

# Desarrollo de un algoritmo computacional para la semiautomatización del control de calidad de elementos de protección personal plomados

## *Development of a computational tool based on image processing for the quality control automation of lead based personal protection equipment*

John Camilo Alcalde Poveda<sup>1</sup>, Erika Muñoz Arango<sup>2</sup>

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 7, 2023  
**Recibido:** 30 de agosto de 2022  
**Aceptado:** 24 de marzo de 2023  
**Publicado en línea:** 29 de diciembre de 2023  
**DOI:** <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.7.2023.670>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

**Citación:** J. C. Alcalde y E. Muñoz, “Desarrollo de un algoritmo computacional para la semiautomatización del control de calidad de elementos de protección personal plomados”, Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, n.º 7, 2023. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.7.2023.670>

### Resumen

**Objetivo:** El uso de los elementos de protección personal plomados (EPP-Pb) es una medida de protección radiológica ante la radiación dispersa que se genera en procedimientos médicos que involucran el uso de equipos emisores o fuentes de radiación ionizante. Los controles de calidad (CC) periódicos permiten detectar fisuras y evaluar el estado de los EPP-Pb para su uso seguro en la rutina clínica mediante la aplicación de criterios cuantitativos de aceptación o rechazo. El objetivo de este trabajo es la semiautomatización del CC de los EPP-Pb empleados por personal ocupacionalmente expuesto, a través del desarrollo de un algoritmo con un enfoque de procesamiento de imágenes basado en la cuantificación de las fisuras. **Metodología:** Fueron adquiridas imágenes digitales de los EPP-Pb mediante tomografía computarizada (TC) como base para la creación y parametrización de una herramienta de optimización mediante lenguaje Python y diferentes librerías. Se desarrolló un algoritmo que cambió las imágenes de formato DICOM a PNG en escala de grises, sobre estas imágenes se aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes que permiten a la herramienta clasificar los EPP-Pb en chalecos o protectores de tiroides plomados según corresponda. Se generó un modelo para la detección de fisuras en los EPP-Pb y se programó la herramienta para calcular el área total

1 Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Manizales, Colombia.

2 Área de Física Médica Hospitalaria, Servicios Especiales de Salud, Hospital Universitario de Caldas (SES-HUC), Manizales, Colombia.

**Autor para correspondencia:** Erika Muñoz Arango, [coordinadorafisicamed@ses.com.co](mailto:coordinadorafisicamed@ses.com.co)

de estas, aplicando criterios de aceptación y rechazo, donde los chalecos y los protectores de tiroides plomados tienen un área máxima de fisuras permitida de 10 cm<sup>2</sup> y 0,3 cm<sup>2</sup>, respectivamente. **Resultados:** La herramienta clasificó satisfactoriamente la totalidad de los EPP-Pb que fueron evaluados, obteniendo 34 chalecos y 22 protectores de tiroides plomados. De los anteriores, el algoritmo detectó 5 chalecos con fisuras y 4 sospechosos de fisuras (pliegues pronunciados). El área total de fisuras cuantificadas estuvo entre 6,1 cm<sup>2</sup> y 12,5 cm<sup>2</sup>; arrojando criterio de rechazo para un solo chaleco cuya área superó los 10 cm<sup>2</sup>. **Conclusiones:** El desarrollo del algoritmo propuesto mediante técnicas de procesamiento de imagen para la detección y cuantificación de fisuras es viable como método semiautomatizado de CC, logrando una identificación de fisuras con una exactitud mayor al 97 %. El uso de herramientas computacionales para la optimización de procesos de protección radiológica reduce el tiempo y la dependencia del observador en la ejecución de los CC.

**Palabras clave:** EPP-Pb, control de calidad, fisuras, procesamiento de imágenes, criterios de rechazo.

### Abstract

**Purpose:** The use of leaded personal protective equipment (PPE-Pb) is a radiological protection measure against scattered radiation generated in medical procedures involving the use of emitting equipment or sources of ionizing radiation. Periodic quality controls (QC) make it possible to detect cracks and evaluate the condition of PPE-Pb for its safe use in clinical routine by applying quantitative criteria for acceptance or rejection. The objective of this work is the semi-automation of QC of PPE-Pb used by occupationally exposed personnel, through the development of an algorithm with an image processing approach based on the quantification of cracks. **Methods:** Digital images of EPP-Pb were acquired by computed tomography (CT) as a basis for the creation and parameterization of an optimization tool using Python language and different libraries. An algorithm was developed that changed the images from DICOM format to grayscale PNG, on these images image processing techniques were applied that allow the tool to classify EPP-Pb in leaded vests or thyroid protectors as appropriate. A model was generated for the detection of cracks in PPE-Pb and the tool was programmed to calculate the total area of these cracks, applying acceptance and rejection criteria, where vests and leaded thyroid protectors have a maximum allowed crack area of 10 cm<sup>2</sup> and 0.3 cm<sup>2</sup>, respectively. **Results:** The tool successfully classified all the PPE-Pb that were evaluated, obtaining 34 vests and 22 plumbed thyroid protectors. Of these, the algorithm detected 5 vests with cracks and 4 suspected cracks (pronounced folds). The total area of quantified cracks was between 6.1 cm<sup>2</sup> and 12.5 cm<sup>2</sup>, with rejection criteria for only one vest whose area exceeded 10 cm<sup>2</sup>. **Conclusions:** The development of the proposed algorithm using processing image techniques for crack detection and quantification is feasible as a semi-automated QC method, achieving crack identification with an accuracy greater than 97%. The use of computational tools for the optimization of radiation protection processes reduces time and observer dependence in the execution of QC.

**Keywords:** PPE-Pb, quality control, crack, image processing, rejection criteria.

## 1. Introducción

**D**iversos protocolos y recomendaciones nacionales e internacionales, orientados a la protección radiológica, recomiendan el uso de elementos de protección plomados para la atenuación de la radiación dispersa generada por diferentes procedimientos médicos de radioterapia y radiodiagnóstico [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Los documentos de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por su sigla en inglés), *ICRP 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* [2]; *ICRP 105: Radiological Protection in Medicine* [3]; el *Exposure factors handbook* [5], y la “Resolución 181434 de 2002. Por la cual se adopta el reglamento de protección y seguridad radiológica”, del Ministerio de Minas y Energía [6]; entre otros, recomiendan el uso constante de elementos de protección personal plomados (EPP-Pb) como chaleco o delantal, protector de tiroides y protector gonadal en toda situación posible en la que un trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE), paciente o persona del público esté en un ambiente con algún tipo de radiación ionizante [1], [2], [3], [4], [5], [7].

El blindaje personal es una de las medidas básicas de protección radiológica y se basa en mantener las dosis recibidas debido a radiación dispersa lo más bajas posibles; para esto se recomienda realizar periódicamente controles de calidad a estos elementos, con el fin de asegurar el buen estado del material interno que los compone; entre estos, el encargado de atenuar la radiación es, generalmente, el plomo o un material equivalente [1], [2], [6], [7].

Las fisuras, grietas y huecos que pueden aparecer en los EPP-Pb, como resultado de su uso, son indicadores de su fatiga, y reducen su vida útil y función principal. La presencia y el área total de estas fisuras se convierte en un parámetro para establecer criterios cuantitativos de rechazo y posterior reemplazo de los EPP-Pb. Los criterios para su rechazo pueden tener un enfoque de optimización costo/beneficio, en el que se consideren las dosis incrementales en los TOE, debido al uso o desuso de los EPP-Pb y el costo de reemplazarlos; de esta manera, se establece un área de fisuras máxima permitida en cada EPP-Pb [1], [7]. La detección de defectos en la estructura del plomo de estos elementos se realiza por medio de imágenes radiológicas (placas de rayos x convencional o tomografía) con el fin de obtener una imagen digital que permita visualizar su estado interno; así se facilita la aplicación de los criterios de evaluación [1], [7].

Las imágenes digitales de tomografía computarizada (TC) tienen formato Dicom (*digital imaging and communication in medicine*), el cual contiene la información visual en unidades Hounsfield (UH), obtenidas a partir de una transformación lineal de los coeficientes de atenuación de rayos X en una nueva escala. Esta transformación da como resultado una escala que va desde -1000 UH para el aire hasta  $\pm 2000$  UH para huesos muy densos y más de 3000 UH para metales [8], [9], [10].

El formato Dicom presenta una estructura de dos partes, el encabezado (*header*) y el conjunto de datos (*dataset*) [9],

[11], [13], [14]. El primero contiene la información relacionada con la sintaxis de codificación y ejecución UID (ID de usuario *user*) del archivo y el tipo de compresión del conjunto de datos [10], [15]. Este último representa la información del objeto de estudio y está constituido por diferentes elementos de datos (*data elements*) que codifican los atributos y características del objeto, que a su vez son descritos por cuatro tipos de etiquetas: TAG, VR, VL, VF. El TAG es la etiqueta única de identificación, el VR indica el tipo o clase de dato almacenado (entero, real, etc.); el VL, la longitud del dato (en *bytes*); el VF, la información del estudio, como los datos del paciente, información del equipo y parámetros radiológicos utilizados en el procedimiento [13], [16].

Los avances en la detección de grietas y fisuras mediante procesamiento de imágenes han permitido aplicar diferentes modelos en la industria; las fisuras en hormigón y materiales compuestos son un ejemplo de estas aplicaciones [12], [15], [17], [18]. Existen diferentes métodos de procesamiento, entre ellos: técnicas de morfología matemática, umbralización, técnicas de suavizados en el dominio espacial, filtros y máscaras de recorte, detección de bordes y objetos, entre otras.

La morfología matemática es una estrategia para el análisis de ciertas estructuras especiales en la imagen, mediante el uso de teoría de conjuntos, la geometría integral y el álgebra de retículas (látices). Esta técnica recurre a elementos como la matriz de convolución Kernel; elementos de estructura, para realizar la erosión, la dilatación, la esqueletización; entre otras [19], [20].

Las técnicas de filtrado y suavizado en el dominio espacial se basan en la manipulación directa de píxeles, mediante una matriz de vecindad de tamaño  $M \times N$  (número de filas por número de columnas), también conocida como matriz de convolución Kernel; es decir, cada píxel adquiere propiedades según los valores de los píxeles vecinos con el objetivo de eliminar ruido indeseado [19], [20]. Los filtros adaptativos son más complejos, ya que la ponderación se calcula para cada uno de los píxeles en función [19], [21]. La umbralización consiste en separar la imagen en regiones según sus valores de intensidad, mediante un umbral  $T$ . Los objetos con valores de intensidad  $T$  pertenecen a una región distinta a los que tienen una intensidad mayor que  $T$ , de lo que se obtiene una imagen de dos niveles o máscara [19], [20], [21]. La detección de bordes es un enfoque para el recorte de obje-

tos dentro de la imagen y se basa en la detección de cambios bruscos de intensidad de los píxeles mediante el uso de las primeras y segundas derivadas [18], [19], [21].

En este trabajo se desarrolló una herramienta computacional para optimizar el control de calidad de los EPP-Pb, donde se tuvieron en cuenta los criterios de aceptación o rechazo establecidos por Duran y Phillips [1]. Para ello se siguió un modelo basado en procesamiento de imágenes digitales para la extracción morfológica de fisuras presentes en el plomo, mediante el uso combinado de filtros adaptativos, así como procesos de segmentación, para así asegurar el estado interno de los EPP-Pb cuyo propósito es la protección radiológica.

## 2. Metodología

### 2.1 Adquisición de imágenes de los EPP-Pb

Utilizando un tomógrafo computarizado marca Philips Medical System, modelo Ingenuity CT, fueron adquiridas imágenes Dicom de los EPP-Pb mediante un estudio “topograma o *surview*”, y se siguió un protocolo “abdomen con contraste” (120 kV-30 mA), a partir del cual se posicionan un chaleco y un protector de tiroides a la vez en cada barrido o topograma. Cada conjunto se posicionó en el isocentro definido por los láseres internos del tomógrafo. Los tiempos de exposición son automáticos en el *surview*, variando según la longitud del EPP.

### 2.2 Desarrollo del algoritmo

#### 2.2.1 Preprocesamiento de imágenes

Para la detección de fisuras se requirió transformar la imagen Dicom. Para esto, por medio del entorno virtual de Python 3.8.5, y las librerías, PyDicom 2.3.0, Numpy 1.33.2 y el TAG “Pixel Array”, se creó una nueva matriz de píxeles que forman una imagen PNG en escala de grises para la aplicación de técnicas y herramientas de procesamiento [23].

Mediante filtros adaptativos de tipo gaussiano y mediano, y de técnicas de morfología matemática, como la apertura y clausura con una matriz de convolución Kernel, se eliminó el ruido con un filtrado continuo sin alterar las características morfológicas de las fisuras de estudio, y se resaltaron los objetos presentes en la imagen de acuerdo con su intensidad,

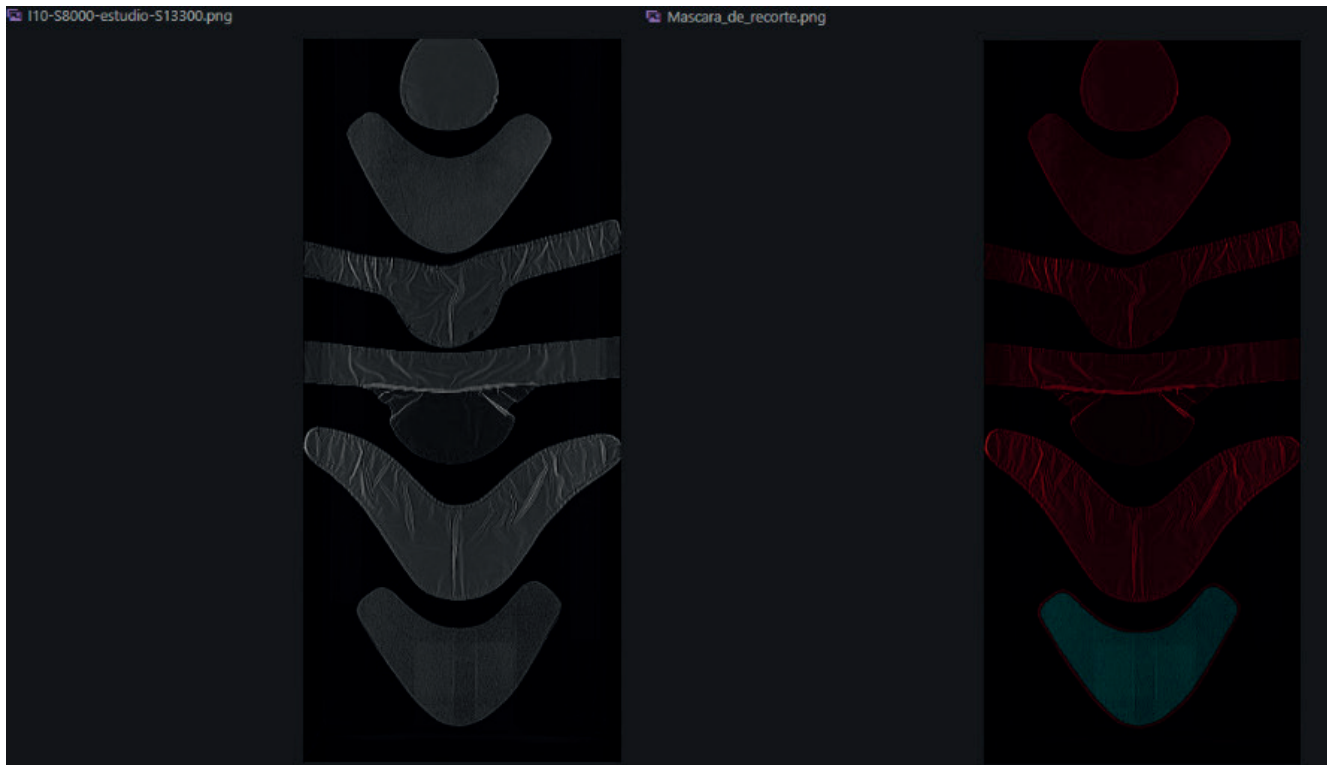


Figura 1. Segmentación y clasificación de EPP-Pb

como se muestra en la figura 1. Esto permitió la diferenciación y clasificación de cada EPP-Pb en chalecos y protectores de tiroides plomados.

### 2.2.2 Primer mapeo de fisuras

Una vez clasificados los EPP-Pb en chalecos y protectores de tiroides plomados, se parametrizó el algoritmo de detección de grietas y pliegues pronunciados. Se realizó un suavizado mediante filtros adaptativos y técnicas morfológicas iterativas a la imagen en escala de gris original, hasta lograr un filtrado que resaltara los objetos de interés dentro del EPP-Pb (fisuras y pliegues en el plomo). Se obtuvo una imagen donde se suprimió más del 50 % de los elementos que no

corresponden a fisuras o pliegues, considerados como ruido. Se procedió con una segmentación de objetos dentro del contorno de selección mediante umbralización, en la que se establece el valor umbral de intensidad de pixel del objetivo, igual a 255, en este caso el valor del límite del pixel de las grietas y pliegues.

La umbralización se llevó a cabo mediante el algoritmo de segmentación OTSU adaptativo, del cual se obtuvo una máscara con los objetos detectados dentro del contorno de selección. Con el uso de esta máscara, se detectaron los contornos de dichos objetos mediante una aproximación simple (definición del contorno en cuatro vectores) y se proyectaron en la imagen original, como se detalla en la figura 2.



Figura 2. Segmentación y clasificación de EPP-Pb

Los EPP-Pb donde mediante la umbralización se encontraron fisuras, pliegues u otros objetos, se clasificaron como chalecos o protectores de tiroides con posibles fisuras.

### 2.2.3 Selección de fisuras

Se realizó un filtrado suave mediante un filtro adaptativo gaussiano con matriz de convolución Kernel de tamaño (3×3) para la detección de elementos dentro de la imagen de los EPP-Pb con posibles fisuras. Mediante segmentación se estableció una nueva máscara con el método de umbralización OTSU adaptativo, con el que se encontraron todos los objetos que pueden ser fisuras o pliegues de manera precisa y exacta. Las fisuras se categorizaron solo por su morfología tomando dos características: intensidad del pixel en escala de grises y su correspondiente tamaño, donde los elementos con tamaño muy pequeño (menor a 2 mm<sup>2</sup>) y los objetos con tonalidades diferentes al valor del píxel de cero (0) se descartaron.

Los objetos obtenidos se proyectaron en la imagen real, y mediante etiquetado y enumeración se comenzó la selección manual de fisuras, como se muestra en la figura 3.

Se seleccionaron los objetos que no corresponden a fisuras y se eliminaron dentro de la imagen.

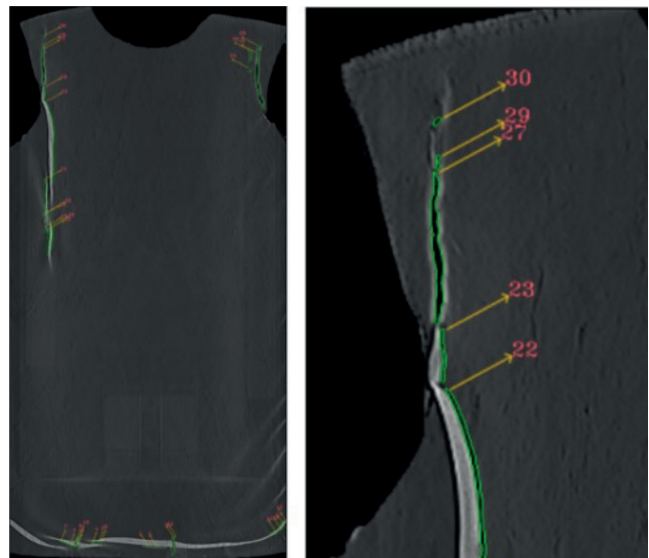
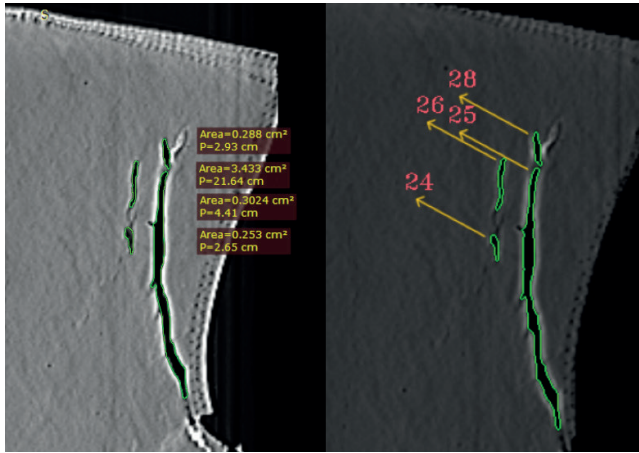


Figura 3. Segmentación y clasificación de EPP-Pb

### 2.2.4 Cuantificación de fisuras

Con las fisuras identificadas en cada imagen, se procedió a cuantificar su área. Mediante la librería OpenCV (Python) se analizó de manera individual cada fisura, donde la sumatoria de todos los píxeles dentro de cada contorno representa el área de la grieta obtenida en píxeles, para lo cual es necesario



**Figura 4.** (a) Contornos de las fisuras identificadas con RadiAnt. (b) Contornos de las fisuras identificadas con el algoritmo

escalar este valor mediante un factor de escala  $F_p$  para obtener la medida en  $\text{cm}^2$  con fines de aplicación de los criterios de aceptación y rechazo.

Utilizando el visualizador *RadiAnt Dicom Viewer 2021.2* (Copyright © 2009-2023 Medixant), se crearon los contornos alrededor de las fisuras sobre la imagen Dicom con ayuda de herramientas de selección de regiones de interés óptico (ROI, por su sigla en inglés) de forma similar a la definición de contornos del numeral 2.2.3, como se muestra en la figura 4.

Se calculó el área interna de las fisuras en  $\text{cm}^2$  (con RadiAnt) y en píxeles (con el algoritmo), como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Áreas de las fisuras en píxeles y  $\text{cm}^2$

| Figura n.º | $A_{px}$ [píxeles] | $A_{R-f}$ [ $\text{cm}^2$ ] |
|------------|--------------------|-----------------------------|
| 0          | 33,5               | 0,05                        |
| 1          | 31,5               | 0,04                        |
| 2          | 77,5               | 0,14                        |
| 3          | 38,0               | 0,06                        |
| 4          | 45,5               | 0,07                        |
| 5          | 30,0               | 0,04                        |
| 6          | 29,0               | 0,06                        |
| 7          | 76,0               | 0,11                        |
| 8          | 81,0               | 0,17                        |
| 9          | 288,5              | 0,60                        |
| 10         | 80,0               | 0,17                        |
| 11         | 26,5               | 0,05                        |
| 12         | 58,5               | 0,12                        |
| 8          | 81,0               | 0,17                        |
| 9          | 288,5              | 0,60                        |
| 10         | 80,0               | 0,17                        |
| 11         | 26,5               | 0,05                        |
| 12         | 58,5               | 0,12                        |
| 13         | 77,5               | 0,11                        |
| 14         | 34,5               | 0,06                        |
| 15         | 94,5               | 0,20                        |
| 16         | 413,0              | 0,77                        |
| 17         | 95,0               | 0,22                        |
| 18         | 360,5              | 0,76                        |
| 19         | 30,5               | 0,04                        |
| 20         | 135,0              | 0,24                        |

Con el área de la de las fisuras en el RadiAnt  $A_{R-f}$  en  $\text{cm}^2$  y el área de las fisuras en el algoritmo en píxeles  $A_{Px}$ , se realizó un ajuste lineal para obtener el factor de ajuste de píxeles  $F_p$ , tal como se detalla en la ecuación (1):

$$A_{R-f} = 0.026 A_{Px} - 0.0494 \quad (1)$$

Del ajuste lineal de las áreas de las fisuras en píxeles y  $\text{cm}^2$ , se obtuvo una ecuación de la recta donde la pendiente representa el factor de ajuste  $F_p$ , de forma que todas las áreas encontradas mediante contornos aplicando morfología matemática, suavizados y aproximaciones tendrán un factor de escala  $F_p$  de 0,0026.

Siguiendo lo descrito en [24], el coeficiente de determinación para el ajuste lineal se calculó mediante la ecuación (2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2)$$

Donde  $R^2$  es el coeficiente de determinación,  $y_i$  es la variable independiente ( $y_i = A_{R-f}$ ),  $\hat{y}_i$  son los valores ajustados (o pronosticados) obtenidos sustituyendo sucesivamente los  $x_i$  (variable dependiente,  $x_i = A_{Px}$ ) en la ecuación de la recta de regresión estimada y  $\bar{y}$  es el promedio de todos los  $y_i$ . Se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2$  igual a 0,99.

La variabilidad  $\sigma^2$  se calculó según la ecuación (3):

$$\sigma^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \quad (3)$$

Donde  $\sigma^2$  es el parámetro de variabilidad,  $y_i$  es la variable independiente ( $y_i = A_{R-f}$ ),  $\hat{y}_i$  son los valores ajustados (o pronosticados,  $\hat{y}_i = \hat{A}_{R-f}$ ) obtenidos sustituyendo sucesivamente la variable dependiente  $x_i$  ( $x_i = A_{Px}$ ) en la ecuación de la recta de regresión estimada y  $n$  es el número de datos obtenidos en este estudio. Los resultados para el cálculo de  $\sigma^2$  se detallan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Variabilidad del área de las fisuras

| Fisura n° | $A_{R_i}$ [píxeles] | $A_{R_i}$ [ $\times 10^{-2}$ cm <sup>2</sup> ] | $\hat{A}_{R_i}$ [ $\times 10^{-2}$ cm <sup>2</sup> ] | $(A_{R_i} - \hat{A}_{R_i})^2$ [ $\times 10^{-6}$ cm <sup>2</sup> ] |
|-----------|---------------------|--|--|--|
| 0         | 33,5                | 5  | 4  | 151  |
| 1         | 31,5                | 4  | 3  | 56   |
| 2         | 77,5                | 14   | 15   | 15   |
| 3         | 38,0                | 6  | 5  | 112  |
| 4         | 45,5                | 7  | 7  | 1  |
| 5         | 30,0                | 4  | 3  | 130  |
| 6         | 29,0                | 6  | 3  | 1156   |
| 7         | 76,0                | 11   | 15   | 1459   |
| 8         | 81,0                | 17   | 16   | 77   |
| 9         | 288,5               | 60   | 70   | 10140  |
| 10        | 80,0                | 17   | 16   | 130  |
| 11        | 26,5                | 5  | 2  | 930  |
| 12        | 58,5                | 12   | 10   | 299  |
| 8         | 81,0                | 17   | 16   | 77   |
| 9         | 288,5               | 60   | 70   | 10141  |
| 10        | 80,0                | 17   | 16   | 130  |
| 11        | 26,5                | 5  | 2  | 930  |
| 12        | 58,5                | 12   | 10   | 299  |
| 13        | 77,5                | 11   | 15   | 1772   |
| 14        | 34,5                | 6  | 4  | 388  |
| 15        | 94,5                | 20   | 20   | 14   |
| 16        | 413,0               | 77   | 102  | 64719  |
| 17        | 95,0                | 22   | 20   | 502  |
| 18        | 360,5               | 76   | 89   | 16358  |
| 19        | 30,5                | 4  | 3  | 102  |
| 20        | 135,0               | 24   | 30   | 3795   |
| $\Sigma$  | 2670,5              | 519  | 566  | 114018   |

Aplicando la ecuación (3) se obtiene la variabilidad, como se detalla a continuación:

$$\sigma^2 = \frac{0.11401787}{21 - 2}$$

$$\sigma^2 = 0.006$$

Obteniendo en porcentaje una variabilidad  $\sigma^2$  del 0,6 % entre los datos y la regresión lineal.

### 2.2.5 Corrección de áreas

Una vez obtenidos los contornos de las fisuras por el método del algoritmo propuesto, se observó una subestimación de las áreas al reconocer el borde interno de las fisuras. Por medio del visualizador RadiAnt se delimitó una de las regiones de interés, en los cuatro chalecos disponibles en la institución, que cuentan con las fisuras de mayores dimensiones para el estudio; los demás presentan integridad en su estructura. El área delimitada manualmente con las herramientas de contorno disponibles en el RadiAnt fue definida como el valor real, y mediante una aproximación lineal con los

**Tabla 3.** Áreas de las fisuras obtenidas mediante RadiAnt y el algoritmo propuesto

| Chaleco n.º                   | Área procesada [cm <sup>2</sup> ] | Área RadiAnt [cm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0-I10-S1030 - estudio-S13300  | 7,9                               | 12,8                            |
| 0-I102-S1000 - estudio-S13300 | 6,0                               | 10,7                            |
| 0-I103-S1000 - estudio-S13300 | 7,6                               | 12,1                            |
| 1-I10-S1020 - estudio-S23550  | 0,9                               | 6,1                             |
| 0-I10-S1040 - estudio-S13330  | 2,7                               | 7,9                             |

valores arrojados por el algoritmo, se obtuvo una expresión matemática para corregir y resolver la subestimación de las áreas. Las áreas de las fisuras de los EPP-Pb, obtenidas con el desarrollo del algoritmo, corresponden a  $A_{Code}$ , y las obtenidas mediante el visualizador RadiAnt corresponden a  $A_{RadiAnt}$ . Los valores se presentan en la tabla 3.

La ecuación de la recta de las áreas de las fisuras se presenta en la ecuación (4).

$$A_{RA} = 0.919 A_{Cod} + 5.3113 \quad (4)$$

Donde  $A_{RA}$  y  $A_{Cod}$  son las áreas en cm<sup>2</sup> obtenidas de las fisuras de los EPP-Pb mediante el visualizador RadiAnt y mediante el algoritmo desarrollado, respectivamente; así, se logró la expresión de corrección de área final de las fisuras a causa de la subestimación inicial. Por último, aplicando de nuevo la ecuación (2), se obtuvo un  $R^2$  igual a 0,99.

### 2.3 Criterios de rechazo y aceptación

Aplicando lo reportado por Duran y Phillips [1], para un aumento máximo del 5 % en la dosis recibida, debido al uso de EPP-Pb con fisuras presentes, se estableció un condicional en el algoritmo para los criterios de rechazo de los elementos plomados procesados anteriormente. En el caso de los chalecos se aplicó la ecuación (5):

$$\sum_i^n A_{i,c-cmt} < 10 \text{ cm}^2 \quad (5)$$

Donde,  $A_{i,c-cmt}$  es el área en cm<sup>2</sup> de la fisura  $i$  obtenida mediante la técnica de procesamiento de imágenes. Se definió que el área total límite de todas las fisuras de un EPP-Pb tipo chaleco debe ser inferior a 10 cm<sup>2</sup>, aplicando directamente los criterios propuestos en [1], los cuales incluyen consideraciones radiobiológicas y económicas.

En el caso de los protectores de tiroides plomados se realizó un procedimiento similar al caso anterior, donde se pro-



puso una modificación al límite dentro del algoritmo según la ecuación (6) [1]:

$$\sum_{i,t} A_{i,t - cmt} < 0.03 \text{ cm}^2 \text{ ó } 3.0 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

$A_{i,t - cmt}$  es el área en  $\text{cm}^2$  de la fisura  $i$  en un protector de tiroides plomado. Se definió que el área total límite de todas las fisuras de un EPP-Pb tipo protector de tiroides debe ser inferior a  $0,03 \text{ cm}^2$  aplicando directamente los criterios propuestos por [1]. De acuerdo con el documento, el criterio del área máxima que orienta al cambio de un chaleco plomado está soportado en la sensibilidad del principal órgano de riesgo para este EPP, la tiroides, donde las dosis recibidas a través de un área menor pueden tener un mayor efecto desde el punto de vista de la protección radiológica.

De acuerdo con el valor del área estimada con el algoritmo y el valor límite aplicado de la literatura, el algoritmo genera la información con el nombre del elemento y la caracterización de “rechazado” o “aceptado”, según sobrepase o no el límite de fisuras obtenido.

El algoritmo se parametrizó con 276 imágenes Dicom correspondientes a chalecos plomados y cuellos plomados adquiridos en años anteriores mediante tomografía computarizada, debido a los pocos datos disponibles. La verificación

se presenta en los resultados con 56 imágenes Dicom de EPP recién adquiridos mediante el protocolo descrito en 2.1.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Clasificación de los EPP-Pb y aplicación del criterio de rechazo mediante el algoritmo

En este apartado se presentan los resultados de la diferenciación y la cuantificación de los EPP-Pb con el algoritmo. En el caso de los protectores de tiroides, el algoritmo identificó los 22 elementos inicialmente escaneados, ninguno de ellos fue clasificado como elemento “con posibles fisuras” correspondientes a EPP con pliegues pronunciados, y 22 como elementos “sin fisuras”. En el caso de los chalecos, el algoritmo reconoció los 34 elementos que fueron escaneados, 9 de ellos clasificados como chalecos “con posibles fisuras” y 25 “sin fisuras”. Sobre los 9 EPP-Pb con posibles fisuras, se realizó la aprobación manual de las fisuras visibles, como un mecanismo de verificación. Con dicha selección se avanzó a la cuantificación del área de fisuras, se validaron los factores de corrección generados en la metodología y posteriormente se evaluaron automáticamente como “aceptados” o “rechazados”. De los 9 chalecos “con posibles fisuras”; 3 fueron rechazados “no cumplen los criterios de aceptación y requieren

```

TERMINAL
*****
---Resumen Aceptación o rechazo de EPP---
*****

Se han analizado 33 chalecos plomados y 21 protectores de tiroides plomados.
Se han encontrado 9 chalecos plomados con posibles fisuras y 24 chalecos plomados sin ninguna fisura.
Se han encontrado 0 protectores de tiroides con posibles fisuras y 21 protectores de tiroides sin ninguna fisura.
- Los elementos del estudio I10-S1000-estudio-S13300 no pudieron ser procesados.-
Revisar que se encuentran bien posicionados.

Se han encontrado 3 chalecos/s que no cumplen los criterios de aceptación y requieren reemplazo:
- El chaleco fisuras-0-I10-S1030-estudio-S13300 no cumple los criterio de aceptacion (A=12.548792599999999 cm^2).
- El chaleco fisuras-0-I102-S1000-estudio-S13300 no cumple los criterio de aceptacion (A=10.68745 cm^2).
- El chaleco fisuras-0-I103-S1000-estudio-S13300 no cumple los criterio de aceptacion (A=12.277595700000003 cm^2).

Se han encontrado 6 chalecos/s que cumplen los criterios de aceptación pero requieren estudio posterior,
(presentan pliegues o fisuras muy pequeñas en el plomo):
- - El chaleco fisuras-0-I10-S1040-estudio-S13330 cumple los criterios de aceptacio, recordar posterior revisión.
- - El chaleco fisuras-1-I10-S1020-estudio-S23520 cumple los criterios de aceptacio, recordar posterior revisión.
- - El chaleco fisuras-1-I10-S1020-estudio-S23550 cumple los criterios de aceptacio, recordar posterior revisión.
- - El chaleco fisuras-1-I10-S1030-estudio-S23520 cumple los criterios de aceptacio, recordar posterior revisión.
- - El chaleco fisuras-1-I10-S1030-estudio-S23600 cumple los criterios de aceptacio, recordar posterior revisión.
- - El chaleco fisuras-1-I10-S1080-estudio-S23520 cumple los criterios de aceptacio, recordar posterior revisión.

```

Figura 5. Resumen del control de calidad de los EPP-Pb, y los resultados de aceptación o rechazo

reemplazo”, y 6 fueron aceptados, pero con advertencia de “posible fisura”; esto ocurre cuando un EPP-Pb cumple con el criterio de aceptación pero requiere seguimiento y trazabilidad, ya que presentan fisuras pequeñas (con áreas menores a  $2 \text{ mm}^2$ ) o pliegues pronunciados. Estos últimos podrían convertirse en fisuras posteriormente, debido al uso cotidiano o su incorrecta manipulación, de acuerdo con lo discutido en otros trabajos similares [26], [28], [29]. De los 6 chalecos que cumplieron el criterio de aceptación, 4 presentaron solo pliegues y los otros 2 presentaron fisuras con un área total inferior al criterio de rechazo aplicado en este estudio. Los resultados entregados por el algoritmo descritos en este apartado se muestran en la figura 5 en el formato del propio algoritmo.

Debido a que el algoritmo clasificó los 56 EPP-Pb disponibles correctamente y a que todos los elementos con fisuras y pliegues muy pronunciados fueron detectados, separados y analizados, fue posible obtener una exactitud del 100 % en la clasificación de los EPP-Pb (como chalecos o protectores de tiroides) y en la detección de EPP-Pb con posibles fisuras en el plomo. Dada el escaso estandarización en relación con los métodos y criterios de evaluación de los EPP-Pb, según la literatura, existen diversas posibilidades metodológicas para la evaluación de dichos elementos, entre las que se encuentran, longitudes de las fisuras, verificación del espesor de plomo equivalente, inspecciones visuales, etc. [25], [26], [27]. El método para este estudio permite hacer una cuantificación del área de fisuras, lo que finalmente vendrá a traducirse en el aumento de la probabilidad de la dosis efectiva recibida por el personal ocupacionalmente expuesto [1], donde, más que la verificación de las condiciones físicas, se hacen consideraciones radiobiológicas y económicas para la institución de salud, al aplicar el método propuesto por [1].

### 3.2 Exactitud en la cuantificación de las fisuras

En la tabla 4, se presentan los resultados de la cuantificación de áreas de fisuras presentes en los chalecos plomados, resultado de la aplicación del algoritmo propuesto (3 con área total mayor a  $10 \text{ cm}^2$  y 2 con área total menor a  $10 \text{ cm}^2$ ); también se presenta el valor de exactitud. El “área RadiAnt”, denominada así por corresponder al área obtenida con el uso del visualizador RadiAnt, se logró con la definición de regiones de interés óptico, y el área fue la calculada por el algoritmo desarrollado, a través de los factores de conversión y corrección descritos en la metodología.

**Tabla 4.** Exactitud en la cuantificación del área de fisuras

| EPP-Pb                      | Área real [cm <sup>2</sup> ] | Área obtenida [cm <sup>2</sup> ] | Exactitud (%) |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 0-110-S1030-estudio-S13300  | 12,8                         | 12,5                             | 97,9          |
| 0-1102-S1000-estudio-S13300 | 10,7                         | 10,7                             | 99,9          |
| 1-110-S1020-estudio-S23550  | 6,1                          | 6,1                              | 98,4          |
| 1-1103-S1020-estudio-S23550 | 12,1                         | 12,3                             | 99,4          |
| 0-110-S1040-estudio-S13330  | 7,9                          | 7,7                              | 97,4          |

De acuerdo con la tabla 4, se obtuvo una exactitud mejor que el 97 % en la cuantificación de las fisuras con el método propuesto. Considerando la necesidad de la ejecución de los CC y seguimiento de los EPP-Pb, así como la necesidad de su ejecución con periodicidad mínimamente anual, según recomendaciones internacionales [26], [30], [31], [32], [33], [34], se hace necesario generar una herramienta que permita tener un alto grado de exactitud en el análisis, similar a la alcanzada en este estudio, y que a su vez disminuya los tiempos de trabajo especializado dedicados a esta tarea. Es importante resaltar que la exactitud obtenida es bastante alta (superior al 97 %) si se evalúa dentro del contexto de las tolerancias en protección radiológica para el análisis de las condiciones de los EPP-Pb [26], [30], [31], [32], [33], [34].

Como ya se mencionó, el método aplicado en este estudio permite cuantificar el área de fisuras, con consideraciones radiobiológicas y económicas, según el modelo de Duran y Phillips [1], con el objetivo de superar las evaluaciones solo por inspecciones visuales en el contexto hospitalario. Cabe aclarar que no existen normas regulatorias establecidas para el rechazo de EPP-Pb ni un consenso en los criterios de rechazo y aceptación aplicados, y ante lo cual, las instalaciones médicas establecen sus propios criterios de rechazo, así como su periodicidad [7], [25], [26], [27], [31], [32], [33], [34], [35].

Las metodologías de procesamiento de imágenes propuestas en este estudio pueden ser reproducibles en trabajos que requieran detección de fisuras no solo en chalecos plomados, sino en contenedores, mamparas plomadas, etc. [9]. Las técnicas de procesamiento de imagen presentan muchos beneficios frente a otras de detección de fisuras, como el *deep learning* y las *convolutional neural networks* (CNN) según la literatura, ya que favorecen una manipulación más simple y rápida en los parámetros de detección [21], [22]. Sin embargo, es importante mencionar que previo a la aplicación

de herramientas computacionales, como la propuesta en este artículo, podrían aplicarse criterios de aceptación y rechazo mucho más estrictos de acuerdo con los estudios más recientes y las nuevas propuestas metodológicas, que pueden tener o no enfoques de tipo costo/beneficio. Estas decisiones quedan a criterio de los responsables de la seguridad y protección radiológica de las diferentes instituciones.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo, gracias al desarrollo del control de calidad de chalecos fisurados con enfoque de procesamiento de imágenes mediante técnicas convencionales con filtros espaciales, segmentación y etiquetado, fue posible una identificación precisa de las fisuras con una exactitud superior al 97 %, para su análisis y cuantificación. Este trabajo representa un aporte en la generación de herramientas que faciliten las tareas de protección radiológica en el ámbito hospitalario, y que promuevan una toma de decisiones más eficiente entre las áreas de seguridad en el trabajo y los responsables de la protección radiológica de las instituciones. El algoritmo desarrollado se considera viable para garantizar el buen estado de los EPP-Pb de una institución por medio de un control de calidad periódico.

Diversos autores expresan la necesidad, desde el punto de vista de la protección radiológica, de la ejecución de controles de calidad a los EPP-Pb con fines de protección radiológica del personal ocupacionalmente expuesto; sin embargo, existe un vacío documental entre la necesidad de dichos controles y recomendaciones internacionales que orienten las metodologías más eficientes para su ejecución, así como los límites a ser aplicados para la cuantificación de las fisuras y la toma de decisiones para el reemplazo de los EPP-Pb en las instituciones de salud [25], [26], [27].

La metodología aplicada en este estudio permite además la identificación de pliegues en los EPP-Pb, los cuales, de acuerdo con la literatura, requieren seguimiento por la posibilidad de generarse fisuras como consecuencia del desgaste del material.

El uso de técnicas computacionales para la optimización de procesos en el área de protección radiológica, como la presentada en este estudio, disminuye el tiempo requerido en esta tarea dentro del ámbito hospitalario, al pasar de cinco

días de trabajo para un análisis por técnicas manuales (con RadiAnd), a dos días con este algoritmo.

Por último, se ha presentado un algoritmo que permite un análisis semiautomático del proceso de control de calidad de los EPP-Pb, mediante criterios de aceptación o rechazo que involucran tanto aspectos radiobiológicos como económicos, y mediante la aplicación del modelo de cuantificación publicado por otros autores [1]. Esta herramienta puede orientar a las áreas de salud y seguridad en el trabajo y física médica, sobre el cambio de estos elementos, según corresponda.

Como evolución de esta primera fase del trabajo con el algoritmo, se espera incluir la reducción de ruido presente en cada EPP-Pb y el uso de otras técnicas para segregar y clasificar los diferentes objetos en la imagen, como grietas y arrugas pronunciadas de forma automática.

#### 5. Referencias

- [1]. E. B. Duran y B. Phillips, "Rejection criteria for defects in lead apparel used for radiation protection of X-ray workers". Radiation Protection Services, BC Center for Disease Control. 2003. [En línea]. [https://www.fisicamedica.it/archivio/sites/default/files/documenti/003\\_Rejection\\_Criteria\\_for\\_Defects\\_in\\_Lead\\_Apparel\\_used\\_for\\_Radiation\\_Protection\\_of\\_X-Ray\\_Workers\\_\\_E-B-\\_Duran\\_and\\_B-\\_Phillips\\_.pdf](https://www.fisicamedica.it/archivio/sites/default/files/documenti/003_Rejection_Criteria_for_Defects_in_Lead_Apparel_used_for_Radiation_Protection_of_X-Ray_Workers__E-B-_Duran_and_B-_Phillips_.pdf)
- [2]. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60*, International Commission on Radiological Protection, Ontario, vol. 21, n.º 1-3, 1991. [En línea]. [www.icrp.org](http://www.icrp.org)
- [3]. *Radiological Protection in Medicine. Publication 105*, International Commission on Radiological Protection, Ontario, vol. 33, n.º 6, 2007. [En línea]. [www.icrp.org](http://www.icrp.org)
- [4]. *Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. Publication 111*, International Commission on Radiological Protection, Ontario, vol. 39, n.º 3, 2009. [En línea]. [www.icrp.org](http://www.icrp.org)
- [5]. *Exposure Factors Handbook*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C., EPA/600/R-09/052F, 2011. [En línea]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>

- [6]. Resolución 181434 de 2002. Por la cual se adopta el reglamento de protección y seguridad radiológica, Ministerio de Minas y Energías, 2002. [En línea]. [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion\\_minminas\\_181434\\_2002.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minminas_181434_2002.htm)
- [7]. K. Lambert y T. McKeon, "Inspection of lead aprons: Criteria for rejection", *Health Physics*, vol. n.º 80, supl. 5, pp. S67-S69, 2001. <https://doi.org/10.1097/00004032-200105001-00008>
- [8]. K. Greenway, A. Murphy, F. Gaillard et al., "Hounsfield unit", Radiopaedia.org (internet), 2015, jul. <https://doi.org/10.5334/rID-38181>
- [9]. R. Bibb, "3-Export data format and media", en *Medical modelling: The application of advanced design and development techniques in medicine*, Sawston: Woodhead Publishing, 2006, pp. 32-36. <https://doi.org/10.1533/9781845692001.32>
- [10]. T. R. Moen, B. Chen, D. R. Holmes et al., "Low-dose CT image and projection Dataset", *Medical Physics*, vol. 48, n.º 2, nov., pp. 902-911, 2021. <https://doi.org/10.1002/mp.14594>
- [11]. W. Serna Serna, J. P. Trujillo Lemus y J. H. Rivera Piedrahita, "Descripción del estándar DICOM para un acceso confiable a la información de las imágenes médicas", *Scientia et Technica*, vol. 2, n.º 45, ago., 2010, SN - 0122-1701. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84917249053>
- [12]. K. E. Hazzan y M. Pacella, "Crack identification in tungsten carbide using image processing techniques", *Procedia Structural Integrity*, vol. 37, pp. 274-281, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.085>
- [13]. O. H. Moreno-Torres, J. A. Ballesteros-Ricaurte y J. S. González-Sanabria, "Transformación de archivos Dicom a formatos XML, JPEG y PNG", *Revista Científica*, vol. 21, n.º 1, ene., pp. 71-80, 2015. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2015.21.a7>
- [14]. M. J. Pérez Langarano, *Implementación de un sistema web para la interpretación, procesamiento y visualización de imágenes Dicom en el hospital Guayaquil*, tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2018. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16507>
- [15]. Y. Wang, J. Y. Zhang, J. X. Liu et al., "Research on crack detection algorithm of the concrete bridge based on image processing", *Procedia Computer Science*, vol. 154, pp. 610-616, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.096>
- [16]. Joel José P.C. Rodrigues, Sandra Sendra Compte, Isabel de la Torra Diez, 4 - Digital Imaging and Communications in Medicine, e-Health Systems, Elsevier, 2016, Pages 53-74, ISBN 9781785480911, <https://www.elsevier.com/books/e-health-systems/rodrigues/978-1-78548-091-1>
- [17]. Z. J. Yang, A. Qsymah, Y. Z. Peng et al., "4D characterisation of damage and fracture mechanisms of ultra high performance fibre reinforced concrete by in-situ micro X-ray computed tomography tests", *Cement and Concrete Composites*, vol. 106, p. 103473, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103473>
- [18]. L. Schöttl, P. Kolb, W. V. Liebig et al., "Crack characterization of discontinuous fiber-reinforced composites by using micro-computed tomography: Cyclic in-situ testing, crack segmentation and crack volume fraction" *Composites Communications*, vol. 21, p. 100384, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100384>
- [19]. R. C. Gonzales y R. E. Woods, *Digital image processing*, 4.ª ed., Londres: Pearson Education, 1999. <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>
- [20]. J. C. Castillo García, *Algoritmos para la restauración de imágenes digitales en colores*, tesis de maestría, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, 2015. <https://www.saber.cic.ipn.mx/SABERv3/Repositorios/webVerArchivo/25863/1>
- [21]. P. Querejeta Simbeni, "Procesamiento digital de imágenes". [En línea], 2015. <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-QuerejetaSimbeniPedro.pdf>
- [22]. H. Kim, E. Ahn, M. Shin et al., "Crack and non-crack classification from concrete surface images using machine learning", *Structural Health Monitoring*, vol. 18, n.º 3, pp. 725-738, 2019. <https://doi.org/10.1177/1475921718768747>
- [23]. G. Roelofs, "Chapter 19 - PNG Lossless Image Compression", en *Communications, Networking and Multimedia, Lossless Compression Handbook*, K. Sayood, ed.,

- Cambridge: Academic Press, 2003, pp. 371-390. <https://doi.org/10.1016/B978-012620861-0/50020-6>
- [24] J. L. Devore. (2018). *Fundamentos de probabilidad y estadística*, 1.<sup>a</sup> ed. XXXXXX. XXXXXXXX. [https://www.academia.edu/42825973/FUNDAMENTOS\\_DE\\_PROBABILIDAD\\_Y\\_ESTAD%C3%8DSTICA](https://www.academia.edu/42825973/FUNDAMENTOS_DE_PROBABILIDAD_Y_ESTAD%C3%8DSTICA)
- [25]. L. Bjørkås, S. Blø, M. K. Rekdal et al., “Quality of radiation protection aprons and quality control routines at different diagnostic imaging modalities”, *Radiography Open*, vol. 6, n.º 1, pp. 64-74, 2020. <https://doi.org/10.7577/radopen.4050>
- [26]. O. Bawazeer, “Quality assurance of personal radiation shield for kilovoltage photon: A multicentre experience”, *Risk Management Healthcare Policy*, vol. 24, n.º 14, mar., pp. 1263-1270, 2021. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S298783>
- [27]. R. S. Livingstone y A. Varghese, “A simple quality control tool for assessing integrity of lead equivalent aprons”, *Indian Journal of Radiology and Imaging*, vol. 28, n.º 2, abr.-jun., pp. 258-262, 2018. [https://doi.org/10.4103/ijri.IJRI\\_374\\_17](https://doi.org/10.4103/ijri.IJRI_374_17)
- [28]. R. Michel y M. J. Zorn, “Implementation of an X-ray radiation protective equipment inspection program”, *Health Physics*, vol. 82, supl. 2, pp. S51-S53, 2002. <https://doi.org/10.1097/00004032-200202001-00012>
- [29]. J. P. McCaffrey, H. Shen, B. Downton et al., “Radiation attenuation by lead and onlead materials used in radiation shielding garments”, *Medical Physics*, vol. 34, n.º 2, pp. 530-537, 2007. <https://doi.org/10.1118/1.2426404>
- [30]. M. M. Rehani, O. Ciraj-Bjelac, E. Vañó et al., “ICRP Publication 117. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department”, *Annals of the ICRP*, vol. 40, n.º 6, pp. 1-102, 2010. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.03.001
- [31]. M. Matsuda y T. Suzuki, “Evaluation of lead aprons and their maintenance and management at our hospital”, *Journal of Anesthesia*, vol. 30, n.º 3, pp. 518-521, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00540-016-2140-2>
- [32]. D. Oppliger-Schäfer y H. W. Roser, “Quality assurance of X-ray protection clothing at the university hospital Basel”, en *Annual Conference of SSRMP*, Basel, 2009, pp. 1-5.
- [33]. R. Michel y M. J. Zorn, “Implementation of an X-ray radiation protective equipment inspection program”, *Health Physics*, vol. 82, supl. 2, pp. S51-S53, 2002. <https://doi.org/10.1097/00004032-200202001-00012>
- [34] Australian/New Zealand Standard™. AS / NZS 2161 Occupational Protective Gloves. Part 1: Selection, Use and Maintenance, 2000. AS/NZS 2161.1. <https://www.saiglobal.com/pdftemp/previews/osh/as/as2000/2100/21611.pdf>
- [35]. M. J. Shymko, “Minimizing occupational exposure”, *Radiologic Technology*, vol. 70, n.º 1, pp. 89-90, 1998. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9779512/>