



UNIVERSIDAD SANTANDER
Facultad de Ciencias de la salud
Licenciatura en Radiología e Imágenes Diagnósticas

**DOSIS DE RADIACIÓN EN NEUROCIRUGIAS DE FUSIÓN CERVICAL
ANTERIOR CON USO DE ARCO EN C**

Trabajo de grado para optar por el título de licenciatura en Radiología e
Imágenes Diagnósticas

AUTORES:

Henry Low
Anthony Marrugo
Valerie Verbel

Director del trabajo:

Juan de Dios Márquez

Asesor metodológico:

Margot Carrillo

Panamá, 13 de Enero de 2026

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestros padres, quienes con su apoyo incondicional y sacrificio, han establecido los cimientos sobre los cuales hoy levantamos este logro. A lo largo de nuestras vidas nos han motivado a seguir adelante y gracias a eso hemos podido adquirir la perseverancia necesaria para la culminación esta etapa.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecemos a Dios, por ser nuestro guía y fortaleza a lo largo de este proceso, por cedernos la sabiduría, la constancia y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa crucial de nuestra formación académica.

Nos gustaría expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros profesores, por su orientación, apoyo y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo, así como por su compromiso y dedicación académica, fundamentales para la correcta realización de esta investigación.

Agradecemos de manera especial al equipo de Brain and Spine Specialists, por su disposición, colaboración y conocimientos compartidos, los cuales contribuyeron significativamente al desarrollo de este estudio.

Asimismo, agradecemos al Hospital Pacífica Salud, por brindar el espacio y el apoyo necesario para la ejecución de este trabajo de investigación.

Finalmente, agradecemos profundamente a nuestros padres y familiares, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de nuestra formación académica, siendo un pilar fundamental para alcanzar este logro.

RESUMEN

La fluoroscopia con arco en C es fundamental en las neurocirugías de fusión cervical anterior, ya que proporciona visualización intraoperatoria en tiempo real y mayor precisión quirúrgica. No obstante, su uso implica la exposición del personal de salud a radiación ionizante, un riesgo ocupacional que demanda ser evaluado y controlado mediante estrategias de protección radiológica y vigilancia dosimétrica. El objetivo general de la presente investigación fue determinar la dosis de radiación ocupacional recibida por el personal de salud que participa en procedimientos de neurocirugía de fusión cervical anterior con uso de arco en C, considerando la localización anatómica expuesta y el tipo de profesional involucrado. La metodología empleada correspondió a un estudio descriptivo, observacional y de corte longitudinal, realizado durante un período de tres meses. La población estuvo conformada por médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial. Para la medición de la dosis se utilizaron dosímetros de luminiscencia ópticamente estimulada (OSL), colocados tanto debajo como fuera del chaleco plomado, así como dosímetros de anillo para la evaluación de la exposición en extremidades. Las dosis registradas se expresaron en términos de Hp(10), Hp(3) y Hp(0.07), según la región anatómica evaluada. Los resultados evidenciaron que las mayores dosis de radiación se registraron en el personal con mayor proximidad al campo de radiación, particularmente en los médicos cirujanos y en el operador del arco en C, siendo las extremidades superiores y la región ocular las zonas más expuestas. Asimismo, se observó una atenuación significativa de la dosis efectiva en los dosímetros ubicados debajo del chaleco plomado, lo que resalta la importancia del uso adecuado de los elementos de protección radiológica. En conclusión, el estudio pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la cultura de seguridad radiológica, optimizar las prácticas fluoroscópicas y reforzar la vigilancia dosimétrica ocupacional en este tipo de procedimientos.

Palabras clave: Radiación ionizante; Arco en C; Neurocirugía; Dosimetría ocupacional; Protección radiológica.

ABSTRACT

C-arm fluoroscopy is essential in anterior cervical fusion neurosurgeries, providing real-time intraoperative visualization and enhanced surgical precision. However, its use exposes healthcare personnel to ionizing radiation, an occupational risk that requires evaluation and control through radiological protection strategies and dosimetric surveillance. The general objective of this research was to determine the occupational radiation dose received by healthcare personnel participating in anterior cervical fusion neurosurgery procedures using C-arm fluoroscopy, considering exposed anatomical locations and the type of professional involved. The methodology employed was a descriptive, observational, longitudinal study conducted over a three-month period. The population consisted of neurosurgeons, radiologists, and support staff. Dose measurements utilized optically stimulated luminescence (OSL) dosimeters placed both beneath and outside lead aprons, as well as ring dosimeters to assess extremity exposure. Recorded doses were expressed in terms of Hp (10), Hp (3), and Hp (0.07), according to the evaluated anatomical region. Results evidenced that the highest radiation doses were recorded among personnel with greatest proximity to the radiation field, particularly neurosurgeons and the C-arm operator, with upper extremities and ocular region being the most exposed areas. Additionally, significant effective dose attenuation was observed in dosimeters located beneath lead aprons, highlighting the importance of proper use of radiological protection equipment. In conclusion, the study demonstrates the need to strengthen radiological safety culture, optimize fluoroscopic practices, and reinforce occupational dosimetric surveillance in these procedures.

Keywords: Ionizing radiation; C-arm; Neurosurgery; Occupational dosimetry; Radiological protection.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Introducción.....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Descripción del problema de investigación	2
1.1.1. Planteamiento del problema o pregunta de investigación.....	4
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivo específicos	6
1.4. Delimitación de la línea y Sublínea de investigación.....	6
1.5. Hipótesis	7
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	8
2. Marco Teórico	8
2.1. Marco Histórico	8
2.2. Marco Referencial	10
Fundamentos teóricos de la protección radiológica	24
2.3 Marco Legal	30
2.4. Marco contextual.....	33
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.....	35
3. Marco metodológico.....	35
3.1. Tipo y diseño de investigación	35
3.2. Unidades de análisis	36
3.2.1. Población	36
3.2.2. Muestra	36
3.2.3 Criterios de Inclusión y Exclusión.....	37

3.3. Variables.....	37
3.3.1 Definición Conceptual	37
3.3.2 Definición Operacionalización	39
3.4. Consideraciones éticas	40
3.5. Métodos para la recolección de los datos	40
3.5.1. Delimitación del o los instrumentos.....	40
3.5.2. Validez o confiabilidad del o los instrumentos.....	42
3.6. Procedimiento	43
CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	45
4. RESULTADOS.....	45
4.1. Presentación de los resultados	45
4.1.1 Dosis total de radiación acumulada durante el periodo de estudio	46
4.1.2 Reporte mensual de dosis-OUT.....	47
4.1.3 Reporte mensual de dosis-IN.....	49
4.1.4 Reporte mensual de dosímetros de anillo	51
4.1.5 Representación gráfica de la dosis registrada mediante dosímetro OUT .	52
4.1.6 Dosis de radiación en función del procedimiento neuroquirúrgico de fusión cervical	54
4.1.7 Distribución del personal y exposición ocupacional según rol profesional	57
4.2. Discusión de los resultados	58
4.2.1 Discusión de la dosis absorbida en tejidos específicos según rol profesional tipo de dosímetro.....	58
4.2.2 Dosis de radiación en función del procedimiento neuroquirurgico de fusión cervical	60
4.2.3 Diferencias en la exposición ocupacional según el rol profesional.....	61
Conclusiones.....	63
Recomendaciones.....	65
Referencias bibliográficas	67
Anexos	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables	39
Tabla 2 Dosis total de radiación acumulada durante el periodo de estudio	46
Tabla 3 Registro mensual de dosis- dosímetro OUT (agosto).....	48
Tabla 4 Registro mensual de dosis- dosímetro OUT (septiembre).....	48
Tabla 5 Registro mensual de dosis- dosímetro OUT (octubre)	49
Tabla 6 Registro mensual de dosis- dosímetro IN (agosto)	50
Tabla 7 Registro mensual de dosis- dosímetro IN (septiembre).....	50
Tabla 8 Registro mensual de dosis- dosímetro IN (octubre)	51
Tabla 9 Registro mensual, dosímetro de anillo- agosto	52
Tabla 10 Registro mensual, dosímetro de anillo- septiembre	52
Tabla 11 Registro mensual, dosímetro de anillo- octubre	52
Tabla 12 Características técnicas de los procedimientos neuroquirurgicos de fusión cervical anterior realizados durante el periodo de estudio	55
Tabla 12A Parámetros técnicos promedio (media aritmética) según tipo de procedimiento	56

ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica de dosis recibida mediante dosímetro OUT en agosto.....	53
Figura 2. Representación gráfica de dosis recibida mediante dosímetro OUT en septiembre.....	53
Figura 3. Representación gráfica de dosis recibida mediante dosímetro OUT en octubre.....	54
Figura 4. Distribución del personal quirúrgico y dosis total registrada durante procedimientos de fusión cervical anterior con uso de arco en C.....	57

INTRODUCCIÓN

El empleo de radiación ionizante en medicina ha crecido notablemente gracias a los avances tecnológicos y la demanda de procedimientos diagnósticos y terapéuticos más precisos. En particular, la fluoroscopia con arco en C se ha convertido en una herramienta indispensable en las neurocirugías de fusión cervical anterior, al permitir visualización intraoperatoria en tiempo real que facilita la colocación precisa de prótesis y eleva tanto la seguridad como la eficacia del procedimiento.

Sin embargo, el uso del arco en C expone al personal de salud a radiación ionizante durante estos procedimientos. Esta exposición depende de varios factores: la duración y frecuencia de la fluoroscopia, la distancia al campo de radiación, la posición del profesional en el quirófano y el correcto uso de equipos de protección radiológica. Aunque las dosis sean bajas y crónicas, pueden generar efectos biológicos estocásticos, lo que subraya la necesidad de monitorear y controlar la dosis recibida por el personal ocupacionalmente expuesto.

Múltiples estudios han demostrado que los médicos cirujanos, el operador del arco en C y quienes están más cerca del paciente acumulan las dosis más altas, especialmente en extremidades superiores, tiroides y cristalino ocular. En este escenario, la vigilancia dosimétrica y la aplicación rigurosa de principios de protección radiológica, como la optimización y el principio ALARA son cruciales para mitigar estos riesgos.

Por lo tanto, esta investigación analiza la dosis de radiación ocupacional que recibe el personal de salud en neurocirugías de fusión cervical anterior con arco en C, generando evidencia para fortalecer la cultura de seguridad radiológica, optimizar las prácticas fluoroscópicas intraoperatorias y proteger mejor al equipo quirúrgico.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema de investigación

El uso del arco en C es crucial para numerosos procedimientos de columna, esto se debe a su capacidad para proporcionar imágenes fluoroscópicas en tiempo real, lo que mejora la precisión quirúrgica y optimiza los resultados del procedimiento. En años recientes, los procedimientos de columna mínimamente invasivos han ganado popularidad, y diversos estudios han destacado que estas técnicas pueden implicar una mayor exposición a la radiación. Un artículo publicado en *PubMed (2014)* destaca que los procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos a menudo requieren un uso significativamente mayor de fluoroscopia, lo que aumenta el riesgo de exposición a la radiación para el personal.

Sin duda, la exposición prolongada a la radiación ionizante en el quirófano, sin las medidas de protección adecuadas, puede generar efectos estocásticos y determinísticos en la salud, aumentando el riesgo de desarrollar enfermedades oncológicas y otras afecciones a largo plazo. Los efectos estocásticos son aquellos que ocurren de manera probabilística, es decir, su aparición no es inmediata, pero el riesgo aumenta con la dosis recibida, como en el caso del cáncer inducido por radiación. En cambio, los efectos determinísticos tienen un umbral de dosis, por encima del cual se producen daños celulares evidentes, como quemaduras en la piel, cataratas o daño medular.

Un estudio realizado evidenció que la exposición acumulada a la radiación ionizante está directamente relacionada con un mayor riesgo de cáncer y otros problemas de salud en el personal médico expuesto de manera continua (Organización Mundial de la Salud, 2023; EPA, 2024).

Por otra parte, las dosis de radiación no se distribuyen de manera equitativa entre los profesionales expuestos, lo que resalta la necesidad de evaluar qué grupos dentro del equipo quirúrgico están recibiendo mayores niveles de radiación y cuáles son las estrategias para reducir el riesgo. Una investigación publicada por *The Journal of Neurosurgery* (2021) ha demostrado que los neurocirujanos son particularmente vulnerables a los riesgos de exposición por radiación debido al uso frecuente de la fluoroscopia en las cirugías de columna. Según el artículo la protección radiológica sigue siendo inadecuada en muchos quirófanos y si bien se dispone de barreras protectoras y dosímetros personales, su implementación suele ser inconsistente.

Estudios realizados en hospitales de Estados Unidos, Europa y Asia, han demostrado que, si no se aplican las medidas de protección adecuadas como el uso de delantales plomados, protectores tiroideos, gafas plomadas, colimación del haz y distancia adecuada, las dosis recibidas por el personal pueden superar los valores recomendados, incrementando el riesgo de desarrollar efectos estocásticos y determinísticos a largo plazo (Kouyoumdjian et al., 2018; Ono et al., 2022; Mahajan et al., 2015).

En Latinoamérica, encuestas realizadas a 371 cirujanos de columna revelan que el 75,7 % usa dosímetros rara vez o nunca, solo el 20 % emplea gafas de protección y los hábitos de fluoroscopia varían por país, demostrando la necesidad de programas educativos y prácticas de seguridad (Falavigna et al., 2018).

En Panamá, la disponibilidad de estudios que evalúen la exposición ocupacional del personal durante procedimientos de columna vertebral es limitada. No se han encontrado investigaciones publicadas que cuantifiquen las dosis de radiación recibidas durante neurocirugías de fusión cervical anterior, dejando un vacío en el conocimiento local respecto a los riesgos a los que se enfrenta el equipo quirúrgico en este tipo de intervenciones.

En el entorno hospitalario donde se desarrollará este estudio, el uso rutinario del arco en C durante procedimientos de fusión cervical anterior no cuenta con un control dosimétrico documentado. Esta situación se debe a la ausencia de una monitorización continua, formación limitada en la aplicación de los principios ALARA, falta de actualización en protocolos de seguridad radiológica y una cultura de protección radiológica poco consolidada entre el personal involucrado.

Las posibles consecuencias de esta situación son graves: a corto plazo, el incumplimiento de límites normativos (20 mSv/año cuerpo) y, a mediano o largo plazo, el riesgo de desarrollo de patologías como cataratas o cáncer.

Ante esta situación, el presente estudio cobra importancia al enfocarse en la cuantificación de las dosis efectivas y equivalentes recibidas por el personal quirúrgico mediante el uso de dosímetros personales durante neurocirugías de fusión cervical anterior. De esta manera, se podrá generar información valiosa sobre una práctica ampliamente utilizada a nivel global y regional, pero poco estudiada investigada localmente, contribuyendo con evidencia fundamental para optimizar las medidas de protección radiológica dentro del quirófano.

1.1.1. Planteamiento del problema o pregunta de investigación

Ante esta situación, la presente investigación busca responder a la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las dosis de radiación promedio recibidas por los médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial durante neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C.?

1.2. Justificación

La elección de este tema responde al interés de comprender con mayor profundidad la exposición a radiación ionizante que recibe el personal de salud durante las neurocirugías de fusión cervical anterior asistidas con arco en C. A pesar de que este tipo de procedimiento se ha vuelto rutinario en muchas instituciones hospitalarias, persiste un vacío significativo en la evaluación precisa de las dosis recibidas por el equipo quirúrgico, especialmente en nuestra región.

Los riesgos asociados a la exposición prolongada, aunque sean dosis bajas, incluyen efectos estocásticos como el aumento del riesgo de cáncer, cataratas o alteraciones genéticas, y efectos determinísticos si las dosis superan ciertos umbrales en zonas corporales sensibles. Esta situación demanda una investigación detallada y actualizada para medir los niveles reales de exposición y evaluar la efectividad de las medidas de protección actualmente implementadas.

En este contexto, este estudio no busca solo cuantificar la dosis de radiación recibida por el equipo quirúrgico, sino también optimizar el uso del arco en C, fortalecer la capacitación en prácticas seguras y crear conciencia sobre la importancia de minimizar estos riesgos acumulativos mediante la mejora de los protocolos de protección radiológica. Los hallazgos permitirán sugerir ajustes en los protocolos de seguridad ocupacional y aplicar las recomendaciones no solo en neurocirugías, sino también a otras especialidades en donde se emplea el uso de fluoroscopia.

Desde una perspectiva académica y científica, esta investigación enriquece el conocimiento en el área de dosimetría ocupacional aplicada a procedimientos neuroquirúrgicos, aportando datos clave para estudios futuros centrados en los efectos biológicos de la radiación ionizante en el personal de salud. A nivel institucional, contribuirá a fortalecer los programas de seguridad y salud ocupacional; en lo profesional y personal, representa un compromiso con el bienestar de médicos

cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial que enfrentan diariamente riesgos invisibles pero significativos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Conocer la dosis de radiación recibida por los diferentes profesionales (cirujanos, radiólogos y personal asistencial) durante neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la dosis de radiación recibida en tejidos específicos, como la tiroides, el cristalino del ojo y las extremidades, identificando las zonas del cuerpo más expuestas en cada uno de los profesionales evaluados, considerando el uso de equipos de protección radiológica.
- Definir la dosis de radiación en función al procedimiento neuroquirúrgico de fusión cervical.
- Analizar las diferencias en la exposición a la radiación entre médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial.

1.4. Delimitación de la línea y Sublínea de investigación

Línea de investigación: Radiología e Imagenología

Esta línea explora el uso de tecnologías de imagen en entornos quirúrgicos complejos, centrándose en procedimientos guiados por fluoroscopia como las neurocirugías con arco en C. Busca evaluar la exposición a radiación ionizante, optimizar protocolos para mantener la calidad diagnóstica y proteger al personal médico, generando evidencia que mejore las prácticas radiológicas al equilibrar riesgos y medidas de mitigación.

Sublínea: Protección radiológica

La sublínea de protección radiológica se centra en la evaluación, implementación y mejora de medidas para minimizar la exposición a radiación ionizante; Abarcando el cumplimiento de normativas globales, innovación en prácticas seguras, monitoreo de dosis, uso eficiente de equipos radiológicos y capacitación continua para quienes están expuestos.

1.5. Hipótesis

Hipótesis positiva (H_1):

La dosis de radiación recibida por el equipo quirúrgico durante las neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C se mantienen dentro de los límites establecidos por la normativa nacional e internacional.

Hipótesis nula (H_0):

La dosis de radiación recibida por el equipo quirúrgico durante las neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C excede los límites establecidos por la normativa vigente.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2. Marco Teórico

2.1. Marco Histórico

La incorporación de tecnologías avanzadas ha revolucionado la neurocirugía, mejorando la precisión y seguridad de los procedimientos complejos y mínimamente invasivos. En particular, el arco en C, un sistema de fluoroscopia intraoperatoria, se ha vuelto indispensable para guiar la colocación de prótesis y garantizar la ubicación correcta en cirugías de columna cervical.

De acuerdo con esta perspectiva, el desarrollo de técnicas de imagen en tiempo real ha renovado la práctica quirúrgica, proporcionando una visualización sin precedentes del campo operatorio. Esta evolución ha impulsado la necesidad de examinar y reducir los riesgos derivados de la exposición a la radiación. Tal es el caso de la investigación de Watanabe et al. (2024), titulada "*Investigation of Radiation Exposure of Medical Staff During Lateral Fluoroscopy for Posterior Spinal Fusion Surgery*", de tipo exploratorio y descriptivo. En este estudio, se evaluó al personal médico involucrado en cirugías de fusión espinal posterior, incluyendo cirujanos, enfermeros y técnicos en radiología en un hospital japonés. La muestra consistió en mediciones de exposición a radiación en distintos puestos del equipo quirúrgico durante procedimientos de columna.

El propósito principal del estudio fue crear un mapa de distribución de dosis de radiación aérea en diversas posiciones alrededor del paciente durante procedimientos de fusión espinal posterior. Entre sus objetivos específicos destacaron medir los niveles de exposición en diferentes áreas del quirófano, evaluar la dosis absorbida por cada profesional, y analizar como la ubicación influye en la cantidad de radiación recibida, para identificar riesgos y promover medidas de protección efectivas.

Los resultados mostraron que el cirujano principal enfrenta los niveles más altos de radiación, especialmente cuando el arco en C se encuentra en posición lateral, seguido por enfermeros de aseo y técnicos. Se generó un mapa útil de zonas de riesgo en el quirófano, que fomenta acciones preventivas y subraya la necesidad de entender las características de la radiación para mejorar la seguridad ocupacional.

Este trabajo conecta directamente con la presente investigación, ya que ambos evalúan la exposición a radiación en procedimientos con fluoroscopia y buscan prácticas seguras para el personal de salud. Sus datos sobre variaciones por posición refuerzan la importancia de capacitar en manejo de radiación y optimizar la distribución del equipo, ayudándonos a diseñar recomendaciones prácticas que reduzcan riesgos y protejan la salud de los profesionales en el quirófano.

Un segundo trabajo publicado en *The Journal of Neurosurgery* por Godzik et al. (2020) titulado "*Surgeon and staff radiation exposure in minimally invasive spinal surgery: prospective series using a personal dosimeter*", una investigación prospectiva aplicada a personal involucrado en cirugías mínimamente invasivas de columna, incluyendo cirujanos, asistentes, y enfermeros. En dicho estudio, se recolectaron datos durante seis meses mediante dosímetros personales que registraron en tiempo real la exposición del personal durante técnicas como LLIF (Fusión intersomática lumbar lateral) y MI-TLIF (Fusión intersomática lumbar transforaminal mínimamente invasiva).

El objetivo principal fue evaluar la viabilidad del monitoreo en tiempo real de la exposición radiológica en el equipo quirúrgico. Se cuantificó la exposición según el rol desempeñado, encontrando que los cirujanos y asistentes registraron niveles significativamente más altos que el personal de enfermería, y que la exposición aumentaba con la edad del paciente. Esto demostró que este monitoreo es práctico, acelera la evaluación y promueve cambios para mayor seguridad.

Este estudio refuerza la utilidad de dosímetros personales en procedimientos con fluoroscopia, como las fusiones cervicales de nuestra investigación. Destaca

cómo el monitoreo inmediato fomenta conciencia y prácticas más seguras, ayudándonos a optimizar protocolos y reducir riesgos a largo plazo para cirujanos, radiólogos y asistentes en quirófanos.

2.2. Marco Referencial

Origen y evolución de los rayos X

El descubrimiento de los rayos X fue un hito revolucionario tanto para la medicina y la física. El 8 de noviembre de 1895, el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen estaba trabajando en su laboratorio de la Universidad de Würzburg, experimentaba con tubos de rayos catódicos cuando una pantalla de platino-cianuro de bario brilló con luz verdosa a distancia, incluso protegida de la luz visible, lo que reveló una nueva radiación capaz de atravesar objetos sólidos como libros, madera y tejidos humanos (Assmus, 1995).

Röntgen llamó a esta radiación “rayos X” por su carácter desconocido y, tras semanas de pruebas secretas, capturó la primera radiografía: la mano de su esposa Anna Bertha con su anillo de bodas visible el 22 de diciembre de 1895, generando asombro mundial (Martins, 2024). Días después, presentó sus hallazgos en la Sociedad Físico-Médica de Würzburg con el artículo *Über eine neue Art von Strahlen* (“Sobre una nueva clase de rayos”). Como resultado de esta publicación, numerosos científicos replicaron sus resultados y comenzaron a emplear esta tecnología emergente en el ámbito clínico.

En 1901, Röntgen recibió el primer Premio Nobel de Física, pero rechazó patentarlo para que permaneciera como patrimonio universal. A partir de ese momento, el uso de los rayos X se expandió, constituyendo una herramienta esencial para la observación interna del cuerpo humano sin necesidad de intervenciones invasivas, y dando lugar al nacimiento de la radiología diagnóstica (Busch., 2016).

Descubrimiento de la radioactividad: Becquerel y los Curie

En 1896, un año después del descubrimiento de los rayos X, Henri Becquerel hizo un hallazgo accidental mientras estudiaba la relación entre la fluorescencia de ciertos materiales y la emisión de rayos X. Utilizó sales de uranio sobre placas fotográficas cubiertas con papel negro, esperando que la fluorescencia inducida por la luz solar dejara una imagen visible en las placas. Pero durante días nublados, al guardar todo en un cajón, las placas aparecieron veladas sin exposición solar directa, lo que le llevó a concluir que el uranio emitía espontáneamente una energía invisible capaz de atravesar el papel y afectar la emulsión, una radiación constante e independiente de estímulos externos (Henri Becquerel, 2023).

Este descubrimiento rompió con las nociones establecidas sobre la emisión de energía y marcó el nacimiento de la radioactividad como disciplina, término introducido poco después por Marie Curie. El descubrimiento de Becquerel también sentó las bases para el desarrollo posterior de la física nuclear y de las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes.

En 1898, Marie y su esposo Pierre Curie, aislaron dos nuevos elementos radiactivos, el polonio, nombrado así en homenaje a Polonia, patria de Marie Curie y el radio, ambos extraídos de grandes cantidades de pechblenda. En reconocimiento a sus aportes, Becquerel recibió el Premio Nobel de Física en 1903, compartido con Marie y Pierre Curie (Badash, 2025). Destacando que Marie Curie fue la primera mujer en recibir un premio Nobel, y pese a ello, enfrentó el desprecio de varios sectores académicos franceses que no aceptaban su protagonismo científico como extranjera y mujer.

Partiendo del hallazgo de Becquerel en 1896 sobre la emisión espontánea de energía del uranio, Marie Curie y su esposo Pierre iniciaron una investigación sistemática de sustancias radiactivas. Marie Curie propuso el término “radioactividad”

para describir este fenómeno, al observar que elementos como el uranio, liberaban energía sin necesidad de estímulos externos (Rincón Educativo, 2024).

Marie Curie, nacida como María Salomea Skłodowska el 7 de noviembre de 1867 en Varsovia, Polonia, enfrentó desde joven barreras sociales, económicas y de género. Al estar excluida del sistema universitario polaco por ser mujer, se formó en la universidad clandestina “Universidad Volante” de Varsovia, forjando una base científica sólida (Muñoz Páez, 2013). En 1891 emigró a París, ingresó a la Universidad de la Sorbona, y obtuvo títulos en física y matemáticas, destacando en un entorno hostil y predominantemente masculino, donde conocía a Pierre Curie, formando una alianza científica y personal que transformaría la historia científica.

Tras la muerte de Pierre Curie en 1906, atropellado por un carruaje, Marie asumió su cátedra en la Sorbona, convirtiéndose en la primera profesora en la historia de esta institución. A pesar del duelo, continuó su labor científica y en 1911 ganó su segundo Premio Nobel, ahora en Química, por el aislamiento del radio y la caracterización de sus propiedades, siendo la única persona en recibir dos premios en disciplinas científicas distintas (Rincón Educativo, 2024).

Durante la Primera Guerra Mundial, Curie impulsó el uso médico de los rayos X creando unidades móviles de diagnóstico, conocidas como *petites Curies*, asistiendo y salvando a miles de soldados heridos. Además, formó a mujeres como técnicas radiólogas, abriendo puertas a su participación en ciencia y medicina durante el conflicto (Rydén, 2025).

La exposición prolongada a materiales radiactivos, cuyos riesgos aún no se conocía, deterioró irreversiblemente su salud. Marie Curie falleció en 1934 por anemia aplásica causada por décadas de trabajo expuesta a la radiación. Sin embargo, su legado continuó; Irène Joliot-Curie, su hija mayor, siguió sus pasos en radioquímica y ganó el Nobel de Química en 1935 con su esposo Frédéric Joliot por descubrir la radiactividad artificial, convirtiendo a los Curie en la primera familia con dos

generaciones premiadas. Su segunda hija, Ève, optó por las humanidades, destacando como escritora, pianista y diplomática (Muñoz Páez, 2013; Britannica Editors, 2025).

El legado de Marie Curie perdura como emblema de dedicación al conocimiento, superación de barreras sociales y avances científicos revolucionarios. Su influencia abarca aplicaciones médicas diagnósticas y terapéuticas de la radioactividad, además de abrir camino a las mujeres en la investigación. Su vida demuestra cómo la pasión, el rigor y la constancia pueden transformar no solo una disciplina, sino la historia de la humanidad.

Incorporación de los Rayos X antes y después en la práctica médica

Durante las primeras décadas del siglo XX, antes de que los rayos X se establecieran como herramienta médica estándar, se usan de forma experimental e incluso curiosa.

En feria y exposiciones internacionales, instalaban cabinas donde el público veía sus propios esqueletos a través de máquinas improvisadas de rayos X, convirtiéndose en una atracción popular. También, en tiendas de calzado, se popularizó el fluoroscopio podológico, dispositivo que utilizaba rayos X para mostrar cómo calzaban los pies dentro de los zapatos, años después se comprobó que su uso sin protección representaba un riesgo significativo tanto para los empleados como para los clientes frecuentes (Duffin & Hayter, 2000).

De forma aún más sorprendente, los rayos X se usaron en concursos de belleza femenina como criterio de evaluación física. En estos eventos, especialmente en Europa y Estados Unidos durante las décadas de 1950 y 1960, se utilizaban imágenes radiográficas de la columna vertebral de las concursantes para determinar la simetría, la curvatura vertebral y la "postura ideal". Se creía que una alineación vertebral armónica era un indicativo de belleza corporal interna, lo cual era altamente

valorado en los estándares estéticos de la época (Dwivedi,2025). Esta práctica revelaba no solo el desconocimiento total de los riesgos biológicos de la radiación, sino también una cosificación del cuerpo femenino disfrazada de rigor "científico".

Estas aplicaciones tempranas, que hoy parecen insólitas o éticamente dudosas, muestran el entusiasmo con que se recibió la tecnología de los rayos X, usándola sin regulaciones ni conocimiento de riesgos. La falta de normas sobre los riesgos asociados a la exposición prolongada causó quemaduras, necrosis e incluso cáncer entre usuarios y operadores. No obstante, este uso extendido, aunque temerario, permitió explorar su potencial y sentó las bases para su adopción médica posterior, ya de una manera crítica y más controlada(Sansare et al., 2011).

Tras esa etapa inicial de usos recreativos, comerciales e incluso estéticos, como evaluar la simetría vertebral en concursos de belleza, los rayos X se consolidaron como herramienta diagnóstica clave en medicina. Desde finales del siglo XIX, se reconocen como radiación electromagnética única por su alta energía, a diferencia de otras ondas del espectro como la luz visible o las microondas, los rayos X poseen una energía significativamente superior, derivada de sus cortas longitudes de onda que varían entre 0.01 y 10 nanómetros (nm). Permitiendo la capacidad de penetrar tejidos blandos como músculos y piel, pero ser absorbidos por estructuras densas como huesos o metales (Ou et al., 2021). Este contraste diferencial de absorción genera las imágenes radiográficas precisas que revolucionaron el diagnóstico interno del cuerpo humano sin intervenciones invasivas.

Proceso y formación de los rayos X

La producción de rayos X comienza cuando electrones emitidos por el filamento del cátodo son acelerados por un campo eléctrico hacia un ánodo metálico, generalmente de tungsteno. Al impactar con este blanco, generan radiación electromagnética en dos formas principales: la radiación de frenado (Bremsstrahlung) y la radiación característica (Bushong, 2013).

La radiación de frenado también conocida por su nombre en alemán *Bremsstrahlung*, se produce cuando un electrón de alta velocidad se aproxima al núcleo de un átomo en el ánodo y debido a la interacción electrostática, el electrón es desviado o desacelerado, generando una pérdida de energía que se libera como fotón de rayos X. Esta forma de radiación se caracteriza por su espectro continuo de energías, ya que la intensidad varía según la trayectoria del electrón y su proximidad al núcleo, más del 80% de los fotones generados en un tubo de rayos X provienen de este mecanismo (Ou et al, 2021).

Por otro parte, la radiación característica surge cuando un electrón acelerado interactúa con otro electrón que se encuentra en una de las capas internas del átomo, usualmente la capa K. Esto expulsa al electrón interno y deja una vacante energética, que es rápidamente ocupada por un electrón de una capa más externa, como la capa L o M, generando la emisión de un fotón cuya energía corresponde a la diferencia entre ambos niveles energéticos, esta emisión es única y constante para cada elemento del ánodo, dependiendo de su número atómico (Allen, 2022).

Sin embargo, la eficiencia de conversión energética en este proceso es bastante baja, aproximadamente el 99 % de la energía cinética de los electrones no se convierte en radiación útil, sino que se disipa en forma de calor dentro del material del ánodo (Bushong, 2021). Este calentamiento surge de la agitación térmica generada por la interacción inelástica de los electrones con los átomos del blanco metálico, sin llegar a generar radiación electromagnética y como resultado, la acumulación de calor en el ánodo puede ser considerable.

Por eso, en equipos de uso intensivo, la acumulación de calor puede dañar el ánodo, haciendo esenciales sistemas de enfriamiento como ánodos giratorios, inmersión en aceite o materiales conductores como el cobre (Allen,2024). Esta gestión térmica resulta crucial para garantizar la durabilidad del equipo y la seguridad operativa en radiología.

Origen y evolución de la fluoroscopia

La fluoroscopia permite visualizar en tiempo real las estructuras internas del cuerpo mediante rayos X continuos. A diferencia de la radiografía convencional, que produce imágenes estáticas, esta técnica ofrece una evaluación dinámica de órganos, tejidos y dispositivos en movimiento, clave para procedimientos diagnósticos y terapéuticos mínimamente invasivos (Bushong, 2021).

Históricamente, la fluoroscopia surgió poco después del descubrimiento de los rayos X en 1895. En 1896, Thomas Edison, cautivado por su potencial, creó el primer fluoroscopio utilizando una pantalla de tungstato de calcio que brillaba al ser impactada por los rayos X. Este dispositivo permitía ver imágenes en movimiento proyectada sobre la pantalla fluorescente, aunque exponía al operador a radiación directa y prolongada sin protección (Hancox & Murphy, 2018).

En sus primeras décadas, la fluoroscopia enfrentó limitaciones tecnológicas y los riesgos graves para el operador. Los médicos observaban directamente a través de lentes o visores acoplados al equipo, recibiendo dosis de radiación significativamente altas de sin protección alguna. Incluso Thomas Edison abandonó sus investigaciones en rayos X luego de que su asistente, Clarence Dally, muriera por cáncer causado por exposición continua (King, 2012). No obstante, décadas después, la llegada del intensificador de imagen revolucionó la fluoroscopia al permitir visualizar las imágenes de forma indirecta y más segura, consolidándola como herramienta esencial en múltiples áreas clínicas.

Desarrollo tecnológico del arco en C

La fluoroscopia representó un avance decisivo al facilitar procedimientos guiados por imagen en tiempo real, allanando el camino para tecnologías más sofisticadas, como el arco en C (Bushong et al., 2012). Este dispositivo de fluoroscopia móvil, diseñado para facilitar la guía visual durante cirugías, fue introducido en 1955

por la Philips Medical Systems, el equipo integraba un generador de rayos X y un intensificador de imagen en una estructura con forma de “C” facilitando la colocación precisa alrededor del paciente sin necesidad de moverlo. (Dbarboni, 2023; Amber Diagnostics, 2022).

Gracias a estos avances, el arco en C se convirtió en una herramienta esencial en especialidades como cardiología intervencionista, gastroenterología, urología, ortopedia y neurocirugía. Su capacidad para ofrecer imágenes en tiempo real revolucionó la colocación precisa de catéteres, prótesis, stents, tornillos y placas, elevando significativamente la seguridad y exactitud de los procedimientos quirúrgicos.

En la actualidad, los sistemas fluoroscópicos han avanzado hacia configuraciones digitales de alta resolución con detectores de panel plano, reducción de artefactos, y algoritmos inteligentes de procesamiento de imagen, Estas innovaciones permiten obtener imágenes precisas con menor exposición tanto para pacientes como para el personal médico. Combinadas con prácticas rigurosas de protección radiológica, convierten a la fluoroscopia en una técnica versátil, segura y eficaz (Guangzhou MeCan Medical Limited, 2023).

El sistema del arco en C integra varios componentes esenciales. El tubo de rayos X genera la radiación principal, cuyo haz es dirigido e impacta en un detector de panel plano, que convierte los fotones en señales eléctricas digitalizadas, permitiendo obtener imágenes nítidas. La estructura en “C” conecta ambos extremos, permitiendo movimientos precisos en múltiples ángulos sin mover al paciente. Por otra parte, la consola de control permite ajustar parámetros claves como el kilovoltaje (kVp), la corriente (mA) y los modos de imagen, además de ofrecer herramientas de procesamiento como zoom o filtros (Bushong, 2021; Zaid Al-Kaylani et al., 2022).

Uso del Arco en C en neurocirugía

La columna cervical representa una estructura anatómica compleja y vulnerable, responsable de proteger la médula espinal y permitir la movilidad

craneocervical. Las patologías como hernias discales, espondilosis cervical, mielopatía compresiva o estenosis foraminal pueden generar síntomas como dolor intenso, debilidad motora o déficits neurológicos progresivos. En consecuencia, su tratamiento quirúrgico se ha convertido en una práctica habitual en el campo de la neurocirugía moderna.

Así mismo, Dentro de las técnicas quirúrgicas más empleadas se encuentra la discectomía cervical anterior con fusión (ACDF, por sus siglas en inglés: *Anterior Cervical Discectomy and Fusion*), procedimiento que consiste en acceder a la columna cervical por vía anterior, extraer el disco intervertebral deteriorado y sustituirlo por una prótesis, que posteriormente se fija con una placa y tornillos, con el objetivo de lograr la fusión vertebral y asegurar la estabilidad biomecánica del segmento intervenido (Sugawara, 2015). Hoy en día, esta técnica es predominante para tratar patologías degenerativas cervicales, gracias a su excelente tasa de éxito clínico y mínimas complicaciones.

De manera complementaria, la artroplastia cervical se ha consolidado como una alternativa quirúrgica indicada principalmente en pacientes seleccionados con patología discal, en la cual el disco afectado es reemplazado por una prótesis móvil, permitiendo la preservación de la movilidad segmentaria y disminuyendo la sobrecarga mecánica sobre los niveles adyacentes.

En casos de compromiso vertebral más extenso, como estenosis cervical severa, lesiones traumáticas o degeneración avanzada, se emplea la corpectomía cervical anterior, técnica que implica la resección parcial o total del cuerpo vertebral comprometido, seguida de la reconstrucción mediante una prótesis estructural, frecuentemente de hueso cadavérico, y la colocación de una placa cervical anterior con tornillos, con el fin de restablecer la estabilidad y lograr la fusión del segmento afectado (Ulrich et al., 2025).

Cabe destacar que tanto la discectomía cervical anterior con fusión (ACDF) como la artroplastia cervical y la corpectomía cervical anterior requieren el uso de fluoroscopia intraoperatoria mediante arco en C para la correcta localización del nivel vertebral a intervenir, la verificación del posicionamiento implantes o prótesis, y el control del alineamiento cervical. Durante estos procedimientos, las imágenes en tiempo real permiten al cirujano confirmar con precisión las referencias anatómicas, evitar errores de localización y minimizar la necesidad de reposicionamientos innecesarios, ya que el arco en C puede desplazarse sin alterar la posición del paciente, ofreciendo un control visual continuo durante toda la intervención quirúrgica (Sertac Kirnaz et al., 2021; Cristante et al., 2018).

Efectos biológicos de la radiación ionizante

Desde una perspectiva molecular tenemos la radiobiología, la cual estudia los efectos biológicos de la radiación ionizante en tejidos vivos. Esta disciplina, que cruza física, biología y medicina, analiza como partículas ionizantes como los rayos X, electrones o protones, interactúan con moléculas celulares, especialmente el ADN.

La radiación ionizante produce daño celular por dos mecanismos principales: vía directa e indirecta. En la vía directa, los fotones o partículas impactan directamente macromoléculas clave como el ADN, su principal blanco, causando roturas simples o dobles en la cadena helicoidal del ADN, las roturas simples afectan una sola hebra y suelen ser reparadas de forma eficiente por los mecanismos celulares, las roturas dobles (DSB) constituyen un daño de mayor complejidad y ocurren cuando ambos filamentos del ADN se cortan en posiciones cercanas, generando inestabilidad genómica, si no se reparan correctamente, pueden desencadenar mutaciones, apoptosis o transformaciones malignas con riesgo carcinogénico (Ibáñez et al., 2024).

Con respecto al daño celular por vía indirecta, esta ocurre mediante la radiólisis del agua. Al cuerpo humano está conformado por un 70% de agua, la radiación genera radicales libres altamente reactivos como el radical hidroxilo (-OH) y el ion hidroxilo

(OH⁻), con electrones desapareados que los hacen inestables. Estos reaccionan rápidamente con proteínas, lípidos y ADN, siendo responsables del 70-80% del daño por radiación en condiciones normales, pese a su corta vida media pero alta citotoxicidad (Azzam et al., 2012).

Además de los mecanismos celulares, los efectos de la radiación ionizante se clasifican en dos categorías principales: deterministas y estocásticos, cada una con características distintas en cuanto a su relación con la dosis, tiempo de aparición y la gravedad del daño.

Los efectos determinísticos solo aparecen cuando la dosis absorbida supera un umbral específico, que varía según el tejido afectado. Una vez cruzado ese límite, la severidad del daño crece proporcionalmente con la dosis recibida. Esta categoría incluye lesiones agudas como eritemas cutáneos, alopecia, descamación húmeda, necrosis tisular, esterilidad temporal o permanente, y cataratas inducidas por radiación. En casos extremos, dosis totales superiores a 1Gy pueden desencadenar el síndrome de irradiación aguda (SIA), una emergencia clínica grave tras exposición masiva al cuerpo (ICRP,2023).

El síndrome de irradiación aguda (SIA) se manifiesta en fases progresivas, inicialmente la fase prodrómica con náuseas, vómitos y fatiga extrema; seguida de una fase latente de mejoría aparente; y finalmente la fase de manifestación clínica con daño orgánico grave. Su gravedad depende de la dosis total absorbida y la extensión corporal afectada, clasificándose en tres formas principales:

- Síndrome hematopoyético (1–10 Gy): compromete la médula ósea, causando leucopenia, anemia y trombocitopenia, con elevado riesgo de infecciones y hemorragias. La mortalidad se puede prevenir con cuidados médicos intensivos.
- Síndrome gastrointestinal (10–30 Gy): destruye la mucosa digestiva, provocando diarrea severa, vómitos persistentes, deshidratación, hemorragias

internas y septicemia. Generalmente resulta letal en pocos días sin tratamiento especializado.

- Síndrome neurovascular o cerebrovascular (más de 30 Gy): daña abruptamente el sistema nervioso central, manifestándose con pérdida de conciencia, convulsiones, ataxia, coma y muerte en unas horas o pocos días. Se considera completamente irreversible (López & Martín, 2011).

Estos síndromes, aunque infrecuentes, constituyen un riesgo concreto en accidentes nucleares, fallas catastróficas de radioterapia o exposición internacional. Por ello, la protección contra efectos determinísticos se basa en límites de exposición estrictamente definidos y en prevenir cualquier escenario de irradiación aguda masiva.

Por el contrario, los efectos estocásticos no carecen de un umbral definido, es decir, pueden manifestarse incluso con dosis muy bajas de radiación, lo que plantea un desafío clave para la protección radiológica. Su gravedad no depende de la cantidad de radiación recibida pero su probabilidad de aparición aumenta proporcionalmente con la dosis acumulada a lo largo del tiempo. Dentro de esta categoría, los efectos principales incluyen el cáncer radio inducido (leucemia, cáncer de tiroides, mama, pulmón, hueso, entre otros) y mutaciones genéticas hereditarias, transmitidas a la descendencia si afectan células germinales (ICRP, 2023).

Estas consecuencias revisten especial relevancia en poblaciones vulnerables como niños, adolescentes y mujeres embarazadas, cuyos tejidos exhiben alta tasa de replicación celular. Esta característica incrementa su susceptibilidad genética a exposiciones ionizantes, incluso en dosis bajas.

Por esto, organismos internacionales como la ICRP han adoptado el modelo preventivo de la curva lineal sin umbral (LNT), que postula la inexistencia de una dosis completamente segura y un riesgo proporcional a cualquier exposición. Aunque este modelo genera debate científico, sigue siendo el fundamento de los límites

ocupacionales y ambientales en la mayoría de las normativas de protección radiológica (Laughlin, 2025).

También, factores como la edad, el sexo, el estado inmunológico, el tipo de radiación (alfa, beta, gamma, neutrones) y la fracción del cuerpo irradiada, influyen significativamente en la magnitud del daño biológico. Asimismo, la radiosensibilidad varía entre tejidos; los de alta replicación celular, como la médula ósea, el epitelio intestinal, gónadas y tejidos embrionarios, resultan especialmente vulnerables (Joshua Adam Tarrence, 2020).

Además, desde la perspectiva genética y molecular, la exposición prolongada a bajas dosis genera disfunciones como inestabilidad cromosómica, errores en la replicación del ADN, estrés oxidativo crónico y alteraciones en la regulación génica, promoviendo enfermedades degenerativas y neoplasias en órganos sanos (Azzam et al., 2012; Joshua Adam Tarrence, 2020). En contraste, el modelo de la curva lineal sin umbral (LNT) permanece como herramienta clave para estimar riesgos estocásticos y definir límites seguros de exposición, a pesar de las controversias científicas (Laughlin, 2025).

Por lo tanto, tanto los efectos inmediatos como las consecuencias tardías de la radiación ionizante plantean un riesgo latente para la salud humana. Esta realidad subraya la necesidad de implementar estrategias completas de protección radiológica, como el principio ALARA (Tan bajo como sea razonablemente posible), el monitoreo mediante dosimetría personal, la optimización de las dosis en procedimientos clínicos y la capacitación permanente del personal expuesto.

Casos emblemáticos de exposición masiva a radiación

A lo largo de la historia, diversos eventos asociados al uso de la radiación ionizante han evidenciado las consecuencias derivadas de fallas en la seguridad radiológica, la gestión del riesgo y el control dosimétrico. Estos casos han permitido

fortalecer la normativa internacional y consolidar una cultura de prevención orientada a la protección del personal ocupacionalmente expuesto.

El accidente de Chernóbil (1986) representa uno de los eventos nucleares más graves registrados, caracterizado por una exposición masiva a radiación ionizante debido a fallas operativas y deficiencias en la cultura de seguridad. La ausencia de protocolos adecuados y de monitoreo dosimétrico contribuyó a elevadas dosis recibidas por trabajadores y población cercana. (IAEA, 2016).

Por otra parte, se encuentra el accidente de Fukushima (2011), aunque el origen fue un desastre natural, se evidenciaron nuevamente debilidades en la gestión del riesgo radiológico. A diferencia de Chernóbil, las medidas de evacuación y control permitieron reducir la exposición directa; sin embargo, el evento reforzó la importancia de la planificación, la vigilancia dosimétrica y la capacitación continua del personal. (OMS,2013; UNSCEAR, 2023).

Igualmente, los accidentes de Three Mile Island (1979) y Tokaimura (1999) demostraron que incluso en entornos controlados pueden ocurrir exposiciones significativas cuando existen errores humanos, incumplimiento de protocolos y fallas en la supervisión. Ambos casos resaltan la necesidad de controles operativos estrictos y monitoreo individual de dosis. (NRC, 2024; Willie, 2023).

En América Latina, cabe destacar el caso ocurrido en Goiânia, Brasil, en 1987; el cual evidenció los riesgos asociados al manejo inadecuado de fuentes radiactivas en contextos no industriales ni hospitalarios. La falta de identificación de una fuente abandonada generó exposición innecesaria en múltiples individuos, subrayando la importancia del control, almacenamiento seguro y educación en radio protección. (Sakomoto-Hojo, 2018).

De igual manera, el incidente ocurrido en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá puso de manifiesto la relevancia del control de calidad, la verificación de dosis

y la correcta aplicación de protocolos en el ámbito médico, reforzando la necesidad de vigilancia dosimétrica y fortalecimiento de la seguridad radiológica en instalaciones de salud. (IAEA, 2001).

En definitiva, estos eventos emblemáticos reafirman que los efectos de la radiación ionizante trascienden ampliamente el ámbito teórico. Tanto en exposiciones agudas como exposiciones crónicas, ya sean accidentales o por errores técnicos, la radiación puede generar consecuencias devastadoras para la salud humana y el medioambiente. Por ello, el análisis detallado de estos casos resulta fundamental para perfeccionar los sistemas de protección radiológica y promover una cultura de seguridad efectiva en todos los niveles, desde el ámbito médico hasta el industrial y científico.

Fundamentos teóricos de la protección radiológica

Los fundamentos teóricos de la protección radiológica constituyen una disciplina clave en las ciencias de la salud, dedicada a salvaguardar la integridad física del personal ocupacionalmente expuesto (POE), el equipo auxiliar y la población general ante los riesgos de la radiación ionizante en entornos médicos, industriales o de investigación. Esta área se apoya en principios científicos, éticos y normativo que buscan maximizar los beneficios diagnósticos y terapéuticos mientras se minimizan los efectos adversos asociados a la exposición (IAEA, 2014).

Tal es el caso en entornos clínicos como las neurocirugías de fusión cervical anterior, en las que se emplea el uso del arco en C, el cumplimiento riguroso de los estándares internacionales de protección radiológica resulta imprescindible. Su aplicación adecuada no solo garantiza entornos laborales seguros, sino que también asegura la sostenibilidad de la práctica médica mediante un enfoque preventivo y de alta calidad.

Principios básicos: justificación, optimización y limitación de dosis

Según la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la protección radiológica se estructura fundamentalmente en torno a tres principios cardinales: justificación, optimización y limitación de dosis.

En primer lugar, el principio de justificación exige que toda práctica que conlleve exposición a radiación debe estar sólidamente fundamentada. Es decir, la relación riesgo-beneficio debe favorecer claramente los beneficios clínicos o terapéuticos para validar su realización (ICRP, 2007). Por lo tanto, cualquier procedimiento radiológico debe ofrecer un valor agregado significativo al diagnóstico o procedimiento quirúrgico.

La optimización, también conocida como principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), establece que las dosis deben mantenerse tan baja como sea razonablemente posible. Esto implica ajustes técnicos precisos como la colimación del haz y la selección óptima de parámetros, junto con una formación continua del personal y revisiones periódicas de protocolos.

Por último, el principio de limitación de dosis establece umbrales precisos para la exposición de trabajadores y del público general. La ICRP determina que el límite anual para trabajadores expuestos es de 20 mSv en promedio a lo largo de cinco años, sin exceder 50 mSv en un solo año (ICRP, 2007).

Los once principios fundamentales de protección radiológica

Complementariamente, la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2016) plantea once principios rectores que amplían y robustecen los pilares fundamentales ya mencionados. A saber:

1. Responsabilidad del liderazgo: los directivos institucionales deben asumir un compromiso activo en la implementación del sistema de protección.

2. Rol del gobierno: el Estado debe proporcionar un marco normativo eficaz y coherente.
3. Marco regulador: se requiere de organismos técnicos independientes con capacidad sancionadora y de supervisión.
4. Justificación de las prácticas: toda exposición debe implicar una ventaja mayor al riesgo.
5. Optimización de la protección: aplicación continúa del principio ALARA.
6. Limitación de dosis individual: los límites deben observarse con rigurosidad.
7. Protección de las futuras generaciones: prevenir efectos intergeneracionales.
8. Prevención de accidentes: prever eventos con potencial liberación radiactiva no deseada.
9. Reducción de consecuencias: contar con planes de respuesta a emergencias.
10. Protección del medioambiente: considerar el impacto ecológico de las radiaciones.
11. Participación informada: involucrar activamente a los trabajadores y la sociedad civil en la toma de decisiones.

Estos principios no solo permiten una toma de decisiones más ética, sino que también aseguran una gestión técnica más sólida y sustentable.

Enfoque ALARA en el entorno clínico

El principio ALARA (tan bajo como sea razonablemente posible o "*As Low As Reasonably Achievable*") representa uno de los pilares operativos fundamentales en la protección radiológica ocupacional. Reconoce que no existe un umbral de exposición completamente seguro, por lo que incluso dosis bajas conllevan riesgos acumulativos en exposiciones repetidas o prolongadas, como en entornos quirúrgicos con uso frecuente del arco en C.

Al mismo tiempo, la aplicación del principio ALARA abarca desde la selección precisa de parámetros técnicos y tiempos de exposición, hasta el empleo de barreras

físicas protectoras y el monitoreo dosimétrico. Asimismo, promueve una cultura de seguridad integral que involucra tanto al personal técnico como a los niveles directivos, posicionando la educación continua como estrategia preventiva fundamental.

Accesorios de protección radiológica

Por otra parte, los accesorios protectores constituyen herramientas esenciales para reducir la exposición ocupacional a la radiación. Entre los más utilizados destacan:

- Delantales plomados: fabricados con plomo o materiales alternativos como antimonio, tungsteno o bismuto encapsulados. Se presentan en espesores de 0.25, 0.35 y 0.50 mm equivalentes de plomo (Pb-eq). Por ejemplo, un delantal de 0.5 mm Pb-eq puede bloquear entre el 90 % y 95 % de la radiación dispersa a 100 kVp.
- Collares tiroideos: diseñados con materiales equivalentes al delantal y con un grosor habitual de 0.5 mm Pb-eq. Protegen la glándula tiroidea, altamente radiosensible, y se ajustan al cuello con cierres de velcro o imanes.
- Gafas plomadas: protegen el cristalino, tejido susceptible a desarrollar cataratas. Sus lentes contienen óxido de plomo y proporcionan protección lateral y frontal de hasta 0.5 mm Pb-eq (Frane & Bitterman, 2023).

Asimismo, el uso de dosímetros personales, tales como los termoluminiscentes (TLD) o de luminiscencia ópticamente estimulada (OSL), resulta obligatorio para el monitoreo individual. Estos dispositivos, posicionados sobre el chaleco plomado a la altura del pecho, permiten cuantificar con precisión la dosis recibida por cada profesional. Gracias a estos datos, se implementan medidas. En función de estos datos, se pueden establecer medidas correctivas oportunas y se valida la seguridad del entorno laboral (Perkins, 2022).

Con el desarrollo de la física médica, surgieron unidades como el roentgen (R), definido en la década de 1920 para cuantificar la ionización en el aire. Posteriormente, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU), estandarizó conceptos como la dosis absorbida, expresada en rad y luego en gray (Gy), junto con la dosis equivalente, expresada en sievert (Sv), que incluye factores de ponderación según el tipo de radiación y la radiosensibilidad del tejido expuesto (Burton, 2017).

Jerarquización y magnitudes dosimétricas

En protección radiológica se distinguen tres magnitudes principales, dosis absorbida, dosis efectiva y dosis equivalente. La dosis absorbida representa una cantidad física medible que indica la energía transferida por unidad de masa. Mientras que la dosis equivalente y la dosis efectiva funcionan como herramientas esenciales para evaluar y gestionar la exposición radiológica.

La dosis absorbida representa una magnitud física fundamental que cuantifica la energía transferida por cualquier radiación ionizante a un medio específico durante su interacción, se define como la energía depositada por unidad de masa al material irradiado, ya sea tejido biológico, aire u otros medios, y se expresa en unidades del Sistema Internacional en gray (Gy), equivalente a un joule por kilogramo ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

No obstante, la dosis absorbida por sí sola resulta insuficiente para estimar el efecto impacto biológico a la radiación, ya que omite las diferencias en el daño causado por distintos tipos de radiación ionizante, como fotones, electrones o partículas alfa (Bushberg et al., 2012).

Con el fin de incorporar la variabilidad en el efecto biológico según el tipo de radiación, se introduce la dosis equivalente, calculada multiplicando la dosis absorbida por un factor de ponderación radiológico (w_r) que refleja la eficacia biológica relativa de cada tipo de radiación. Esta magnitud permite estimar el riesgo de daño tejidos específico y se expresa en sievert (Sv). Así, la dosis equivalente establece un vínculo

esencial entre la medición física y la evaluación del impacto biológico en los tejidos expuestos (ICRP, 2007).

A partir de la dosis equivalente se define la dosis efectiva, que consideran tanto el tipo de radiación como la radiosensibilidad de los diferentes órganos y tejidos del cuerpo humano. Para ello, se aplican factores de ponderación tisular (w_t), que reflejan la contribución relativa de cada órgano al riesgo global de efectos estocásticos, como el cáncer. La dosis efectiva, expresada en sievert (Sv), estima el riesgo total para el individuo y sirve como referencia clave para establecer los límites de dosis en protección radiológica ocupacional y pública (ICRP, 2007).

Estas magnitudes se organizan en una jerarquización dosimétrica, donde la dosis absorbida constituye la base física fundamental, la dosis equivalente incorpora el tipo de radiación, y la dosis efectiva integra además la radiosensibilidad de los tejidos, permitiendo una evaluación progresivamente más precisa del riesgo biológico global.

Sin embargo, dado que la dosis efectiva y la dosis equivalente en órganos no pueden medirse directamente en condiciones laborales reales, la protección radiológica magnitudes operacionales definidas por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU). Entre estas destacan el equivalente de dosis personal Hp(10), asociado a la dosis efectiva en tejidos profundos; Hp(3), utilizado como aproximación a la dosis en el cristalino del ojo; y Hp(0.07), relacionado con la dosis en piel y extremidades superficiales (Ubeda de la C et al., 2018).

Estas magnitudes operacionales se registran mediante dosímetros personales y permiten estimar de manera práctica las dosis relevantes para proteger al personal expuesto. En este sentido, el uso de Hp(10), Hp(3) y Hp(0.07) resulta especialmente pertinente, ya que evalúa la exposición ocupacional del personal de salud en regiones críticas como el tronco y cabeza, cristalino del ojo y extremidades superiores durante procedimientos neuroquirúrgicos guiados por fluoroscopia.

En concordancia con estas magnitudes operacionales, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) establece límites de dosis para el personal ocupacionalmente expuesto con el fin de prevenir efectos deterministas y reducir la probabilidad de efectos estocásticos. Para la dosis efectiva, se recomienda un límite de 20 mSv por año en promedio en un período de cinco años, sin exceder 50 mSv en un solo año. En el caso del cristalino del ojo, el límite equivalente es de 150 mSv/año según la reglamentación nacional, mientras que para la piel y las extremidades se fija un límite anual de 500 mSv (ICRP, 2007; ICRP, 2012). Estos valores de umbral guían la interpretación de mediciones dosimétricas en estudios ocupacionales. Estas magnitudes, registradas mediante dosímetros personales de cuerpo entero y dosímetros de anillo, sustentan la cuantificación de la exposición del personal de salud en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C, y orientan el diseño metodológico descrito en el capítulo.

2.3 Marco Legal

La radiación ionizante, aunque constituye una herramienta indispensable en la medicina moderna, conlleva riesgos que deben gestionarse de acuerdo con marcos normativos específicos. En Panamá, la regulación sobre protección radiológica se fundamenta en instrumentos legales alineados con las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA). Dentro de estos destacan el Decreto Ejecutivo N.º 770 de 2010, la Norma Básica 110 y la Resolución N.º 0025 de 2017, los cuales constituyen la base regulatoria para garantizar la seguridad en el uso clínico de la radiación ionizante (MINSAL, 2016).

Decreto Ejecutivo N.º 770 de 2010

El Decreto Ejecutivo N.º 770 de 2010 establece el Reglamento de Protección Radiológica en Panamá, definiendo el marco normativo que rige todas las prácticas relacionadas con fuentes radiactivas y equipos emisores de radiación ionizante. Entre sus disposiciones principales se encuentran:

- La adopción de los principios fundamentales de protección radiológica: justificación, optimización y limitación de dosis, como ejes de seguridad en toda práctica con radiación.
- La fijación de límites de dosis efectivos para el personal ocupacionalmente expuesto (POE) y para la población en general, en concordancia con lo establecido por la ICRP.
- La obligación de implementar programas de protección radiológica, que incluyan capacitación continua, monitoreo dosimétrico, control de calidad y medidas de seguridad física.
- La responsabilidad de los titulares de licencias o autorizaciones, quienes deben garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad en todas las etapas de uso de la radiación.

Este decreto constituye el pilar normativo nacional, ya que articula las obligaciones de los profesionales de la salud, las instituciones médicas y las autoridades regulatorias en materia de seguridad radiológica (Decreto Ejecutivo N.º 770, 2010).

Norma Básica 110

La Norma Básica 110, emitida como parte del marco regulatorio complementario, desarrolla lineamientos técnicos y administrativos para reforzar la seguridad radiológica. Su contenido establece:

- La clasificación de las prácticas radiológicas según su nivel de riesgo, diferenciando entre diagnóstico por imágenes, radioterapia, medicina nuclear, usos industriales e investigación.
- Los criterios de vigilancia y control dosimétrico, tanto para personal ocupacionalmente expuesto como para trabajadores auxiliares y la población general.

- La necesidad de implementar protocolos de seguridad estandarizados, con énfasis en instalaciones médicas que utilizan equipos de fluoroscopia y arcos en C, donde las dosis tienden a ser acumulativas.
- La obligatoriedad de contar con personal especializado en protección radiológica, debidamente certificado y autorizado por la autoridad reguladora nacional.

De esta manera, la Norma Básica 110 complementa el Decreto 770 al ofrecer criterios prácticos de aplicación clínica, garantizando la seguridad en procedimientos médicos avanzados (Norma Básica 110, s. f.).

Resolución N° 0025 de 2017

La Resolución N.º 0025 de 2017 regula la categorización de las instalaciones radiactivas, estableciendo parámetros que permiten clasificar los centros según el nivel de riesgo radiológico y la complejidad de los procedimientos realizados. Esta resolución contempla:

- La diferenciación entre instalaciones de categoría I, II y III, dependiendo de la magnitud de la actividad radiactiva y del potencial de exposición.
- La obligación de las instituciones de salud de presentar planes de seguridad radiológica, adecuados a la categoría correspondiente, incluyendo infraestructura, blindajes, equipos de monitoreo y protocolos de emergencia.
- La exigencia de programas de formación y actualización periódica para el personal expuesto y el personal técnico responsable del uso de la radiación.
- La supervisión por parte de las autoridades competentes, que incluyen inspecciones periódicas y el cumplimiento de auditorías técnicas de seguridad.

En consecuencia, esta resolución fortalece el marco legal al garantizar que las instalaciones médicas, entre ellas los hospitales que utilizan arcos en C para procedimientos quirúrgicos, mantengan estándares de seguridad proporcionales al riesgo asociado (Resolución N.º 0025, 2017).

2.4. Marco contextual

El Hospital Pacífica Salud (Hospital Punta Pacífica) representa una de las instituciones privadas de salud más prestigiosas de Panamá. Fundado a principios del año 2000, por médicos y empresarios panameños en alianza con Johns Hopkins Medicine International, inauguró su primera sede en 2006 Punta Pacífica, una zona estratégica de la Ciudad de Panamá por su desarrollo urbanístico y cercanía a los principales centros financieros y al Corredor Sur. En 2022, expandió su cobertura con una segunda sede en Costa del Este, consolidando su crecimiento en el sector salud (González, 2025).

Pacífica Salud ha forjado un legado de innovación en la medicina panameña, posicionándose siempre a la vanguardia con procedimientos y servicios que han transformado la salud en el país. En 2007, marcaron historia con el primer trasplante renal y la primera cirugía cardiovascular (2007), para 2015 ya incorporaban cirugías cardiovasculares pediátricas y desde entonces han integrado cirugía robótica con sistemas como HUGO RAS y ROSA, junto a programas especializados en cardiopatías congénitas, soporte vital extracorpóreo (ECMO) y monitoreo de pacientes con inteligencia artificial a través de plataformas como Vitalert.

Estos avances se complementan con acreditaciones internacionales como la Joint Commission International (JCI), certificaciones ISO y PlanTree, así como reconocimientos en rankings regionales de hospitales de alta complejidad.

En cuanto a su infraestructura, la sede de Punta Pacífica dispone de 51 habitaciones privadas, 11 suites y una suite presidencial junto a ocho unidades de cuidados intensivos, tres salas de cuidados semi-intensivos, quirófanos inteligentes equipados con tecnología de flujo laminar y filtros HEPA, una sala de partos moderna y servicios complementarios como capilla, terrazas y áreas perioperatorias integradas. A esto se suman servicios esenciales como laboratorio clínico, banco de sangre, radiología avanzada, emergencias disponibles las 24 horas y un Centro

Cardiovascular que agrupa estudios diagnósticos no invasivos en un solo lugar. La cirugía robótica, turismo médico y programas ejecutivos de salud complementan un enfoque integra que impulsa la innovación constante.

El hospital se organiza mediante direcciones clínicas y administrativas, respaldadas por un equipo interdisciplinario de alto nivel. Incluye departamentos clave como cirugía, maternidad, neonatología, emergencias, cuidados intensivos, radiología y laboratorio, lo que ofrece una gama amplia de servicios clínicos. Sistemas modernos de gestión y capacitaciones continuas garantizan calidad y seguridad en cada paso (González, 2025).

En relación con su misión institucional, Pacífica Salud se centra en entregar atención de excelencia, fusionando tecnología puntera con un toque humano enfocado en seguridad, calidad e innovación. Esto se concreta bajo una dirección médica conectada con Johns Hopkins, enriqueciendo el ámbito educativo y científico.

En suma, Pacífica Salud emerge como un hospital privado de tercer nivel, donde especialización avanzada, tecnología de élite y personal capacitado se unen en un modelo asistencial completo. Su trayectoria lo consolida como referente regional, listo para enfrentar demandas sanitarias globales y complejas.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3. Marco metodológico

3.1. Tipo y diseño de investigación

El diseño de investigación que se trabajó fue de enfoque cuantitativo, ya que se basó en la recopilación y análisis de datos numéricos mediante el uso de dosímetros personales para conocer la dosis de radiación recibida por cirujanos, radiólogos y personal asistencial durante neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C. Por tanto los datos al momento del análisis fueron numéricos y estadísticos tal como lo dice Sampieri (2014), los enfoques cuantitativos son aquellos que se caracterizan por recolectar y analizar datos numéricos con el fin de establecer patrones, probar hipótesis y generalizar resultados.

En esta misma línea, el alcance fue de tipo descriptivo ya que se analizó las diferencias en la exposición a la radiación entre médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial. Según Sampieri (2014) los estudios descriptivos se enfocan en especificar las características, propiedades y perfiles de grupos o procesos, con el propósito de detallar como se manifiesta un fenómeno en una población sin manipular las variables.

Asimismo, la investigación fue de diseño no experimental y de tipo longitudinal, puesto que los datos se recolectaron en un periodo de tres meses en las cirugías realizadas por el equipo de Brain and Spine Specialist dentro del Hospital Pacífica Salud para analizar la exposición a la radiación en los diferentes profesionales expuestos. Se describió la dosis recibida por cada grupo profesional, identificando las áreas del cuerpo más expuestas y la variabilidad en función del tipo de procedimiento, sin establecer relaciones de causas y efectos. No se manipularon variables, sino que se observó y analizó la exposición a la radiación en su contexto natural, sin intervenir en las condiciones del procedimiento quirúrgico.

De acuerdo con Sampieri (2014), los estudios longitudinales permiten observar los cambios que se presentan en las variables o sujetos a lo largo de un periodo determinado, con el fin de identificar tendencias, patrones o variaciones en el tiempo dentro del fenómeno estudiado.

3.2. Unidades de análisis

3.2.1. Población

La población del estudio fue de tipo finita, conformada por 10 profesionales que integran el equipo quirúrgico de “Brain and Spine Specialist” en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C. Este equipo incluye médicos cirujanos, anestesiólogo, instrumentista, operador del arco en C, personal de enfermería (enfermero circulante y enfermero de sala) y medico neurólogo.

3.2.2. Muestra

Se trabajó con una muestra no probabilística de tipo intencional, seleccionada a partir de criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos, considerando que no todos los integrantes del equipo quirúrgico presentan el mismo nivel de exposición ocupacional a la radiación ionizante. La muestra estuvo conformada por cinco (5) participantes, específicamente médicos cirujanos, médico anestesiólogo, instrumentista y licenciado en radiología (operador del arco en C), quienes mantienen una proximidad directa y continua a la fuente de radiación durante los procedimientos de neurocirugía de fusión cervical anterior. Adicionalmente, se considera que a diferencia del resto de los participantes, el personal instrumentista no utiliza de manera rutinaria delantal plomado durante los procedimientos evaluados, condición que fue considerada en la caracterización de la muestra y en el análisis de la exposición ocupacional.

La selección de estos profesionales se fundamentó en su mayor permanencia dentro del campo de radiación primaria y de radiación dispersa, lo que los expone a un riesgo dosimétrico superior en comparación con otros miembros del equipo quirúrgico cuya presencia es intermitente o se realiza a mayor distancia del arco en C. En este sentido, la muestra fue definida con base en criterios de riesgo ocupacional y representatividad dosimétrica, con el objetivo de obtener mediciones más precisas y relevantes para el análisis de la exposición radiológica durante el procedimiento estudiado.

3.2.3 Criterios de Inclusión y Exclusión

Inclusión

- Ser miembro activo del grupo quirúrgico “Brain and Spine Specialist”.
- Estar expuesto directamente al uso de arco en C durante neurocirugías de fusión cervical anterior.
- Aceptar participar de forma voluntaria y firmar el consentimiento informado.

Exclusión

- Personal quirúrgico que no participe de forma regular en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C durante el periodo de estudio.
- Quienes presenten inconformidad reiterada o incumplimiento de los protocolos establecidos por el equipo investigador.
- Retirarse del estudio o revocar el consentimiento informado antes de finalizar el período de medición.

3.3. Variables.

3.3.1 Definición Conceptual

En la presente investigación se identificaron cuatro variables fundamentales para la evaluación de la exposición ocupacional a radiación ionizante durante

procedimientos de fusión cervical anterior con uso de arco en C, las cuales se describen a continuación:

- Dosis de radiación: corresponde a la cantidad de radiación ionizante absorbida por el personal de salud durante los procedimientos quirúrgicos asistidos con fluoroscopia. Esta variable se expresa en milisieverts (mSv) y permite estimar la dosis equivalente y/o efectiva recibida en distintas regiones corporales, constituyendo un indicador esencial para la evaluación del riesgo biológico asociado a la exposición ocupacional.
- Tiempo de exposición: Intervalo de tiempo durante el cual el personal permanece expuesto al campo de radiación generado por el arco en C durante la emisión fluoroscópica. Esta variable se relaciona directamente con la dosis acumulada, ya que un mayor tiempo de exposición fluoroscópica se asocia con un incremento en la dosis recibida.
- Uso de protección radiológica: hace referencia a la aplicación de medidas de protección personal destinadas a reducir la dosis de radiación absorbida por el personal ocupacionalmente expuesto. Incluye el uso de delantales plomados, protectores tiroideos y gafas plomadas, los cuales actúan como barreras físicas frente a la radiación primaria y dispersa durante el procedimiento.
- Tipo de profesional expuesto: corresponde a la clasificación del personal de salud que participa en el acto quirúrgico, según su rol y función dentro del procedimiento (médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial). Esta variable permite analizar la distribución de la dosis de radiación en función del nivel de exposición ocupacional asociado a cada rol profesional.

3.3.2 Definición Operacionalización

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Indicador	Técnica	Instrumento	Unidad de medida
Dosis de radiación	Medición de la dosis de radiación utilizando dosímetros personales.	Medición directa de dosis.	Dosímetro personal	Milisieverts (mSv)
Tiempo de exposición	Registro del tiempo desde el inicio hasta el final de la exposición al arco en C.	Registro directo/observación	Hoja de registro	Horas/minutos
Uso de protección radiológica	Observación y registro del tipo y cantidad de protección utilizada por cada participante.	Observación directa	Lista de chequeo	Presencia/ausencia de protección
Tipo de profesional expuesto	Clasificación del personal de médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial.	Observación y clasificación	Hoja de registro	Tipo de profesional

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.4. Consideraciones éticas

La investigación se desarrolló conforme a tres ejes fundamentales para garantizar la integridad científica y el respeto a los derechos de los involucrados.

1. Principios éticos internacionales: Se respetaron las directrices de la Declaración de Helsinki (Asociación Médica Mundial, 2013), el Informe Belmont (1979), las *International Ethical Guidelines for Health-related Research Involving Humans* del CIOMS (2016), las *Good Clinical Practice E6(R1)* del ICH (1996) y la Declaración Universal sobre Bioética y Derechos Humanos de la UNESCO (2005).

2. Normativas nacionales: Se dio cumplimiento de acuerdo con la Ley 81 de 2019 sobre Protección de Datos Personales (Panamá, 2019a), la Ley 84 de 2019 de Investigación para la Salud (Panamá, 2019b) y la Ley 68 de 2003 sobre Derechos y Deberes de los Pacientes (Panamá, 2003). Además, se gestionaron los permisos institucionales ante el comité de bioética de la Universidad Santander y el Hospital Pacífica Salud y se obtuvo el consentimiento informado de todos los participantes.

3. Medidas de confidencialidad: Se respetó la autonomía de los participantes para retirarse en cualquier momento, se codificaron los datos para garantizar el anonimato, se almacenaron en bases seguras con acceso restringido al equipo investigador y se estableció un periodo de conservación de cinco años antes de su eliminación segura.

3.5. Métodos para la recolección de los datos

3.5.1. Delimitación del o los instrumentos

El estudio empleó la técnica de medición directa con dosimetría personal, utilizando como instrumentos principales:

- Dosímetros personales(cuerpo entero)
- Dosímetro de anillo

Colocación

Dosímetro cuerpo entero: El dosímetro personal de cuerpo entero se utilizó para la medición de la dosis ocupacional recibida por el personal quirúrgico durante las neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C. Este dispositivo permite estimar la dosis equivalente y/o efectiva asociada a la exposición del cuerpo entero, expresada en milisieverts (mSv).

El dosímetro fue colocado a nivel torácico, sobre el uniforme quirúrgico y por encima del delantal plomado, siguiendo las recomendaciones internacionales para la monitorización de la exposición ocupacional en procedimientos fluoroscópicos. Esta ubicación permite registrar de forma representativa la dosis debida principalmente a la radiación dispersa presente en el quirófano.

Equipos de protección radiológica utilizados

Durante los procedimientos incluidos en el estudio, los participantes utilizaron equipos de protección radiológica de acuerdo con su rol profesional. Los médicos cirujanos y el médico anestesiólogo emplearon delantales plomados con un espesor equivalente de 0.25 mm Pb, complementados con protectores tiroideos de 0.5 mm Pb. El licenciado en radiología, operador del arco en C, utilizó un delantal plomado con un espesor equivalente de 0.5 mm Pb y protector tiroideo del mismo espesor. En el caso del personal instrumentista, por decisión propia, no se utilizó delantal plomado de manera rutinaria durante los procedimientos evaluados.

Estas condiciones de protección fueron consideradas en la colocación de los dosímetros, ubicándose el dosímetro externo (OUT) por encima del delantal plomado y el dosímetro interno (IN), cuando correspondió, por debajo del mismo, con el fin de estimar la dosis no atenuada y la dosis atenuada por la protección radiológica, respectivamente.

Dosímetro de anillo: El dosímetro de anillo se empleó específicamente para la medición de la dosis absorbida en las extremidades superiores, particularmente en los médicos cirujanos, debido a la proximidad de las manos al campo de radiación durante la manipulación quirúrgica.

Este dispositivo fue colocado en el dedo de la mano considerada más expuesta durante el procedimiento, con el objetivo de evaluar la dosis recibida en esta región anatómica, reconocida como una de las zonas de mayor riesgo ocupacional en procedimientos guiados por fluoroscopia.

La recolección de los datos dosimétricos se realizó de manera acumulativa durante un período de tres meses, correspondiente al desarrollo de las neurocirugías de fusión cervical anterior incluidas en el estudio. Las mediciones se efectuaron sin modificar las condiciones habituales del acto quirúrgico ni la práctica clínica del personal participante, garantizando que los valores registrados reflejaran la exposición real en el entorno quirúrgico.

Los dosímetros fueron suministrados por las empresas Microsievert, S.A. y Electrónica Médica, ambas con registro sanitario vigente en la República de Panamá y autorización en materia de protección radiológica, responsables de la lectura, procesamiento y entrega de los reportes dosimétricos correspondientes. Los datos obtenidos fueron posteriormente registrados y sistematizados por el equipo investigador para su análisis.

3.5.2. Validez o confiabilidad del o los instrumentos

Una vez diseñado el instrumento de recolección de datos, se procedió a llevar a cabo el proceso de validación con el fin de garantizar su pertinencia, claridad y coherencia con los objetivos de la investigación. Para ello, se hizo una revisión a través de un juicio de expertos donde el instrumento fue entregado a tres profesionales en el área de radiología, protección radiológica y metodología de la investigación los cuales

revisaron su pertinencia, precisión, calidad conceptual y entre otros criterios del trabajo correspondiente.

3.6. Procedimiento

El procedimiento de la investigación se desarrolló en tres fases consecutivas, orientadas a garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados y la obtención de datos válidos y confiables.

1. Preparación: En esta fase se definieron de manera precisa el problema de investigación, los objetivos y la justificación del estudio. Asimismo, se diseñó el protocolo metodológico, incluyendo la delimitación de las variables, la población y muestra de estudio, así como los instrumentos de recolección de datos. Paralelamente, se elaboró el marco teórico que sustentó científicamente la investigación y se gestionaron los permisos institucionales y éticos necesarios para su ejecución, incluyendo la aprobación por parte de las instancias correspondientes y la obtención del consentimiento informado de los participantes.

2. Recolección: La recolección de los datos se realizó mediante el uso de dosimetría personal durante un período de tres meses, correspondiente a las neurocirugías de fusión cervical anterior incluidas en el estudio. Los dosímetros fueron utilizados de manera acumulativa, sin modificar las condiciones habituales del acto quirúrgico ni la práctica clínica del personal participante.

El seguimiento, control y reemplazo mensual de los dosímetros fue responsabilidad del equipo investigador, quien verificó su correcta colocación, recuperación y envió para su lectura, asegurando la continuidad y consistencia del proceso de medición durante todo el período de estudio.

3. Análisis: Una vez obtenidos los reportes dosimétricos, la información fue organizada y sistematizada en una base de datos utilizando el programa Microsoft Excel. Los datos se presentaron en forma de tablas y gráficas, y se aplicaron medidas de

estadística descriptiva, tales como media y mediana con el propósito de describir la tendencia central, la dispersión y el comportamiento general de las dosis registradas en los diferentes profesionales evaluados.

Adicionalmente, los valores de dosis obtenidos fueron contextualizados mediante su comparación con los límites ocupacionales recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) para dosis efectiva, dosis equivalente al cristalino del ojo y dosis en piel y extremidades, con el fin de valorar la magnitud de la exposición ocupacional observada durante los procedimientos neuroquirúrgicos incluidos en el estudio.

CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4. Resultados

4.1. Presentación de los resultados

En esta investigación, los resultados obtenidos a partir de la medición de la dosis de radiación registrada durante procedimientos de neurocirugía de fusión cervical anterior con uso de arco en C fueron organizados y sintetizados en tablas y representaciones gráficas, y se presentan de forma descriptiva, sin incorporar análisis intraoperatorio. Las mediciones se realizaron durante un periodo de tres meses, correspondientes a los meses de agosto, septiembre y octubre, en el Hospital Pacífica Salud, abarcando un total de 18 procedimientos quirúrgicos.

Para el procesamiento de los datos se empleó el método de tabulación computacional mediante herramientas del programa Microsoft Excel, utilizándose para la organización y sistematización de los datos recopilados en cuadros y gráficas. Como complemento, se empleó el programa AutoCAD para la elaboración de ilustraciones esquemáticas relacionadas con la distribución del personal dentro del quirófano.

Las mediciones se registraron mediante dosímetros OSL (Luminiscencia Ópticamente Estimulada). A cada participante se le asignaron dos dosímetros personales, los cuales fueron reemplazados mensualmente. El dosímetro interno (IN), ubicado debajo del chaleco plomado, se utilizó como referencia de la dosis ocupacional $H_p(10)$, asociada a la dosis efectiva atenuada por los elementos de protección radiológica. El dosímetro externo (OUT), colocado fuera del chaleco plomado a nivel del cuello y del tórax, se empleó para el registro de la dosis incidente sin protección, utilizándose para la estimación de la dosis equivalente en cristalino $H_p(3)$ y de la dosis equivalente superficial en extremidades $H_p(0.07)$. Al mismo tiempo, se utilizó un dosímetro de anillo para el registro de la dosis equivalente superficial en extremidades superiores de los médicos cirujanos.

4.1.1 Dosis total de radiación acumulada durante el periodo de estudio

Como se observa en la **Tabla 2**, se presenta la dosis total de radiación ocupacional acumulada y registrada durante el periodo de estudio para cada uno de los profesionales evaluados. En dicha tabla se presentan los valores de dosis efectiva Hp(10) obtenidos mediante el dosímetro interno (IN) y el dosímetro externo (OUT), así como los valores de dosis equivalente superficial en extremidades Hp(0.07) registrados mediante los dosímetros de anillo en los médicos cirujanos.

Tabla 2

Dosis total de radiación acumulada durante el periodo de estudio

Participante	Dosímetro IN Hp(10)	Dosímetro OUT Hp(10)	Dosímetro Anillo Hp(0.07)
Neurocirujano 1	PM	0.52 mSv	1.76 mSv
Neurocirujano 2	PM	0.36 mSv	2.23 mSv
Operador arco en C	PM	0.04 mSv	
Anestesiólogo	PM	0.01 mSv	
Instrumentista		0.01 mSv	

Nota: Dosímetro IN, Por debajo del chaleco; Dosímetro OUT: fuera del chaleco; ambos fueron utilizados para el registro de la dosis efectiva Hp(10). El dosímetro de anillo se empleó para la medición de la dosis equivalente superficial en extremidades Hp(0.07). PM: por debajo del mínimo reportable.

4.1.2 Reporte mensual de dosis-OUT

En las **Tablas 3, 4 y 5** se presentan los valores de dosis de radiación ocupacional registrados mediante el dosímetro colocado fuera del chaleco plomado (OUT) para los meses de agosto, septiembre y octubre, respectivamente, expresados en términos de Hp(10), Hp(0.07) y Hp(3) para cada uno de los profesionales evaluados.

En el mes de agosto (Tabla 2), los valores más altos de las dosis Hp(10), Hp(0.07) y Hp(3) correspondieron a los médicos neurocirujanos. Dado que, para el NSG1 se registraron 0.25 mSv en dosis efectiva Hp(10), 0.26 mSv en dosis equivalente a extremidades Hp(0.07) y 0.21 mSv en dosis equivalente al cristalino Hp(3), mientras que para el NSG2 se observaron 0.16 mSv, 0.20 mSv y 0.14 mSv. Al mismo tiempo, el operador del arco en C registró valores de 0.02 mSv en dosis efectiva Hp(10) y de 0.01 mSv tanto en dosis equivalente a extremidades Hp(0.07) como en dosis equivalente al cristalino Hp(3). En cuanto al médico anesthesiologo e instrumentista, los valores se reportaron como PM (por debajo del mínimo reportable) en las tres magnitudes evaluadas.

Para el mes de septiembre (Tabla 3), se registraron valores menores en comparación con agosto. Por lo tanto, En los médicos neurocirujanos, el NSG1 presentó 0.07 mSv en Hp(10), 0.06 mSv en Hp(0.07) y 0.06 mSv en Hp(3), de modo similar el NSG2 registró 0.05 mSv en Hp(10), 0.09 mSv en Hp(0.07) y 0.04 mSv en Hp(3). Mientras que para el instrumentista, se registraron valores de 0.01 mSv en Hp(10), Hp(0.07) y Hp(3). En el operador del arco en C y medico anesthesiologo, los valores se reportaron como PM en todas las magnitudes.

En el mes de octubre (Tabla 4), se observó nuevamente un incremento en los valores registrados en los médicos neurocirujanos. De modo que el NSG1 presentó 0.20 mSv en Hp(10), 0.22 mSv en Hp(0.07) y 0.16 mSv en Hp(3) y el NSG2 registró 0.15 mSv en Hp(10), 0.18 mSv en Hp(0.07) y 0.12 mSv en Hp(3), respectivamente. El

operador del arco en C registró valores de 0.02 mSv en Hp(10) y de 0.01 mSv en Hp(0.07) y Hp(3), mientras que el médico anestesiólogo registró valores de 0.01 mSv en las tres magnitudes. Referente al instrumentista, los registros se reportaron como PM.

Los datos presentados en las Tablas 2, 3 y 4 describen la variación mensual de las dosis registradas mediante el dosímetro OUT para cada rol profesional durante el periodo de estudio.

Tabla 3

Registro mensual de dosis- dosímetro OUT (agosto)

Datos del Participante		Dosis en Milisievert (mSv)		
Nombre	Código	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(3)
Neurocirujano 1	NSG1-OUT	0.25	0.26	0.21
Neurocirujano 2	NSG2-OUT	0.16	0.2	0.14
Operador arco en C	OP A/C-OUT	0.02	0.01	0.01
Anestesiólogo	ANEST-OUT	PM	PM	PM
Instrumentista	INST	PM	PM	PM

Nota: Elaboración propia, 2025

Tabla 4

Registro mensual de dosis- dosímetro OUT (septiembre)

Datos del Participante		Dosis en Milisievert (mSv)		
Nombre	Código	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(3)
Neurocirujano 1	NSG1-OUT	0.07	0.06	0.06
Neurocirujano 2	NSG2-OUT	0.05	0.09	0.04
Operador arco en C	OP A/C-OUT	PM	PM	PM
Anestesiólogo	ANEST-OUT	PM	PM	PM
Instrumentista	INST	0.01	0.01	0.01

Nota: Elaboración propia, 2025.

Tabla 5

Nota: Elaboración propia, 2025.

Datos del Participante		Dosis en Milisievert (mSv)		
Nombre	Código	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(3)
Neurocirujano 1	NSG1-OUT	0.2	0.22	0.16
Neurocirujano 2	NSG2-OUT	0.15	0.18	0.12
Operador arco en C	OP A/C-OUT	0.02	0.01	0.01
Anestesiólogo	ANEST-OUT	0.01	0.01	0.01
Instrumentista	INST	PM	PM	PM

4.1.3 Reporte mensual de dosis-IN

Tal como se presenta en las **Tablas 6, 7 y 8**, se describen los valores de dosis de radiación ocupacional registrados mediante el dosímetro colocado dentro del chaleco plomado (IN) para los meses de agosto, septiembre y octubre, nuevamente expresados en términos de Hp(10), Hp(0.07) y Hp(3) para cada uno de los profesionales evaluados. La magnitud Hp(10) registrada mediante este dosímetro se considera como referencia de la dosis ocupacional, de acuerdo con la ubicación del instrumento y la metodología empleada.

Durante el mes de agosto (Tabla 6), los valores registrados para la mayoría de los profesionales se reportaron como PM (por debajo del mínimo reportable). Sin embargo, para el NSG2 se registraron valores de 0.01 mSv en Hp(10), no obstante, para el NSG1, el operador del arco en C, el médico anestesiólogo y el instrumentista los registros se consignaron como PM en las tres magnitudes evaluadas.

Para el mes de septiembre (Tabla 7), los valores correspondientes al NSG1, NSG2, el operador del arco en C y el médico anestesiólogo se reportaron como PM. A diferencia del instrumentista, en el cual se registraron valores de 0.01.

En el mes de octubre (Tabla 8), los registros correspondientes a todos los profesionales evaluados se reportaron como PM, sin valores cuantificables por encima del mínimo reportable para este periodo.

Tabla 6

Registro mensual de dosis- dosímetro IN (agosto)

Datos del Participante		Dosis en Milisievert (mSv)		
Nombre	Código	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(3)
Neurocirujano 1	NSG1-IN	PM	PM	PM
Neurocirujano 2	NSG2-IN	0.01	0.01	0.01
Operador arco en C	OP A/C-IN	PM	PM	PM
Anestesiólogo	ANEST-IN	PM	PM	PM
Instrumentista	INST	PM	PM	PM

Nota: Elaboración propia, 2025.

Tabla 7

Registro mensual de dosis- dosímetro IN (septiembre)

Datos del Participante		Dosis en Milisievert (mSv)		
Nombre	Código	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(3)
Neurocirujano 1	NSG1-IN	PM	PM	PM
Neurocirujano 2	NSG2-IN	PM	PM	PM
Operador arco en C	OP A/C-IN	PM	PM	PM
Anestesiólogo	ANEST-IN	PM	PM	PM
Instrumentista	INST	0.01	0.01	0.01

Nota: Elaboración propia, 2025.

Tabla 8

Registro mensual de dosis- dosímetro IN (octubre)

Datos del Participante		Dosis en Milisievert (mSv)		
Nombre	Código	Hp(10)	Hp(0.07)	Hp(3)
Neurocirujano 1	NSG1-IN	PM	PM	PM
Neurocirujano 2	NSG2-IN	PM	PM	PM
Operador arco en C	OP A/C-IN	PM	PM	PM
Anestesiólogo	ANEST-IN	PM	PM	PM
Instrumentista	INST	PM	PM	PM

Nota: Elaboración propia, 2025.

4.1.4 Reporte mensual de dosímetros de anillo

Conforme a las **Tablas 9, 10 y 11** se presentan los valores de dosis equivalente superficial Hp(0.07) registrados mediante los dosímetros de anillo en los médicos neurocirujanos para los meses de agosto, septiembre y octubre, respectivamente.

En el periodo correspondiente al mes de agosto (Tabla 9), el médico neurocirujano NSG1 registró un valor de 0.26 mSv, mientras que el NSG2 presentó un valor de 0.20 mSv en Hp(0.07). Para el mes de septiembre (Tabla 10), se registraron valores de 0.06 mSv para el NSG1 y de 0.09 mSv para el NSG2 en la magnitud Hp(0.07).

Durante el periodo de octubre (Tabla 11), el NSG1 registró un valor de 0.22 mSv y el NSG2 un valor de 0.18 mSv en Hp(0.07).

Tabla 9*Registro mensual, dosímetro de anillo- agosto*

Participante	Dosis en Milisieverte
Código	Hp(0.07)
NSG1	1.64
NSG2	1.43

*Nota: Elaboración propia, 2025.***Tabla 10***Registro mensual, dosímetro de anillo- septiembre*

Participante	Dosis en Milisieverte
Código	Hp(0.07)
NSG1	0.80
NSG2	0.70

Tabla 11*Registro mensual, dosímetro de anillo- octubre*

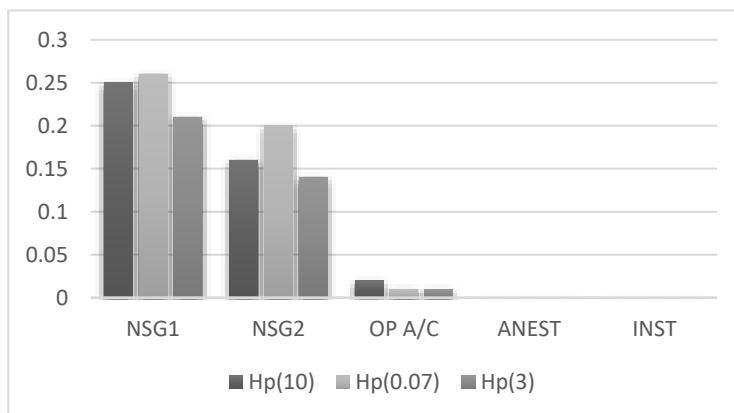
Participante	Dosis en Milisieverte
Código	Hp(0.07)
NSG1	1.23
NSG2	1.07

4.1.5 Representación gráfica de la dosis registrada mediante dosímetro OUT

Las **Figuras 1 a 3** representan gráficamente los valores de dosis registrados mediante el dosímetro colocado fuera del chaleco plomado (OUT) para cada profesional evaluado, correspondientes a los meses de agosto, septiembre y octubre.

Figura 1

Representación gráfica de dosis recibida mediante dosímetro OUT en agosto

**Figura 2**

Representación gráfica de dosis recibida mediante dosímetro OUT en septiembre

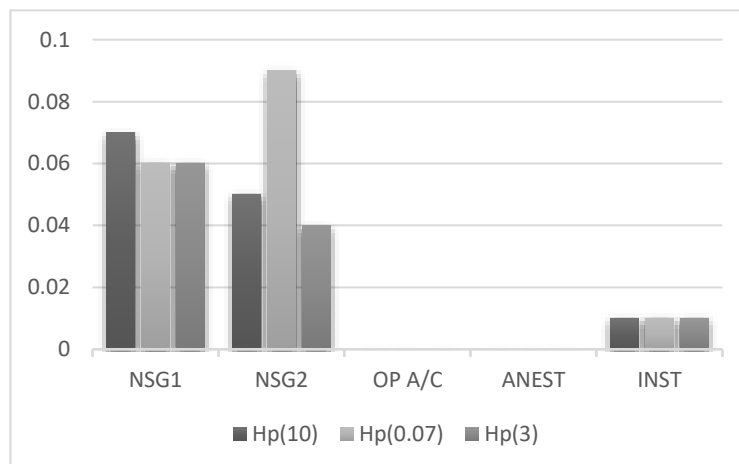
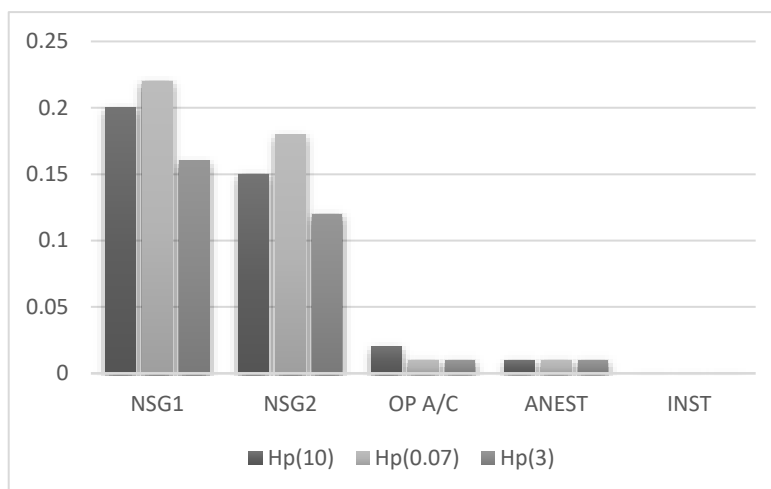


Figura 3

Representación gráfica de dosis recibida mediante dosímetro OUT en octubre



4.1.6 Dosis de radiación en función del procedimiento neuroquirúrgico de fusión cervical

Los parámetros técnicos registrados durante los procedimientos neuroquirúrgicos de fusión cervical anterior incluyeron el tipo de procedimiento, los niveles cervicales intervenidos, la duración de la fluoroscopia, el voltaje aplicado (kVp) y la corriente del tubo (mA), los cuales se presentan en la **Tabla 12**.

En dicha tabla se documentan procedimientos de discectomía y fusión cervical anterior (ACDF), artroplastias y corpectomías, realizados en distintos niveles cervicales, principalmente entre los niveles vertebrales C3 y C7. Los tiempos de fluoroscopia registrados variaron entre 0.3 y 2.1 minutos, según el procedimiento efectuado. En consecuencia, los valores de voltaje oscilaron entre 62 y 108 kVp, mientras que las corrientes del tubo se registraron entre 1.2 y 5.5 mA durante los distintos procedimientos evaluados.

Tabla 12

Características técnicas de los procedimientos neuroquirúrgicos de fusión cervical anterior realizados durante el periodo de estudio

Procedimiento	Niveles	Duración	Voltaje (Kv)	Ma
ACDF	2N	00.5min	78 Kvp	2.1mA
Artroplastia	2N+	01.0min	90Kvp	3.0mA
ACDF	4N+	02.1min	71Kvp	1.7mA
ACDF	3N+	01.0min	76Kvp	3.0mA
Artroplastia	3N+	00.7min	72Kvp	2.7mA
ACDF	2N+	01.4min	73Kvp	1.8mA
Corpectomía	2N+	00.8min	108Kvp	5.5mA
Artroplastia	1N	00.6min	70Kvp	3.5mA
Corpectomía	2N+	01.2min	74Kvp	1.9mA
ACDF	1N	00.3min	64Kvp	2.0mA
Artroplastia	2N	00.6min	66Kvp	1.43mA
ACDF	1N	00.3min	75Kvp	3.0mA
Artroplastia	1N	01.7min	62Kvp	1.2mA
ACDF	3N	01.3min	73Kvp	2.7mA
ACDF	2N+	0.7min	76Kvp	2.0mA
Artroplastia	1N	00.5min	69Kvp	3.4mA
ACDF	1N+	01.3min	78Kvp	3.2mA

Artroplastía	3N+	00.9min	72Kvp	2.7mA
--------------	-----	---------	-------	-------

Nota: En la columna *Niveles* se indica la cantidad de niveles vertebrales intervenidos durante cada procedimiento quirúrgico; la letra **N** hace referencia a *nivel vertebral*. Los valores acompañados del signo “+” corresponden a los procedimientos en los que se trabajó específicamente el nivel vertebral C6–C7 dentro de la cirugía. *Elaboración propia, (2025).*

A partir del procesamiento de los datos registrados, se obtuvieron los valores promedio (media aritmética) del tiempo de fluoroscopia, del voltaje aplicado y de la corriente del tubo, organizados según el tipo de procedimiento neuroquirúrgico, los cuales se presentan en la **Tabla 12A**.

Tabla 12A

Parámetros técnicos promedio (media aritmética) según tipo de procedimiento

Procedimiento	Tiempo promedio de fluroscopia (min)	kVp promedio	mA promedio
ACDF	0.99	73.78	2.39
Artroplastia	0.86	71.57	2.56
Corpectomía	1.00	91.00	3.70

Los valores promedio fueron calculados a partir de los registros con información completa de duración de fluoroscopia, voltaje (kVp) y corriente (mA). Elaboración propia (2025).

De tal manera, los datos registrados en las Tablas 12 y 12A describen las características técnicas de los procedimientos neuroquirúrgicos de fusión cervical anterior realizados durante el periodo de estudio, así como los valores promedio de los parámetros fluoroscópicos registrados según el tipo de procedimiento.

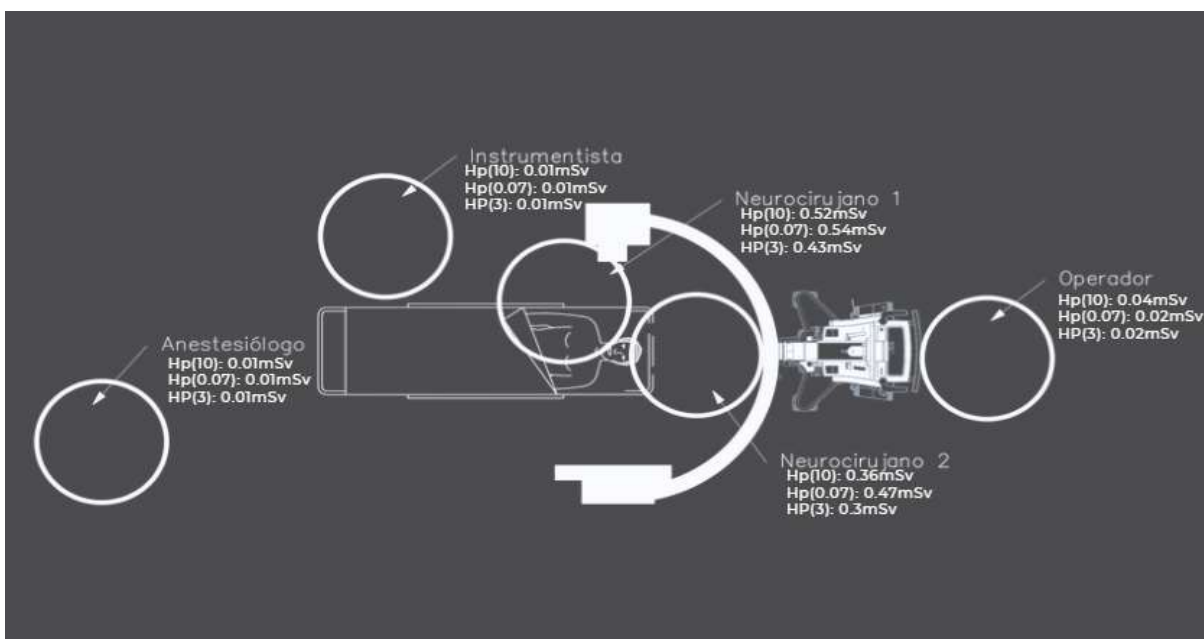
4.1.7 Distribución del personal y exposición ocupacional según rol profesional

A partir del análisis de la disposición del personal quirúrgico en el quirófano, se muestran los valores de dosis total acumulada registrados durante el periodo de estudio mediante el dosímetro colocado fuera del chaleco plomado (OUT) para cada rol profesional evaluado, tal como se observa en la **Figura 4**.

La ilustración representa la disposición habitual del personal quirúrgico en el quirófano durante los procedimientos de fusión cervical anterior con uso de arco en C, incluyendo a los médicos cirujanos, al operador del arco en C (licenciado en radiología), al médico anestesiólogo y al instrumentista. Asimismo, se incorporan los valores correspondientes a la dosis total acumulada registrada para cada rol profesional durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

Figura 4

Distribución del personal quirúrgico y dosis total registrada durante procedimientos de fusión cervical anterior con uso de arco en C.



Nota: La ilustración muestra la distribución del personal dentro del quirófano durante las cirugías de fusión cervical anterior. Los círculos representan la posición por cada profesional evaluado; Elaboración propia, (2025).

4.2. Discusión de los resultados

El presente estudio aporta información relevante sobre la exposición ocupacional a la radiación ionizante durante procedimientos neuroquirúrgicos de fusión cervical anterior con uso de arco en C. A partir de los registros obtenidos mediante dosímetros de cuerpo entero y de anillo, se describen las diferencias en la dosis recibida de acuerdo con el tejido evaluado, el tipo de procedimiento realizado y el rol profesional del personal presente en el quirófano, contrastando los resultados con la evidencia científica disponible y con los principios de protección radiológica establecidos en la literatura.

4.2.1 Discusión de la dosis absorbida en tejidos específicos según rol profesional tipo de dosímetro

A partir de los registros obtenidos mediante los dosímetros ubicados fuera (OUT) y dentro (IN) del chaleco plomado, así como mediante dosímetros de anillo, se identificaron diferencias en la distribución de la dosis de radiación en tejidos específicos de acuerdo con el rol profesional desempeñado durante las neurocirugías de fusión cervical anterior.

De acuerdo con los registros presentados en el apartado 4.1, los valores más altos de dosis registrados mediante el dosímetro OUT correspondieron a los médicos neurocirujanos, mientras que en el operador del arco en C, el médico anestesiólogo y el personal instrumentista se observaron valores menores o por debajo del mínimo reportable. Este comportamiento sugiere que las regiones corporales no protegidas directamente por el blindaje torácico, como la región cervical y cefálica, reciben mayores niveles de exposición en los profesionales que permanecen más próximos al campo de radiación durante el procedimiento.

En relación con los valores obtenidos mediante el dosímetro IN, estos se registraron predominantemente como PM (por debajo del mínimo reportable) en todos

los roles profesionales, lo que es consistente con la atenuación proporcionada por el chaleco plomado como medida de protección radiológica durante los procedimientos fluoroscópicos evaluados.

Desde el análisis de la dosis equivalente superficial en extremidades Hp(0.07), se identificaron valores más elevados en los médicos neurocirujanos, registrados mediante dosímetros de anillo, en comparación con los demás profesionales, en quienes no se utilizó este tipo de dosímetro. Este comportamiento es consistente con una mayor exposición de las extremidades superiores de los cirujanos durante estos procedimientos, asociada a la proximidad al campo quirúrgico y a la manipulación directa del instrumental bajo fluoroscopia.

Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura científica, donde se ha documentado que las manos del cirujano suelen recibir las mayores dosis durante procedimientos guiados por fluoroscopia, incluso cuando se emplean medidas de protección radiológica, debido a su cercanía al haz de radiación y a la radiación dispersa (Abosala et al., 2018).

Por otra parte, la dosis equivalente al cristalino Hp(3), los valores registrados mediante el dosímetro externo permiten discutir la exposición en la región cefálica, particularmente a nivel ocular. Los médicos neurocirujanos nuevamente presentaron los mayores registros en esta magnitud en comparación con los otros roles profesionales, patrón asociado a su permanencia cercana al campo de radiación durante el procedimiento, mientras que en el resto del personal los valores se mantuvieron bajos o por debajo del mínimo reportable.

En suma, los hallazgos obtenidos permiten identificar que, según el rol profesional, las regiones corporales con mayor exposición fueron las extremidades superiores y la región cervical y cefálica en los médicos cirujanos; la región corporal externa en el operador del arco en C; y una menor exposición global en el médico

anestesiólogo y el personal instrumentista, asociada principalmente a una mayor distancia respecto al haz de radiación.

4.2.2 Dosis de radiación en función del procedimiento neuroquirúrgico de fusión cervical

A partir de los resultados derivados del análisis de datos registrados, se presentaron variaciones durante los procedimientos neuroquirúrgicos de fusión cervical anterior con uso de arco en C en función del tipo de procedimiento realizado, los niveles cervicales intervenidos y los parámetros técnicos empleados, tal como se presenta en las Tablas 12 y 12A.

De acuerdo con los datos obtenidos, los procedimientos que involucraron múltiples niveles vertebrales y aquellos de mayor complejidad técnica registraron mayores tiempos de fluoroscopia, así como valores más elevados de voltaje (kVp) y corriente del tubo (mA), en comparación con procedimientos de menor extensión. Este comportamiento indica que la exposición ocupacional no depende únicamente de la duración global de la cirugía, sino del uso específico de la fluoroscopia requerido para la adecuada visualización intraoperatoria durante cada tipo de intervención.

Desde la perspectiva anatómica, los niveles cervicales inferiores, en especial entre las vértebras C6 y C7, localizadas en la porción inferior del cuello, marcan el límite anatómico entre el cuello y la región dorsal y coinciden con la altura de los hombros. Esta localización conlleva una mayor superposición de estructuras óseas y de tejidos blandos durante la adquisición fluoroscópica, lo que puede dificultar la visualización radiológica y favorecer la necesidad de ajustes repetidos del arco en C. En consecuencia, los procedimientos que involucraron niveles cervicales inferiores, como C6–C7, presentaron una mayor exigencia fluoroscópica, reflejada en mayores tiempos de fluoroscopia y en un incremento del número de activaciones del equipo durante el procedimiento.

Por consiguiente, estos resultados permiten discutir que la dosis de radiación ocupacional se relaciona con la interacción entre la técnica quirúrgica empleada, los niveles vertebrales comprometidos y los requerimientos de imagen intraoperatoria, más que con el tiempo quirúrgico total considerado de forma aislada.

Asimismo, los resultados obtenidos guardan concordancia con lo reportado en la literatura, donde se ha señalado que los procedimientos de cirugía de columna guiados por fluoroscopia que implican mayor complejidad técnica y niveles vertebrales inferiores tienden a requerir un uso más frecuente del arco en C, incrementando la exposición a la radiación del personal involucrado (Cristante et al., 2018).

4.2.3 Diferencias en la exposición ocupacional según el rol profesional

Las diferencias observadas en los valores de dosis acumulada durante los procedimientos neuroquirúrgicos de fusión cervical anterior con uso de arco en C reflejan variaciones en la exposición ocupacional en función del rol profesional desempeñado por el personal presente en el quirófano, de acuerdo con lo presentado en la Figura 4 y en la Tabla 2.

Los resultados indican que los médicos cirujanos presentaron las dosis más elevadas en comparación con el resto del personal evaluado. Esta mayor exposición se asocia con su ubicación constante en proximidad inmediata al campo quirúrgico y al paciente, así como con la necesidad de mantener las extremidades superiores y el tronco cercanos al área de irradiación durante el uso de la fluoroscopia, lo cual se reflejó en los valores registrados de dosis equivalente superficial en extremidades y de la dosis medida mediante el dosímetro externo (OUT).

En relación con las implicaciones, el componente predominante de la exposición ocupacional corresponde a la radiación dispersa originada en el paciente, quien actúa como fuente secundaria tras la interacción del haz primario con los tejidos,

siendo el efecto Compton el mecanismo de dispersión dominante en los rangos energéticos característicos de la fluoroscopia.

Igualmente, investigaciones previas han señalado que el cirujano principal concentra las mayores dosis ocupacionales durante procedimientos de cirugía de columna guiados por fluoroscopia, debido a su cercanía al campo de radiación y a la manipulación directa del instrumental (Watanabe et al., 2024; Godzik et al., 2020).

Al analizar las diferencias en la exposición a la radiación según el rol profesional, se observó que el licenciado en radiología, operador del arco en C, presentó valores de dosis inferiores a los registrados en los médicos cirujanos, pese a su participación directa en la manipulación del equipo. Esta diferencia puede atribuirse a la posibilidad de mantener una mayor distancia respecto al paciente durante la adquisición de imágenes y a su ubicación preferente del lado del detector, donde la intensidad de la radiación dispersa es menor.

En cambio, el médico anesthesiólogo y el personal instrumentista registraron las dosis acumuladas más bajas durante el periodo de estudio, lo cual es consistente con su ubicación habitual a mayor distancia del campo quirúrgico y del paciente, así como con una menor permanencia en las zonas de mayor dispersión durante las cirugías.

CONCLUSIONES

La presente investigación hizo posible conocer con mayor precisión la dosis de radiación que reciben los distintos profesionales que participan en procedimientos de neurocirugía de fusión cervical anterior con uso de arco en C, poniendo en evidencia que la exposición varía según el rol desempeñado por los médicos cirujanos, el médico anesthesiólogo, los licenciados en radiología y el personal asistencial.

Se determinó que las zonas corporales más expuestas a la radiación ionizante fueron principalmente las extremidades superiores, la región cervical y el cristalino del ojo, con valores más altos en los médicos cirujanos a partir de los registros de la dosis efectiva $H_p(10)$, dosis equivalente superficial $H_p(0.07)$ y dosis equivalente al cristalino $H_p(3)$, incluso considerando el uso de los equipos de protección radiológica implementado.

Al analizar estos resultados con los límites ocupacionales recomendados por los organismos internacionales de protección radiológica, que establecen un límite efectivo de 20 mSv anuales para trabajadores expuestos (equivalente a aproximadamente 1.67 mSv mensuales) y con el valor de referencia institucional de 1.5 mSv mensuales del Hospital Pacífica Salud, se encontró que las dosis registradas se mantienen dentro de los márgenes de seguridad aceptados para la exposición ocupacional. Asimismo, desde el punto de vista normativo panameño, estos hallazgos se encuentran en concordancia con lo establecido en el Decreto Ejecutivo N° 770 de 2010 y con los lineamientos técnicos de la Norma Básica 110 para el personal ocupacionalmente expuesto.

En relación con el tipo de procedimiento, se definió la dosis de radiación recibida en función al procedimiento neuroquirúrgico, el cual mostró variaciones según la complejidad de la intervención. Se evidenciaron dosis más elevadas en procedimientos que abarcaron múltiples niveles cervicales, especialmente en las

corpectomías y en las fusiones a nivel de las vértebras C6–C7, en comparación con otros tipos de cirugía evaluados.

Sin embargo, al analizar las diferencias en la exposición a la radiación entre médicos cirujanos, licenciados en radiología y personal asistencial, se concluye que la posición relativa de cada profesional respecto al paciente, al tubo de rayos X y al detector de imagen influye de manera directa en la magnitud de la dosis recibida. En este sentido, la proximidad al paciente y la ubicación en relación con el sistema emisor–receptor del arco en C se confirman como factores determinantes de la exposición ocupacional en procedimientos neuroquirúrgicos guiados por fluoroscopia. Esto refuerza la necesidad de planificar y optimizar la distribución del personal dentro del quirófano, así como de aplicar de manera constante las medidas de protección radiológica para reducir la exposición.

Estos resultados demuestran la importancia de aplicar de forma sistemática el principio de optimización de la protección radiológica (ALARA) en este tipo de intervenciones, de modo que la práctica clínica se oriente a ajustar y optimizar los parámetros técnicos sin comprometer la calidad de la imagen requerida para la seguridad del procedimiento.

Este estudio se sitúa dentro de un nivel de investigación de vigilancia, ya que aporta información clave para el seguimiento sistemático de la exposición ocupacional a la radiación ionizante en procedimientos neuroquirúrgicos guiados por fluoroscopia. En consecuencia, los resultados obtenidos respaldan la necesidad de fortalecer los programas de vigilancia dosimétrica, la capacitación continua del personal y la supervisión periódica del cumplimiento de las medidas de protección radiológica, de la mano con la normativa panameña vigente y con los estándares internacionales de seguridad radiológica.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda fortalecer la vigilancia dosimétrica ocupacional del personal que participa en procedimientos de neurocirugía de fusión cervical anterior con uso de arco en C, garantizando el uso sistemático y adecuado de dosímetros de cuerpo entero y dosímetros de anillo, especialmente en los médicos cirujanos y en el operador del equipo de fluoroscopia, quienes registraron mayores niveles de exposición a la radiación ionizante.

Asimismo, se sugiere optimizar las prácticas fluoroscópicas intraoperatorias mediante el uso adecuado de la colimación, la correcta selección de los parámetros técnicos del equipo y la ubicación apropiada del arco en C, con el propósito de minimizar la exposición ocupacional a la radiación ionizante durante los procedimientos neuroquirúrgicos, sin comprometer la calidad de la imagen requerida para la seguridad del acto quirúrgico.

De igual manera, se recomienda reforzar el uso correcto, constante y adecuado de los equipos de protección radiológica, tales como chalecos plomados preferiblemente de 0.5mm, protectores tiroideos y gafas plomadas, particularmente en el personal que se ubica en mayor proximidad al campo de radiación, con el fin de reducir la dosis recibida en regiones corporales radiosensibles como la tiroides, el cristalino y las extremidades superiores.

Al mismo tiempo, se sugiere implementar y fortalecer programas de capacitación continua en protección radiológica dirigidos al equipo quirúrgico y al personal asistencial, orientados a la aplicación de los principios de optimización de la dosis (ALARA) y a la concientización sobre la distribución de la exposición ocupacional dentro del quirófano, promoviendo prácticas seguras en el uso de la fluoroscopia. Es importante que todo el personal de salud involucrado en procedimientos que requieren el uso del arco en C adopte medidas orientadas a minimizar la exposición ocupacional a la radiación ionizante. Entre estas medidas se destacan la optimización del tiempo

de fluoroscopia, el mantenimiento de una distancia adecuada respecto a la fuente de radiación y la correcta utilización de los implementos de protección radiológica.

Por otra parte, resulta fundamental que el personal encargado del manejo del arco en C cuente con la capacitación necesaria para su uso adecuado, incluyendo la correcta selección de parámetros técnicos, la adecuada colimación del haz de radiación y el posicionamiento apropiado del intensificador de imágenes. La correcta aplicación de estas medidas contribuye significativamente a disminuir la dosis de radiación recibida por el personal de salud durante los procedimientos, favoreciendo así condiciones más seguras dentro del quirófano.

Como seguimiento de esta actividad, se recomienda fomentar el desarrollo de estudios dosimétricos futuros que incluyan un mayor número de procedimientos, periodos de seguimiento más prolongados y la evaluación de distintas técnicas neuroquirúrgicas, con el propósito de ampliar la evidencia científica disponible sobre la exposición ocupacional a la radiación ionizante en procedimientos guiados por fluoroscopia y fortalecer los programas de vigilancia radiológica en el ámbito quirúrgico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abosala A. (2018). A Report on Occupational Ionizing Radiation Exposure by an Orthopedic Surgeon in a National Health-care Setting - Clinical Case Perspective. *Journal of orthopaedic case reports*, 8(3), 81–84. <https://doi.org/10.13107/jocr.2250-0685.1122>
- Allen, C. M. (2022). Production and Properties of X-Rays. Umsystem.pressbooks.pub. <https://umsystem.pressbooks.pub/digitalradiographicexposure/chapter/production-and-properties-of-x-rays/>
- Amber Diagnostics. (2022, February 16). C-Arm, Fluoroscopy and Image Acquisition | Amber Diagnostics. www.amberusa.com. <https://www.amberusa.com/blog/c-arm-fluoroscopy-and-image-acquisition>
- Assmus, A. (1995). Early History of X Rays. <https://www.semanticscholar.org/paper/Early-History-of-X-Rays-Assmus/d1b64c16d76fb51220a2c84f8e66e0efa747432c>
- Azzam, E. I., Jay-Gerin, J.-P., & Pain, D. (2012). Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Letters*, 327(1-2), 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2011.12.012>
- Badash, L. (2025). Henri Becquerel. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/biography/Henri-Becquerel>
- Britannica Editors. (2025). Marie Curie | Biography & Facts. In *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/biography/Marie-Curie>
- Britannica. (2018). Marie Curie | Biography & Facts. In *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/biography/Marie-Curie>
- Burton, M. (2017). Radiation - Historical background. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/radiation/Historical-background>
- Busch, U. (2016). Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos x y la creación de una nueva profesión médica. *Revista Argentina de Radiología*, 80(4), 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.rard.2016.08.003>
- Bushong, S. C. (2013). *Radiologic science for technologists: physics, biology, and protection* (10th ed.). Elsevier.

- Bushong, S. C. (2021). *RADIOLOGIC SCIENCE FOR TECHNOLOGISTS: Physics, Biology, and Protection*. (12th ed.). Elsevier Mosby.
- Cristante, A. F., Barbieri, F., da Silva, A. A. R., & Dellamano, J. C. (2019). RADIATION EXPOSURE DURING SPINE SURGERY USING C-ARM FLUOROSCOPY. *Acta ortopedica brasileira*, 27(1), 46–49. <https://doi.org/10.1590/1413-785220192701172722>
- Dbarboni. (2023, April 18). Then and Now: The Evolution of Mobile Medical Imaging. Globus Medical. <https://www.globusmedical.com/excelsius-technology/then-and-now-the-evolution-of-mobile-medical-imaging/>
- Duffin, J., & Hayter, C. R. (2000). Baring the sole. The rise and fall of the shoe-fitting fluoroscope. *Isis; an international review devoted to the history of science and its cultural influences*, 91(2), 260–282. <https://doi.org/10.1086/384721>
- Dwivedi, K. (2025, February 11). Posture, X-Rays & Beauty Queens: The Forgotten History of Chiropractic Pageants. SheThePeople. https://www.shethepeople.tv/lifestyle/chiropractic-pageants-when-beauty-pageants-focused-on-posture-8695344?utm_source=chatgpt.com
- Falavigna, A., Ramos, M. B., Iutaka, A. S., Menezes, C. M., Emmerich, J., Taboada, N., & Riew, K. D. (2018). Knowledge and Attitude Regarding Radiation Exposure Among Spine Surgeons in Latin America. *World neurosurgery*, 112, e823–e829. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.01.166>
- Frane, N., & Bitterman, A. (2023). Radiation Safety and Protection. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK557499/>
- Godzik, J., Mastorakos, G. M., Nayar, G., Hunter, W. D., & Tumialán, L. M. (2020). Surgeon and staff radiation exposure in minimally invasive spinal surgery: Prospective series using a personal dosimeter. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 32(6), 817–823. <https://doi.org/10.3171/2019.11.SPINE19448>
- Gonzalez, A. (2025, September 2). Pacífica Salud - Lo más valioso eres tú. Pacífica Salud. <https://www.pacificasalud.com/>
- Guangzhou MeCan Medical Limited. (2023, July 18). Flat Panel Detector: Advantages and Applications. Medicalxraymachine.com; Guangzhou MeCan Medical

- Limited. <https://www.medicalxraymachine.com/news/flat-panel-detector-advantages-applications-69389711.html>
- Hancox, J., & Murphy, A. (2018b). Thomas Edison. Radiopaedia.org. <https://doi.org/10.53347/rid-61491>
- Henri Becquerel. (2023). New World Encyclopedia. https://www.newworldencyclopedia.org/p/index.php?title=Henri_Becquerel
- IAEA. (2001). Investigation of an Accidental Exposure of Radiotherapy Patients in Panama. <https://www.iaea.org/publications/6391/investigation-of-an-accidental-exposure-of-radiotherapy-patients-in-panama>
- IAEA. (2014). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. In International Atomic Energy Agency eBooks. <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>
- IAEA. (2016). Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación. <https://www.iaea.org/es/publications/10812/proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion-normas-basicas-internacionales-de-seguridad>
- Ibáñez, B., Melero, A., Montoro, A., San Onofre, N., & Soriano, J. M. (2024). Molecular Insights into Radiation Effects and Protective Mechanisms: A Focus on Cellular Damage and Radioprotectors. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(11), 12718–12732. <https://doi.org/10.3390/cimb46110755>
- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- ICRP. (2023). https://www.icrp.org/consultation_viewitem.asp?guid=%7B1EB0E0EC-7B17-4E72-A5E0-E10330264E62%7D
- Joshua Adam Tarrence. (2020, April 17). Radiation Biology and Safety. Radiology Key. <https://radiologykey.com/radiation-biology-and-safety/>
- King, G. (2012, March 14). Clarence Dally — The Man Who Gave Thomas Edison X-Ray Vision. Smithsonian Magazine. <https://www.smithsonianmag.com/history/clarence-dally-the-man-who-gave-thomas-edison-x-ray-vision-123713565/>

- Kouyoumdjian, P., Guillaume Gras-Combe, Mickael Grelat, Fuentes, S., Blondel, B., Tropiano, P., Fahed Zairi, Beaurain, J., Yann Philippe Charles, Alexandre Dhenin, Elfertit, H., Julien Le Roy, Joël Greffier, & Lonjon, N. (2018). Surgeon's and patient's radiation exposure during percutaneous thoraco-lumbar pedicle screw fixation: A prospective multicenter study of 100 cases. *ELSEVIER*, 104(5), 597–602. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.05.009>
- Laughlin, J. M. (2025). The Linear No Threshold (LNT) Model and Its Impact on Radiation Protection Policies at Low Doses. *Radiation Environment and Medicine*, 14(1), 44. https://doi.org/10.51083/radiatenviroinmed.14.1_44
- López, M., & Martín, M. (2011). Medical management of the acute radiation syndrome. *Reports of practical oncology and radiotherapy: journal of Greatpoland Cancer Center in Poznan and Polish Society of Radiation Oncology*, 16(4), 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2011.05.001>
- Mahajan, A., Samuel, S., Saran, A. K., Mahajan, M. K., & Mam, M. K. (2015). Occupational radiation exposure from C arm fluoroscopy during common orthopaedic surgical procedures and its prevention. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*, 9(3), RC01–RC4. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2015/10520.5672>
- Martins, K. (2024, 19 julio). Discovery of X-Rays. *World History Encyclopedia*. <https://www.worldhistory.org/article/2497/discovery-of-x-rays/>
- Ministerio de Salud Panamá. (2016). Departamento de Salud Radiológica | Ministerio de Salud de la República de Panamá. [Minsa.gob.pa. https://www.minsa.gob.pa/informacion-salud/departamento-de-salud-radiologica.](https://www.minsa.gob.pa/informacion-salud/departamento-de-salud-radiologica)
- Mould, R. F. (1995). *A Century of X-rays and Radioactivity in Medicine: With Emphasis on Photographic Records of the Early Years*. CRC Press. Royale, S. *A Century of X-rays and Radioactivity in Medicine With Emphasis on Photographic Records of the Early Years*.
- Muñoz Páez, A. (2013). Marie Sklodowska-Curie y la radioactividad. *Educación Química*, 24(2), 224–228.

- https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2013000200007
- NCR. (2024, March 28). Backgrounder on the Three Mile Island Accident. United States Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle>
- Nelson, E. M., Monazzam, S. M., Kim, K. D., Seibert, J. A., & Klineberg, E. O. (2014). Intraoperative fluoroscopy, portable X-ray, and CT: Patient and operating room personnel radiation exposure in spinal surgery. *The Spine Journal*, 14(12), 2985–2991. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2014.06.003>
- Ono, K., Takafumi Kumasawa, Keiichi Shimatani, Masatoshi Kanou, Yamaguchi, I., & Naoki Kunugita. (2022). Radiation Dose Distribution of a Surgeon and Medical Staff during Orthopedic Balloon Kyphoplasty in Japan. *Journal of Radiation Protection and Research*, 47(2), 86–92. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2021.00304>
- Organización Mundial de la Salud. (2013, February 28). Informe mundial sobre los riesgos del accidente nuclear de Fukushima para la salud. Who.int; World Health Organization: WHO. <https://www.who.int/es/news/item/28-02-2013-global-report-on-fukushima-nuclear-accident-details-health-risks>
- Ou, X., Chen, X., Xu, X., Xie, L., Chen, X., Hong, Z., Bai, H., Liu, X., Chen, Q., Li, L., & Yang, H. (2021b). Recent Development in X-Ray Imaging Technology: Future and Challenges. *Research*, 2021(9892152), 1–18. <https://doi.org/10.34133/2021/9892152>
- Perkins, S. (2022, November 22). Thermoluminescent Dosimeter [TLD] - Everything You Need to Know. Radiation Detection Company. <https://radetco.com/thermoluminescent-dosimeter-tld-everything-you-need-to-know/>
- Rincon Educativo. (2024, December 9). Marie Curie, una vida dedicada al estudio de la radiactividad - Rincón educativo. Rincón Educativo. <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/marie-curie-vida-dedicada-radiactividad/>


- Rydén, J. (2025, April 29). MARIE CURIE - NobelPrize.org. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/stories/women-who-changed-science/marie-curie/>
- Sakamoto-Hojo E. T. (2018). Lessons from the accident with ¹³⁷Cesium in Goiania, Brazil: Contributions to biological dosimetry in case of human exposure to ionizing radiation. *Mutation research. Genetic toxicology and environmental mutagenesis*, 836(Pt A), 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.05.019>
- Sansare, K., Khanna, V., & Karjodkar, F. (2011). Early victims of X-rays: a tribute and current perception. *Dento maxillo facial radiology*, 40(2), 123–125. <https://doi.org/10.1259/dmfr/73488299>
- Sertac Kirnaz, Gebhard, H., Wong, T., Raj Nangunoori, Schmidt, F., Sato, K., & Härtl, R. (2021). Intraoperative image guidance for cervical spine surgery. 9(1), 93–93. <https://doi.org/10.21037/atm-20-1101>
- Sugawara T. (2015). Anterior Cervical Spine Surgery for Degenerative Disease: A Review. *Neurologia medico-chirurgica*, 55(7), 540–546. <https://doi.org/10.2176/nmc.ra.2014-040353>. United Nations. (2005). The Chernobyl Accident. United Nations: Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; United Nations. <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/chernobyl.html>
- Ubeda de la C, C., Nocetti G. , D., Inzulza C. , A., Oyarzún C. , C., Alarcón E. , R., Ubeda de la C, C., Nocetti G. , D., Inzulza C. , A., Oyarzún C. , C., & Alarcón E. , R. (2018). Magnitudes y unidades para dosimetría del personal ocupacionalmente expuesto en radiodiagnóstico e intervencionismo. *Revista Chilena de Radiología*, 24(1), 5–11. <https://doi.org/10.4067/S0717-93082018000100005>
- United States Environmental Protection Agency. (2024, October 2). Radiation health effects. <https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects>
- UNSCEAR. (2023). The Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Accident: An overview. United Nations: Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/fukushima.html>
- Watanabe, S., Nakanishi, K., Mura, M., Yutori, A., Hitomi, G., Uchino, K., Iba, H., Sugimoto, Y., & Mitani, S. (2024). Investigation of Radiation Exposure of Medical

- Staff During Lateral Fluoroscopy for Posterior Spinal Fusion Surgery. *Journal of Clinical Medicine*, 13(21), 6442. <https://doi.org/10.3390/jcm13216442>
- Willie, G. (2023, August 2). Lágrimas de sangre: el lento y cruel final del hombre “más radioactivo” del mundo. *LA NACION*. <https://www.lanacion.com.ar/el-mundo/lagrimas-de-sangre-el-lento-y-cruel-final-del-hombre-mas-radioactivo-del-mundo-nid04072021/>
- World Health Organization. (2011, April 23). Radiation: The Chernobyl accident. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-chernobyl-accident>
- World Health Organization. (2013, August 11). Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation. [Www.who.int. https://www.who.int/publications/i/item/9789241505130](https://www.who.int/publications/i/item/9789241505130)
- World Health Organization. (2023, July 27). Ionizing radiation and health effects. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects>
- Zaid Al-Kaylani, A. H. A., Schuurmann, R. C. L., Maathuis, W. D., Slart, R. H. J. A., De Vries, J. P. M., & Bokkers, R. P. H. (2022). Clinical Applications of Quantitative Perfusion Imaging with a C-Arm Flat-Panel Detector-A Systematic Review. *Diagnostics* (Basel, Switzerland), 13(1), 128. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13010128>



Anexo 2. Presupuesto

No.	Concepto	Cantidad o Unidad	Valor (B/.)
	Costos del proyecto	-	-
	Personal:		
	Asesorías	15	0.00
	Encuentros	10	0.00
	Costos de oficina:		
	Conexión a internet	11	
	Fotocopias	1	0.00
	Elementos de consumo:		
	Resaltadores	3	2.50
	Bolígrafo	5	2.50
	Inversión:		
	Dosímetros		
	• Cuerpo entero	9	396.00
	• Anillo	2	102.00
	Otros:		
	Revisión de comité de bioética	1	25.00
	Imprevistos y gastos administrativos:	1	100.00
	<i>[Imprevistos y administración; alrededor del 10-20% del total; añade estos rubros si aplica]</i>		
	Valor total en Balboas (B/.)		628.00

Anexo 3. Inscripción proyecto

	COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y EXTESIÓN	
	Inscripción Propuesta Trabajo de Grado FR-INE-01	Fecha: 25- Abril de 2017 2016
	Versión 0.0	Página 1 de 1

INSCRIPCIÓN DE PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

1. Título del Proyecto:	Dosis de radiación en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C.
2. Facultad	Ciencias de la salud
3. Programa:	Licenciatura en radiología e imágenes diagnósticas
4. Unidad Ejecutora:	Universidad Santander
5. Director Técnico del Estudio:	Lcdo. Juan de Dios Márquez
6. Asesor Metodológico:	Margot Carrillo
7. Investigador (es):	Henry Low, Anthony Marrugo y Valerie Verbel.
Nombre:	Henry Low
Correo Electrónico:	hlow@mail.usantander.edu.pa
Número telefónico:	6881-5596
Nombre:	Anthony Marrugo
Correo Electrónico:	amarrugo@mail.usantander.edu.pa
Número telefónico:	6757-1562
Nombre:	Valerie Verbel
Correo Electrónico:	vverbel@mail.usantander.edu.pa
Número telefónico:	6955-5937
8. Duración del Proyecto:	4 meses
9. Fecha Probable de Inicio:	Junio 2025
10. Fecha Probable de Terminación:	Septiembre 2025
11. Fecha de Aprobación de la Coordinación de Investigación:	22 de mayo de 2025
12. Código del Proyecto:	LRID-2025-05-114
13. Firma Vicerrector investigación o Coordinador de Investigación	
14. Firma coordinador programa:	

Anexo 4. Carta de aval o de no objeción



Boulevard Pacífica y Vía Punta Dardón, Panamá
+ (507) 204-8000 / info@pacificasalud.com
pacificasalud.com

Ciudad de Panamá, mayo 08, 2025

Mgts. Juan de Dios Márquez
Coordinador de la licenciatura en Radiología e imágenes diagnósticas
Universidad de Santander


Reciban un cordial saludo.

Por medio de la presente, y en atención a la solicitud recibida, hacemos constar que el **Hospital Pacífica Salud no tiene objeción** en que los estudiantes **Valerie Verbel** CIP: 8-1006-257, **Anthony Marrugo** CIP: 8-1009-639 y **Henry Low** CIP: 8-777-2325, realicen su proyecto de grado titulado: **"Dosis de radiación en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C."**

Dicho proyecto se llevará a cabo dentro del grupo quirúrgico de **Brain & Spine Specialist** en nuestras instalaciones, durante un período estimado de tres meses, y contará con el respectivo aval del Comité de Bioética Institucional de su universidad.

Agradecemos que se mantenga una comunicación constante durante el desarrollo del estudio, cumpliendo con las normativas y protocolos establecidos por nuestra institución. Sin más, reiteramos nuestra disposición de colaboración en iniciativas académicas e investigativas que fomenten el desarrollo profesional.

Atentamente,


Dr. Antonio Cachafeiro
Director Médico
Hospital Pacífica Salud


DIRECCIÓN MÉDICA



Anexo 5. Registro Resegis

**Ministerio de salud - Proyecto
registrado en plataforma RESEGIS****Lic. Valerie Michelle
Verbel Doubleday**

Hemos recibido su solicitud referente al protocolo de investigación:

Dosis de radiación en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C.

Su protocolo ha sido incluido en el registro de protocolos de investigación para la salud. **Registro número 4435**

Anexo 6. Instrumento

Fecha	Procedimiento	Duración	Voltaje (Kv)	mA
14/08/25	ACDF C3-C4 C4-C5	00.5min	78 Kvp	2.1mA
14/08/25	Artroplastia C5-C6 C6-C7	01.0min	90Kvp	3.0mA
15/08/25	ACDF C3-C4 C4-C5 C5-C6 C6- C7	02.1min	71Kvp	1.7mA
15/08/25	ACDF C4-C5 C5-C6 C6-C7	01.0min	76Kvp	3.0mA
16/08/25	Artroplastia C4-C5 C5-C6 C6-C7	00.7min	72Kvp	2.7mA
22/08/25	ACDF C5-C6 C6-C7	01.4min	73Kvp	1.8mA
28/08/25	Corpectomía C5-C6 C6-C7	00.8min	108Kvp	5.5mA
29/08/25	Artroplastia C5-C6	00.6min	70Kvp	3.5mA
18/09/25	Corpectomía C5-C6 C6-C7	01.2min	74Kvp	1.9mA
22/09/25	ACDF C5-C6	00.3min	64Kvp	2.0mA
29/09/25	Artroplastia C4-C5 C5-C6	00.6min	66Kvp	1.43mA
29/09/25	ACDF C5-C6	00.3min	75Kvp	3.0mA
05/10/2025	Artroplastía C3-C4	01.7min	62Kvp	1.2mA

05/10/2025	ACDF C3-C4 C4-C5 C5-C6	01.3min	73Kvp	2.7mA
08/10/2025	ACDF C5-C6 C6-C7	0.7min	76Kvp	2.0mA
27/10/2025	Artroplastia C5-C6	00.5min	69Kvp	3.4mA
28/10/2025	ACDF C6-C7	01.3min	78Kvp	3.2mA
28/10/2025	Artroplastia C4-C5 C5-C6 C6-C7	00.9min	72Kvp	2.7mA

Dosis total recibida en 3 meses			
Participante	Dosímetro 1	Dosímetro 2	Dosímetro Anillo
NSG1	PM	0.52mSv	1.76mSv
NSG2	PM	0.36mSv	2.23mSv
A/C	PM	0.04mSv	
A	PM	0.01mSv	
I		0.01mSv	

Anexo 7. Carta de aprobación Comité Bioética (en caso de estudios con seres humanos o archivos institucionales)



CBI-USantander-M- 091- 2025

Panamá, 16 de julio de 2025.

MEMORANDO

**Para: Henry Low,
Anthony Marrugo
Valerie Verbel**
Investigadores Principales.



De: Dra. Iliana Ceballos.
Presidente Ad-hoc del Comité de Bioética de la Investigación

Asunto: Consideraciones sobre protocolo revisado

En reunión ordinaria del 23 de junio 2025 del Comité de Bioética de la Investigación de la Universidad Santander Panamá se discutieron los documentos del protocolo: **"Dosis de radiación en neurocirugías de fusión cervical anterior con uso de arco en C en el Hospital Pacífica Salud, Ciudad de Panamá, julio a octubre de 2025"**. Y se decide aprobar con correcciones menores, mismas que se completaron el 03 de julio de 2025.

Los Miembros del Comité de Bioética de la Investigación deciden entonces:

<input checked="" type="checkbox"/> Aprobar	<input type="checkbox"/> Solicitud de Modificaciones
<input type="checkbox"/> Suspender para correcciones	<input type="checkbox"/> Denegar

Anexo 8: Carta revisión profesor español y Diploma

Panamá, 15 de Enero de 2026

Señores

COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADO

Universidad de Santander

Ciudad

Saludo cordial,

Certifico que a los estudiantes: HENRY LOW, con identificación 8-777-2325; ANTHONY MARRUGO, con identificación 8-1009-639 y VALERIE VERBEL con identificación 8-1006-257 respectivamente, se les ha revisado el Trabajo de Grado Titulado: DOSIS DE RADIACIÓN EN NEUROCIRUGÍAS DE FUSIÓN CERVICAL ANTERIOR CON USO DE ARCO C.

Doy fe que el trabajo cumple con todas las exigencias de redacción y ortografía del idioma español.

Atentamente,

Tania Yanez

Profesor (a) de español

Cédula: 8-361-31

REPÚBLICA DE PANAMÁ
TRIBUNAL ELECTORAL

Irma Yannet
Good Paz

||| P
A
N
A
M
A
|||



8-361-31

NOMBRE USUAL:
FECHA DE NACIMIENTO: **06-MAR-1970**
LUGAR DE NACIMIENTO: **PANAMÁ, PANAMÁ**
SEXO: **F** TIPO DE SANGRE:
EXPEDIDA: **22-OCT-2019** EXPIRA: **22-OCT-2029**



Irma Yannet Good P.

