REVISTA INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Estimación retrospectiva de exposición ocupacional en radiología intervencionista a partir de la información registrada en un sistema de gestión de dosis en pacientes

Retrospective estimation of occupational exposure in interventional radiology from information recorded in a patient dose management system

Deivid Orlando López[1], María Esperanza Castellanos[1], Jorge Alberto Cifuentes[2]

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 8, 2026

Recibido: 30 de junio de 2026

Aceptado: 28 de agosto de 2026

Publicado en línea: 15 de octubre de 2026

DOI: https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.8.2026.776

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: D. O. Lopez, M. E. Castellanos, y J. A. Cifuentes, «Estimación retrospectiva de exposición ocupacional en radiología intervencionista a partir de la información registrada en un sistema de gestión de dosis en pacientes», *rev. investig. apl. nucl.*, n.º 8, oct. 2026.

Resumen

La dosimetría personal en radiología intervencionista informa la dosis mensual integrada acumulada, pero no permite identificar qué procedimientos, configuraciones angulares o condiciones de trabajo explican la exposición ocupacional. Se desarrolló una metodología para estimar la exposición ocupacional mensual de los médicos especialistas que realizan el procedimiento a partir de la información registrada en el sistema de gestión de dosis en pacientes XRDOSE, registros institucionales de procedimientos y dosimetría personal, configuraciones de irradiación, y mediciones de niveles ambientales de dosis. Se analizaron 1539 estudios de angiografía, con 50516 eventos de irradiación - definidos como activaciones continuas del equipo de rayos X - sin excluir modos ni imágenes rechazadas. La priorización identificó procedimientos y médicos especialistas con alta frecuencia de estudios, y alto producto dosis-área (DAP) acumulado mediante la intersección de los grupos que cubrían al menos el 80 % de ambas variables (criterio P80-P80). Los médicos especialistas retenidos conformaron la subcohorte utilizada para identificar las configuraciones de irradiación. En este grupo, 37011 eventos de irradiación ocuparon 5449 pares angulares exactos, agrupados en 137 configuraciones repetidas mediante intervalos de ±5°; se seleccionaron nueve intervalos representativos, con 94.0 % de los eventos a menos de 20° de alguno de ellos. En 17 condiciones de irradiación, un fantoma de 20 cm de agua sólida simuló al paciente; las mediciones se realizaron

[1] Maestría en Física Médica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

[2] Hospital Universitario San Ignacio, Bogotá, Colombia

con detectores situados a alturas representativas de los dosímetros de tórax y cristalino de los médicos especialistas. Se evaluaron cinco modelos, entendidos como relaciones matemáticas multiplicativas entre las series mensuales calculadas y la dosimetría reportada. El modelo retenido incorporó un factor individual por médico especialista para $H_p(10)$ y otro para $H_p(3)$, con $RMSE^{(10)} = 0.134$, $RMSE^{(3)} = 0.149$ y puntaje promedio S = 0.141. Se usaron dosímetros fijos de referencia instalados en los arcos en C. La comparación entre sus dosis mensuales estimadas y reportadas alcanzó una correlación de 0.838. Los resultados muestran que la información del sistema de gestión de dosis en pacientes, principalmente el DAP, integrada con la frecuencia de estudios, las configuraciones de irradiación, las mediciones en condiciones seleccionadas y los factores individuales, permite estimar de manera retrospectiva la exposición ocupacional mensual de los médicos especialistas.

Palabras clave: radiología intervencionista, dosimetría personal, $H_p(10)$, $H_p(3)$, producto dosis-área, sistema de gestión de dosis en pacientes.

Abstract

Personal dosimeters in interventional radiology report the cumulative monthly integrated dose but cannot identify which procedures, angular configurations, or working conditions explain occupational exposure. A methodology was developed to estimate monthly occupational exposure of medical specialists from information recorded in the XRDOSE patient dose management system, institutional procedure records and personal dosimetry, irradiation configurations, and environmental dose measurements. A total of 1,539 angiography studies were analyzed, involving 50,516 irradiation events—defined as continuous activations of the X-ray equipment—without excluding any modes or rejected images. Prioritization identified procedures and medical specialists with both high study frequency and high cumulative dose-area product (DAP) by intersecting the groups that covered at least 80% of each variable (P80-P80 criterion). The retained medical specialists formed the subcohort used to identify irradiation configurations and perform the monthly analysis. Within this group, 37,011 irradiation events occupied 5,449 exact angular pairs, which were grouped into 137 repeated configurations using ±5° intervals; nine representative intervals were selected, with 94.0% of irradiation events located within 20° of one of them. Under 17 irradiation conditions, a 20 cm solid-water phantom simulated the patient. Measurements were obtained with detectors positioned at heights representative of the medical specialists' chest and eye-lens dosimeters. Five models were evaluated as multiplicative mathematical relationships between calculated monthly series and reported dosimetry. The retained model incorporated one medical-specialist-specific factor for $H_p(10)$ and another for $H_p(3)$, with $RMSE^{(10)} = 0.134$, $RMSE^{(3)} = 0.149$, and mean score S = 0.141. Fixed reference dosimeters installed on the C-arms were also used. Comparison between their estimated and reported monthly doses yielded a correlation of 0.838. These results show that information from a patient dose management system, mainly DAP, can support retrospective estimation of monthly occupational exposure when integrated with study frequency, irradiation configurations, measurements under selected conditions, and individual factors.

Keywords: interventional radiology, personal dosimetry, $H_p(10)$, $H_p(3)$, dose-area product, patient dose management system.

Introducción

La radiología intervencionista comprende procedimientos diagnósticos y terapéuticos guiados por imagen, durante los que el médico especialista permanece en proximidad al paciente y al campo de radiación. La exposición ocupacional proviene principalmente de la radiación dispersada por el paciente y varía con la carga de trabajo, la geometría del arco en C, la distancia y el uso de protección [2], [4]. En esta práctica, la lectura mensual del equivalente de dosis personal a 10 mm, $H_p(10)$, y del equivalente de dosis personal a 3 mm, $H_p(3)$, resume la exposición acumulada durante el periodo de uso del dosímetro, pero no permite identificar la contribución de cada procedimiento, configuración geométrica, distancia al paciente, posición del médico que realiza el procedimiento o si existe uso de protección. Esta limitación es relevante porque las magnitudes operacionales proporcionan estimaciones para la vigilancia de la exposición externa del personal expuesto y se relacionan con magnitudes limitadoras de protección radiológica, que no se miden directamente durante la práctica clínica [1], [2].

La exposición ocupacional del cristalino ha cobrado especial relevancia. En cardiología intervencionista se han reportado opacidades del cristalino asociadas con la irradiación del personal, con diferencias respecto al personal no expuesto [3]. La relación entre dosis ocupacional y carga de trabajo no es universal: la exposición depende de la especialidad, la proyección, el tamaño de campo, la técnica, la distancia y la protección [4], [5], [6]. Estudios recientes han usado registros del equipo o sistemas de gestión de dosis en pacientes para estimar exposición ocupacional, pero coinciden en que los datos técnicos requieren información local de la práctica, la posición y la configuración de irradiación para aproximarse a la lectura individual [7], [8].

En protección radiológica, los niveles de referencia diagnósticos se establecen a partir de distribuciones de dosis en grupos de pacientes y se emplean para optimizar las exposiciones médicas, no para evaluar exposiciones individuales [9]. De manera análoga, una estimación ocupacional retrospectiva basada en un sistema de gestión de dosis en pacientes debe interpretarse como una herramienta de trazabilidad y análisis comparativo de situaciones particulares que ameriten investigación, no como reemplazo de la dosimetría personal reglamentaria; puede apoyar, por ejemplo, la investigación de una lectura atípica, la reconstrucción de un periodo cuando se pierde un dosímetro o la revisión de discrepancias entre la carga de trabajo y la dosis reportada. El objetivo de este trabajo fue establecer una metodología para estimar la exposición ocupacional mensual de los médicos especialistas en radiología intervencionista a partir de la información retrospectiva del sistema de gestión de dosis en pacientes, mediciones de niveles ambientales de dosis y dosimetría personal.

Materiales y métodos

1. Cohorte, fuentes de información y calidad de datos

El estudio fue retrospectivo y se limitó a procedimientos de angiografía por rayos X (XA) registrados en dos salas con equipos Philips Allura Clarity entre el 17 de marzo (fecha de puesta en servicio del sistema de gestión de dosis) y el 26 de diciembre de 2025: embolización abdominal, panangiografía, angioplastia coronaria y/o implante de stent coronario, arteriografía coronaria con cateterismo cardiaco, XA abdomen, derivación biliar, reparo de aneurisma y cambio de catéter de nefrostomía.

La información del sistema de gestión de dosis en pacientes, XRDOSE, se integró con el sistema institucional de archivo y comunicación de imágenes (PACS, Picture Archiving and Communication System, por sus siglas en inglés), registros institucionales de procedimientos y reportes de dosimetría personal. De acuerdo con DICOM, un evento de irradiación corresponde a una activación continua del equipo de rayos X y constituye la unidad mínima del reporte dosimétrico [16]. En este estudio se rastrearon todos los eventos informados por XRDOSE, incluidos los registrados por el equipo como fluoroscopia, cine, adquisición o sustracción, sin excluirlos por el modo ni por la conservación de una imagen. DICOM no establece necesariamente una relación uno a uno entre el evento de irradiación y la adquisición; por ello, en este artículo se usa evento para la unidad primaria y adquisición solo cuando se alude específicamente a la obtención de imágenes. Los eventos que compartían el identificador único se agruparon en un mismo estudio, que fue la unidad empleada para contabilizar la frecuencia de procedimientos.

La cohorte incluyó 50516 eventos de irradiación y 1539 estudios de angiografía. La completitud se definió como la proporción de estudios con información válida para

cada variable requerida y se evaluó mediante intervalos de confianza de Wilson [10]. El procedimiento y el médico especialista estuvieron identificados en el 100 % de los estudios registrados en XRDOSE. La identidad del médico especialista se verificó mediante los registros institucionales. La distribución del DAP total por estudio presentó asimetría hacia valores altos, lo que justificó organizar el análisis por coberturas acumuladas.

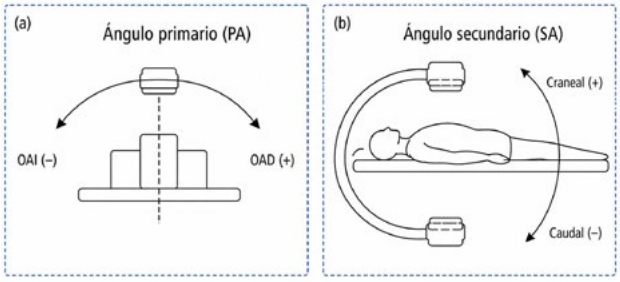
2. Priorización y configuración de irradiación

La carga de trabajo se cuantificó mediante la frecuencia de estudios. El DAP (Producto dosis área) total de cada estudio se obtuvo como la suma del DAP de sus eventos de irradiación y para cada categoría analizada, el DAP acumulado correspondió a la suma de los DAP totales de todos sus estudios durante el periodo analizado. La priorización se realizó bajo el criterio P80-P80 para cada dimensión: procedimiento, especialidad, abordaje o médico especialista. Se ordenaron sus categorías por DAP acumulado hasta cubrir al menos el 80 % del correspondiente de la cohorte y, de forma independiente, por número de estudios hasta cubrir al menos el 80 % de la frecuencia total. La intersección entre ambos conjuntos definió los grupos retenidos o grupos de interés. El abordaje correspondió a la vía de acceso clínico, por ejemplo: femoral o radial.

En el análisis por médico especialista se añadió una regla de borde para representar la variabilidad temporal alrededor de los cortes P80-P80. Para cada médico especialista se calculó, mes a mes, el número de estudios y el DAP mensual acumulado; en cada serie se obtuvo el rango intercuartílico (IQR = Q3 - Q1), medida robusta frente a valores extremos. Los IQR se proyectaron alrededor del número total de estudios y del DAP acumulado del médico especialista durante el periodo. Si un médico especialista no alcanzó directamente uno de los cortes, se consideró próximo al umbral cuando el intervalo correspondiente lo incluía; la inclusión final exigió cumplir simultáneamente las condiciones de frecuencia y DAP, de forma directa o mediante esta regla de borde, que incluyó médicos especialistas próximos a ambos umbrales, sin incorporar otros médicos especialistas alejados de ellos. El percentil 80 se eligió según la concentración observada y puede adaptarse a otras distribuciones.

La configuración de irradiación se describió mediante la posición angular del arco en C, definida por el ángulo primario (PA) y el ángulo secundario (SA) (Figura 1). Ambos se discretizaron en intervalos de ±5°. En el grupo de médicos especialistas, cada evento se representó mediante su par angular exacto (PA_i, SA_i); este punto describe la orientación del arco. La distancia euclidiana se calculó entre cada par exacto y el centro del intervalo seleccionado más cercano, mientras que la selección final buscó cobertura simultánea por frecuencia y DAP, un número suficiente de eventos en los intervalos retenidos y la reducción de los percentiles altos de esa distancia. Las convenciones de movimiento se muestran en la Figura 1: el panel (a) corresponde al PA y el panel (b) al SA.

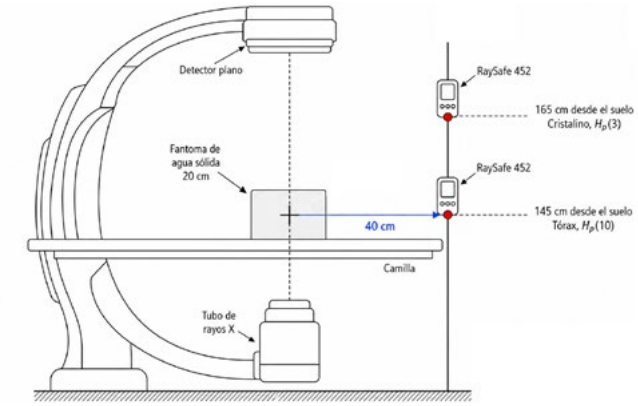
Figura 1. Convenciones de movimiento del arco en C: (a) ángulo primario (PA), con rotación hacia oblicua anterior izquierda (OAI, –) y oblicua anterior derecha (OAD, +); (b) ángulo secundario (SA), con inclinación caudal (–) y craneal (+).



3. Mediciones de niveles ambientales de dosis y modelo mensual

Las mediciones se realizaron con un fantoma de 20 cm de agua sólida que simuló al paciente y generó radiación dispersa (Figura 2). Los detectores se ubicaron externamente a 145 cm y 165 cm desde el suelo, que son las alturas de los dosímetros del médico especialista (tórax y cristalino, respectivamente). Se estudiaron 17 condiciones de eventos de irradiación definidas por combinaciones reproducibles de intervalo angular, abordaje y altura de medición. Por ello, un mismo intervalo podía aportar más de una condición (diferentes abordajes y alturas de medición). Las mediciones se tomaron sin interponer elementos de protección (como delantal, gafas plomadas o mampara) entre el fantoma y los detectores, con el fin de construir una condición de referencia reproducible. El efecto de la protección se evaluó como componente de los modelos.

Figura 2. Montaje experimental para la medición de radiación dispersa: el fantoma de agua sólida simula al paciente; los detectores externos se ubicaron a 145 cm y 165 cm para representar las alturas del dosímetro de tórax y del dosímetro de cristalino, respectivamente. Las mediciones se realizaron sin elementos de protección interpuestos entre el fantoma y los detectores.



Mediante el detector RaySafe 452 se midió el kerma en aire, K_{air}, que se convirtió mediante coeficientes dependientes de la energía a $H_p(10)$ para tórax y a dosis absorbida en el cristalino, D_{lens}. Los dosímetros personales institucionales reportaron directamente $H_p(10)$ y $H_p(3)$, de acuerdo con el ICRU 95 [1], $D_{lens} = F(E, \alpha)H_p(3)$, con $F(E, \alpha) = d_{lens}(E, \alpha)/h_p(3; E, \alpha)$. Para las energías medias medidas (46–57 keV) y la geometría experimental, los coeficientes se interpolaron linealmente y F(E, α) permaneció próximo a la unidad [1]. Se registraron D_{lens} obtenidos a partir de la medición experimental y $H_p(3)$ de los dosímetros personales, y se usaron dosímetros electrónicos EDD (Electronic Direct Dosimeter), que proporcionaron lecturas directas en $H_p(10)$ [17]. Para cada médico especialista r y mes m, el emparejamiento entre las configuraciones medidas y las conversiones dosimétricas produjo las series mensuales calculadas $\tilde{H}_{m,r}^{(10)}$ y $\tilde{H}_{m,r}^{(3)}$.

Para este trabajo, un modelo es una relación matemática multiplicativa que transforma las series calculadas $\tilde{H}$ en estimaciones mensuales ajustadas $\hat{H}$ para compararlas con la dosimetría personal reportada. Se evaluaron cinco modelos de complejidad creciente: M1 empleó un factor común por médico especialista para ambas magnitudes; M2, factores independientes por médico especialista y magnitud; M3 añadió a M2 un factor efectivo de mampara; M4 incorporó factores por procedimiento y M5 combinó factores por procedimiento y mampara. La forma correspondiente a M2 fue:

$$\hat{H}_{m,r}^{(10)} = g_r^{(10)} \tilde{H}_{m,r}^{(10)}$$
$$\hat{H}_{m,r}^{(3)} = g_r^{(3)} \tilde{H}_{m,r}^{(3)}$$

Para cada magnitud operacional $q \in \{10, 3\}$, el desempeño se evaluó mediante el error cuadrático medio en escala logarítmica: $RMSE_r^{(q)} = \sqrt{\{(1/|T|) \Sigma_{m \in T} [\log(1 + H_{m,r}^{(q)}) - \log(1 + \hat{H}_{m,r}^{(q)})]^2\}}$, donde T es el conjunto de meses evaluados, H es la lectura mensual reportada y $\hat{H}$ la estimación ajustada. El término +1 permitió incluir meses con lectura nula y redujo la influencia de valores extremos. Se conservaron las lecturas nulas reportadas por el servicio —el proveedor asigna cero bajo su límite de detección— y, si toda una serie fue nula, su factor se fijó en cero. Otros servicios deben verificar el tratamiento de datos de su proveedor.

El puntaje promedio se definió como $S_r = [RMSE_r^{(10)} + RMSE_r^{(3)}]/2$, con el mismo peso para ambas magnitudes; por lo tanto, valores menores de S indican mejor desempeño conjunto.

En las ecuaciones del modelo, $\hat{H}_{m,r}^{(d)}$ es la dosis mensual estimada y $g_r^{(d)}$ es el factor empírico operacional para el médico especialista r y la magnitud d. Este factor no es un coeficiente físico de conversión: engloba diferencias persistentes entre la condición experimental y la práctica real, como la adherencia al uso del dosímetro, su ubicación y lado de porte, la posición del médico especialista, el empleo de protección y los hábitos de trabajo. Los factores se estimaron por mínimos cuadrados no lineales en marzo–agosto de 2025; el RMSE y S se calcularon con factores fijos en septiembre–diciembre, meses no usados en el ajuste. La selección siguió un criterio de parsimonia: ante desempeño equivalente, se retuvo el modelo con menor número de parámetros [11], [12]. Para la verificación independiente con dosímetros fijos se empleó un factor análogo por angiógrafo, denotado $g_{ctrl,j}$.

Resultados

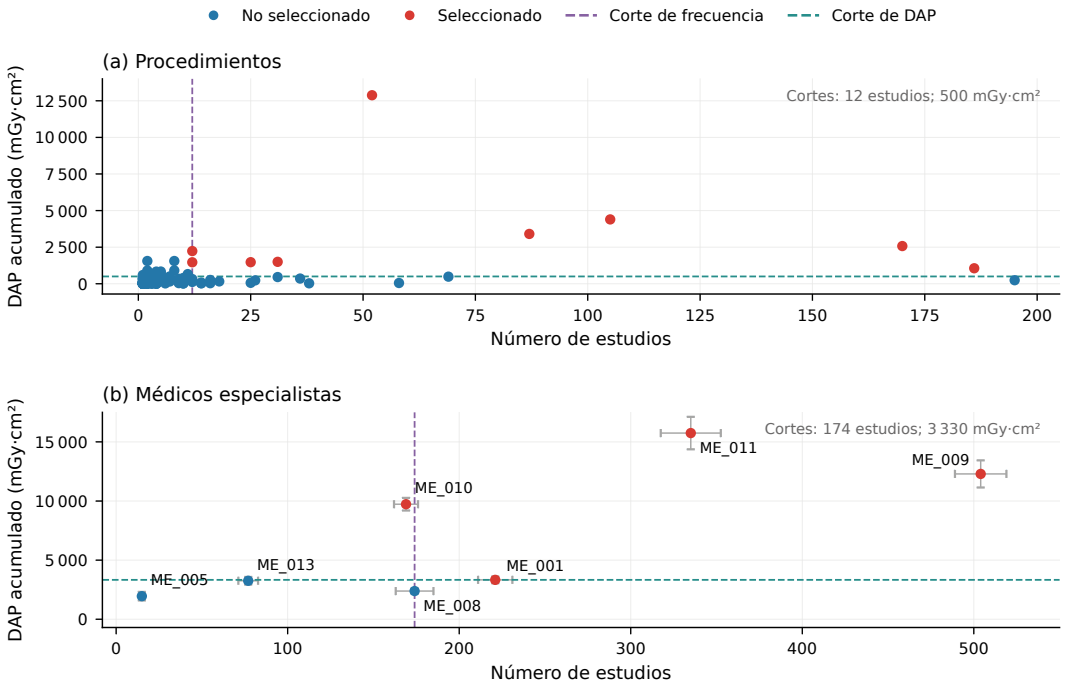
1. Concentración por frecuencia y DAP acumulado

El criterio P80-P80 identificó ocho procedimientos, dos especialidades, tres abordajes y cuatro médicos especialistas como focos principales de análisis. La Figura 3 muestra que la priorización no equivale a ordenar únicamente por frecuencia ni por DAP acumulado, sino a localizar categorías que sostienen ambas dimensiones. El análisis de varianza (ANOVA) de Welch comparó entre procedimientos el logaritmo natural de 1 más el DAP total por estudio, transformación usada por la asimetría positiva de la variable. El contraste mostró

diferencias globales significativas ($F = 219.7$; $p < 0.01$), lo que respalda tratar los procedimientos como perfiles distintos [13].

Los procedimientos priorizados fueron embolización abdominal, panangiografía, angioplastia coronaria y/o implante de stent coronario, arteriografía coronaria con cateterismo cardiaco, XA abdomen, derivación biliar, reparo de aneurisma y cambio de catéter de nefrostomía. La selección de médicos especialistas no se interpretó como una evaluación de desempeño individual, sino como la definición del subconjunto ocupacional pertinente para identificar las configuraciones de irradiación. Los puntos retenidos en la Figura 3 determinaron los médicos especialistas cuyas configuraciones angulares alimentaron el mapa de la Figura 5 y las condiciones medidas con el montaje de la Figura 2.

Figura 3. Priorización por DAP acumulado y frecuencia de estudios: (a) procedimientos y (b) médicos especialistas. Los puntos rojos fueron retenidos por la intersección P80-P80 y los azules no fueron retenidos; las líneas discontinuas indican los cortes de cobertura acumulada del 80 % en frecuencia y DAP. En los médicos especialistas, las barras de error representan los rangos intercuartílicos del número mensual de estudios y del DAP mensual acumulado.



2. Configuración angular y medición ambiental

En la base completa se obtuvieron 142 configuraciones angulares discretizadas. En la subcohorte de médicos especialistas seleccionados (médicos de interés), 37011 eventos de irradiación y 1229 estudios ocuparon 5449 pares angulares exactos; al discretizar en intervalos de ±5°, los pares se agruparon en 137 configuraciones repetidas. El criterio de selección produjo seis intervalos base y tres puntos adicionales para mejorar la cobertura. Los nueve intervalos finales se presentan en la Tabla 1 y sus parámetros técnicos en la Tabla 2.

Tabla 1. Intervalos representativos para el emparejamiento angular en los médicos de interés.

Intervalo	n_e	N_p	DAP_t (mGy cm²)
(-90, 0)	1027	142	512.3
(-20, 0)	701	133	776.5
(0, 0)	22087	1204	26815.1
(0, 10)	557	134	829.7
(0, 20)	678	202	493.6
(0, 30)	922	136	534.8
(20, 0)	1780	236	1240.5
(30, 0)	1337	171	1208.3
(90, 0)	1075	143	1254.7

n_e: número de eventos de irradiación; N_p: número de estudios; DAP_t: suma del DAP de los eventos incluidos en cada intervalo durante el periodo analizado.

Tabla 2. Parámetros técnicos por intervalo angular representativo. El intervalo se expresa como (PA, SA), en grados; n_e es el número de eventos de irradiación, kVp la tensión máxima del tubo, mAs el producto corriente-tiempo, t el tiempo de irradiación y A el área del campo. Los parámetros se presentan como media ± desviación estándar.

Intervalo	n_e	kVp	mAs	t (s)	A (cm²)
(-90, 0)	1027	73.8 ± 7.1	1008.6 ± 1804.2	11.1 ± 20.5	630.8 ± 230.9
(-20, 0)	701	79.2 ± 8.9	943.4 ± 1371.2	8.7 ± 14.7	887.1 ± 309.3
(0, 0)	22087	77.3 ± 8.7	854.4 ± 1594.7	9.2 ± 16.5	1013.2 ± 232.8
(0, 10)	557	79.6 ± 6.5	1485.1 ± 2456.8	12.1 ± 19.8	724.2 ± 308.3
(0, 20)	678	80.2 ± 7.4	1396.2 ± 1734.2	8.0 ± 13.6	453.4 ± 235.1
(0, 30)	922	83.4 ± 8.8	1668.4 ± 1892.3	7.0 ± 11.6	287.1 ± 101.6
(20, 0)	1780	80.9 ± 8.6	1586.5 ± 1859.4	8.8 ± 12.5	386.7 ± 265.9
(30, 0)	1337	80.9 ± 9.6	1397.5 ± 1646.6	9.9 ± 14.0	593.5 ± 375.0
(90, 0)	1075	73.5 ± 6.3	1083.7 ± 1537.6	11.5 ± 16.7	593.6 ± 200.2

n_e: número de eventos de irradiación. Los valores de kVp, mAs, t y A se presentan como media ± desviación estándar.

Se seleccionó un conjunto final de datos que corresponden a una distancia angular media de 3.9° y una mediana de 0.5°. Los percentiles 90 y 95 corresponden a 14.3° y 21.2° respectivamente, y el 94.0 % de los eventos de irradiación quedó dentro de 20° de algún intervalo seleccionado (ver Figura 4). Las 17 condiciones medidas cubrieron 20087 eventos y 436 estudios de la subcohorte de médicos especialistas, equivalentes al 54.3 % de los eventos y al 35.5 % de los estudios. La Figura 5 muestra la concentración angular del DAP y su relación con los intervalos seleccionados.

Figura 4. Distribución de la distancia euclidiana desde cada evento de irradiación hasta el intervalo representativo más cercano en la subcohorte de médicos especialistas. P90 y P95 corresponden a los percentiles 90 y 95; ME significa médico especialista. El eje se limita a 36° para concentrar el rango informativo; 54 de 37011 eventos presentaron distancias iguales o superiores a ese valor.

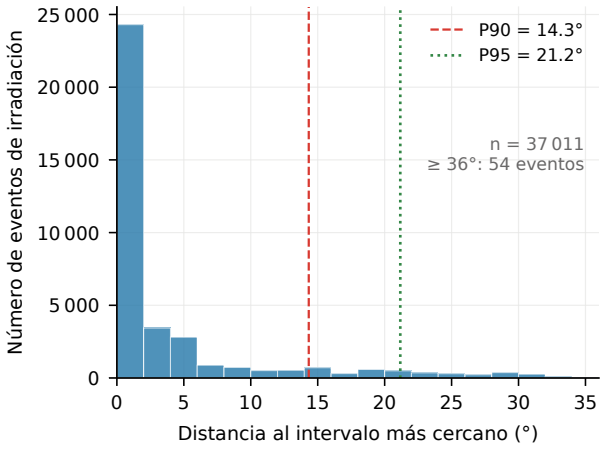
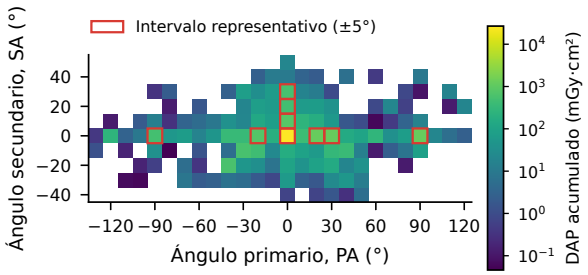


Figura 5. Distribución del DAP acumulado en el espacio angular de la subcohorte de médicos especialistas. Cada cuadrado representa un intervalo de 10° × 10° (±5° alrededor del centro PA-SA). El color codifica el DAP acumulado en cada intervalo mediante una escala logarítmica; los contornos rojos identifican los nueve intervalos representativos seleccionados para las mediciones experimentales de la Figura 2 y las celdas blancas corresponden a combinaciones sin eventos registrados.



3. Análisis comparativo mensual

La Tabla 3 presenta el desempeño de los cinco modelos definidos en la Sección 3. Mediciones de niveles ambientales de dosis y modelo mensual. El modelo con factores individuales por médico especialista y magnitud operacional alcanzó el menor puntaje con menor complejidad. Los modelos con más parámetros redujeron el error durante el periodo de ajuste, pero no mejoraron el desempeño en la ventana de análisis comparativo.

Tabla 3. Comparación de modelos en la ventana de análisis comparativo; el número de parámetros corresponde al promedio de parámetros libres por médico especialista.

Modelo	Parámetros	RMSE$^{(10)}$	RMSE$^{(3)}$	S
M1	1	0.156	0.157	0.156
M2	2	0.134	0.149	0.141
M3	3	0.134	0.149	0.141
M4	9	0.145	0.149	0.147
M5	12	0.171	0.197	0.184

El modelo retenido fue M2: un factor $g^{(10)}$ para $H_p(10)$ y un factor $g^{(3)}$ para $H_p(3)$ por médico especialista. La diferencia entre los puntajes promedio de M2 (0.141186) y M3 (0.141192) indica que añadir ese parámetro no produjo una mejora observable en la predicción con la información disponible sobre el uso y la posición de la mampara; este resultado no implica que la mampara sea físicamente ineficaz. La Figura 6 presenta dos casos: un médico especialista con factores mayores que la unidad en ambas magnitudes y otro con ajuste mixto, en el que $H_p(3)$ queda por debajo de la condición experimental de referencia. La Figura 7 resume el comportamiento de los dosímetros fijos de referencia instalados en los arcos en C, usados como verificación independiente y no como parte del ajuste del personal.

Figura 6. Comparación mensual de dos casos representativos: (a) ME_011 y (b) ME_010. Reportado corresponde a la lectura institucional de dosimetría personal; estimado, a la serie calculada antes del ajuste individual; y ajustado M2, a la serie corregida mediante los factores del modelo retenido. En ME_011, los factores fueron $g^{(10)} = 1.337$ y $g^{(3)} = 2.862$; la validación alcanzó correlaciones de 0.982 para $H_p(10)$ y 0.814 para $H_p(3)$, con RMSE lineal de 0.110 mSv y 0.243 mSv, respectivamente. En ME_010, $g^{(10)} = 1.360^{*}$ y $g^{(3)} = 0.156$; el asterisco indica que el coeficiente de $H_p(10)$ se sustituyó por el promedio del grupo porque el ajuste individual resultó nulo. Para $H_p(3)$, la correlación de validación fue 0.875 y el RMSE lineal fue 0.037 mSv. Los factores mayores o menores que uno corrigen diferencias sistemáticas de escala y no constituyen conversiones físicas entre D_{lens} y $H_p(3)$.

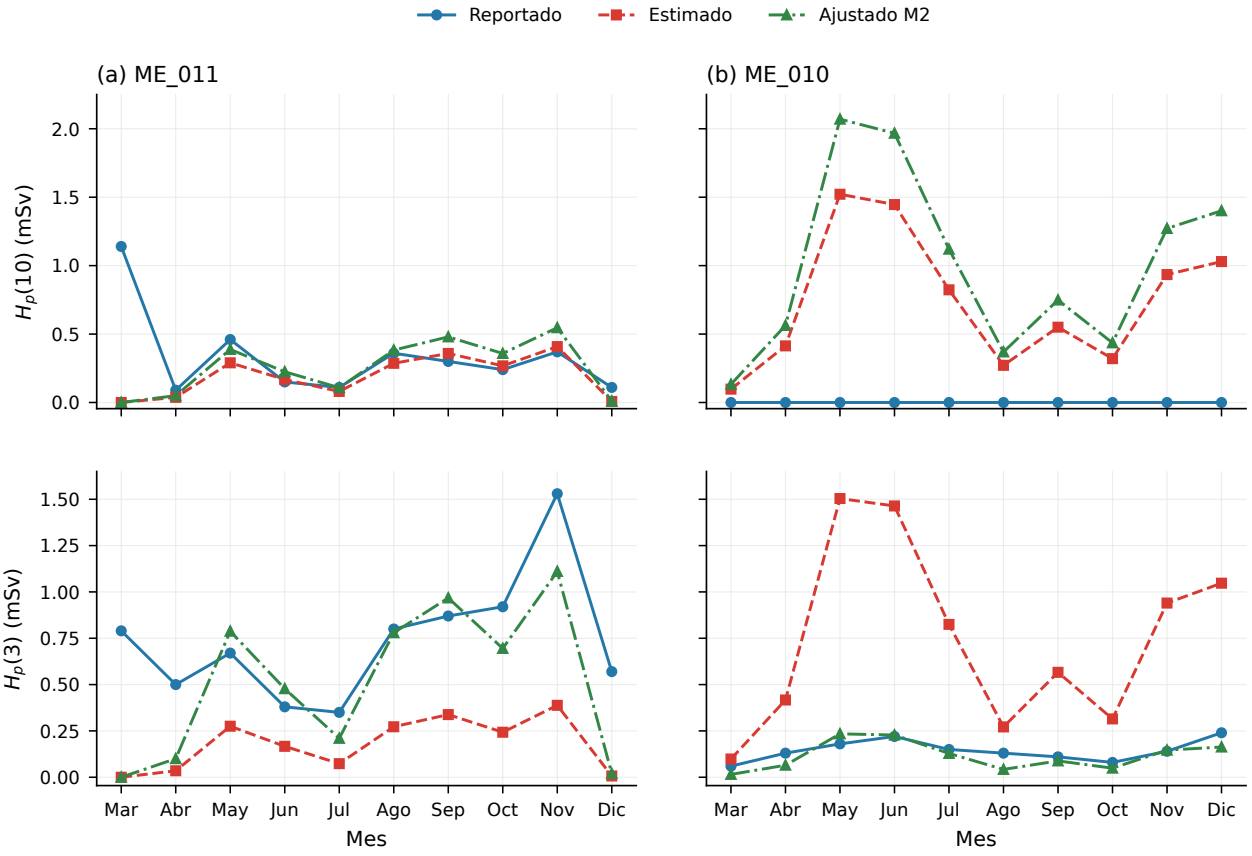
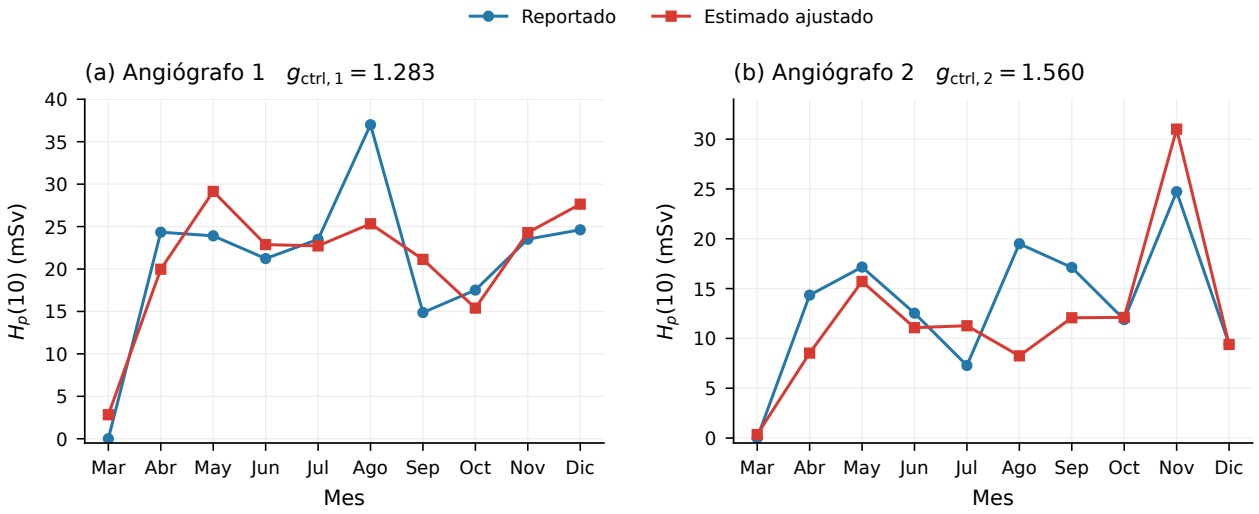


Figura 7. Comparación mensual de los dosímetros fijos de referencia: (a) angiógrafo 1 y (b) angiógrafo 2. Reportado corresponde a la lectura mensual del dosímetro fijo y estimado ajustado, a la serie calculada a partir de XRDOSE después de aplicar el factor de escala de cada equipo; estas lecturas no corresponden a la dosimetría personal del médico especialista. La comparación conjunta alcanzó un RMSE lineal global de 4.97 mSv y un coeficiente de correlación de Pearson r = 0.838 (n = 20 observaciones mensuales). Los factores retenidos fueron $g_{ctrl,1} = 1.283$ para el angiógrafo 1 y $g_{ctrl,2} = 1.560$ para el angiógrafo 2.



Discusión

El resultado central es metodológico: el DAP registrado en el sistema de gestión de dosis en pacientes aporta información sobre las irradiaciones, pero no basta para estimar la exposición ocupacional individual. Esta observación es consistente con mediciones clínicas y simulaciones que muestran dependencia de la posición, la configuración de irradiación, la protección y la práctica local [4], [5], [14], [15]. En este estudio, la estimación mensual integró además el DAP y la frecuencia de estudios con las configuraciones angulares del arco en C, las mediciones de niveles ambientales de dosis y los factores individuales por magnitud operacional. El modelo M2 alcanzó $RMSE^{(10)} = 0.134$ y $RMSE^{(3)} = 0.149$; la verificación con dosímetros fijos mostró una correlación de 0.838 y un RMSE global de 4.97 mSv. Frente a enfoques basados solo en la carga de trabajo o en sistemas de seguimiento de dosis [7], [8], esta integración constituye el aporte específico del estudio.

La comparación con la literatura permite precisar ese aporte. Meijer et al. [5] encontraron relaciones acumuladas entre la dosis de cristalino, la dosimetría personal de tórax y el DAP, pero también una pérdida de ajuste al analizar lecturas mensuales individuales. Wu et al. [7] mostraron que los registros técnicos del equipo contienen información predictiva sobre la dosis de cristalino, aunque con dispersión relevante y dependencia del nivel de exposición. Bortoli et al. [8] propusieron aprovechar los sistemas de seguimiento de dosis y la carga de trabajo para estimar exposición ocupacional. En concordancia con esos trabajos, los resultados obtenidos indican que el DAP funciona como señal de la carga de irradiación, pero su relación con la lectura personal no es universal. La contribución de esta metodología es incorporar de manera explícita la geometría angular, mediciones experimentales locales y factores individuales separados para $H_p(10)$ y $H_p(3)$, en lugar de aplicar una conversión única desde la dosis del paciente.

La agrupación de 5449 pares angulares exactos en 137 configuraciones repetidas, y luego en nueve intervalos representativos, permitió convertir una práctica clínica heterogénea en un conjunto experimental viable. Esta reducción no elimina la variabilidad de la posición del médico especialista ni del uso de protección, pero define una base reproducible para el seguimiento retrospectivo. La resolución mensual de la dosimetría personal fue la principal limitación: no permite asignar eventos individuales a lecturas específicas ni distinguir cambios diarios de posición, mampara o uso del dosímetro. La generalización también está limitada por el análisis de una sola institución, dos angiógrafos y nueve

meses, periodo que correspondió a la información disponible al iniciar el análisis.

Los factores individuales del modelo no deben interpretarse como constantes físicas; representan factores empíricos operacionales que integran diferencias entre la condición experimental de referencia y la práctica real de cada médico especialista, incluidas la adherencia, la colocación, la posición y la protección. Por ello, la metodología complementa la vigilancia dosimétrica institucional y puede apoyar análisis de coherencia, priorización de mediciones futuras e investigación de discrepancias en la dosimetría personal. Su aplicación en otros servicios exige validar localmente la calidad de los registros, la geometría de trabajo, las mediciones y los factores empíricos.

La selección de M2 frente a modelos más complejos también es relevante. M2 y M3 presentaron puntajes prácticamente iguales, por lo que el modelo con menos parámetros fue preferible y la ausencia de mejora al incluir la mampara no debe interpretarse como falta de eficacia física de la protección; más bien refleja que la información mensual disponible no permitió aislar de forma estable su posición y uso durante cada procedimiento. La correlación de Pearson de 0.838 obtenida con los dosímetros fijos aporta una verificación independiente de la tendencia temporal reconstruida, aunque su RMSE global de 4.97 mSv no es directamente comparable con el error de la dosimetría personal, porque esos dosímetros están instalados cerca del tubo y representan otra geometría de exposición. Estudios posteriores deberían registrar de forma prospectiva la posición del médico especialista, el uso de mampara y dosímetro, y validar la metodología en más instituciones, equipos y periodos de seguimiento.

Conclusiones

La estimación retrospectiva de exposición ocupacional en radiología intervencionista requiere integrar la frecuencia de estudios y el DAP acumulado con las configuraciones de irradiación, las mediciones de niveles ambientales de dosis y la dosimetría personal. En la cohorte analizada, el criterio P80-P80 permitió seleccionar procedimientos, especialidades, abordajes y médicos especialistas; el análisis angular agrupó miles de configuraciones exactas en nueve intervalos representativos, con 94.0 % de cobertura dentro de 20°; y el modelo permitió ajustar, por individuo y magnitud operacional, la información temporal y de escala a la dosimetría personal mensual. El modelo M2 alcanzó $RMSE^{(10)} = 0.134$ y $RMSE^{(3)} = 0.149$; la verificación independiente obtuvo r de Pearson = 0.838 y RMSE global = 4.97 mSv.

La metodología propuesta no sustituye la dosimetría personal reglamentaria ni permite atribuir causalmente una lectura mensual a un evento individual. Su aporte es relacionar la práctica clínica registrada, las configuraciones de irradiación y las dosis mensuales reportadas, apoyar la vigilancia retrospectiva e investigar discrepancias en la dosimetría personal. La verificación con dosímetros fijos respalda la capacidad de reconstruir tendencias temporales, pero la transferencia a otros servicios requiere calibración local y validación prospectiva.

Referencias

[1] ICRU, "Operational quantities for external radiation exposure: Report 95," *J. ICRU*, vol. 20, no. 1, pp. 1-96, 2020. https://doi.org/10.1093/jicru/ndaa001

[2] International Commission on Radiological Protection, "ICRP Publication 139: Occupational radiological protection in interventional procedures," *Ann. ICRP*, vol. 47, no. 2, pp. 1-118, 2018. https://doi.org/10.1177/0146645317750356

[3] O. Ciraj-Bjelac, M. M. Rehani, K. H. Sim, H. B. Liew, E. Vano y N. J. Kleiman, "Risk for radiation-induced cataract for staff in interventional cardiology: Is there reason for concern?," *Catheter. Cardiovasc. Interv.*, vol. 76, no. 6, pp. 826-834, 2010. https://doi.org/10.1002/ccd.22670

[4] E. Vano, J. M. Fernandez y R. M. Sanchez, "Estimation of staff lens doses during interventional procedures: Comparing cardiology, neuroradiology and interventional radiology," *Radiat. Prot. Dosim.*, vol. 165, no. 1-4, pp. 279-283, 2015. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv049

[5] E. J. Meijer, D. W. H. van Zandvoort, M. J. A. Loos, C. M. E. S. N. Tseng y C. van Pul, "The eye lens dose of the interventionalist: Measurement in practice," *Phys. Med.,* vol. 100, pp. 1-5, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.05.012

[6] L. Alejo, C. Koren, E. Corredoira, F. Sánchez, J. Bayón, A. Serrada y E. Guibelalde, "Eye lens dose correlations with personal dose equivalent and patient exposure

in paediatric interventional cardiology performed with a fluoroscopic biplane system," *Phys. Med.,* vol. 36, pp. 81-90, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.03.015

[7] M. Wu, F. Yuan, Y. Gu, J. Wang, L. Lu y Z. Zeng, "Predictive modeling of eye lens dose in interventional radiology: A polynomial regression approach to cumulative fluoroscopy dose," *Front. Public Health*, vol. 13, art. 1547101, 2025. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1547101

[8] E. Bortoli, M. Biondi, R. Avitabile et al., "Dose estimation for interventional radiology staff: An updated workload survey using a dose-tracking system," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 140, art. 587, 2025. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06558-9

[9] International Atomic Energy Agency, "About diagnostic reference levels." [En línea]. Disponible: https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/radiology/diagnostic-reference-levels/about-diagnostic-reference-levels. [Consultado: 15-jun-2026].

[10] E. B. Wilson, "Probable inference, the law of succession, and statistical inference," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 22, no. 158, pp. 209-212, 1927. https://doi.org/10.1080/01621459.1927.10502953

[11] T. Hastie, R. Tibshirani y J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2.a ed. New York, NY, EE. UU.: Springer, 2009. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7

[12] K. P. Burnham y D. R. Anderson, *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, 2.a ed. New York, NY, EE. UU.: Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/b97636

[13] B. L. Welch, "On the comparison of several mean values: An alternative approach," *Biometrika*, vol. 38, no. 3-4, pp. 330-336, 1951. https://doi.org/10.1093/biomet/38.3-4.330

[14] P. Ferrari et al., "Simulation of $H_p(10)$ and effective dose received by the medical staff in interventional radiology procedures," J. Radiol. Prot., vol. 39, no. 3, pp. 809-824, 2019. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab2c42

[15] A. Almén et al., "Personal dosimetry using Monte Carlo simulations for occupational dose monitoring in interventional radiology: The results of a proof of concept in a clinical setting," *Radiat. Prot. Dosim.*, vol. 195, no. 3-4, pp. 391-398, 2021. https://doi.org/10.1093/rpd/ncab045

[16] National Electrical Manufacturers Association, "DICOM PS3.3: Information Object Definitions; PS3.6: Data Dictionary; and PS3.16: Irradiation Event Type," Digital Imaging and Communications in Medicine, 2026. [En línea]. Disponible: https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/

[17] Unfors Instruments AB, "Unfors EDD-30: Direct reading pocket dosimeter," ficha técnica, 2007. [En línea]. Disponible: https://www.alatuji.com/images/products/files/radiasi.pdf