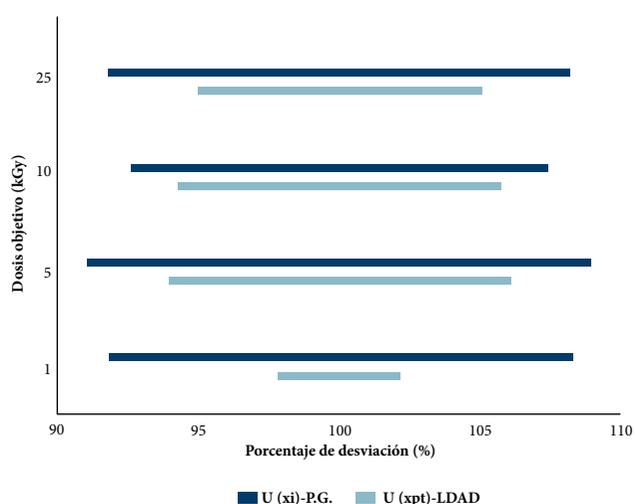
5. CONCLUSIONES

La evaluación de la medida de desempeño presentada por INTERLAB correspondiente a los resultados entregados por la Planta de Irradiación Gamma, en donde se calificaron dos parámetros de desempeño, z (z -score) y E_n , en las cuatro dosis objetivo definidas en el ensayo de aptitud, es *aceptable*. Este resultado califica el desempeño de la Planta de Irradiación Gamma relacionado con el proceso de irradiación, la competencia del personal y la garantía de la calidad analítica en los más altos estándares de calidad.

La robustez del procedimiento empleado para estimar la incertidumbre es una pieza fundamental en la implementación del sistema de calidad basado en la norma ISO 11137, asociado a la validación del proceso de operación, el proceso de dosimetría de rutina, la calificación de la instalación y la calificación del desempeño

Se obtuvieron diferencias entre el valor medido y el valor asignado como referencia menores del 10% (gráfica 3), que se considera un buen resultado [3].

Se debe continuar participando en la realización de más ensayos de aptitud para mantener el sistema de gestión de calidad y verificar la efectividad de las acciones de mejora tomadas.



Gráfica 3 Resultados de dosis e incertidumbres logradas por los sistemas dosimétricos de rutina PMMA de la Planta de Irradiación Gamma (P. G.) y el de referencia del Laboratorio de Dosimetría de Altas Dosis (LDAD).

Agradecimientos

Los autores agradecen a Miguel Antonio Vargas y Gelfi Nelson Beltrán, funcionarios del grupo de Geoquímica Analítica y Geotecnia de la Dirección de Laboratorios, y al antiguo operador de la Planta de Irradiación, Jaime Bravo, del Servicio Geológico Colombiano, por su ayuda en la construcción y adaptación del fantoma utilizado en este ejercicio.

Gracias también a Andrea Docters, jefe de la Planta de Irradiación de la CNEA, por su colaboración en la gestión de los dosímetros de referencia a ser entregados al LDAD.

Tabla 2. Resultados finales, Planta de Irradiación Gamma (P. G.) vs. Laboratorio de Dosimetría de Altas Dosis (LDAD)

Dosis objetivo (kGy)	Temperatura inicial de irradiación (°C)	Temperatura final de irradiación (°C)	Dosis PMMA P. G. (kGy)	U PMMA P. G. (k = 2)	Dosis alanina LDAD (kGy)	U alanina LDAD (k = 2)	Parámetro z (z -score)	Parámetro E_n	Calificación
1	26,6	26,2	0,99	0,08	0,99	0,02	-0,09	0,06	Aceptable
5	25	25,5	4,89	0,43	4,73	0,28	-0,55	0,38	Aceptable
10	23,5	24,6	10,22	0,74	9,47	0,53	-0,58	0,99	Aceptable
25	24,9	24,7	24,54	1,98	23,83	1,17	-1,07	0,34	Aceptable

Tabla 3. Porcentaje de laboratorios participantes que obtuvieron calificaciones aceptables o cuestionables en z -score y aceptables en E_n

Dosis objetivo (kGy)	Porcentaje en el rango aceptable (z)	Porcentaje en el rango cuestionable (z)	Porcentaje en el rango aceptable (E_n)
1	92%	0%	67%
5	92%	0%	33%
10	92%	0%	50%
25	85%	8%	55%

Referencias

- [1] ONAC, “Ensayo de aptitud”, 2019. [Online]. Disponible en <https://onac.org.co/proveedores-de-ensayos-de-aptitud>.
- [2] ISO/IEC, “ISO/IEC 17043:2014 Evaluación de la conformidad: Requisitos generales para ensayos de aptitud”, 2014. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-iec:17043:ed-1:v1:es>
- [3] INTERLAB y CNEA, “Informe final N-DO-02. Ensayo de aptitud por comparaciones interlaboratorio en irradiación y medición de dosímetros”, Buenos Aires, 2019.
- [4] H. Garonis, F. di Giacomo, D. Russo y E. Camacho, “Proceso de realización de los ensayos de aptitud por comparación interlaboratorio”. En *Simposio de Metrología*, 2010, p. 5.
- [5] ISO, “ISO 9001:2015 - Quality management systems: Requirements”, p. 29, 2015.
- [6] ISO/IEC, “ISO/IEC 17025:2005 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”, p. 28, 2005.
- [7] CNEA, “Interlaboratorios e Instalaciones, Interlab”, 2019.
- [8] ONAC, “Acuerdos de reconocimiento internacional - ONAC”. [Online]. Disponible en <https://onac.org.co/acuerdos-de-reconocimiento-internacional>.
- [9] International Atomic Energy Agency, *Radiation safety of gamma, electron and X ray irradiation facilities*, IAEA SAFET. Vienna: IAEA, 2010.
- [10] ISO/IEC, “ISO/ASTM 51276:2019 (en). Practice for use of a polymethylmethacrylate dosimetry system”, 2019.
- [11] ISO/IEC, “ISO/ASTM 51261:2013 (en). Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing”, p. 18, 2013.
- [12] B. Whittaker y M. F. F. Watts, “The influence of dose rate, ambient temperature and time on the radiation response of Harwell PMMA dosimeters”, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 60, n.º 1-2, pp. 101-110, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(00\)00316-9](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(00)00316-9)
- [13] J. I. Abril, “Determinación de la dosis absorbida por dosimetría PMMA”, Bogotá, D. C., 2017.
- [14] ISO/IEC, “ISO/IEC 13528:2015, Statistical methods for use in proficiency testing by laboratory comparisons”, 2015.
- [15] BIPM, *GUM - Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1.º. Sevres: JCGM, 2008.
- [16] Eurachem/CITAC, *Cuantificación de la incertidumbre en medidas analíticas: Guía CITAC 4*, 3.ª ed. UK: UK National Measurement System, 2011.
- [17] BIPM, *VIM - International Vocabulary of Metrology: Basic and general concepts and associated terms*, 3.º. Sevres: JCGM, 2008.

Una aproximación a la implementación de los estudios de futuro en el Servicio Geológico Colombiano

An approach to the implementation of future studies in the Colombian Geological Survey

Guillermo Parrado Lozano¹

Recibido: 21 de agosto de 2019

Aceptado: 11 de diciembre de 2019

Publicado en línea: 30 de diciembre de 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.512>

Citación: G. Parrado Lozano, “Una aproximación a la implementación de los estudios de futuro en el Servicio Geológico Colombiano”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 49-68, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.512>

RESUMEN

Se presenta una revisión bibliográfica relacionada con los conceptos fundamentales y metodologías aplicables en una estrategia de construcción social del conocimiento de los escenarios posibles, probables y deseables para el desarrollo del Servicio Geológico Colombiano —entidad pública nacional de ciencia y tecnología— en el siglo XXI. Partiendo de los conceptos fundamentales, luego se muestra una breve reseña histórica de los desarrollos de la prospectiva como disciplina, para finalizar con una aproximación al rol de las geociencias y las ciencias nucleares, pilares de la consolidación del Servicio Geológico Colombiano (SGC) como líder en el ámbito de sus competencias en nuestro país.

ABSTRACT

A bibliographic review is presented of fundamental concepts and methods applicable in a social construction of knowledge strategy for possible, probable and desirable scenarios for the development of the Colombian Geological Survey, a national science and technology public entity, in the twenty-first century. Starting from fundamental concepts, a brief historical review of the development of foresight as a discipline is provided, ending with an approach to the role of the geosciences and nuclear sciences, pillars of the consolidation of the Colombian Geological Survey as a leader in the field of its competencies in Colombia.

Palabras clave: estudios de futuro, prospectiva, geociencias, ciencias nucleares, centro de pensamiento.

Keywords: future studies, foresight, geosciences, nuclear sciences, think tank

¹ Dirección de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano. Coordinador del Grupo de Reactor Nuclear de Investigación IAN-R1. Líder del Grupo de Investigación Asuntos Nucleares, de Minciencias.
Email de correspondencia: gparrado@sgc.gov.co

Ningún viento es favorable para quién no sabe a dónde va.

Séneca

1. MARCO CONCEPTUAL

La predicción, el pronóstico o anticipación del futuro ha sido uno de los retos más inquietantes en el tiempo de cada una de las antiguas civilizaciones, y ahora, en tiempos posmodernos, sigue vigente. La necesidad de saber con antelación cómo sería el clima para sembrar y cosechar con éxito, el conocimiento estimado de la calidad, cantidad y duración de las reservas de agua o alimentos y su eventual racionamiento en épocas de escasez, así como el crecimiento de la población que haría uso de estos, son apenas algunos de los interrogantes a los que se veían enfrentados de forma cotidiana nuestros más primitivos antecesores.

Situados en el terreno bélico, los antiguos empezaron a desarrollar capacidades *a priori* de modelación del futuro para conocer la composición, disposición y posibilidades de movilización o ataque de los ejércitos de sus adversarios. El arte de la anticipación también aparece ligado al arte de la guerra. El maestro Sun Tzu, en su texto clásico *El arte de la guerra*, indica que

Si intentas utilizar los métodos de un gobierno civil para dirigir una operación militar, la operación será confusa. Triunfan aquellos que saben cuándo luchar y cuándo no. Saben discernir cuándo utilizar muchas o pocas tropas. Tienen tropas cuyos rangos superiores e inferiores tienen el mismo objetivo. Se enfrentan con preparativos a enemigos desprevenidos. Tienen generales competentes y no limitados por sus gobiernos civiles. Estas cinco son las maneras de conocer al futuro vencedor. [1]

En la literatura de anticipación, también conocida como *relatos de ciencia ficción*, se ofrece otra interesante aproximación a escenarios futuros, prometedores o demolidores. Autores de todas las épocas y matices, como Agustín de Hipona, Leonardo da Vinci, Tomás Moro, Francis Bacon, Charles Fourier, Julio Verne, Ray Bradbury, Isaac Asimov, H. G. Wells, Aldous Huxley, George Orwell, Katshuro Ōtomo y Tom King, por nombrar solo a algunos de ellos, han contribuido desde su particular genialidad en su respectivo campo, a la previsión de las

posibles consecuencias de la introducción de determinados avances tecnológicos en imaginarias sociedades normalizadas o distópicas [2].

Los denominados *estudios de futuro* (*foresight*, en su denominación anglosajona), citados por la Sociedad Finlandesa de Estudios del Futuro, se definen como “los estudios [que] examinan el presente con una especial comprensión del futuro, integran resultados de investigación de diferentes campos de conocimiento y ayudan a los encargados de la adopción de decisiones estratégicas a hacer mejores elecciones para un futuro común”. Lo cual significa que conceptualmente estos se enriquecen de los aportes multidisciplinares y se caracterizan porque ven “el futuro como un espacio de realización del potencial humano, donde caben múltiples alternativas que permiten pensar y gestionar, bajo una óptica del bien común, la incertidumbre asociada a las decisiones estratégicas que marcan la trayectoria de la sociedad en su conjunto” [3].

En la tabla 1 se exhibe una descripción de la estructura los diferentes futuros, se muestra su denominación de uso común o informal y la denominación técnica, según el investigador prospectivista colombiano Carlos Mera [4].

Tabla 1. Estructura del futuro

Discurso teórico-práctico	Designación aceptada
Adivinar	Adivinación
Predecir	Profecía
Anticipar	Futurología
Construir el futuro	Prospectiva
Imaginar	Ciencia ficción
Soñar	Utopía

Los estudios de futuro, en la particular visión de Mera, presuponen un papel activo de los seres humanos, en cuanto se orientan a su involucramiento en la modificación de las posibles realidades en las que desarrollarán su existencia. Este involucramiento determina la voluntad y necesidad de cambio de un presente que muchas veces se puede mostrar desgastado, agotado, cíclico o repetido, es decir, desprovisto de esperanzas, retos o desafíos que pongan a prueba nuestras capacidades intelectuales.

En la figura 1 se muestra el escenario convergente de aparición de la prospectiva en la década de los noventa, resultado de los enfoques de la planificación estratégica, los es-

tudios de futuro y el conexo análisis de las políticas públicas. Gavigan (citado en [4]) asegura que

La prospectiva ha tenido tendencia a ser más frecuente en aquellos campos socioeconómicos en los que se puede partir de una base de indicadores y de datos, y en las que las tendencias y contratendencias establecidas (o al menos ampliamente percibidas) son la base de las inversiones a largo plazo, como en las áreas de la ciencia, la tecnología y la innovación.

Los cuatro sentidos básicos de la prospectiva se describen a continuación [3]:

- » Pensar en el futuro (anticipación): Los estudios más clásicos en materia de anticipación son los que tienen que ver con pensar el futuro. Esto significa, entre otras cosas, plantear imágenes del futuro, diseñar escenarios, anunciar alertas tempranas e identificar tendencias.
- » Debatir sobre el futuro (apropiación): Debatir sobre el futuro implica dar un paso más adelante y plantear nuevas ideas que enriquezcan un diálogo con toda la sociedad, teniendo en cuenta los resultados del estudio de escenarios futuros. En este caso se trata de incluir nuevos temas en la agenda pública, lo que pone de relieve el vínculo entre prospectiva e innovación. Estos nuevos temas tienen que ver con múltiples dimensiones de la realidad, bien sea al nivel político, económico, social, ambiental, de ciencia y tecnología, de participación ciudadana o de seguridad.
- » Modelar el futuro (acción): Modelar o dar forma al futuro tiene que ver sobre todo con preparar procesos de decisión sistemáticos y organizados, que entrañan acumulaciones de conocimiento, resultados progresivos, generación de capacidades que preparan a la sociedad para la toma de decisiones acerca de su futuro, de una manera coherente y durante largos períodos de tiempo.
- » Vigilar el presente (aprendizaje): La vigilancia estratégica del presente está íntimamente relacionada con metodologías afines con el análisis de riesgo y el análisis de horizontes o análisis del entorno. Gestiona los sistemas participativos y basados en datos

conceptuales, innovaciones metodológicas, tecnológicas y de comunicación, capaces de apoyar la identificación, evaluación y explotación de conocimientos relacionados con cuestiones complejas y altamente inciertas, como las sorpresas, las “cartas salvajes” (*wild cards*) y las señales débiles, así como los asuntos emergentes que se derivan de la interconexión de conocimientos provenientes de comunidades de exploración e investigación al nivel mundial.

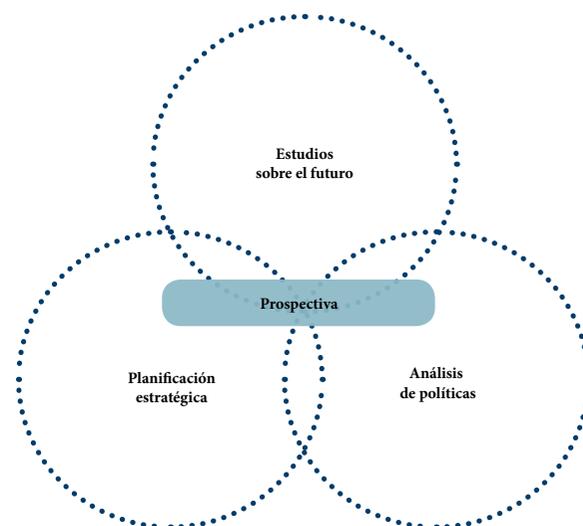


Figura 1. Enfoque procedente de la prospectiva
Fuente: [4]

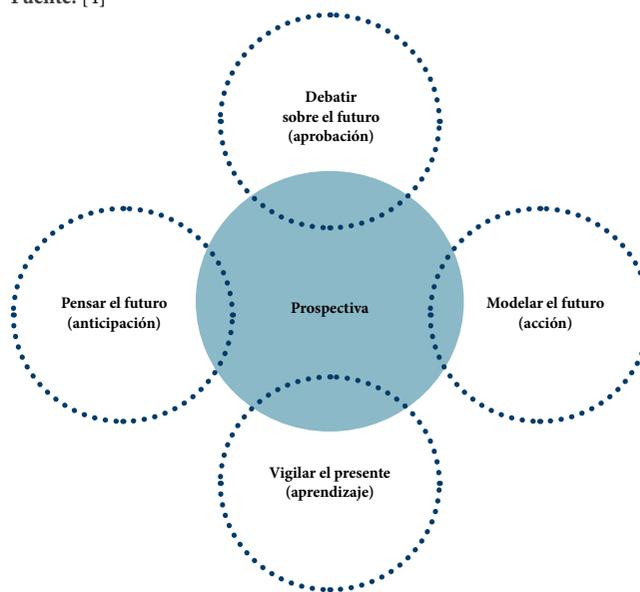


Figura 2. Sentidos básicos de la prospectiva [4]

Los estudios de futuro también suelen relacionarse con cuatro categorías conceptuales básicas que se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Conceptos básicos de los estudios de futuro (adaptado de [4])

Nivel	Definición	Pertinencia
1. Predicción	Una declaración no probabilística, con un nivel de confianza absoluto acerca del futuro. Por "no probabilística" se entiende que es un enunciado que tiene la pretensión de ser único, exacto y no sujeto a controversia.	Pertinente en las ciencias exactas, en las que existen leyes, verificación experimental y control de variables.
2. Pronóstico	Pretende determinar la probabilidad de que ocurran ciertos eventos futuros, con un nivel de confianza relativamente alto. Se centra en la calidad de los enunciados y las interpretaciones realizadas.	En materia de ciencias sociales, ciencias de la administración y estudios del futuro, es más pertinente hablar de pronósticos que de predicciones.
3. Prospectiva	Se exploran diferentes tipos de incertidumbre: » la incertidumbre suave se presenta cuando la dinámica del fenómeno sigue alguna forma ordenada, aun si es compleja, como las cadenas estocásticas o las oscilaciones de largo plazo, y » la incertidumbre dura es inherente a la estructura interna de la dinámica del fenómeno, que se comporta, al menos parcialmente, de un modo caótico, indeterminado y casual desde la perspectiva actual del pensamiento humano.	» La incertidumbre se origina en la deficiencia de los métodos o en la inadecuada comprensión del proceso y no en la estructura misma del fenómeno. » La incertidumbre dura incluye las denominadas situaciones explosivas, las tendencias declinantes y las situaciones propensas a sorpresas.
4. Pensamiento complejo	Aborda la complejidad que surge cuando el entorno se torna opaco y menos descifrable, debido a que el contexto se modifica constantemente por el efecto de las acciones de los actores internos y externos.	Explora la ambigüedad que afecta la capacidad de operar de las organizaciones.

Para Mario Bunge, el conocido físico y filósofo de la ciencia argentino, es necesario hacer una primera distinción conceptual entre la prospectiva y la predicción. Cabe aclarar que este autor utiliza también los términos *prognosis*, *conjetura* y *expectativa*, entre otros [5]. En la tabla anterior Medina desarrolla de manera creciente estas categorías enfatizando en su definición y en la pertinencia de aplicarlas, partiendo de la simple predicción hasta llegar al pensamiento complejo, categoría ampliamente estudiada por Edgar Morin, en una nueva lógica denominada *complejidad*, definida como "un fenómeno cuantitativo, una cantidad extrema de interacciones e interferencias entre un número muy grande de unidades". ¿Qué es la complejidad, entonces?

Según Morin [6],

A primera vista la complejidad es un tejido (*complexus*: lo que está tejido en conjunto) de constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados: presenta la paradoja de lo uno y lo múltiple. Al mirar con más atención, la complejidad es, efectivamente, el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen nuestro mundo fenoménico. Así es que la complejidad se presenta con los rasgos inquietantes de lo enredado, de lo inextricable, del desorden, de la ambigüedad, la incertidumbre [...] De allí la necesidad, para el conocimiento, de poner orden en los fenómenos rechazando el desorden, de descartar lo incierto, es decir, de seleccionar los elementos de orden y de certidumbre, de quitar ambigüedad, clarificar, distinguir, jerarquizar [...] Pero tales operaciones, necesarias para la inteligibilidad, corren el riesgo de producir

ceguera si eliminan a los otros caracteres de lo complejo; y, efectivamente, como ya se ha indicado, nos han vuelto ciegos [...] Finalmente, se hizo evidente que la vida no es una sustancia, sino un fenómeno de auto-eco-organización extraordinariamente complejo que produce la autonomía. Desde entonces es evidente que los fenómenos antro-po-sociales no podrían obedecer a principios de inteligibilidad menos complejos que aquellos requeridos para los fenómenos naturales

Esta ceguera tiene que ver con la entronización de la simplificación, de la visión reduccionista, del anhelo profundamente humano de encontrar teorías generales que expliquen de forma unidimensional toda la multidimensionalidad de los cambios, cada vez más acelerados, que vivimos en la sociedad actual [7].

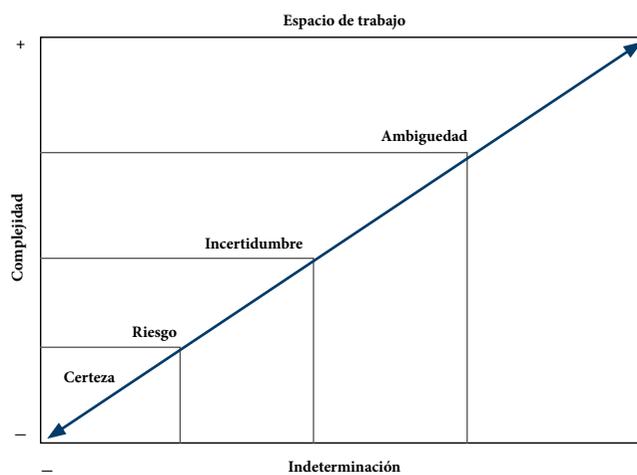


Figura 3. Relaciones entre la complejidad y la indeterminación (adaptado de [4])

Tabla 3. Relaciones entre los niveles de indeterminación y los conceptos básicos

Nivel	Orientación hacia el futuro	Predictibilidad de los eventos	Situaciones futuras	Tipo de futuro y estrategia	Métodos
1. Certeza	Predicción	Eventos que ciertamente ocurrirán	Deterministas	Futuro suficientemente claro. Es viable cierto nivel de predicción	Análisis y monitoreo del entorno
2. Riesgo	Pronóstico	Eventos que probablemente ocurrirán	Aproximables por hipótesis convencionales de regularidad estocástica. Se establecen probabilidades de que ocurran ciertos eventos, de acuerdo con unos argumentos determinados	Futuros alternativos. Se sabe cuáles son los actores, las variables y las interrelaciones que se manejan, y se pueden plantear sus probables futuros	Análisis de tendencias y escenarios cuantitativos
3. Incertidumbre	Prospectiva	Universo conocido de los estados posibles. Eventos que podrían ocurrir dentro de un espectro de situaciones conocidas, sin que se sepa la secuencia en que se producirían	Preidentificadas, aunque se desconozca la cadena de eventos que las pueda producir. Es difícil conocer a todos los actores, las variables y las interrelaciones que se manejan	Se plantean futuros posibles. Una gama de posibles resultados, pero sin escenario natural alguno. No se conoce la probabilidad de ocurrencia de un evento	Consulta de expertos, escenarios cualitativos
4. Ambigüedad	Pensamiento complejo	Eventos francamente indeterminados. Incertidumbre no estructurada.	Acciones y reacciones caracterizadas por la creatividad, la innovación y la sorpresa	Auténtica ambigüedad. Sin base alguna para predecir el futuro, ya que no se pueden identificar, y menos prever, las variables pertinentes para configurar el futuro. Ni siquiera sería posible elaborar escenarios para el diseño de una estrategia	Simulación y modelación no lineal. Creatividad

Fuente: adaptada de [4]

La complejidad, entendida como el espacio de la no-linearidad, de las múltiples, variadas y simultáneas interacciones, se contrapone a las teorías de elección racional y presupone que nuestras decisiones están lejos de la precitada visión reduccionista. Como se muestra en la figura 3, se postula un amplio espectro del conocimiento, que comprende cuatro estadios básicos, que van desde la certeza hasta la ambigüedad, pasando por el riesgo y la incertidumbre. Esos estadios, representados en un plano cartesiano, en uno de sus ejes muestra la relación entre el determinismo y la indeterminación, y en el otro, la relación entre la baja y la alta complejidad de los espacios de trabajo de la prospectiva. En la certeza se conocen de forma evidente las variables y sus relaciones. Se presenta el riesgo cuando se conocen las variables, pero tan solo se pueden estimar las relaciones existentes entre ellas, o sea, sus probabilidades. Se observa la incertidumbre si se conocen las variables, pero algunas no se pueden medir, y se desconocen las relaciones entre todas. Finalmente, la ambigüedad se presenta si no se conocen todas las variables pertinentes y estas son sujetos de identificación [8].

Las referidas relaciones entre la complejidad y la determinación dan cuenta de la vasta aplicabilidad de los estudios prospectivos en temas tan variados como los de defensa,

seguridades nacional, energética y alimentaria, modelos de negocios, análisis de mercados, análisis electoral, megatendencias en ciencias, modelos de predicción del clima, entre otros. Este escenario se enmarca en los postulados de Michel Godet, uno de los notables teóricos de esta disciplina, quien indica que por fortuna la única certidumbre es la muerte, pues un presente caracterizado por la certeza y la predictibilidad sería, en últimas, insoportable. Esta afirmación la sustenta en la premisa relativa a que el futuro no es la prolongación determinista del pasado, sino que este está abierto a la conjunción de múltiples actores que se mueven en función de los intereses de sus proyectos, donde, en todo caso, la idea-fuerza es que “la anticipación es necesaria para iluminar la acción” [9].

Otro importante autor de la transdisciplina prospectiva es Bertrand de Jouvenel (citado en [4]), uno de sus pioneros mundiales, quién anota que

Al observar el pasado, la voluntad del hombre es vana, su libertad es nula, su poder, inexistente [...] El pasado es el lugar de los hechos sobre los que no se puede hacer nada, es al mismo tiempo el lugar de los hechos conocidos y constatados. Mientras que, por el contrario, el futuro es

para el hombre, en tanto que sujeto dotado de conocimiento y razón, espacio de incertidumbre, y en tanto que sujeto activo, espacio de libertad y de poder.

Sin embargo, son varios los autores que sitúan a Gastón Berger (1957) como el creador del vocablo prospectiva, que, en oposición al término retrospectiva, se define como “la ciencia que estudia el futuro para poder influir en él”. Ben Martín (citado en [4]) describe la prospectiva como “El proceso de investigación que requiere mirar sistemáticamente el futuro a largo plazo en ciencia, tecnología, economía y sociedad, con el objetivo de identificar las áreas de investigación estratégicas y las tecnologías genéricas emergentes que generarán los mayores beneficios económicos y sociales”.

Reconstruyendo los antecedentes más remotos de los estudios del futuro, los investigadores Ortégón y Medina [10] indican que ya Platón, en su *República*, describía “una sociedad futura donde el concepto de justicia es capital para la vida e instituciones sociales”. También mencionan cómo san Agustín, obispo de Hipona, en su obra *La ciudad de Dios*, se sitúa en una ciudad terrena asociada a la ambición humana, y su contrapuesta ciudad divina, fundamentada en el amor de Dios, cuya configuración solo puede ser posible en la tierra cuando sus estructuras sociales, en el futuro, se alinearen con la voluntad del Creador. En la *Utopía* de Tomás Moro, este pensador inglés describe una sociedad idealizada en la que los individuos conviven de forma armónica en la entidad construida, que se fundamenta en el bien común, la educación y el trabajo como sus pilares. Francis Bacon, otro filósofo inglés, relaciona *La nueva Atlantis* como ese espacio de futuro prometedor donde el individuo fundamenta su poder y su autonomía. Ya a finales del siglo XIX, los pensadores Auguste Comte y Karl Marx, de manera coincidente, postularon que la ciencia y la tecnología, como motores del progreso y el cambio social, coadyuvarían en la solución de muchos de los problemas que aquejaban a las sociedades de ese entonces (salubridad, movilidad, pobreza, inequidad, entre otros), premisa que aún tiene vigencia hoy en día [10].

Teniendo en cuenta que los estudios del futuro en efecto están revestidos de un carácter científico sin un objeto definido, es posible llegar a la comprensión de tres tipos de futuro: posible, probable y deseable, cuya descripción se muestra en la tabla 4 [9].

En este orden de ideas, los estudios de futuro se rigen —en un consenso ya reconocido a finales del siglo XX— por tres principios fundamentales, que se describen a continuación [9]:

- » **Primer principio.** Reconoce la existencia de un dilema característico de los estudios de futuro entre el conocimiento y el deseo/temor. Mientras que necesitamos conocer el pasado y el presente como referentes para analizar el futuro, por otro lado nuestros deseos/temores acerca de este último no se corresponden con nuestros conocimientos, y hasta eventualmente los contradicen.
- » **Segundo principio.** El único tiempo sobre el cual los humanos podemos tener incidencia es el futuro. El pasado es el tiempo de los hechos cumplidos. El presente es este momento que ahora vivimos, que en unos instantes ya será pasado. Antonio Concheiro, notable teórico de la disciplina, establece que “...el pasado pertenece a la memoria, el presente a la acción, y el futuro, a la imaginación y la voluntad...”.
- » **Tercer principio.** Postula que no hay un solo futuro, sino muchos futuros posibles. Aquí bien vale mencionar el significado del término *futuribles*, esbozado por De Jouvenel (citado por Mera) como “el complejo de futuros alternativos posibles y probables mostrados como construcciones mentales” [4].

En un reciente estudio —pleno de didáctica—, Hauptman y Steinmüller indagan acerca de las definiciones y diferencias entre los relatos de anticipación o de ciencia ficción y los estudios de futuro. Partiendo de la premisa *¿Qué pasaría si...?* exploran una interesante senda que integra de manera metódica la imaginación en el proceso de construcción social de futuros. En la tabla 5 se muestran las principales variables que describen estas dos aproximaciones [39].

Tabla 4. Tipos de futuros

Los futuros posibles	Exploran alternativas mutables, sujetas a incertidumbres y rupturas o discontinuidades.
Los futuros probables o esperados	Son resultado del análisis de tendencias y de extrapolaciones de “datos” del presente.
Los futuros deseables o preferidos	Reflejan la expectativa de atención de las demandas actuales de la sociedad, de políticas de gobierno, de estrategias empresariales, entre otras, que se expresan por medio de las metas o los valores de los actores sociales.

Tabla 5. Variables descriptivas de la ciencia ficción y de los estudios de futuro

	Ciencia ficción	Prospectiva
Objetivo	Entretenimiento. Estimulación intelectual.	Proporcionar orientación para la acción.
Enfoque	Intuitivo, creativo (con métodos artísticos de ficción).	Acorde con lo científico / mejores prácticas metodológicas / creatividad.
Cuestiones orientadoras	¿Qué es imaginable? ¿Cuáles son las implicaciones más sorprendentes, increíbles y desastrosas?	¿Qué es posible? ¿Qué es probable? ¿Qué es deseable? ¿Qué implicaciones son admisibles?
Retos	Suspensión de la incredulidad. Inducción de una sensación de asombro.	Nuevas ideas convincentes y útiles sobre el o los futuros.
Criterios de calidad	Originalidad. Visiones poderosas y convincentes. Estilo y calidades dramáticas. Personajes convincentes.	Plausibilidad, coherencia lógica. Realismo. Transparencia metodológica (con respecto a las declaraciones de valores).
Factores de éxito	Placer/satisfacción del lector. Ventas.	Satisfacción de los clientes. Utilidad para tomar las mejores decisiones.

Fuente: [38]

Estos investigadores finalmente señalan que la previsión genera imágenes del futuro que pueden ser asimiladas con métodos controlados, fundamentados en el mejor conocimiento disponible de los dominios de lo posible, de manera que la creatividad y la imaginación son insumos necesarios por varias razones: para superar la miopía de “presentismo”, también para integrar los aspectos humanos (“humanidad”) en la imagen del futuro y, finalmente, para traer al presente algunas de las muy variadas posibilidades en las que, por supuesto, el futuro es bastante pródigo.

2. APUNTES DE PROSPECTIVA EN GEOCIENCIAS Y EN CIENCIAS NUCLEARES

La prospectiva, como otras disciplinas de su naturaleza, tiene ahora, en su madurez, un cuerpo conceptual y metodológico robusto, que le imprime solidez, identifica sus ámbitos de competencia y establece sus dominios temáticos, que se avizoran en continua expansión. Un objetivo de este artículo es mostrar sucintamente algunas de las cuestiones de relevancia actual en las disciplinas relacionadas, que conciten el interés de los investigadores y de los que sienten curiosidad por estas temáticas. En primera instancia se muestran algunos desarrollos conceptuales del campo geocientífico, donde el elemento articulador es de naturaleza antropocéntrica, es decir, orientado hacia la satisfacción de las necesidades de la especie humana. Luego se muestra lo pertinente a las ciencias nucleares, haciendo hincapié en un campo particular, el de la seguridad energética, que cobra una especial importancia en el actual momento histórico, cuando se exponen —algunas veces sin la debida profundidad y rigor— argumentos a favor o en contra de la diversi-

ficación de la canasta energética, el agotamiento de las fuentes tradicionales de suministro de materias primas y la posibilidad de armonizar el consumo con la sostenibilidad planetaria.

3.1. Prospectiva en geociencias

Los rasgos interdisciplinarios se revelan en aproximaciones tan disímiles como las de las geociencias y el arte. En un reciente número del *Journal of Maps* [11], el editorial destaca cómo las colaboraciones entre artes y geociencias ayudan a comprender el levantamiento de información espacial en geomorfología, cartografía geológica, estudios del Cuaternario, etc., a partir de la elaboración de mapas cuya representación gráfica se fundamenta en tres conceptos críticos: espaciales (distancias, direcciones, etc.), locales (territorios, delimitaciones, etc.) y ambientales (características biofísicas, etc.), donde los humanos y nuestro dinamismo (pasado, presente y futuro) predeterminamos en buena medida la construcción de los sitios donde habitamos o proyectamos hacerlo. Los mapas, como representaciones de esas posibles realidades, pueden acudir al arte, en un interesante ejercicio que deja atrás el viejo paradigma que evidenciaba la desconexión entre las humanidades y las ciencias [11].

En este orden de ideas, entre los múltiples ámbitos de estudio conocidos en prospectiva, se menciona la emergencia del término *prospectiva territorial*, asimilado a aquello que en el ámbito latinoamericano el investigador mexicano Arturo Montaña (citado por Baena) denominó un “modelo propio de la geopropectiva”, postulado como una teoría orientada a la elaboración de “herramientas que permitan construir los futuros alternativos, geográficamente situados, que sirvan a las comunidades, individuos o instituciones,

para mejorar la calidad de vida de sus miembros, alcanzar la sustentabilidad de sus lugares, y fortalecer su cohesión social” [12]. La prospectiva territorial es una disciplina que incluye los siguientes modelos referidos al concepto integral del ordenamiento territorial:

- » Modelo para determinar las tendencias clave en unidades de paisaje y del territorio (según sus características o propiedades)
- » Modelo de órdenes clasificatorios de tendencias
- » Modelo para determinar los escenarios probables, posibles y deseables
- » Modelo para determinar el peso de los actores territoriales
- » Modelo para el pronóstico y análisis de configuraciones territoriales
- » Modelo para analizar acciones y determinar el programa político relacionado con su ejecución

Este modelo y su aplicación práctica contribuyen a visualizar los posibles escenarios de desarrollo de las comunidades, como lo menciona su autor, en búsqueda de la armonía entre estas y su entorno natural [12].

La misma interdisciplinariedad mencionada al principio de este aparte se constituye en un elemento central del estudio acerca de la proyección del futuro de las investigaciones en hidrogeología [13]. La hidrogeología, como otros campos del saber, no ha sido ajena a las dinámicas de cambio caracterizadas por los conflictos entre la adopción de los enfoques reduccionistas y los alternativos interdisciplinarios. De esta forma, desde mediados del siglo XX, y hasta la primera década del XXI, la cuantificación y el modelamiento de los recursos hídricos fueron los objetos centrales de estudio e investigación en esta disciplina. Otros temas que se prevé podrán abordarse en décadas posteriores se relacionan con la sostenibilidad del recurso (ecología subterránea, simulaciones demanda-suministro, interacciones biogeoquímicas, etc.), los estudios de complejidad (aproximaciones estocásticas, determinísticas, teoría del caos, etc.), las aproximaciones reduccionistas rigurosas (repetibilidad, generalización, etc.), la heterogeneidad (porosidad primaria y secundaria, secuencias estratigráficas, modelos geoestadísticos, etc.), la incertidumbre (demanda del recurso, salud pública, vacíos de información, etc.) y, finalmente, las proyecciones en in-

vestigación básica y aplicada asociadas al estudio de los geosistemas complejos no lineales [13].

En cuanto a la proyección de las geociencias y sus ámbitos de estudio, el Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences, con el auspicio de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de los Estados Unidos, formuló las que a su juicio son las diez grandes preguntas de investigación de las ciencias de la tierra:

1. ¿Cómo se formaron la Tierra y otros planetas?
2. ¿Qué sucedió durante la “edad oscura” de la Tierra (primeros 500 millones de años)?
3. ¿Cómo comenzó la vida?
4. ¿Cómo funciona el interior de la Tierra y cómo afecta esto su superficie?
5. ¿Por qué la Tierra tiene tectónica de placas y continentes?
6. ¿Cómo son controlados los procesos de la Tierra por las propiedades de sus materiales?
7. ¿Qué causa el cambio climático y qué tanto puede ahora cambiar?
8. ¿Cómo la vida ha dado forma a la Tierra y cómo la Tierra ha moldeado la vida?
9. ¿Pueden predecirse los terremotos, las erupciones volcánicas y sus consecuencias?
10. ¿Cómo el flujo y transporte de fluidos afecta el ambiente antrópico? [38]

Previamente, en 1973, la Unesco y la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (UICG) estructuraron el Programa Internacional de Geociencias (PICG), al que en 2015 se le adicionó el Programa de Geoparques Mundiales de la Unesco, para constituir el ahora denominado Programa Internacional de Geociencias y Geoparques (IGGP). Este programa se ha enfocado en el apoyo a la investigación y el intercambio científico en los siguientes cinco temas estratégicos:

- » Recursos de la Tierra: mantenimiento de nuestra sociedad
- » Cambio global: evidencia de los registros geológicos
- » Riesgos geológicos: mitigar los riesgos
- » Hidrogeología: ciencias de la tierra inherentes al ciclo del agua
- » Geodinámica: control de nuestro entorno

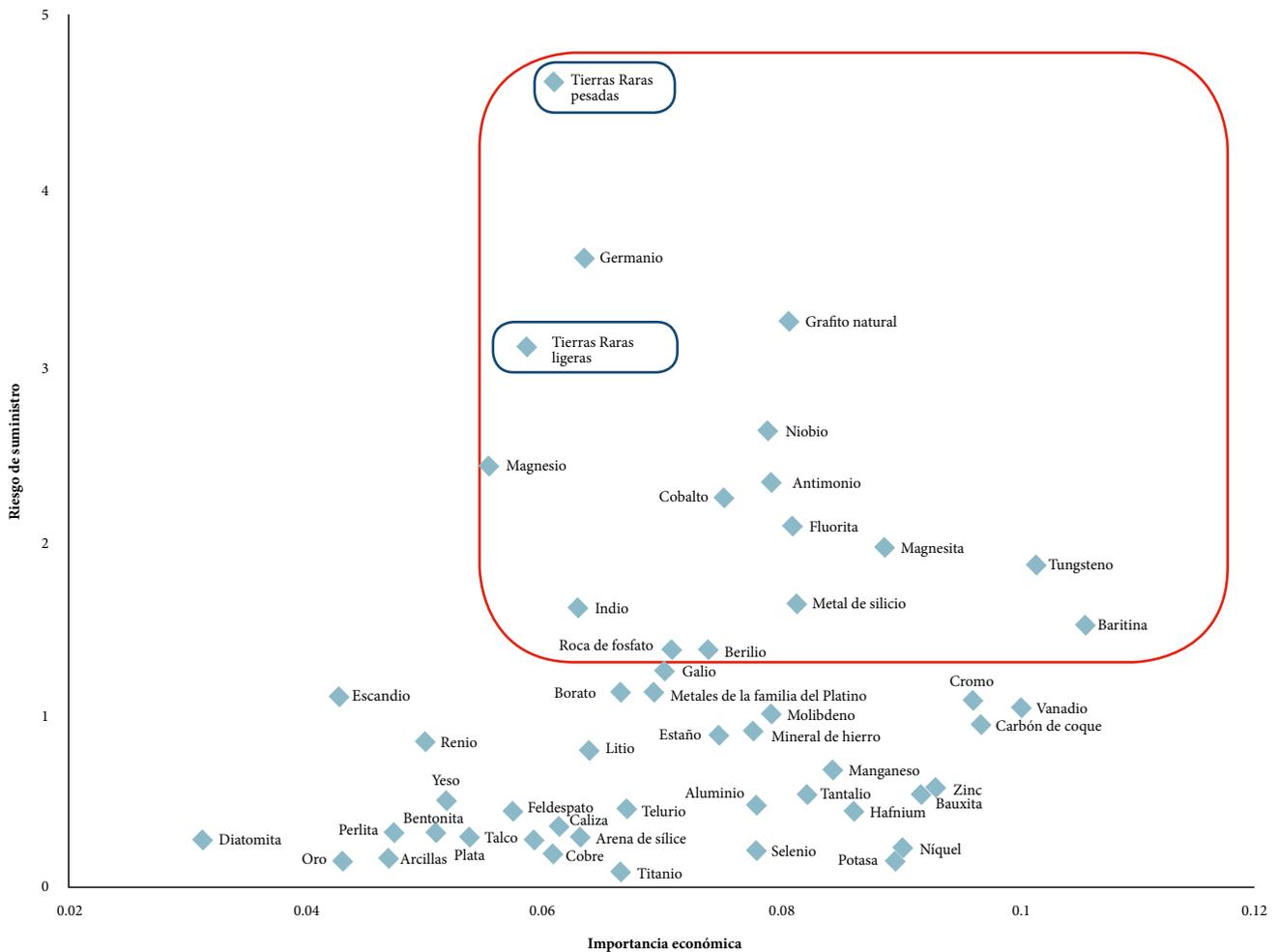


Figura 4. Minerales de importancia crítica en la OCDE, 2015 [14]

Otro tema de singular importancia en el ámbito geocientífico prospectivo se relaciona con la provisión de los recursos minerales, materias que fundamentan su valor en la utilidad que prestan y en la subsecuente abundancia/escasez de estos en la naturaleza. En el documento “Critical minerals today and in 2030: An analysis for OECD countries (2015)” [14] se muestra que las materias primas son esenciales para la economía global y que el desarrollo futuro depende de su suministro continuo, al igual que el de los combustibles fósiles, materiales que no son renovables. En general, sus depósitos en la corteza terrestre se encuentran agrupados o concentrados en zonas de similares características geológicas, lo que hace que la seguridad del suministro sea un riesgo potencial. En muchos casos el agotamiento de los depósitos minerales económicamente competitivos en los países industrializados ha hecho que los suministros dependan cada vez más de la estabilidad política de las economías emergentes ricas en minerales. De esta manera, la demanda creciente de estos mer-

cados emergentes, nuevas tecnologías que requieren grandes cantidades de los minerales, la baja capacidad de sustitución en aplicaciones y las bajas tasas de reciclaje han incidido en que estas economías sean cada vez más vulnerables a posibles interrupciones en el suministro dirigido a los mercados globales.

En la figura 4 se muestra un estimativo combinado del riesgo relativo de suministro de minerales con respecto a su importancia económica para los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), para 2015. Los minerales más representativos (es decir, los diez primeros) son, en orden descendente, baritas, tungsteno, vanadio, carbón de coque, cromo, zinc, níquel, potásicos y magnesita; sin embargo, esta última es la única que se encuentra entre los diez primeros en riesgo de suministro [14]. En esta misma línea argumentativa, el proyecto EU-Intraw (acrónimo de European Union’s International Observatory for Raw Material) ha visualizado, mediante la metodología

prospectiva apoyada de forma conceptual por el programa Micmac® (acrónimo de *matrice d'impacts croisés-multiplication appliquée à un classement* [matriz de impactos cruzados y multiplicación aplicada para una clasificación]), tres probables escenarios de suministro de materias primas mineras para la Unión Europea en 2050 [15]. Este proyecto, construido con una visión de largo plazo, explora el consumo de estos geomateriales bajo el supuesto de que las políticas, estrategias y prioridades se encuentran en constante estado de flujo, en respuesta a los cambios políticos y socioeconómicos. Esta interdependencia configura una de las principales dimensiones del ya complejo sistema de suministro de materias primas minerales. El primer escenario, “Alianza para la sostenibilidad”, examina la dinámica de un ambiente político y económico global que se centra en la sostenibilidad ambiental y económica, y que conduce cada vez más hacia una economía circular de materias primas. El segundo escenario, de “Comercio Ilimitado”, refleja un mundo en el cual el libre comercio continúa dominando la política mundial y el entorno económico, con expectativas de una creciente demanda de materias primas. Finaliza con un tercer escenario, de los “Muros nacionales”, que refleja un futuro en el que el nacionalismo y el proteccionismo económico comienzan a dominar, lo que conduce al estancamiento del crecimiento económico y a la volatilidad de las materias primas (*commodities* transables en los mercados de valores) [15].

Igualmente álgidos son los temas que, incorporados en la reflexión prospectiva, se relacionan con la emergente disciplina de la geoética, que

... consiste en la investigación y la reflexión sobre los valores que sustentan los comportamientos y las prácticas adecuadas, dondequiera que las actividades humanas interactúan con el sistema terrestre. La geoética se ocupa de las implicaciones éticas, sociales y culturales de la educación, la investigación y la práctica en geociencias, y del papel social y la responsabilidad de los geocientíficos en la realización de sus actividades [...] considerando los futuros del moderno desarrollo social y económico [16].

El geólogo Antonio Stoppani (1824-1891) introdujo el concepto de *era antropozoica*. Identificó a los humanos como una nueva “fuerza geológica” y, por lo tanto, como una parte integral y esencial de la naturaleza. Como primer populari-

zador del conocimiento geológico, Stoppani se convirtió en uno de los pioneros de la geoética. Esta reconoce la contingencia de la evolución humana en el planeta e identifica al *Homo sapiens* como una fuerza geológica que actúa en los entornos geológico y biológico, y asigna a los humanos una responsabilidad ética que surge de la conciencia de ser un modificador del sistema terrestre [16]. La geoética nació en 1991 del cruce de la ética con la geología. El Dr. Vaclav Nemeš es considerado el padre de esta disciplina. Tanto las ciencias de la Tierra como las Sociales han aceptado la geoética debido a la necesidad de una actitud ética apropiada para toda la geosfera y un análisis crítico de los dilemas geoéticos y la búsqueda de formas de resolverlos, que en todo caso deben asegurar la sostenibilidad de las generaciones futuras [16].

En este escenario de la geoética, bien vale la pena contextualizar como ejemplo algunos de los desarrollos de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD), mediante el informe “Perspectiva global de la Tierra” [17]. Este estudio presenta una visión transformadora de la forma en que usamos la Tierra, factor determinante de nuestro bienestar futuro e hilo conductor de la estructura social de la humanidad. Se muestra un panorama mundial de la cartografía de la dinámica de la productividad de la Tierra, enfocado en la detección temprana de las trayectorias críticas de las transformaciones mundiales de la Tierra, observadas como el más importante desafío colectivo, “desde las presiones del crecimiento demográfico, el cambio climático, la urbanización, la migración y los conflictos a la inseguridad alimentaria, energética e hídrica. En todas sus dimensiones, la seguridad humana es cada vez más frágil y en muchas partes del mundo, la degradación de la Tierra y el cambio climático ya se reconocen como factores que contribuyen a una sensación de creciente inestabilidad”, asegura Monique Barbut, actual secretaria ejecutiva de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación [17]. En la figura 5 se exhibe un esquema de las principales variables en las que se fundamenta la “seguridad humana”, entendida como “el acceso a alimentos y agua, estabilidad de trabajo y medios de subsistencia, resiliencia ante el cambio climático y los fenómenos climáticos extremos y, en última instancia, estabilidad social y política”. Como conclusión de estudio es posible encontrar un futuro en el que exista una seguridad humana basada en la gestión de la Tierra, si se adopta la neutralidad de la degradación de

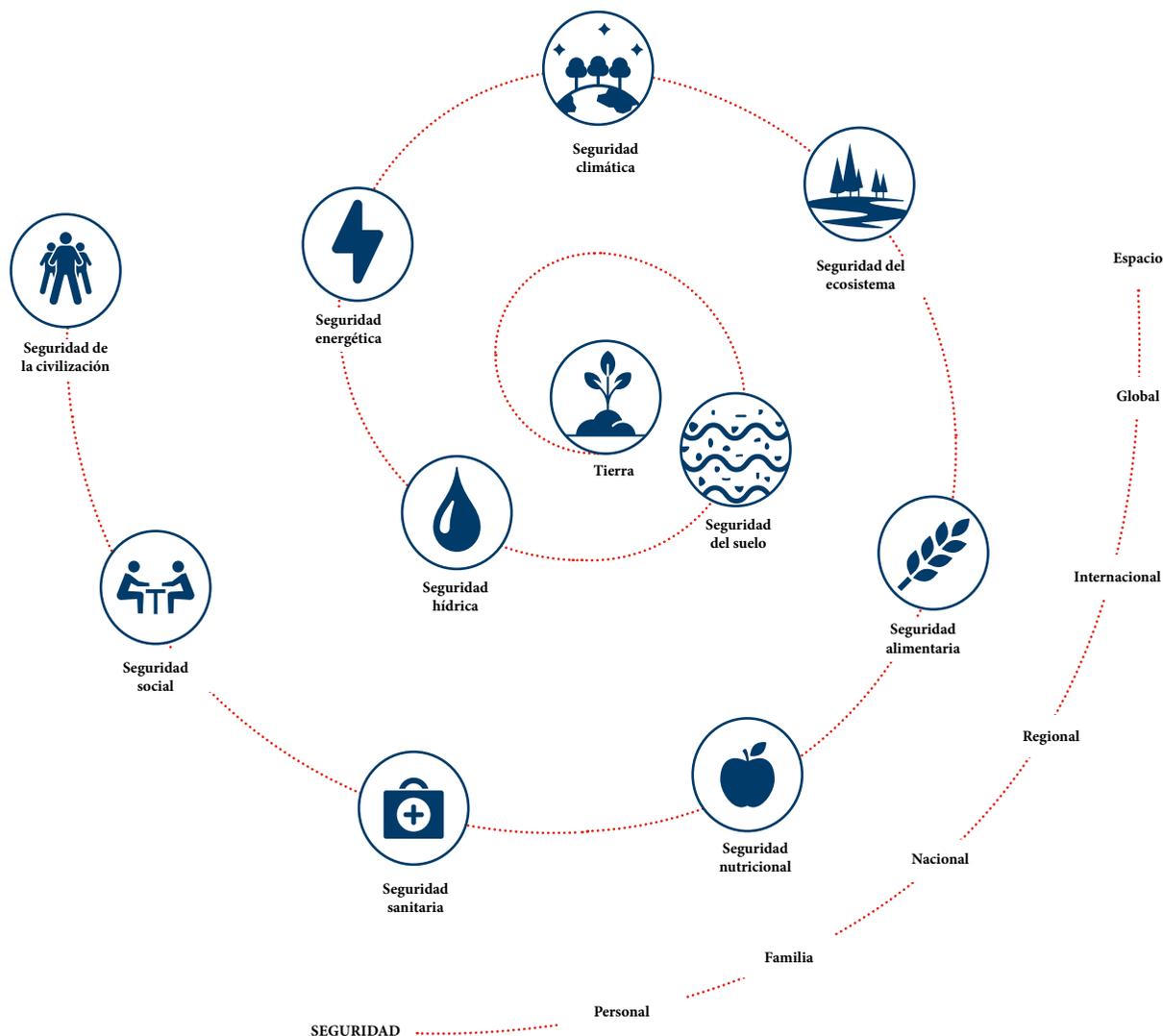


Figura 5. Dimensiones de la seguridad humana, 2017, UNCCD [17]

las tierras (NDT) como “un nuevo enfoque de la gestión de la Tierra que pretende fomentar acciones para evitar o reducir la degradación, y también para restaurar las tierras degradadas, con el fin de lograr el objetivo de pérdida neta cero en tierras sanas y productivas, a nivel nacional” [17].

Estas breves anotaciones tan solo pretenden llamar a la reflexión colectiva sobre la importancia de las geociencias integradas en los desarrollos conceptuales de la disciplina prospectiva, donde uno de los más recientes retos se relaciona con el entendimiento de las escalas espacio-temporales geológicas en la geosfera, en particular, en el nivel urbano o urbanosfera, compuesta a su vez por la biourbanosfera, la atmourbanosfera, la hidrourbanosfera y la litourbanosfera, y cómo estas afectarán la permanencia de la especie humana en el planeta [18] [19] y [20].

3.2. Prospectiva en ciencias nucleares

El suministro de energía eléctrica a partir de reactores nucleares de potencia (nucleoelectricidad) es uno de los componentes de la *seguridad energética*, concepto integrado como una de las dimensiones de la *seguridad humana*, explicada en el numeral anterior [17]. La seguridad energética, dada su naturaleza multidimensional, no cuenta con una definición global que la cubra. Este término apareció en los albores del siglo XX, en un ambiente geopolítico de industrialización caracterizado por la emergencia de nuevas naciones y sus consecuentes problemas de defensa y soberanía, en los que sin duda el rol del suministro de los combustibles para las fuerzas armadas cobró importancia estratégica. Varias décadas después, en el ámbito civil, el suministro de petróleo para facilitar la movilidad de las personas, los negocios y mercancías, se convirtió en la im-

pronta de una época de vertiginoso crecimiento económico, en la que los derivados del petróleo ya ocupaban el primer lugar en el consumo energético de las naciones [21]. Se destacan las siguientes definiciones relacionadas en la referencia citada:

- » La seguridad energética es la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible (Energy International Agency, 2017).
- » La seguridad energética es la capacidad de evitar el impacto adverso de cortes del suministro de energía causados por eventos naturales, accidentales o intencionales que afectan los sistemas de suministro y distribución de energía y servicios públicos (Departamento de Defensa de los Estados Unidos, 2009).
- » La inseguridad energética es la pérdida de bienestar económico que puede ocurrir como resultado de un cambio en el precio o la disponibilidad de energía (Bohi y Toman, 1996).
- » La seguridad energética es la capacidad de una economía para garantizar la disponibilidad de energéticos de manera sostenible y oportuna, con precios que no afecten negativamente el desempeño económico (APER, 2007).
- » La seguridad energética es la prestación ininterrumpida de servicios energéticos vitales (IIASA, 2012).
- » La seguridad energética es la capacidad de un país para satisfacer la demanda nacional de energía con suficiencia, oportunidad, sustentabilidad y precios adecuados, en el presente y hacia un futuro, que suele medirse por lustros y decenios más que por años (Navarrete, 2008).
- » La seguridad energética es simplemente la baja vulnerabilidad de los sistemas energéticos vitales (Cherp y Jewell, 2014).
- » La seguridad energética nacional se concibe como la acción del Estado orientada a garantizar el suministro de energía de manera sostenible medioambiental y económicamente, a través del abastecimiento exterior y la generación de fuentes autóctonas, en el marco de los compromisos internacionales. La Estrategia de Seguridad Nacional plantea como objetivo en el ámbito de la seguridad energética diversificar las fuentes de energía, garantizar la seguridad del transporte y abastecimiento e impulsar la sostenibi-

lidad energética. Entre las líneas de acción estratégica que plantea para alcanzar este objetivo se centran en tres aspectos: el abastecimiento, la distribución y el consumo (Departamento de Seguridad Nacional, Gobierno de España, 2019).

En este escenario, la emergencia de las tecnologías nucleares provistas por los sectores militares en la Segunda Guerra Mundial cobró singular importancia estratégica en la definición de este conflicto y en sus posteriores desarrollos geopolíticos enmarcados en la Guerra Fría. A partir de entonces fueron notorios los avances en tecnologías nucleares para aplicaciones en los sectores industrial, biomédico, bélico, ciencias básicas, ambientales y nanotecnologías, entre otras, y en la investigación teórica asociada a la modelación de las reacciones químicas nucleares.



Figura 6. Producción histórica de electricidad a partir de fuentes nucleares [22]

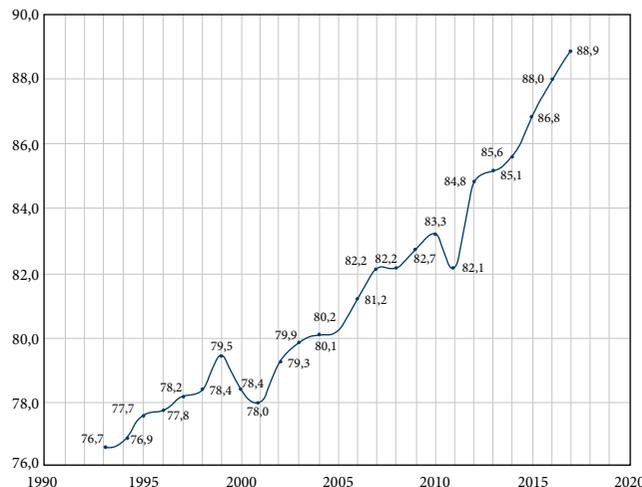


Figura 7. Acceso de la población mundial a la electricidad [22]

Sin embargo, las recurrentes crisis petroleras (1973, 1979 y 1990) empezaron a incidir también en la variación anual mundial del porcentaje de participación de la energía nuclear en la producción total de energía (figura 6). Allí se observa que si bien entre 1990 y 2015 esta se redujo a casi la mitad, actualmente algunos países, como Francia (77,6%), Estados Unidos (19,3%), Federación Rusa (17,0%), Alemania (14,3%), Bélgica (37,5%), España (20,6%), Reino Unido (20,9%), Suecia (34,7), Suiza (34,9%) y Ucrania (48,6%), presentan una dependencia estratégica significativa de esta fuente [22], que sopesada junto al acceso de la población mundial a la demanda de energía (figura 7), ofrece un interesante escenario para realizar elaboraciones de mayor complejidad.

Así, a escala mundial se aprecia un espectro promedio de generación de energía eléctrica (figura 8) que está ampliamente dominado por los combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo, 66,7%), mientras que la hidroelectricidad cubre el 17,2% y la nuclear 11,2%. Las otras fuentes alternativas de la canasta energética son las provenientes de biomasa, energía eólica, geotérmica y solar.

Con respecto al consumo mundial final de energía en 2017 (figura 9), según datos de la OCDE, la Agencia Internacional de Energía y el Balance Prospectivo Nacional de Energía de México (2017), hubo un predominio de los sectores de industria y transporte, seguidos del uso residencial.

La energía nuclear, según lo confirmado por el reciente Panel Intergubernamental de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IPCC), en su informe emitido en octubre del 2018, podría desempeñar un importante papel en la transición energética necesaria orientada hacia un escenario mixto en el que primen las bajas emisiones de carbono [25].

Sin embargo, no se debe olvidar que la capacidad total de generación nuclear ha disminuido en casi un 10% desde 2006, lo cual resulta, en la actualidad, en una participación mundial en la generación de electricidad de cerca de, tan solo, el 11%. Esto se debe principalmente al cierre temporal de varias plantas nucleares en Japón después del evento de Fukushima, seguido de otros cierres permanentes en este mismo país, los Estados Unidos y Europa. En algunos casos, este descenso es el resultado de una decisión política de eliminación/reducción ("moratoria") de la opción nuclear; en otros, de la falta de competitividad de centrales nucleares en los mercados de electricidad en evolución, atribuida a los bajos precios del gas natural o la emergencia de las energías renovables subsidiadas.

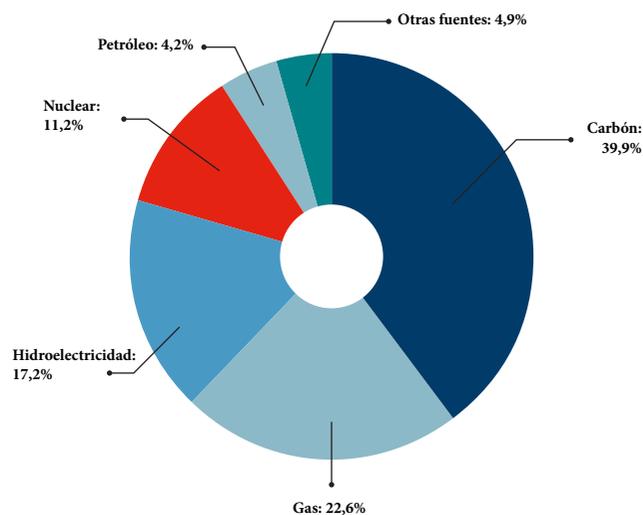


Figura 8. Panorama mundial de generación eléctrica según fuentes de energía [23]

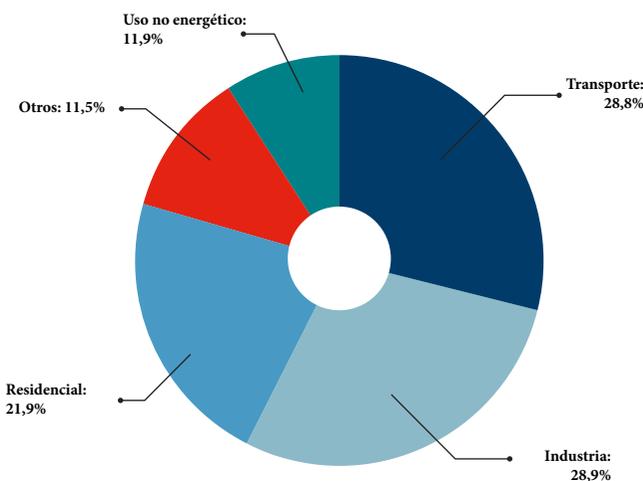


Figura 9. Consumo mundial final de energía por sectores, 2018 [24]

Sobre este aspecto, vale resaltar que, aunque se están construyendo varios reactores nucleares de potencia, principalmente en la República Popular China y en la Federación Rusa, la mayoría de los proyectos de nueva construcción en los Estados Unidos de América y en la región de Europa occidental ha sufrido retrasos en sus cronogramas y sobrecostos en sus presupuestos, lo que ha hecho que los posibles inversionistas se muestren reacios a asumir compromisos mayores que los requeridos con antelación. A esto se suma la creciente pérdida de credibilidad, entre la opinión pública informada, de la industria nuclear, que ha derivado en un impacto mediático negativo por la oposición de ONG ambientalistas y partidos políticos verdes, entre otros actores de la sociedad civil organizada, por los recientes incidentes en centrales nucleoelectricas [26].

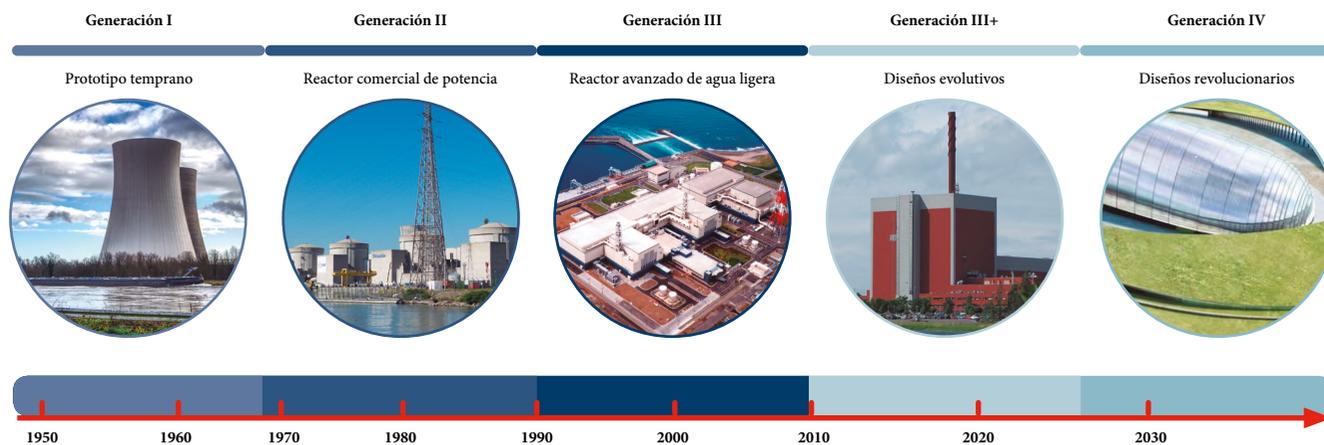


Figura 10. Generaciones de los reactores nucleares de potencia (NPP, por su acrónimo inglés) [27]

Este panorama un tanto sombrío no ha sido óbice para que la industria nuclear continúe sus desarrollos tecnológicos. En la figura 10 se muestra un esquema de la línea de tiempo del desarrollo de los reactores nucleares de potencia (nuclear power plants, NPP), incluyendo las previsiones a 2030, postulado por el Foro Internacional de Reactores de Generación IV (GIF, por su acrónimo inglés). Estos desarrollos tecnológicos se fundamentan en cuatro principios básicos: sostenibilidad; seguridad y credibilidad; competitividad económica y protección física [27].

Los reactores de potencia de cuarta generación (proyectados como factibilidad) se caracterizan por su alta eficiencia en el diseño, que garantizará la posibilidad de generar combustible fisible a partir de material fértil, con lo cual se produciría un material igual o más fisible de lo que consume el reactor en condiciones normales de operación.

La implantación de estas tecnologías se traduciría en una significativa reducción de los pasivos ambientales ocasionados por la construcción de repositorios geológicos profundos que usualmente albergan los desechos producidos en estas instalaciones nucleares, mientras se desarrollan tecnologías que aumenten la eficiencia en el reprocesamiento de combustibles usados. La emergencia de las actuales tecnologías fue prevista de manera acertada en el ejercicio prospectivo de 2002 realizado por el mencionado foro, en el que, de cien ideas conceptuales, fueron seleccionadas como promisorias las siguientes:

- » Reactor rápido refrigerado por gas (GFR)
- » Reactor rápido enfriado con plomo (LFR)
- » Reactor de sal fundida (MSR)

- » Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR)
- » Reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR)
- » Reactor de muy alta temperatura (VHTR)

De este escenario también suelen mencionarse como ideas disruptivas los denominados *pequeños reactores modulares* (*small modular reactors, SMR*), que, en términos del OIEA se definen como una “nueva generación de reactores nucleares diseñados para generar energía eléctrica de hasta 300 MW, cuyos componentes y sistemas pueden fabricarse en una instalación externa y luego ser transportados como módulos a los sitios donde la demanda implique su instalación” [28].

Para países como el nuestro, con una matriz energética poco diversificada y escaso o ningún desarrollo de generación eléctrica mediante reactores nucleares de potencia previsto en su planeación, alternativas como la mostrada con los SMR pueden coadyuvar en el eventual suministro seguro de energía en vastas zonas no interconectadas (ZNI) de la compleja geografía nacional.

Actualmente, en un reciente boletín (junio de 2019) de la Asociación Nuclear Mundial (World Nuclear Association, WNA), se presentó un panorama medianamente promisorio de generación nucleoelectrónica en los países emergentes, es decir, aquellos que están considerando, planean o han empezado la construcción de reactores nucleares de potencia. Entre ellos se destacan los siguientes:

- » En Europa: Italia, Albania, Serbia, Croacia, Portugal, Noruega, Polonia, Bielorrusia, Estonia, Letonia, Lituania, Irlanda y Turquía.

Tabla 6. Reactores nucleares de potencia operativos en América [40]

País	N.º de reactores operativos	N.º de reactores en construcción	% total en matriz energética
EE. UU.	99	5	19,4%
Canadá	19	0	16,0%
México	2	0	4,6%
Brasil	2	1	4,4%
Argentina	3	1	2,8%
TOTAL	125	7	47,2%

- » En el Medio Oriente y África del norte: estados del golfo, incluidos los Emiratos Árabes Unidos, Arabia Saudita, Qatar y Kuwait; Yemen, Israel, Siria, Jordania, Egipto, Túnez, Libia, Argelia, Marruecos y Sudán.
- » En África occidental, central y meridional: Nigeria, Ghana, Senegal, Kenia, Uganda, Tanzania, Zambia, Namibia y Ruanda.
- » En América Central y del Sur: Cuba, Chile, Ecuador, Venezuela, Bolivia, Perú y Paraguay.
- » En Asia central y meridional: Azerbaiyán, Georgia, Kazajstán, Mongolia, Bangladesh, Sri Lanka y Uzbekistán.
- » En el sudeste de Asia y Oceanía: Indonesia, Filipinas, Vietnam, Tailandia, Laos, Camboya, Malasia, Singapur, Myanmar, Australia y Nueva Zelanda.
- » En el este de Asia: Corea del Norte.

La situación de los reactores nucleares de potencia en 2015 se muestra en la tabla 6. En ese entonces se destacaba su participación en la matriz energética de los Estados Unidos, que en 2019 se mantuvo en 19%, con un incremento de la participación del gas natural (37%) y las energías renovables (19%), previéndose la expansión de esta últimas a 38% hacia 2050. A pesar del número significativo de naciones (cerca de 30) involucradas en la generación nucleoelectrica, no se prevé que estos desarrollos contribuyan significativamente a la expansión y consolidación de una capacidad nuclear “de-seable” en un futuro próximo [29].

Como conjunto, la situación energética en el entorno latinoamericano no se diferencia mucho de la mundial. Áreas geográficas con abundantes recursos naturales (combustibles fósiles y biomasa) y una climatología que favorece la producción hidroenergética son las características regionales relevantes [30]. Esta situación predetermina que de manera lenta la matriz de oferta energética (2016) se diversifique, dominada ampliamente por el consumo de petróleo y sus derivados (39%), seguido del gas natural (30%) y el carbón (6%). Posteriormente, la hidroelectricidad cubre el 7%, mientras la energía nuclear apenas alcanza el 1%. Se destaca

cómo la biomasa llega a 16%, y las otras energías renovables, al 1%.

La oferta diversificada de la actual matriz energética (2016) en la región de América Latina y del Caribe se muestra en las gráficas 11 y 12, resultado de una detallada simulación desarrollada por los investigadores en prospectiva energética de la Organización Latinoamericana de Energía (Olade) y orientada hacia el escenario de 2040, para cuando se prevé una progresiva inclusión de otras energías renovables (solar, eólica y geotérmica, entre otras) que, en todo caso, superan la expectativa de avance de la introducción de la energía nuclear. Esta última mantendrá, según este estudio, una participación marginal en el concierto energético regional cercana al 1%.

En el contexto histórico latinoamericano fueron pioneros en los desarrollos conceptuales de los programas nucleares, Brasil, en la década de los treinta del siglo XX, durante el gobierno de Getulio Vargas, Argentina en los cuarenta, y México, en los años cincuenta, esfuerzos que se concretaron en 1974 con la puesta en funcionamiento de Atucha I, la primera central nucleoelectrica de la región (Argentina). Actualmente, cada uno de estos países posee dos centrales de generación nucleoelectrica operativas [32]. En el ámbito local, en Colombia el primer intento por introducir en la planeación energética indicativa la variable nuclear se dio en la década de los ochenta, en la Administración Betancur (1982-1986), cuando se publicó el documento “Demanda de energía en el estudio nacional de energía (ENE), de Colombia: metodología y resultados”, en cuyo marco conceptual se formuló el primer Plan de Desarrollo Nuclear (PDN), documento estratégico en el que se plantearon las tres etapas estratégicas necesarias para la consolidación de esta tecnología en nuestra nación [33]:

Etapas I, 1985-2002. Optimización y conversión del reactor nuclear IAN-R1, orientada hacia la utilización de un combustible de bajo enriquecimiento (LEU 20% U_3O_8) y la elevación de la potencia hasta un megavatio (1.000 kW), fomento

de la producción de radioisótopos y la aplicación intensiva de las técnicas analíticas nucleares en diversos sectores productivos.

Etapa II, 2002-2022. *Diseño y construcción de un centro nuclear de investigación y producción.* Construcción y puesta a crítico de un nuevo reactor multipropósito, en las afueras de la ciudad, y evaluación integral de la prefactibilidad de la capacidad de generación nucleoelectrónica mediante modelos proyectivos.

Etapa III, 2022-2035. *Primer reactor nuclear de potencia.* Introducción del país en la era de la nucleoelectricidad.

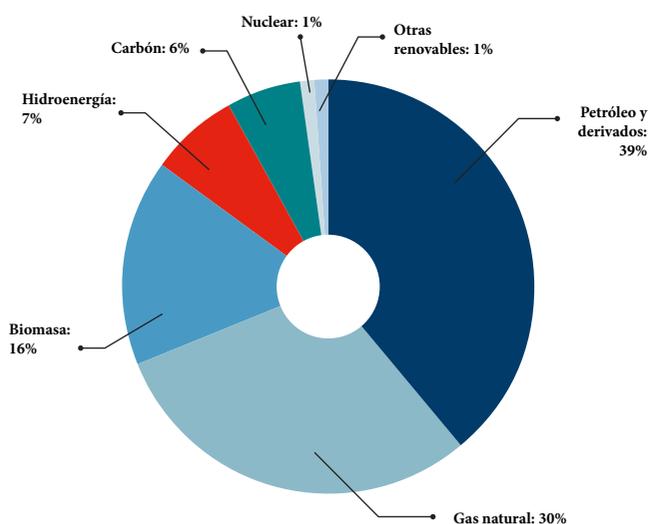


Figura 11. Matriz energética de América Latina y el Caribe en 2016, según la Olade [31]

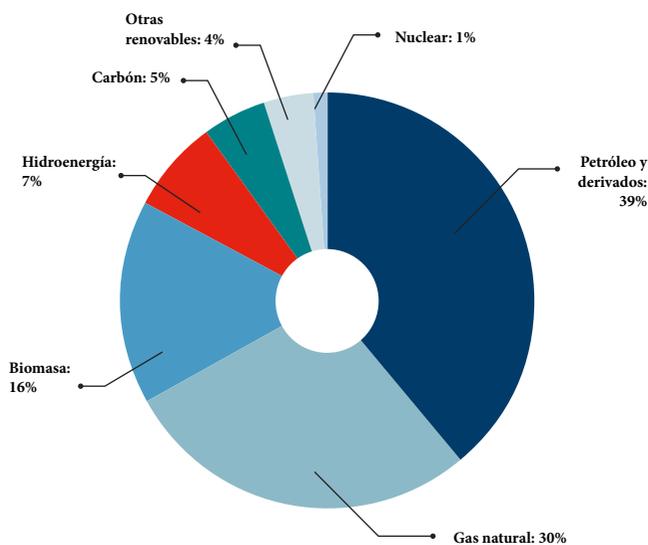


Figura 12. Simulación de la matriz energética de América Latina y el Caribe proyectada para 2040, según la Olade [31]

La evidencia existente a la fecha indica que este plan nunca se concretó, en parte por la falta de visión estratégica de futuro de nuestros planificadores y, por otro lado, debido a la abundancia de recursos hídricos de ese entonces, que pospusieron esta decisión. Posteriores eventos relacionados con las anomalías climáticas (fenómeno de El Niño) develaron esta falta de previsión y sometieron a los ciudadanos a intensos racionamientos de energía a principios de la década de los noventa del pasado siglo, cuyo fantasma —la “inseguridad energética”— volvió a aparecer, en concurrencia con la conocida situación del proyecto Hidroituango (que representaba el 17% de la demanda de energía eléctrica nacional a finales de 2018, según fuentes acreditadas de la propia EPM/Medellín, Col.).

Con el objetivo de prever, reducir, mitigar y eventualmente compensar los efectos negativos —algunos de ellos poco previsible— generados y no contemplados en los ejercicios formales de prospectiva, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Ministerio de Minas y Energía, la Interconexión Eléctrica S. A. (ISA), las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y algunos centros consultores del pensamiento prospectivo, entre otros, han avanzado durante las últimas décadas en los refinamientos para construir herramientas metodológicas relacionadas. En 2010 se presentó el “Plan de desarrollo para las fuentes no-convencionales de energía en Colombia” (PDFNCE), orientado a la evaluación de los recursos solar, eólico, de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y biomasa, y se encontró que la información sobre los recursos geotérmico, nuclear y el aprovechamiento energético de los océanos era bastante preliminar, cuando no prácticamente inexistente. En particular, en las zonas no interconectadas (ZNI), la eventual dotación o potencial de estos recursos sigue siendo baja, en buena medida explicada por la escasa población que allí se asienta. Respecto a la energía nuclear, el estudio concluye que esta “se visualiza en el muy largo plazo, para lo cual se considera conveniente ir construyendo las condiciones que lo permitan cuando ello resulte conveniente para el país desde el punto de vista de seguridad energética y de costos” [34].

Un interesante ejercicio prospectivo, el “Plan energético nacional Colombia: Ideario energético 2050”, realizado por la UPME en 2015, establece que en un escenario de largo plazo (2014-2050) se privilegie en el país una transición de la canasta energética hacia las energías renovables, limpias,

adaptadas al cambio climático y enfocadas en la entrega de servicios energéticos con mayor eficiencia.

En el mismo estudio se reflexiona acerca de resistencia generada por el eventual uso de las técnicas de fractura hidráulica (*fracking*), sobre la decisión de la política alemana de desmontar su parque nuclear y la posibilidad de establecer una línea de política relacionada con nuevos marcos regulatorios que favorezcan el desarrollo de la energía nuclear en el país. Esta alternativa estaría ligada con la construcción de pequeñas centrales nucleares (PCN), que

... pueden verse como una alternativa a largo plazo para diversificar el parque generador colombiano. La energía nuclear es una fuente confiable, segura y libre de emisiones de efecto invernadero. En Europa y Estados Unidos han venido trabajando en esquemas de negocios que permiten flexibilizar el uso de los combustibles para centrales nucleares y se ha desarrollado una opción de “nuclear fuel leasing” que permite al operador de una central poner el riesgo y costos asociado al combustible nuclear, incluyendo su disposición final, bajo la responsabilidad de un tercero. Esto minimiza los requisitos regulatorios previos a la instalación, que generalmente son muy engorrosos. Esta opción, combinada con las nuevas tecnologías de alto nivel de seguridad, como por ejemplo el “tristructural isotropic fuel”, y los menores tamaños de las unidades (de 50 MW o menos), vuelven a la energía nuclear una opción a considerar en el largo plazo. [35]

Un posterior estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en 2017, con el apoyo del Banco Mundial y el Fondo Fiduciario de Crecimiento Verde de Corea, para aportar en los insumos de “construcción de políticas públicas en el contexto de la Misión de Crecimiento Verde, liderada por el DNP”, aborda los temas relacionados con la oferta de energía enfocándose en fuentes no convencionales de energía renovables (FNCE), entre las cuales la opción nuclear se encuentra incluida, de acuerdo con lo estipulado por la Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, y que menciona en su

Artículo 5.º Definiciones. Numeral 16. *Fuentes no convencionales de energía (FNCE)*. Son aquellos recursos de energía disponibles a nivel mundial que son ambiental-

mente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCE la energía nuclear o atómica y las FNCE. Otras fuentes podrán ser consideradas como FNCE según lo determine la UPME. [36]

Entre los desarrollos del mencionado estudio se encuentra la alianza estratégica constituida por la UPME, la Universidad del Valle, Instituto de Prospectiva, la Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación del Sector Energético Colombiano (Grisec) y la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, que a mediados del 2018 emitió el informe de propuesta para la conformación del Observatorio Colombiano de Energía (OCE), espacio de reflexión sobre el futuro energético de nuestra nación con una perspectiva a 2050 [37]. En ese informe, dada su naturaleza prospectiva, se identifican como viables las siguientes tendencias de alto impacto:

- » Aceleración de la urbanización
- » Crecimiento de las energías renovables
- » Uso de la energía en calentamiento y transporte
- » Mejoramiento de la eficiencia energética
- » Crecimiento de las tecnologías de energía limpia
- » Compromisos de los países por disminuir emisión de gases efecto invernadero (GEI) [37]

Asimismo, se consideran estas tendencias de bajo impacto:

Generación de electricidad a partir de energía nuclear
Incremento de la demanda de GLP (gas licuado de petróleo) para hogares y zonas rurales [37]

La prospectiva energética, como elemento clave de la “seguridad energética”, es una de las temáticas estratégicas en que el SGC se debe involucrar con otros actores (UPME, ISA, MinEnergía, Isagén, Acolgén, DNP, grupos de investigación de MinCiencias, OIEA, OCDE, IEA, centros académicos y del pensamiento, observatorios, etc.), para contribuir desde sus competencias al avance del conocimiento, insumo básico para la generación de políticas públicas de largo plazo que articulen la generación nucleoelectrica con los planes de diversificación de la canasta energética nacional.

3. CONCLUSIONES

El abordaje de los estudios prospectivos o de futuro en el Servicio Geológico Colombiano, en sus componentes geocientífica y nuclear, es una tarea pendiente de realizar, tanto por sus investigadores como por el estamento directivo de la entidad. Siendo notable la producción conceptual y práctica sobre la disciplina prospectiva, disponible en los diferentes repositorios virtuales de información, es necesario que la entidad forme y capacite a funcionarios y colaboradores en el manejo de las herramientas informáticas de la prospectiva y en las disponibles de forma gratuita en la web, por ejemplo, en <http://es.lapropective.fr/Metodos-de-prospectiva/Los-programas.html>.

Estos breves apuntes de prospectiva pretenden favorecer una cultura de la indagación, la autocrítica y el debate mediante la exposición y confrontación de ideas y argumentos técnicos, elementos básicos de los ejercicios prospectivos o de construcción de futuro, donde la elaboración de planes estratégicos con horizontes de tiempo de diez, veinte y treinta años se convierta en una buena práctica de gerencia pública que ilumine el desarrollo institucional a largo plazo.

Esto se traduce en el ejercicio de repensar la actual institucionalidad pública de ciencia y tecnología al amparo de los futuros deseables que se pretenden establecer para ella, visualizando como efecto neto la mejora objetiva de la calidad de vida de la población colombiana.

Agradecimientos

El autor agradece de forma especial a los integrantes de la Dirección Técnica de Asuntos Nucleares (DTAN) del Servicio Geológico Colombiano, quienes aportaron ideas que fortalecieron las bases conceptuales de construcción de este escrito.

Referencias

- [1] Sun Tzu, *El arte de la guerra*. 2015. FeedBooks/Electronic-book. Disponible en <http://cimcon.armada.mil.co/sites/default/files/El%20arte%20de%20la%20guerra.%20Sun%20Tzu.pdf>
- [2] G. Walta, "La literatura de anticipación". *Revista Telos, Fundación Telefónica* n.º 108. [En línea]. Disponible en <https://telos.fundaciontelefonica.com/wp-content/uploads/2017/11/telos-108-analisis-gabriel-h-walta.pdf>
- [3] J. Medina, S. Becerra y P. Castaño, *Prospectiva y política pública para el cambio estructural en América Latina y el Caribe*. Libros de la Cepal, n.º 129 (LC/G.2622-P). Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2014.
- [4] C. Mera, "Concepto, aplicación y modelo de prospectiva estratégica en la administración de las organizaciones". *Revista Estrategia Organizacional*, UNAD. [En línea]. Disponible en <http://academia.unad.edu.co/images/investigacion/hemeroteca/estrategiaorganizational/2012/Concepto,%20aplicaci%C3%B3n%20y%20modelo.pdf>
- [5] M. Bunge, *La investigación científica*, Barcelona: Siglo XXI Editores. 2004.
- [6] E. Morin, *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa. 2001.
- [7] E. Morin, *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. Bogotá: Cooperativa Editorial Magisterio. 2001.
- [8] A. Afuah, *La dinámica de la innovación organizacional*. México, D. F.: Oxford University Press. 1999.
- [9] M. Godet, *De la anticipación a la acción*. Barcelona: Marcombo. 1993.
- [10] E. Ortegón y J. Medina, *Prospectiva: construcción social del futuro*. Cali: Ilpes y Universidad del Valle. 1997.
- [11] S. Tooth, M. J. Smith, H. A. Viles y F. Parrott. *Perspectives on the contemporary art-geoscience interface*. Special volume, *Journal of Maps.*, vol. 15: 3. 2019. Disponible en <https://www.tandfonline.com/toc/tjom20/15/3?nav=toCList>
- [12] G. Baena, G. "Sobre futuros incompletos y esperanzas continuas... líneas para la historia de la prospectiva en México". *Selected Readings: Foresight experiences in European Union & Latin America*, under the 7th Framework Programme for Research and Technological Development Workshop. Flacso-México. 2008.
- [13] D. Galloway, "The complex future of hydrogeology". *Hydrogeology Journal*, 18, pp. 807-810. 2010. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Devin_Galloway/publication/225443668_The_complex_future_of_Hydrogeology/links/556f037008aefcb861dd4a87.pdf
- [14] OCDE, "Critical minerals today and in 2030: An analysis for OECD countries". París. 2015.
- [15] S. Schimpf, F. Sturm, V. Correa, B. Bodo y C. Kean, "The world of raw materials 2050: Scoping future dynamics in

- raw materials through scenarios”. *Energy Procedia*, vol. 125, pp. 6-13. 2017.
- [16] P. Bobrowsky, V. S. Cronin, G. di Capua, S. W. Kieffer y S. Peppoloni, “The emerging field of geoethics”. En *Scientific Integrity and Ethics with Applications to the Geosciences*, Special Publication American Geophysical Union, John Wiley and Sons, Inc. 2017.
- [17] Naciones Unidas, “Convención de Lucha contra la Desertificación. Informe de perspectiva global de la tierra”. 1ª. ed. Bonn. 2017. ISBN: 978-92-95110-52-6.
- [18] R. Menegat, R. C. Fontana, “Gigantic cities and the new challenge of an old science: Geoethics, geoeducation, and geoknowledge in Porto Alegre, Brazil”. En *Geoethics in Latin America*. The Latin American Studies Book Series. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. 2018. ISSN 2366-343X.
- [19] R. L. Terrington, S. Thorpe, H. Kessler, A. Bidarmaghz, R. Choudhary, M. Yuan y S. Bricker, “Making geology relevant for infrastructure and planning”. International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC): Driving data-informed decision-making. Cambridge, UK: British Geological Survey, University of Cambridge. pp. 403-409. <https://doi.org/10.1680/ic-sic.64669.403>
- [20] L. Cuervo y F. Guerrero, “Prospectiva en América Latina: aprendizajes para la práctica. Parte 2. Prospektiva urbana y local”. Santiago de Chile: Cepal. Serie Seminarios y Conferencias. 2018. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43722/S1701160_es.pdf?sequence=1
- [21] V. Rodríguez, “Seguridad energética: análisis y evaluación del caso de México”. México D. F.: Cepal, serie Estudios y Perspectivas. 2018. ISSN 1680-8800.
- [22] World Bank, Data Bank. [En línea]. Disponible en <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.NUCL.ZS?end=2015&start=1990&view=chart>
- [23] S. Buruchenko e I. Pioro, “Nuclear power as a basis for future electricity generation”. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESSS). IOP Conference. 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042002>
- [24] Gobierno Federal de México, *Informe del balance prospectivo energético nacional*. 2018. [En línea]. <https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>. México D. F.
- [25] B. W. Brook y J. A. C. Bradshaw, “Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation”. *Conservation Biology*, vol. 29, n.º 3, pp. 702-712. 2014. <https://doi.org/10.1111/cobi.12433>
- [26] OCDE y NEA, *Nuclear innovation 2050: An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future*. París. 2019
- [27] OECD y NEA. *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*. París. 2014.
- [28] International Atomic Energy Agency, *Advances in small modular reactor technology developments: A supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. Vienna. 2016. [En línea]. Disponible en https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2016.pdf
- [29] World Nuclear Association “Emerging nuclear energy countries: Report”. 2019. [En línea]. Disponible en <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx>
- [30] F. Morales y A. Márquez, “Situación actual de la energía nuclear en América: proyecciones de una realidad asimétrica”. *Cuadernos de Difusión/Prospektiva y Estrategia: Visión de Futuro para las Políticas Públicas*, n.º 9. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2014.
- [31] Organización Latinoamericana de Energía (Olae), *Panorama energético de América Latina y el Caribe, 2018*. Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe (Sielac). Quito. 2018. [En línea]. Disponible en <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0416b.pdf>
- [32] R. Robayo, G. A. Sahid, J. E. Villareal y V. Manrique, 2014. *Reflexiones del poder nuclear en el siglo XXI*. Bogotá: Universidad del Rosario. ISSN 2027-615X n.º 2. 2014. Disponible en https://www.urosario.edu.co/ODA/Archivos/doc_investigacion/Reflexiones-del-poder-nuclear-en-el-Siglo-XXI/
- [33] G. Parrado, D. Alonso, M. Peña y F. Mosos, “Aplicaciones del reactor nuclear colombiano de investigación IAN-R1”. *Revista Anales de Ingeniería*, n.º 932, Sociedad Colombiana de Ingenieros. 2015. ISSN 0120-0149. Disponible en https://issuu.com/ingsci/docs/revista_932
- [34] H. Rodríguez y F. González, *Plan de desarrollo para las fuentes no-convencionales de energía en Colombia (PD-*

- FNCE). Bogotá: Corpoema y UPME. 2010. Disponible en: <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/994/1/Vol%201%20Plan%20Desarrollo.pdf>
- [35]Unidad de Planeación Minero-Energética, *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario energético 2050*. Bogotá. 2015. Disponible en <https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Plan%20energetico%20Nacional%202050.pdf>
- [36]Departamento Nacional de Planeación, World Bank Group, Misión de Crecimiento Verde, EnerSinc y Korea Green Growth Partnership, *Energy demand situation in Colombia*. 2017. [En línea]. Disponible en <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Supply%20Situation%20vf.pdf>
- [37]Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, *Observatorio Colombiano de Energía: aproximación a las condiciones para su conformación*. Informes de Vigilancia Tecnológica, Convenio 005-2017 UPME-UNAL. Bogotá. 2018.
- [38]National Research Council. 2008. *Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12161>.
- [39]Hauptman A., Steinmüller K. Surprising Scenarios. Imagination as a Dimension of Foresight. In: Peperhove R., Steinmüller K., Dienel HL. (eds) *Envisioning Uncertain Futures*. Zukunft und Forschung. Springer VS, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-25074-4_4. 2019
- [40]International Atomic Energy Agency (2019). "Power Reactor Information System". [Internet]. Disponible en <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

La *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (IAN)* es una publicación científica seriada del Servicio Geológico Colombiano (SGC). La revista es una nueva versión de la Revista Nucleares del antiguo Instituto de Asuntos Nucleares, treinta años después de que apareciera su primer número en 1986.

La *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares* publica artículos científicos inéditos de investigación científica y tecnológica, de reflexión, de revisión, artículos cortos o reportes de caso sobre los usos pacíficos de la ciencia y de las tecnologías nucleares, así como de la investigación en reactores nucleares, aplicaciones radiactivas y nucleares, metrología de las radiaciones ionizantes, aplicaciones en neutrónica, irradiación de materiales, tópicos selectos en geocronología e isotopía, protección radiológica y en modelado, simulación y prospectiva.

Se admiten artículos en español o inglés de autores vinculados o no vinculados al Servicio Geológico Colombiano. Su periodicidad es anual y se publica de forma digital en la página web del Servicio Geológico Colombiano, e impresa, bajo la política de acceso abierto.

Se permite la reproducción total o parcial de los artículos publicados bajo el adecuado reconocimiento a la fuente y la indicación sobre cambios realizados o adaptaciones

Proceso de arbitraje

La revisión de los artículos estará sujeta a un estricto proceso de evaluación por dos pares nacionales o internacionales seleccionados por el Comité Editorial. De acuerdo con el resultado de la evaluación se decidirá su publicación o se sugerirán modificaciones. El Comité Editorial podrá rechazar, sugerir cambios o realizar modificaciones al estilo literario sin alterar el contenido científico. Los artículos aceptados para publicación serán revisados en su versión final por cada uno de los autores. La sola participación en las convocatorias de recepción de artículos no garantiza la publicación de los trabajos enviados.

Se verificará en primera instancia el cumplimiento de todos los criterios de presentación establecidos por la *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares* en las instrucciones a los autores. Posteriormente se iniciará el proceso de evaluación, el cual es completamente anónimo para evaluadores y autores. Superado el proceso de evaluación, en un plazo no mayor a tres semanas, los autores deberán atender las sugerencias y correcciones realizadas. En caso de que no incluyan una o varias sugerencias, deberán argumentar con detalle sus razones en una carta adicional. Si los dos evaluadores recomiendan rechazar el artículo, este no será publicado. Si las dos evaluaciones son completamente contrarias, se someterá el artículo a una tercera evaluación. Si se recomienda la publicación del artículo, pero realizando modificaciones y sujeta a una segunda evaluación, la nueva versión será enviada al evaluador asignado para su aprobación.

Los evaluadores deberán firmar un acuerdo de confidencialidad y una declaración de conflicto de intereses, si es el caso, para salvaguardar el adecuado uso de la información. Además, tanto evaluadores como autores deberán conocer y aceptar las normas internacionales de ética en investigación emitidas por el Committee on Publication Ethics con respecto al plagio y a la revisión por pares, normas a las que se acoge la revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares. Estas normas podrán ser consultadas en http://publicationethics.org/files/International%20standard_editors_for%20website_11_Nov_2011.pdf

Autoría

La autoría deberá corresponder a quienes hayan contribuido de forma activa y sustancial al contenido intelectual del artículo y al análisis o interpretación de los datos; por tanto, los autores estarán en condiciones de hacerse públicamente responsables del artículo enviado. La lista y orden de autores deben ser revisados antes de someter por primera vez el trabajo a publicar, pues después de sometido no se aceptan cambios de autoría. Los autores de un artículo aprobado para publicación cederán los derechos patrimoniales al Servicio Geológico Colombiano para su posterior divulgación, reproducción y distribución en los medios impresos y digitales que el Servicio Geológico Colombiano disponga, así como para su inclusión en bases de datos e índices nacionales o internacionales.

Instrucciones a los autores

Criterios de presentación

Todo artículo sometido a consideración debe cumplir con los siguientes criterios de presentación:

- » Se deben enviar por email a REVISTAIAN@sgc.gov.co en formato Word.
- » Su título, aportado en español e inglés, debe ser breve y reflejar la esencia de la investigación.
- » Se debe incluir la información de los autores e incluir el último título académico, la información completa de afiliación institucional de cada autor y el email del autor de correspondencia.
- » Se debe incluir el resumen y las palabras clave en español e inglés. Las imágenes se deben adjuntar como

archivos gráficos individuales, con una resolución mínima de 300 dpi.

- » Si se requieren agradecimientos, reconocimientos a entidades, permisos de publicación, etc., deberán incluirse al final del texto y antes de las referencias bibliográficas.
- » Las contribuciones no deben superar las 15 páginas.
- » El contenido de los artículos no debe haber sido publicado, total o parcialmente, en otra revista.
- » El texto cumple con los requisitos bibliográficos y de estilo indicados en las normas editoriales.

Normas editoriales

1. Tablas

Las tablas se deben presentar en formato editable, no como imágenes, y acompañadas de una leyenda explícita y la fuente. Todas las tablas deben estar referenciadas en el texto y deben ser esenciales para explicar o ampliar parte del argumento del artículo.

2. Figuras

Las figuras como diagramas, fotografías o mapas deben aportarse en archivos gráficos con una resolución mínima de 300 dpi. Cada figura debe ser citada en el texto y estar acompañada de una leyenda explicativa que incluya la fuente.

Las imágenes de fuentes distintas a los autores del artículo deben contar con la autorización del autor de la imagen original, o estar libres de conflictos de derechos de autor o tener licencia *Creative Commons* (consultar el siguiente enlace: <https://co.creativecommons.org>). Los mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélite deben incluir una escala gráfica.

3. Unidades, abreviaturas y símbolos

Se usará el Sistema internacional de Unidades (m, Kg, s, K), empleando sólo términos aceptados generalmente. Defina las abreviaciones y acrónimos en la primera vez que son usados en el texto, incluso si ellos han sido definidos en el resumen. No use abreviaciones en el título a menos que sea necesario.

4. Citas

El uso de referencias en el texto debe seguir estas normas según la IEEE.

Las referencias deben estar numeradas en el orden en que aparecen en el documento.

- » Una vez asignado un número a una referencia dada, el mismo número debe emplearse en todas las ocasiones en que ese documento sea citado en el texto.
- » Cada número de referencia debe estar entre corchetes [], por ejemplo “...el fin de la investigación [12]...”
- » No es necesario mencionar al autor en la referencia a menos que sea relevante en el texto.
- » En el cuerpo del documento tampoco se mencionará la fecha de publicación.
- » No es necesario incluir la palabra “referencia”, por ejemplo “...en la referencia [27]...”: basta con indicar “...en [27]...”
- » Para citar más de una fuente a la vez es preferible incluir cada una de ellas con su respectivo corchete, por ejemplo, “como indican varios estudios [1], [3], [5]...” en lugar de “como indican diversos estudios [1, 3, 5]...”

5. Citas textuales

Cuando la cita textual sea menor de cuarenta palabras se reproducirá dentro del párrafo, entre comillas y sin cursiva. Al final de la cita deberá aparecer su respectiva referenciación.

Cuando la cita textual supere las cuarenta palabras, se escribirá en párrafo aparte, con sangría izquierda de 2,5 cm, sin comillas y sin cursiva, y la tipografía de todo ese párrafo se dejará con un tamaño un punto menor que el texto normal. Al final de la cita deberá aparecer su respectiva referenciación.

6. Referencias bibliográficas

Hay que tener en cuenta que en la norma IEEE, de los nombres de pila de los autores solo se aporta la inicial. En caso de que se anoten los dos apellidos, no deben separarse por guion. Las referencias bibliográficas deben ir a espacio sencillo y sin sangría. Si los documentos cuentan con Doi, este dato se debe incluir al final de la referencia.

» *Libros*

Iniciales y Apellido del autor, Título del libro en cursiva. Edición. Lugar de publicación: Editorial, Año de publicación.

Ejemplos:

[1] W. K. Chen, *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth Press, 2003.

[2] R. Hayes, G. Pisano y S. Wheelwright, *Operations, Strategy, and Technical Knowledge*. Hoboken, NJ: Wiley, 2007.

[3] J. A. Prufrock, Ed., *Lasers*, 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

» *Artículo de revista*

Iniciales y Apellido del autor, “Título del artículo entre comillas”, Título abreviado de la revista en cursiva, volumen (abreviado vol.), número abreviado (no.) páginas (abreviado pp.), Mes Año.

Ejemplos:

[4] K. A. Nelson, R. J. Davis, D. R. Lutz y W. Smith, “Optical generation of tunable ultrasonic waves,” *Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 2, Feb., pp. 1144-1149, 2002.

[5] S.-Y. Chung, “Multi-level dirty paper coding,” *IEEE Communication Letters*, vol. 12, no. 6, pp. 456-458, June 2008.

Nota: Para referenciar artículos que aún no han sido aceptados para publicación, se empleará la frase “submitted for publication” en lugar de la fecha. Si han sido aceptados, pero aún no aparecen publicados, usar “to be published” en lugar de la fecha.

» *Artículos publicados en conferencias*

Iniciales y Apellidos del autor, “Título del artículo de conferencia” in Nombre completo de la conferencia, Ciudad de la conferencia, Estado de la conferencia abreviado (si corresponde), año, páginas (abreviado pp.)

Ejemplos:

[6] J. Smith, R. Jones y K. Trello, “Adaptive filtering in data communications with self improved error reference,” In Proc. IEEE International Conference on Wireless Communications '04, 2004, pp. 65-68.

[7] G. Caire, D. Burshtein y S. Shamai (Shitz), “LDPC coding for interference mitigation at the transmitter,” in Proceedings of the 40th Annual Allerton Conference in Communications, Control, and Computing, Monticello, IL, pp. 217-226, October 2002.

Nota: La palabra “in” antes del título de la conferencia no ha pone en cursiva.

» **Artículo presentado en conferencia sin publicar**

Iniciales y Apellido del autor, “Título del artículo de conferencia”, presented at the Título completo de la conferencia, Ciudad de la Conferencia, Estado abreviado, Año.

Ejemplo:

[8] H. A. Nimr, “Defuzzification of the outputs of fuzzy controllers”, presented at 5th International Conference on Fuzzy Systems, Cairo, Egypt, 1996.

» **Informes técnicos (informes, documentos internos, memoranda)**

Iniciales y Apellido del autor, “Título del informe”, Nombre de la empresa, Sede la empresa, Tipo de informe abreviado, Número de informe, Fecha de publicación.

Ejemplo:

[9] N. Asokan, V. Shoup y M. Waidner, “Optimistic fair exchange of digital signatures,” IBM: Zurich, Switzerland, Rep. RZ 2973, 1997.

» **Tesis de máster o tesis doctoral**

Iniciales y Apellido del autor, “Título de la tesis o proyecto”, Clase de documento (tesis doctoral, trabajo fin de máster, etc.), Departamento, Institución académica (abreviada), Ciudad, Estado abreviado, Año.

Ejemplo:

[10] H. Zhang, “Delay-insensitive networks,” M.S. thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canadá, 1997.

[11] J.-C. Wu, “Rate-distortion analysis and digital transmission of nonstationary images”. Ph.D. dissertation, Rutgers, the State University of New Jersey, Piscataway, NJ, USA, 1998.

[12] E.A. Sloat, “Case Studies of Technical Report Writing Development Among Student Engineers,” Ph.D. dissertation, McGill University, Montréal, QC, 1994. Available: ProQuest Dissertations and Theses,

» **Comunicaciones privadas**

Iniciales y Apellido de la persona con la que se mantiene la comunicación (private communication), Año.

Ejemplo:

[13] T. I. Wein (private communication), 1997.

» **De internet**

Iniciales y Apellido del autor (año, mes y día). Título (edición) [Tipo de medio, generalmente Online]. Available: Url

Ejemplo:

[14] Structural Engineering Society–International.[Online]. Available: <http://www.seaint.org>

NOTA: los recursos en internet pueden presentar una tipología muy variada (revistas, monografías, sitios web de entidades, bases de datos, etc.) En general, se citan como el documento impreso del tipo al que pertenecen añadiendo la indicación [Online] u otro tipo de medio por el que se transmitan, y el DOI (Digital Object Identifier) o url.

» **Catálogos**

Catalog No. Código del catálogo, Nombre del producto, Empresa, Ciudad, Estado (abreviado)

Ejemplo:

[15] Catalog No. NWM-1, Microwave Components, M. W. Microwave Corp., Brooklyn, NY.

Enlaces sugeridos

- » Escribir un buen artículo científico: <https://revistas.uam.es/index.php/reice/article/viewFile/7965/8220>
- » Palabras clave en geociencias: <https://www.american-geosciences.org/georef/georef-thesaurus-lists>
- » IEEE Author Center: <http://ieeauthorcenter.ieee.org/>
- » Creative Commons: <https://co.creativecommons.org/>

“El hecho de que la *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, sucesora de la *Revista Nucleares* del Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, publique este tercer número en consonancia con las políticas de ciencia y tecnología del Servicio Geológico Colombiano y con el reconocimiento de Colciencias de nuestro grupo de investigación, nos permite afianzarnos y proyectarnos aún más hacia la investigación en las ciencias nucleares ”

- 3** Editorial
Hernán Olaya Dávila
- 5** Resultados e interpretación al aplicar la técnica de matriz de riesgo en braquiterapia
Diana Carolina Herrera, Mauricio Arciniegas Álvarez y José Alberto Gómez
- 12** Aplicación de protocolos de control de calidad en equipos de fluoroscopia en las ciudades de Tunja (Boyacá) y Bogotá
Mercy Natalia González Sánchez y Hernán Olaya Dávila
- 28** Simulación de la reacción de captura neutrónica por gadolinio por medio de GEANT4
Diego Alexander Téllez, Robinson Steven Medina, José A. Sarta, Edwin Munévar y José Alfonso Leyva
- 36** Temperature and heat flux calculations for the maximum power channel of the TRIGA IAN-R1 research reactor
José Antonio Sarta y Luis Álvaro Castiblanco
- 40** Desempeño satisfactorio de la Planta de Irradiación Gamma en el ensayo de aptitud, programa INTERLAB N-DO-02
Jormagn Israel Abril Murillo, Giovanni Andrés Vela Guzmán y Azarías de Jesús Moreno Machado
- 49** Una aproximación a la implementación de los estudios de futuro en el Servicio Geológico Colombiano
Guillermo Parrado Lozano
- 69** Política Editorial