

**Revisión documental sobre el impacto de las variables ambientales en la vida útil de los  
detectores de panel plano (FPD)**

Diana Carolina García Guevara

Derly Margoth Macias Chinchajoy

Juliet Andrea Rodríguez Trochez

Henry Yohan Manquillo Manquillo

Román Danilo Zambrano Mueses

Asesor

Edna Rocío Jamaica Guio

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud (ECISA)

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2026

## **Agradecimientos**

Agradecemos profundamente a Dios por acompañarnos en cada paso de este camino y brindarnos la fortaleza necesaria para superar cada reto vivido durante nuestra formación académica y personal.

A nuestros profesores, gracias por compartir sus conocimientos, su paciencia y su vocación. Más que enseñarnos conceptos, nos inspiraron a crecer, a pensar de manera crítica y a creer en nuestras capacidades.

A nuestras familias y seres queridos, gracias por el apoyo incondicional, por la comprensión en los momentos difíciles y por convertirse en nuestra mayor motivación para seguir adelante.

Cada logro alcanzado también es de ustedes.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que hicieron parte de este proceso y dejaron una enseñanza, una palabra de aliento o una experiencia significativa en nuestras vidas.

## **Dedicatoria**

Dedicamos este logro a nuestras familias, por ser el motor que impulsó cada uno de nuestros esfuerzos y por acompañarnos con amor, confianza y sacrificio en cada etapa de este camino. A nuestros profesores, porque su guía, dedicación y ejemplo dejaron una huella importante en nuestra formación tanto profesional como personal.

Y a nosotros mismos, por la constancia, la disciplina y la capacidad de no rendirnos aun en los momentos más difíciles. Este trabajo representa el resultado de todo el esfuerzo, aprendizaje y crecimiento vivido durante este proceso.

## Resumen

La presente investigación analiza la influencia de la temperatura y la humedad relativa sobre el rendimiento y la vida útil de los detectores de panel plano (Flat Panel Detectors – FPD) utilizados en radiología digital. Estos sistemas representan una tecnología esencial en la obtención de imágenes diagnósticas de alta calidad, fundamentales para la toma de decisiones clínicas seguras y precisas. El estudio se desarrolló mediante un enfoque cualitativo y diseño documental, basado en la revisión de artículos científicos, libros especializados, tesis académicas y documentos técnicos relacionados con física médica, radiología digital y control de calidad en sistemas de imagenología. A partir de la evidencia recopilada, se analizaron parámetros de desempeño como la eficiencia cuántica de detección (DQE), la relación señal-ruido (SNR), la uniformidad y la estabilidad operativa de los detectores. Los resultados evidencian que las condiciones ambientales inadecuadas favorecen procesos de degradación física y electrónica en los FPD. La exposición prolongada a temperaturas elevadas y altos niveles de humedad relativa incrementa el ruido electrónico, altera la estabilidad de la señal y acelera el envejecimiento de materiales y componentes internos, afectando la calidad diagnóstica de las imágenes y reduciendo la confiabilidad operativa de los equipos. Finalmente, la investigación destaca la importancia del monitoreo ambiental y del mantenimiento predictivo como estrategias para optimizar el desempeño de los detectores digitales, prolongar su vida útil y fortalecer la seguridad del paciente bajo el principio ALARA.

**Palabras Clave:** radiología digital, detectores de panel plano, temperatura, humedad relativa, calidad de imagen.

### **Abstract**

This research analyzes the influence of temperature and relative humidity on the performance and service life of Flat Panel Detectors (FPD) used in digital radiology. These systems represent an essential technology for obtaining high-quality diagnostic images, which are fundamental for safe and accurate clinical decision making. The study was developed using a qualitative approach and a documentary research design based on the review of scientific articles, specialized books, academic theses, and technical documents related to medical physics, digital radiology, and quality control in imaging systems. From the collected evidence, performance parameters such as Detective Quantum Efficiency (DQE), Signal-to-Noise Ratio (SNR), uniformity, and operational stability of the detectors were analyzed. The results show that inadequate environmental conditions promote physical and electronic degradation processes in FPD systems. Prolonged exposure to high temperatures and elevated relative humidity levels increases electronic noise, alters signal stability, and accelerates the aging of materials and internal components, affecting the diagnostic quality of medical images and reducing the operational reliability of the equipment. Finally, the study highlights the importance of environmental monitoring and predictive maintenance as key strategies to optimize detector performance, extend equipment lifespan, and strengthen patient safety under the ALARA principle.

**Keywords:** digital radiology, flat panel detectors, temperature, relative humidity, image quality.

## Tabla de contenido

Introducción .....	11
Planteamiento del Problema.....	13
Justificación.....	16
Objetivos .....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos.....	19
Marco Teórico .....	20
Evolución y Fundamentos de la Radiología Digital .....	20
<i>Sustitución de la Radiografía en Pantalla de Cine por Radiografía</i>	
<i>Computarizada.....</i>	20
<i>De la Radiografía Computarizada (CR) a la Radiología Digital (DR) .....</i>	21
<i>Análisis de Tecnologías de Tomografía Computarizada .....</i>	22
Diseño Interno y Sensibilidad de Materiales .....	24
<i>Detectores de Conversión Indirecta (a-Si).....</i>	24
<i>Arquitectura Funcional de los Detectores de Panel Plano .....</i>	25
<i>Dinámica del Calor y Degradación Térmica .....</i>	26
<i>Detectores de Conversión Directa (a-Se) .....</i>	27
<i>Influencia de los Factores Ambientales y Operativos en la Calidad de las</i>	
<i>Imágenes Radiológicas en Entornos Hospitalarios.....</i>	30
<i>Susceptibilidad Termodinámica de los Materiales .....</i>	30
Dinámica del Calor y Degradación Térmica.....	32
<i>Efectos del Calor en la Calidad de Imagen .....</i>	32
<i>Degradación del Selenio (a-Se).....</i>	32

<i>Análisis Comparativo con BGO</i> .....	32
<i>Artefactos Asociados a Detectores de Panel Plano</i> .....	32
<i>Artefactos y Artificios en Tomografía Computada</i> .....	33
Impacto de la Humedad Relativa y Corrosión.....	34
<i>Fallos en la Detección de Exposición Automática</i> .....	34
<i>Factores de Ventilación y Entornos Adversos</i> .....	34
<i>La Calidad de Imagen en Radiología Digital</i> .....	34
Modelado Matemático de la Vida Útil y Degradación .....	35
<i>Interacción Sinérgica (Modelo de Peck)</i> .....	35
Consecuencias Clínicas, Métricas de Calidad y Economía .....	35
<i>Métricas de Calidad en Radiología Digital</i> .....	35
<i>Impacto Clínico de la Radiología Digital en la Precisión Diagnóstica</i> .....	36
<i>Degradación de Eficiencia Cuántica de Detección</i> .....	37
<i>Análisis de Costos y Eficiencia Operativa</i> .....	37
Conclusiones y Recomendaciones de Gestión.....	40
<i>Protocolos de Control Ambiental</i> .....	40
<i>Gestión del Mantenimiento en Dispositivos Médicos</i> .....	40
<i>Estrategia Aumentar la Vida Útil de los Detectores de Panel Plano (FPD)</i> ....	41
Marco Metodológico .....	42
Tipo y Diseño de la Investigación .....	42
Enfoque de Investigación .....	42
Diseño de Investigación.....	43
Población y Unidad de Análisis.....	44

Criterios de Selección Documental .....	45
Fuentes y Técnicas de Recolección de Información .....	46
Técnicas de Análisis de la Información.....	46
Procedimiento Metodológico .....	47
Resultados .....	49
Conclusiones .....	59
Referencias Bibliográficas .....	61

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Evidencia Científica de Degradación Higrotérmica en Detectores Digitales de Panel Plano (FPD)</i> .....	51
<b>Tabla 2</b> <i>Impacto de Variables Ambientales en Vida Útil y Desempeño Operativo de FPD</i> .....	53

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Actualización de Equipo de Analógico a Digital</i> .....	22
<b>Figura 2</b> <i>Incidencia de los Rayos X en el Detector de Panel Plano de Silicio Amorfo</i>	25
<b>Figura 3</b> <i>Conversión Directa e Indirecta en Detectores de Panel Plano</i> .....	27
<b>Figura 4</b> <i>Corte Poloidal con la Visión del Detector Multicanal del Plasma del TJ-II.</i> .....	29
<b>Figura 5</b> <i>Transmisión del Filtro de 1500 Å de Aluminio</i> .....	29
<b>Figura 6</b> <i>Composición del Detector de Panel Plano de Selenio Amorfo.</i> .....	31
<b>Figura 7</b> <i>Evaluación del Costo/Efectividad en un Horizonte de 7 Años</i> .....	39

## Introducción

En las últimas décadas, el diagnóstico por imágenes ha experimentado una evolución significativa gracias a la incorporación de tecnologías digitales, las cuales han optimizado los procesos de adquisición, procesamiento y almacenamiento de imágenes médicas. Esta transformación ha permitido mejorar la eficiencia diagnóstica, incrementar la calidad de las imágenes y reducir la exposición del paciente a la radiación ionizante en comparación con los sistemas convencionales basados en película radiográfica.

Dentro de este contexto tecnológico, los detectores de panel plano (Flat Panel Detectors, FPD) se han consolidado como componentes esenciales en los sistemas de radiografía digital. Estos dispositivos son responsables de la conversión de la radiación de rayos X en señales electrónicas, las cuales son procesadas para generar imágenes diagnósticas de alta resolución, constituyéndose en elementos determinantes para la calidad del diagnóstico clínico (Seeram, 2023).

De acuerdo con Seeram (2023), el desempeño de estos detectores está directamente relacionado con parámetros fundamentales de calidad de imagen, tales como la eficiencia cuántica de detección (DQE), la relación señal-ruido (SNR), la función de transferencia de modulación (MTF) y la uniformidad del sistema. Estas métricas permiten evaluar la capacidad del detector para reproducir de manera fiel la información radiológica, por lo que cualquier alteración en su comportamiento impacta de forma directa la confiabilidad diagnóstica.

En este sentido, los detectores digitales constituyen sistemas altamente sensibles a las condiciones de operación, especialmente a variaciones en su estabilidad electrónica. Cambios en estos parámetros pueden generar incremento del ruido, pérdida de uniformidad y disminución progresiva del rendimiento del sistema, lo que evidencia la importancia de mantener condiciones adecuadas para su funcionamiento continuo y seguro.

No obstante, a pesar de su alta sofisticación tecnológica, la evidencia sugiere que factores externos como la temperatura y la humedad pueden influir de manera progresiva en la estabilidad funcional de estos dispositivos, favoreciendo procesos de degradación que no siempre son evidentes en etapas tempranas, pero que afectan su desempeño a largo plazo.

Bajo esta perspectiva, el comportamiento de los detectores de panel plano no puede analizarse únicamente desde su estructura tecnológica interna, sino también desde su interacción con el entorno en el que operan. Comprender estas dinámicas resulta fundamental para garantizar la calidad del diagnóstico por imágenes, optimizar el desempeño operativo de los sistemas y prolongar su vida útil dentro de los servicios de radiología digital.

Sin embargo, aún se evidencia la necesidad de profundizar en el análisis del impacto que ejercen las variables ambientales, particularmente la humedad y la temperatura, sobre la estabilidad y durabilidad de estos sistemas, debido a que su degradación progresiva puede comprometer la confiabilidad diagnóstica y la eficiencia operativa en los servicios de imagenología médica.

## **Planteamiento del Problema**

En la práctica de la radiología digital moderna, los sistemas de adquisición de imagen han pasado a depender de tecnologías altamente sensibles que requieren condiciones de operación controladas para mantener su desempeño óptimo. En este sentido, los detectores de panel plano se han convertido en componentes centrales del proceso diagnóstico, ya que permiten la conversión directa o indirecta de la radiación en información digital de alta resolución. Sin embargo, su funcionamiento no puede entenderse únicamente desde su diseño tecnológico, sino también desde la interacción con el entorno donde operan, especialmente en relación con variables físicas como la temperatura y la humedad.

Desde una perspectiva técnica, se reconoce que estos dispositivos requieren estabilidad en sus parámetros electrónicos internos, así como una correcta calibración de elementos como la ganancia, el offset y la corrección de defectos del detector. Estas condiciones permiten mantener la fidelidad de la imagen y garantizar una adecuada representación de las estructuras anatómicas. No obstante, cuando los factores ambientales se descontrolan, se inicia un proceso progresivo de alteración en la respuesta del sistema que afecta su rendimiento global.

En la literatura especializada se ha descrito que el desempeño de los detectores no depende exclusivamente de su arquitectura interna, sino que está estrechamente relacionado con el entorno físico en el que operan. En este sentido, se ha planteado que la exposición prolongada a condiciones de temperatura elevada o humedad relativa alta puede modificar el comportamiento de los materiales semiconductores y centelladores, generando cambios en la estabilidad de la señal, incremento del ruido electrónico y pérdida progresiva de eficiencia en la detección de radiación.

Este planteamiento ha sido respaldado por investigaciones que explican cómo la humedad puede alterar materiales como el yoduro de cesio, afectando su estructura microscópica y la capacidad de conducción de la luz generada en el proceso de conversión. De forma paralela, se ha evidenciado que el aumento de temperatura influye directamente sobre la movilidad de los portadores de carga en materiales como el selenio amorfo, incrementando la corriente oscura y deteriorando la calidad de la señal digital.

En concordancia con lo anterior, estudios de referencia en física de la imagen médica han señalado que los detectores digitales son altamente sensibles a variaciones ambientales, las cuales pueden comprometer parámetros fundamentales como la eficiencia cuántica de detección, la función de transferencia de modulación y la relación señal-ruido. Estos cambios no solo afectan la calidad de la imagen, sino que también pueden acelerar el envejecimiento del sistema y reducir su vida útil operativa (Bushberg et al., 2001; Seeram, 2023).

De manera complementaria, organismos internacionales han advertido que el control de las condiciones ambientales forma parte esencial de los programas de aseguramiento de calidad en radiología digital, debido a que pequeñas variaciones en temperatura o humedad pueden generar desviaciones significativas en la estabilidad del sistema de adquisición de imagen (International Atomic Energy Agency IAEA, 2019).

A partir de esta evidencia, se hace evidente que el problema no radica únicamente en el diseño tecnológico de los detectores, sino en la falta de control sistemático de las condiciones ambientales en las que operan. Esta situación puede generar degradación progresiva del sistema, incremento en los costos de mantenimiento, fallas operativas y afectación en la continuidad del servicio diagnóstico.

En este contexto, surge la necesidad de analizar de manera integral la evidencia científica disponible sobre la relación entre las variables ambientales, principalmente humedad

y temperatura y la vida útil de los detectores de panel plano utilizados en radiología digital. En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el impacto documentado de las variables ambientales (humedad y calor) en la vida útil de los detectores de panel plano (FPD)?

## Justificación

La radiología digital se ha consolidado como una herramienta esencial en el diagnóstico médico contemporáneo, debido a su capacidad para generar imágenes de alta resolución que permiten la identificación oportuna de diversas patologías. En este contexto, los detectores de panel plano (Flat Panel Detectors, FPD) constituyen un componente crítico del sistema, ya que son responsables de la conversión de la radiación de rayos X en señales digitales que posteriormente se transforman en imágenes diagnósticas. Por esta razón, su estabilidad operativa y su adecuado desempeño son fundamentales para garantizar la calidad diagnóstica en los servicios de imagenología médica (Seeram, 2023; Bushberg et al., 2001).

En el escenario actual de transformación digital en salud, asociado al desarrollo de tecnologías propias de la industria 4.0, la gestión de los equipos biomédicos enfrenta nuevos retos relacionados con el monitoreo, el mantenimiento y la optimización del rendimiento tecnológico. Los sistemas modernos de radiología digital generan información técnica continua, asociada a parámetros como la ganancia, el offset, la uniformidad del detector y los mapas de defectos. Sin embargo, en muchos entornos clínicos esta información no se utiliza de manera sistemática para identificar procesos tempranos de degradación o fallas incipientes en los sistemas de adquisición de imagen (Daniel, 2024).

Diversas investigaciones han señalado que el desempeño de los detectores de panel plano no depende únicamente de su diseño tecnológico, sino también de las condiciones ambientales en las que operan. En particular, variables como la temperatura y la humedad relativa pueden influir de forma significativa en el comportamiento de los materiales semiconductores y centelladores, afectando la estabilidad electrónica, la respuesta del detector y la calidad final de la imagen. Cuando estos factores no se encuentran adecuadamente

controlados, pueden presentarse alteraciones progresivas en la señal digital, incremento del ruido electrónico y reducción de la vida útil del sistema (IAEA, 2019; Seeram, 2023).

Desde el punto de vista técnico, la estabilidad de parámetros como la eficiencia cuántica de detección (DQE) es determinante para asegurar la obtención de imágenes diagnósticas confiables con dosis de radiación optimizadas. La degradación progresiva de estos indicadores puede comprometer la calidad de imagen, dificultar la interpretación clínica y afectar los procesos de control de calidad y calibración periódica de los equipos (Burtzloff et al., 2009).

Adicionalmente, desde la perspectiva de la protección radiológica, el funcionamiento adecuado de los detectores es esencial para garantizar la aplicación del principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), el cual busca mantener la exposición del paciente a la radiación en niveles mínimos razonables. Las inestabilidades técnicas derivadas del deterioro ambiental pueden inducir ajustes compensatorios en los parámetros de adquisición, lo que podría incrementar innecesariamente la dosis administrada durante los estudios radiológicos (IAEA, 2019).

En el contexto colombiano, donde las instituciones prestadoras de servicios de salud enfrentan limitaciones económicas, alta demanda asistencial y restricciones tecnológicas, el análisis de los factores que influyen en la vida útil de los equipos adquiere especial relevancia. La identificación del impacto de las variables ambientales sobre los detectores de panel plano puede aportar evidencia útil para fortalecer estrategias de mantenimiento, optimizar el uso de los recursos disponibles y mejorar la continuidad operativa de los servicios de imagenología (Ortiz Aguilar & Osorio Ochoa, 2024).

En este sentido, la presente investigación se justifica en la necesidad de analizar el impacto documentado de variables ambientales como la humedad y el calor en la vida útil de los detectores de panel plano utilizados en radiografía digital. Este análisis puede contribuir al fortalecimiento de la gestión tecnológica hospitalaria, a la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y a la optimización de la calidad diagnóstica, con el fin de favorecer una atención más segura, eficiente y sostenible para los pacientes.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar el efecto de la temperatura y la humedad relativa sobre la estabilidad operativa y la vida útil de los detectores de panel plano (FPD), a partir de la revisión de la literatura científica, en relación con su desempeño en radiología digital.

### **Objetivos Específicos**

Identificar la evidencia científica relacionada con la influencia de la temperatura y la humedad en la degradación o falla de los detectores de panel plano (FPD).

Describir los hallazgos reportados en la literatura sobre el desempeño y la vida útil de los detectores de panel plano (FPD), a partir de indicadores técnicos y operativos.

Analizar el impacto de las condiciones ambientales sobre los parámetros de calidad de imagen en radiología digital, incluyendo la eficiencia cuántica de detección (DQE), la relación señal-ruido (SNR), la uniformidad y los mapas de defectos.

Clasificar las condiciones ambientales en niveles de riesgo (seguras, de vigilancia y de alto riesgo), con base en la evidencia científica y lineamientos técnicos internacionales.

## Marco Teórico

### Evolución y Fundamentos de la Radiología Digital

#### *Sustitución de la Radiografía en Pantalla de Cine por Radiografía Computarizada.*

De acuerdo con Contreras et al. (2022), la radiografía convencional basada en película y pantalla ha sido, durante más de un siglo, una herramienta clave tanto en el diagnóstico médico como en procesos de inspección industrial. Desde su introducción a finales del siglo XIX, este método permitió avances significativos en la visualización interna del cuerpo humano y en la evaluación de distintos materiales. Sin embargo, con el paso del tiempo también se hicieron evidentes varias limitaciones asociadas a esta tecnología.

Entre las principales dificultades se encontraban los procesos químicos necesarios para el revelado de las películas, los cuales resultaban complejos y requerían condiciones específicas de manejo. A esto se sumaban los costos relativamente altos de los materiales utilizados, el tiempo necesario para obtener las imágenes y la dependencia de personal capacitado para realizar cada etapa del procedimiento. Asimismo, el almacenamiento físico de las radiografías y las dificultades para compartir o transmitir las imágenes representaban obstáculos importantes dentro de los sistemas de atención en salud. Otro aspecto relevante era el impacto ambiental generado por los productos químicos empleados durante el proceso de revelado.

Ante este panorama, comenzó a desarrollarse la radiografía digital como una alternativa tecnológica orientada a superar muchas de estas limitaciones. Según explican Contreras et al. (2022), este sistema incorpora detectores digitales capaces de captar los patrones de radiación producidos por los rayos X y transformarlos en información digital. Posteriormente, estos datos son procesados mediante sistemas computacionales y presentados

en monitores especializados, lo que permite al profesional de la salud analizar las imágenes de manera más rápida y precisa.

En términos generales, la radiografía digital integra varias etapas dentro de su funcionamiento, entre las que se destacan la captura de la imagen, el procesamiento de las señales eléctricas generadas por el detector, la visualización en pantalla y las herramientas de posprocesamiento. Además, incluye sistemas para el almacenamiento y la transmisión de las imágenes, lo que facilita su integración dentro de plataformas de gestión de imágenes médicas y mejora la comunicación entre los profesionales de la salud.

### ***De la Radiografía Computarizada (CR) a la Radiología Digital (DR)***

La evolución tecnológica en los sistemas de diagnóstico por imagen ha impulsado una transición progresiva desde la Radiografía Computarizada (CR) hacia la Radiografía Digital (DR), lo que ha representado un cambio importante en la eficiencia y rapidez de los procesos radiológicos. En los sistemas de radiografía computarizada, la obtención de la imagen se realiza mediante placas de fósforo fotoestimulable, las cuales almacenan la información generada por la exposición a los rayos X. Posteriormente, estas placas deben ser escaneadas en un lector especializado para convertir la información almacenada en una imagen digital, lo que implica un flujo de trabajo dividido en varias etapas.

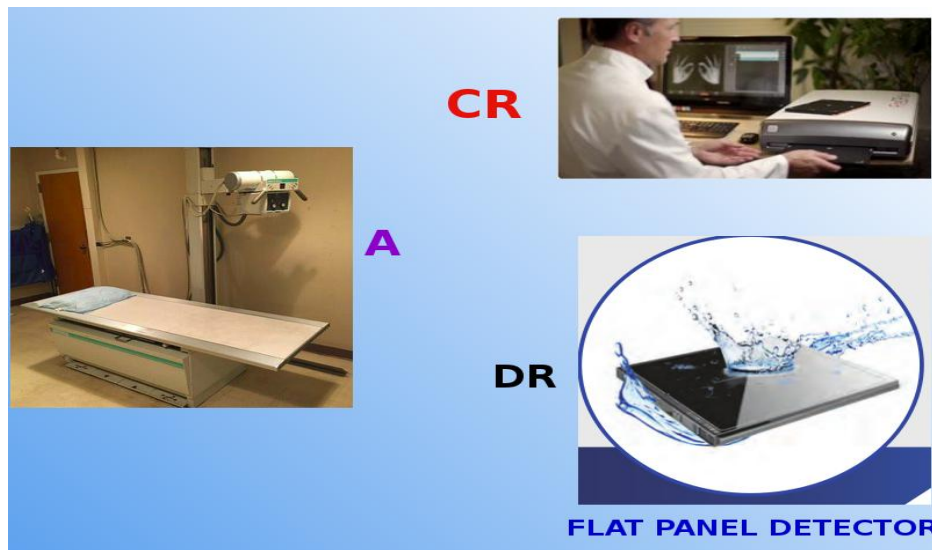
En contraste, los sistemas de radiografía digital utilizan detectores de panel plano o *Flat Panel Detectors* (FPD), los cuales permiten la captura directa e inmediata de la imagen radiográfica mediante procesos electrónicos de conversión digital. Esta tecnología elimina la necesidad de manipular chasis o placas intermedias, optimizando el flujo de trabajo y reduciendo el tiempo requerido para la obtención de la imagen diagnóstica. Asimismo, la conversión casi instantánea de la energía de radiación en señal digital mejora la resolución

espacial, favorece la visualización inmediata de la imagen y permite una mayor eficiencia en el procesamiento y almacenamiento de la información radiológica (Seeram, 2023).

Como resultado, esta integración tecnológica no solo optimiza los tiempos de adquisición de imágenes, sino que también mejora la eficiencia del flujo de trabajo en los servicios de radiología, permitiendo que los profesionales de la salud dispongan de información diagnóstica de forma más rápida y precisa

### Figura 1

#### *Actualización de Equipo Analógico a Digital*



*Nota.* La imagen compara la radiología analógica con las dos tecnologías digitales existentes. A la izquierda está el equipo básico (A), y a la derecha los sistemas de adquisición (CR y DR).

Fuente. García, J. (s.f.).

#### ***Análisis de Tecnologías de Tomografía Computarizada***

En el ámbito de la gestión tecnológica hospitalaria, la actualización y evaluación periódica de los equipos de diagnóstico por imagen constituye un elemento fundamental para garantizar la calidad de los estudios radiológicos y la seguridad del paciente. De acuerdo con la International Atomic Energy Agency (2019), el desempeño de los equipos de radiología

digital no depende únicamente de su funcionamiento técnico, sino también de su capacidad para adaptarse a los avances en tecnologías de adquisición y procesamiento de imágenes. Estos avances influyen directamente en la calidad diagnóstica, la eficiencia operativa de los servicios de radiología y la optimización de la dosis de radiación administrada al paciente.

En esta misma línea, la European Society of Radiology (2019) señala que la modernización de los equipos de imagen médica forma parte de las estrategias orientadas a mejorar la eficiencia clínica y mantener estándares adecuados de calidad en los servicios de diagnóstico. A medida que se desarrollan nuevas generaciones de detectores digitales, sistemas de reconstrucción de imagen y algoritmos de procesamiento avanzado, los equipos más antiguos pueden presentar limitaciones para cumplir con las exigencias actuales en términos de resolución, velocidad de adquisición y manejo eficiente de la información diagnóstica.

Por otra parte, organismos especializados como la American Association of Physicists in Medicine (2020) destacan la importancia de implementar programas de evaluación tecnológica, mantenimiento preventivo y control de calidad en los equipos de radiología. Estas estrategias permiten monitorear el rendimiento de los sistemas de imagen a lo largo del tiempo y facilitan la toma de decisiones relacionadas con su actualización, optimización o reemplazo dentro de las instituciones de salud. En conjunto, estas recomendaciones evidencian que una adecuada planificación en la gestión de tecnología médica contribuye a fortalecer la calidad diagnóstica, mejorar la eficiencia de los servicios de radiología y garantizar condiciones seguras para los pacientes y el personal sanitario.

## **Diseño Interno y Sensibilidad de Materiales**

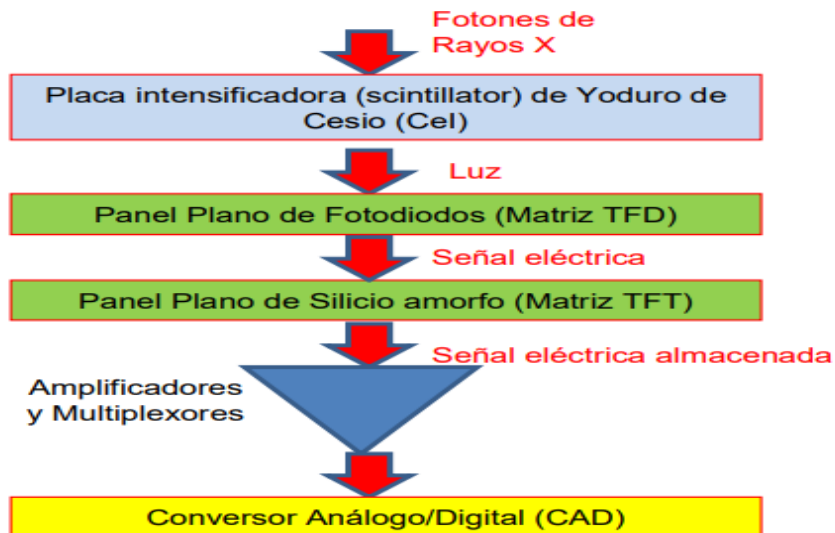
### ***Detectores de Conversión Indirecta (a-Si)***

Los detectores de conversión indirecta basados en silicio amorfo (a-Si) constituyen una de las tecnologías más utilizadas en los sistemas de radiografía digital. Este tipo de detector funciona mediante un proceso de conversión en dos etapas, en el cual la energía de los rayos X se transforma primero en luz visible y posteriormente en señal eléctrica digital. Para lograrlo, el detector incorpora una capa centelleadora, generalmente compuesta por yoduro de cesio (CsI) o gadolinio oxisulfuro ( $Gd_2O_2S$ ), cuya función es convertir la radiación incidente en fotones de luz.

Posteriormente, esta luz es captada por una matriz de fotodiodos fabricados con silicio amorfo, los cuales transforman la señal luminosa en una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación recibida. Esta señal es procesada por transistores de película delgada (TFT), que permiten la lectura y transmisión de los datos hacia el sistema informático encargado de reconstruir la imagen digital. Este proceso de conversión indirecta permite obtener imágenes con buena resolución espacial y alta eficiencia de detección, lo que ha favorecido su implementación en numerosos sistemas de radiografía digital utilizados en la práctica clínica (Euclid Seeram, 2019)

**Figura 2**

*Incidencia de los Rayos X en el Detector de Panel Plano de Silicio Amorfo*



*Nota.* El diagrama detalla las etapas de conversión por las que pasa la radiación ionizante desde que impacta el detector indirecto hasta que se transforma en un formato procesable por una computadora. Fuente. Seguro Social de Salud (EsSalud). (2008).

### ***Arquitectura Funcional de los Detectores de Panel Plano***

Los sistemas de radiografía digital modernos se sustentan en el uso de detectores de panel plano (Flat Panel Detectors, FPD), dispositivos diseñados para transformar la energía de los rayos X en señales digitales que posteriormente son procesadas para generar la imagen diagnóstica. Desde el punto de vista estructural, estos detectores están conformados por una matriz de transistores de película delgada (Thin Film Transistors, TFT) organizados en una disposición bidimensional que permite registrar y transferir las cargas eléctricas generadas durante la exposición radiológica.

Según Seeram (2023), el funcionamiento de los FPD depende de la interacción coordinada entre el material detector y los componentes electrónicos encargados de almacenar

y transportar la señal generada. En este proceso, cada elemento de la matriz actúa como una celda independiente capaz de registrar la señal producida por la interacción de la radiación con el material fotosensible. Posteriormente, dicha señal es amplificada y digitalizada mediante circuitos electrónicos especializados, lo que permite reconstruir la información radiológica en forma de imagen digital de alta resolución.

La importancia de comprender esta arquitectura radica en que la estabilidad operativa del detector depende directamente del correcto funcionamiento de estos componentes. Alteraciones en los materiales semiconductores o en la integridad de los circuitos electrónicos pueden afectar la eficiencia de captura de señal, generando ruido electrónico, artefactos o pérdida de información diagnóstica. Por esta razón, el análisis estructural de los detectores constituye una base fundamental para evaluar los efectos que factores ambientales, como la temperatura y la humedad, pueden ejercer sobre el rendimiento de los sistemas de radiología digital.

### ***Dinámica del Calor y Degradación Térmica***

**Capa protectora:** Lámina de aluminio o fibra de carbono que provee integridad estructural.

**Capa reflectante:** Película blanca diseñada para maximizar la reflexión de fotones hacia el fotosensor.

**Centelleador de CsI:** Capa de yoduro de cesio (400-500  $\mu\text{m}$ ) que transmuta los rayos X en luz visible.

**Matriz de fotodiodos y TFT:** Conjunto de silicio amorfo que convierte la fluorescencia en cargas eléctricas.

**Circuitos de procesamiento:** Componentes ADC y amplificadores para la digitalización de la señal.

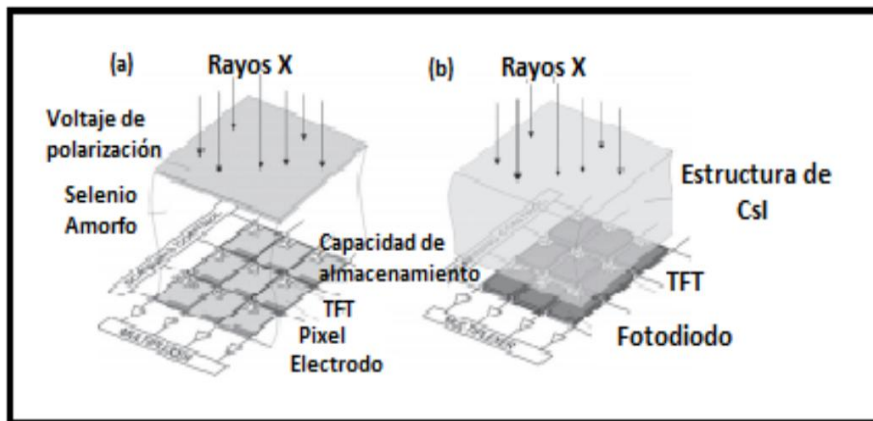
**Sustrato de vidrio:** Base que garantiza la estabilidad termomecánica del sistema.

### ***Detectores de Conversión Directa (a-Se)***

Estos dispositivos emplean Selenio Amorfo ( $Z=34$ ) para la conversión directa de fotones en carga eléctrica. Según Swaby et al. (2026), el espesor de la capa (200-400  $\mu\text{m}$ ) es determinante para la eficiencia de detección. Se ha demostrado que el uso de capas de bloqueo de poliimida permite suprimir la corriente oscura por debajo de 10  $\text{pA}/\text{mm}^2$  bajo campos eléctricos de hasta 10  $\text{V}/\mu\text{m}$ . No obstante, existe un compromiso técnico identificado en capas de 414  $\mu\text{m}$ : aunque logran una mayor fotocorriente por absorción, presentan una susceptibilidad incrementada al atrapamiento de portadores de carga, lo que deriva en una persistencia de señal o lag temporal (Swaby et al., 2026).

### **Figura 3**

#### *Conversión Directa e Indirecta en Detectores de Panel Plano*



*Nota.* El esquema compara los componentes internos de los dos mecanismos de captura en radiología digital: la conversión directa mediante un semiconductor (a) y la conversión indirecta empleando un material centellador acoplado a fotodiodos (b).

### ***Desarrollo de Detectores Basados en Pantallas Luminiscentes en el Stellarator TJ-II***

#### ***Fundamentos***

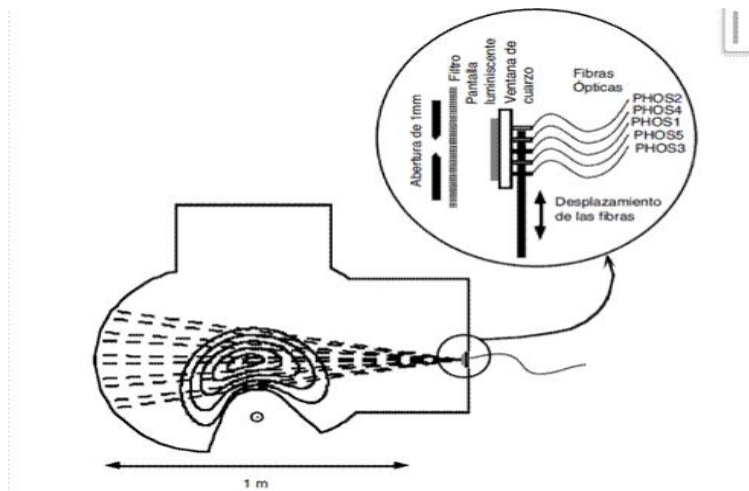
Zurro et al. (2005). Este detector consiste en una pantalla luminiscente y un racimo de cinco ramas que recogen la luz luminiscente de la pantalla y la guían a 5 fotomultiplicadores diferentes. El detector se diseñó con el objeto de conseguir simultáneamente resolución espacial y temporal en las medidas de la radiación de ultravioleta de vacío procedente del plasma del stellarator TJ-II, que complementará la información que proporcionan otros detectores y diagnósticos operativos en el TJ-II, como las matrices lineales de detectores de rayos X de baja energía, bolometría y el espectrómetro de alta resolución de ultravioleta de vacío, que observa una cuerda central del plasma.

### **Descripción**

Un esquema simplificado del detector y de la visión que cada uno de los canales tiene del plasma, se muestra en la figura 6. La radiación procedente del plasma llega al detector a través de una abertura de 1 mm de diámetro. Seguidamente, está colocado un filtro que sirve para elegir la banda de radiación que se quiere medir. Se escogió un filtro comercial de aluminio con un espesor de 1500 Å, que transmite la radiación con energía mayor que 15 eV y cuya curva de transmisión se muestra en la figura 5

**Figura 4**

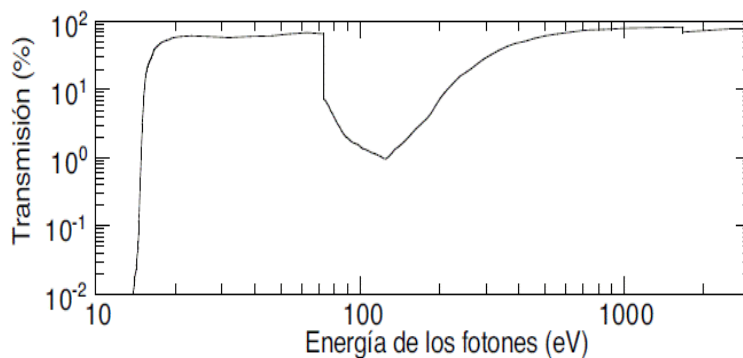
*Corte Poloidal con la Visión del Detector Multicanal del Plasma del TJ-II.*



*Nota.* La imagen representa una sección transversal (corte poloidal) de la cámara de vacío del dispositivo de fusión nuclear TJ-II, destacando el campo de visión y el diseño interno del sistema de detección multicanal acoplado para el diagnóstico del plasma. Fuente: Tomado de universidad Complutense de Madrid (2010).

**Figura 5**

*Transmisión del Filtro de 1500 Å de Aluminio*



*Nota.* La gráfica de escala logarítmica muestra el porcentaje de transmisión de un filtro delgado de aluminio con un espesor de 1500 Angstroms (1500 Å), evaluado ante diferentes

niveles de energía de fotones expresados en electronvoltios (eV). Fuente: de universidad Complutense de Madrid (2010).

### ***Influencia de los Factores Ambientales y Operativos en la Calidad de las Imágenes Radiológicas en Entornos Hospitalarios.***

De acuerdo con Ortiz et al (2024), debemos identificar 4 factores importantes, como son los asociados el paciente, al hardware, al operador y al software, de los cuales podemos resaltar los siguientes parámetros:

**Técnica de Adquisición:** La forma en la que se realiza la adquisición de la imagen, como la exposición apropiada a la radiación, la configuración del equipo y la técnica de posicionamiento del paciente puede afectar significativamente la calidad de la imagen.

**Calidad del Equipo:** La calidad y el estado del equipo radiológico, incluyendo el generador de rayos X, el detector de imagen y otros componentes juegan un papel crucial en la obtención de imágenes de alta calidad.

**Calibración y Mantenimiento:** Es fundamental que el equipo radiológico este correctamente calibrado y mantenido para garantizar la precisión y la consistencia de las imágenes producidas.

**Técnico Radiológico:** La habilidad y experiencia del técnico radiológico que opera el equipo son factores importantes. Un técnico capacitado puede optimizar la configuración del equipo y garantizar un posicionamiento adecuado del paciente para obtener imágenes de alta calidad.

### ***Susceptibilidad Termodinámica de los Materiales***

La integridad de los componentes activos está condicionada por su cinética de degradación frente a agentes externos:

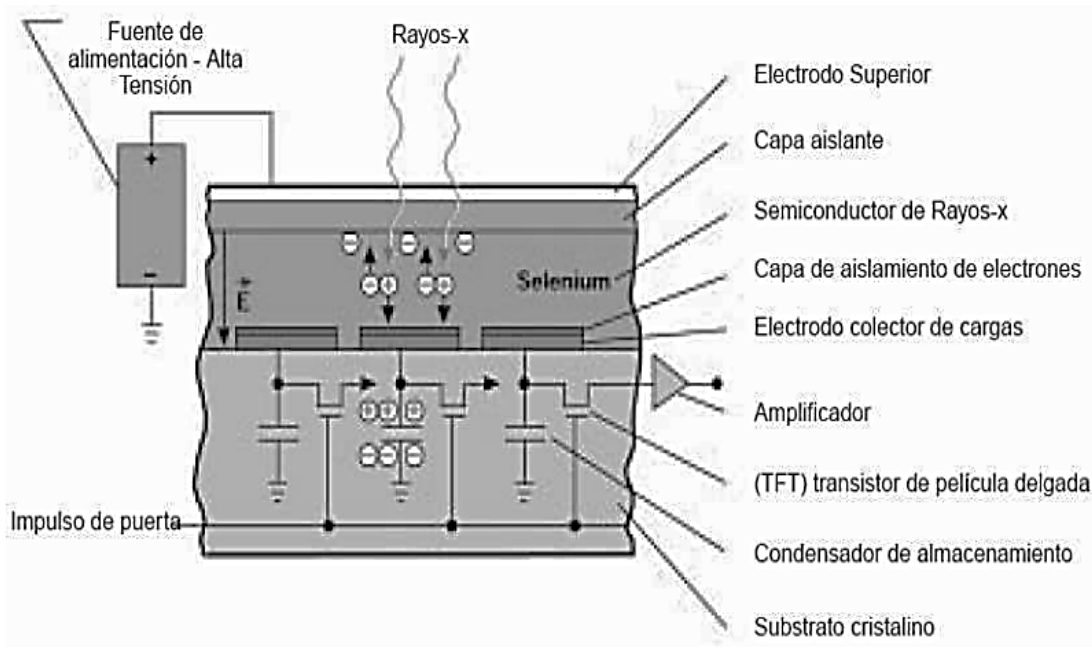
**Yoduro de Cesio (CsI):** Presenta una higroscopía crítica que induce la deliquesencia; la absorción de vapor de agua provoca la disolución estructural de las microagujas del centelleador, degradando la resolución espacial.

**Silicio Amorfo (a-Si):** Exhibe una propensión al incremento del ruido electrónico por agitación térmica, afectando la estabilidad de la matriz TFT.

**Selenio Amorfo (a-Se):** Vulnerable a la fatiga del sensor y a alteraciones en la movilidad de huecos, especialmente en entornos con disipación térmica ineficiente.

### Figura 6

*Composición del Detector de Panel Plano de Selenio Amorfo.*



*Nota.* El diagrama detalla la organización interna y las capas semiconductoras de un detector digital directo. Se ilustra cómo interactúa la radiación con el material sensor y el circuito electrónico inferior encargado de retener y direccionar las cargas eléctricas generadas. Fuente. Seguro Social de Salud (EsSalud). (2008).

## **Dinámica del Calor y Degradación Térmica**

### ***Efectos del Calor en la Calidad de Imagen***

Se ha observado que temperaturas ambientales superiores al rango de 35°C-40°C incrementan exponencialmente el dark noise (ruido oscuro) en sistemas de fabricantes como Fuji y AGFA (Al Khalifah et al., 2012). Este fenómeno reduce la relación señal-ruido (SNR), comprometiendo la detección de estructuras de bajo contraste.

### ***Degradación del Selenio (a-Se)***

En capas gruesas de a-Se, el estrés térmico altera la movilidad de los portadores de carga y el tiempo de tránsito. El aumento de la temperatura favorece el atrapamiento de portadores en estados localizados, lo que no solo incrementa la corriente oscura, sino que también prolonga el tiempo de recuperación del detector tras la exposición (Swaby et al., 2026).

### ***Análisis Comparativo con BGO***

Estudios de Tayal et al. (2020) cuantifican que un incremento de apenas 10°C respecto a la temperatura de operación estándar provoca un déficit significativo en el conteo de fotones. Este estrés térmico se manifiesta clínicamente como "defectos irregulares" (patchy defects) en los mapas de uniformidad, invalidando la calibración del sistema.

### ***Artefactos Asociados a Detectores de Panel Plano***

Además de los procesos de degradación física de los materiales, los sistemas de radiografía digital pueden presentar artefactos derivados de limitaciones en la electrónica de lectura o en los algoritmos de procesamiento de señal. Estos fenómenos pueden manifestarse como irregularidades en el brillo, distorsiones en zonas de alto contraste o patrones anómalos en la uniformidad de la imagen.

Investigaciones realizadas por S. Burtzlaff, et al (2009) han identificado diferentes tipos de artefactos asociados al proceso de lectura en detectores de panel plano utilizados en aplicaciones radiográficas. Los autores observaron que ciertas distorsiones pueden generarse durante la transferencia de la señal desde la matriz del detector hacia el sistema de procesamiento, especialmente cuando se analizan objetos con alta absorción radiológica.

La identificación de estos fenómenos es relevante para los programas de control de calidad, ya que permite diferenciar entre defectos originados por fallos físicos del detector y aquellos relacionados con el procesamiento electrónico de la señal. Esta distinción resulta fundamental para establecer estrategias de corrección adecuadas, evitando interpretaciones erróneas sobre el estado real del sistema de imagen.4. Impacto de la Humedad Relativa y Corrosión.

#### ***Artefactos y Artificios en Tomografía Computada.***

De acuerdo con Camargo et al. (2023). Para el artefacto de ruido lo podemos encontrar por una mala calibración del equipo y falta de mantenimiento preventivo, se puede mejorar las imágenes aumentando el miliamperaje, también podemos mejorar con el manejo del contraste en el post proceso de la imagen. Dado que no existe un protocolo para estos mantenimientos y siendo imprevistos los fallos al contactar los representantes de los tomógrafos se brindará el servicio pertinente. En consideración de los factores ambientales, se debe tener en cuenta que el entorno donde se lleve a cabo el estudio debe mantenerse limpio y a una temperatura adecuada. La humedad, la temperatura y la presencia de polvo son elementos críticos, ya que tienen el potencial de ocasionar errores en el algoritmo de reconstrucción. En consecuencia, resulta fundamental mantener un control preciso de la temperatura mediante el uso de un sistema de aire acondicionado, puertas cerradas para evitar el cambio de temperatura por parte

del aire acondicionado y garantizar una limpieza óptima tanto en los equipos como en su entorno, con el propósito de prevenir posibles fallas derivadas de estos factores.

### **Impacto de la Humedad Relativa y Corrosión**

#### ***Fallos en la Detección de Exposición Automática***

La infiltración de humedad y la condensación interna comprometen la circuitería del sensor de exposición. De acuerdo con Varex (2017), estas condiciones pueden provocar disparos falsos o la ausencia total de activación en modo Detección de Exposición Automática, forzando la repetición de exámenes y aumentando la dosis de radiación al paciente.

#### ***Factores de Ventilación y Entornos Adversos***

Un factor crítico a menudo subestimado es la circulación de aire insuficiente. Varex (2017) advierte que la instalación en bandejas Bucky cerradas sin ventilación adecuada impide la disipación del calor generado por la electrónica interna. Asimismo, la exposición a entornos salinos o sulfurosos acelera la corrosión de los contactos metálicos, reduciendo drásticamente la vida útil de los circuitos de lectura.

#### ***La Calidad de Imagen en Radiología Digital***

Según Hernández et al. (2024). Tener establecido un protocolo para el mantenimiento preventivo donde se establezcan procedimientos en caso de fallos imprevistos, contar con un servicio eficiente por parte de los representantes del equipo. Respecto a los factores ambientales, se subraya la necesidad de mantener un entorno limpio y a una temperatura adecuada. Se debe asegurar a humedad y la temperatura adecuada, con evidencia escrita a partir de planillas. Se debe contar con aire acondicionado, esto como recomendaciones para mejorar la calidad de las imágenes en y la vida útil de los equipos.

## **Modelado Matemático de la Vida Útil y Degradación**

### ***Interacción Sinérgica (Modelo de Peck)***

La tasa de fallo se modela mediante la combinación del estrés térmico y la humedad relativa. El volumen de exámenes actúa como un acelerador de la fatiga del material, donde la falta de flujo de aire correlaciona directamente con el fallo prematuro de los transistores de película delgadas

## **Consecuencias Clínicas, Métricas de Calidad y Economía**

### ***Métricas de Calidad en Radiología Digital***

La evaluación objetiva de la calidad de imagen en radiología digital se fundamenta en un conjunto de parámetros físicos que permiten cuantificar la capacidad del sistema para representar con precisión las estructuras anatómicas. Entre los indicadores más utilizados se encuentran la eficiencia cuántica de detección (DQE), la función de transferencia de modulación (MTF) y la relación señal-ruido (SNR), los cuales describen diferentes aspectos del desempeño del detector.

De acuerdo con Euclid Seeram (2023), la eficiencia cuántica de detección constituye una de las métricas más relevantes, ya que expresa la capacidad del sistema para transformar los fotones incidentes en información útil para la formación de la imagen. Una mayor DQE indica que el detector aprovecha de manera más eficiente la radiación recibida, lo que permite obtener imágenes con menor dosis de radiación para el paciente.

Por su parte, la función de transferencia de modulación describe la habilidad del sistema para reproducir detalles espaciales de diferentes tamaños, mientras que la relación señal-ruido refleja el equilibrio entre la información útil y las fluctuaciones aleatorias presentes en la señal electrónica. En conjunto, estos parámetros permiten identificar cambios

sutiles en el rendimiento del detector que pueden pasar desapercibidos durante la evaluación visual de las imágenes.

En este contexto, la degradación de los materiales del detector o la presencia de condiciones ambientales adversas puede provocar alteraciones en estas métricas, lo que se traduce en una disminución progresiva de la calidad diagnóstica. Por lo tanto, el análisis de estos indicadores resulta esencial para detectar tempranamente fallos en los sistemas de radiología digital.

### ***Impacto Clínico de la Radiología Digital en la Precisión Diagnóstica***

Diversos estudios han demostrado que la introducción de detectores digitales ha mejorado significativamente la precisión diagnóstica en comparación con los sistemas radiográficos analógicos tradicionales. Este avance tecnológico se debe principalmente a la mayor capacidad de los detectores digitales para registrar variaciones sutiles en la intensidad de la radiación, lo que permite visualizar con mayor claridad estructuras anatómicas de bajo contraste.

Un estudio comparativo realizado por W. J. Lee y B. S. Choi (2013) evaluó la fiabilidad diagnóstica de las imágenes obtenidas mediante detectores de panel plano frente a radiografías analógicas en la clasificación de neumoconiosis. Los resultados mostraron una mayor consistencia entre observadores y una mejor capacidad para identificar hallazgos radiológicos sutiles en las imágenes digitales.

Estos hallazgos sugieren que la tecnología digital ofrece ventajas significativas en términos de sensibilidad diagnóstica. Sin embargo, dicha superioridad depende de que los detectores mantengan condiciones óptimas de funcionamiento. Cualquier degradación en los componentes del sistema puede reducir la calidad de la señal capturada y afectar la confiabilidad del diagnóstico. En consecuencia, garantizar la estabilidad operativa de los

detectores digitales se convierte en un aspecto crítico para preservar los beneficios clínicos asociados a esta tecnología.

### ***Degradación de Eficiencia Cuántica de Detección***

La física de la agitación térmica dicta que el incremento del ruido de fondo eleva el umbral de ruido obscuro, reduciendo directamente la Eficiencia Cuántica de Detección (DQE). Simultáneamente, la fatiga del sensor y la degradación estructural del centelleador provocan una dispersión de la señal luminosa, lo que disminuye la Función de Transferencia de Modulación (MTF). En mamografía digital, esto compromete la visibilidad de microcalcificaciones, reduciendo la confianza diagnóstica (Swaby et al., 2026)

### ***Análisis de Costos y Eficiencia Operativa***

En los servicios de diagnóstico por imagen, la disponibilidad operativa de los equipos radiológicos constituye un factor determinante para la eficiencia clínica y económica de las instituciones de salud. Cuando un sistema de radiografía digital presenta fallas técnicas o periodos prolongados de inactividad, se generan impactos directos en la productividad del servicio, en los tiempos de atención a los pacientes y en los costos asociados a la operación hospitalaria. En este sentido, la literatura especializada señala que los programas de mantenimiento preventivo y control de calidad permiten reducir significativamente los riesgos de interrupciones inesperadas en el funcionamiento de los equipos de imagen médica (International Atomic Energy Agency, 2019).

Desde la perspectiva de la gestión tecnológica en salud, diversos estudios destacan que la planificación del mantenimiento y la evaluación periódica del rendimiento de los equipos contribuyen a prolongar su vida útil y a optimizar el uso de los recursos institucionales. La American Association of Physicists in Medicine (2020) señala que los programas estructurados de mantenimiento preventivo permiten identificar de manera temprana posibles

fallas en los componentes electrónicos, sistemas de detección o procesos de adquisición de imagen, lo que reduce la probabilidad de reparaciones costosas o interrupciones prolongadas del servicio.

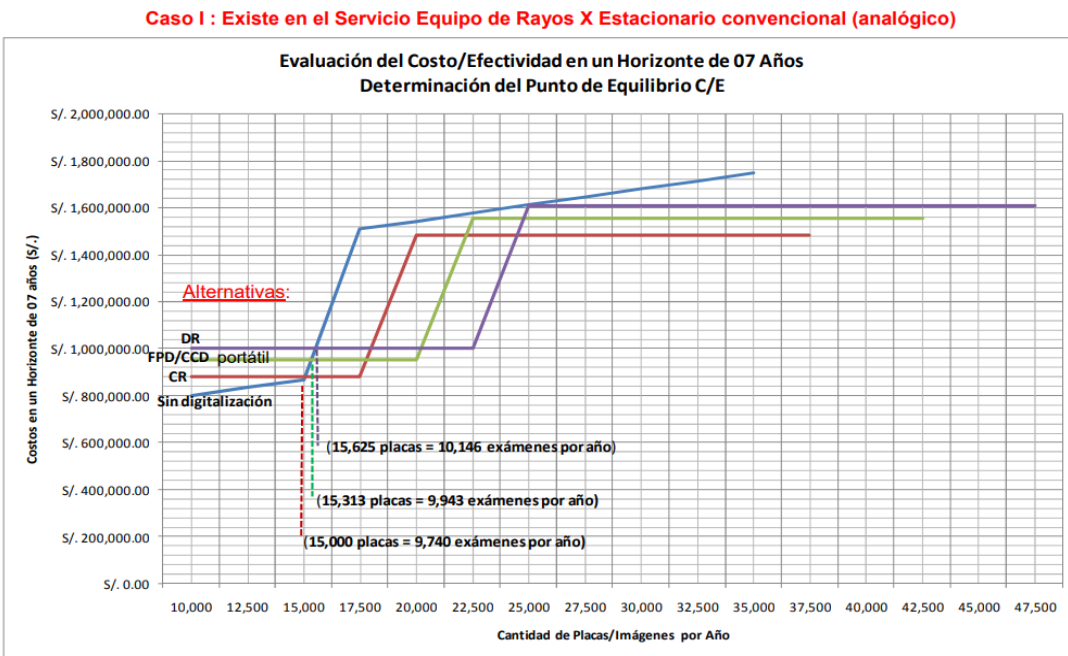
Asimismo, una adecuada gestión del mantenimiento favorece la estabilidad en parámetros técnicos fundamentales para la calidad de imagen, como la eficiencia cuántica de detección (Detective Quantum Efficiency, DQE) y la función de transferencia de modulación (Modulation Transfer Function, MTF), los cuales influyen directamente en la resolución y fidelidad diagnóstica de las imágenes radiológicas. Cuando estos parámetros se ven afectados por fallas técnicas o desgaste de los componentes, pueden aparecer artefactos o degradaciones en la imagen que afectan la precisión diagnóstica (Jerrold T. Bushberg et al., 2012).

Daniel (2024) también nos indica que la gestión del ciclo de vida de los dispositivos médicos debe integrar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo orientadas a maximizar la disponibilidad operativa del equipamiento hospitalario

En este contexto, la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y evaluación tecnológica continua permite mejorar la eficiencia operativa de los servicios de radiología, optimizar los costos asociados a la operación de los equipos y garantizar la continuidad en la prestación de los servicios diagnósticos dentro de las instituciones de salud.

Figura 7

*Evaluación del Costo/Efectividad en un Horizonte de 7 Años*



*Nota.* La gráfica presenta un estudio financiero comparativo en un horizonte de proyección de 7 años. Evalúa los costos totales (eje vertical en Soles, S/.) frente al volumen de producción anual de imágenes (eje horizontal), tomando como escenario base un servicio que ya dispone de un equipo de rayos X convencional estacionario. Fuente. Seguro Social de Salud (EsSalud). (2008).

Como refiere el Boletín 26 - Digitalización de Imágenes Médicas en Radiología (2008), en el caso 1 es conveniente la adquisición de un nuevo Equipo de Rayos X Digital (DR) en reemplazo del Equipo analógico existente cuando la demanda supera los 10,146 exámenes (15,625 placas / imágenes) por año.

## **Conclusiones y Recomendaciones de Gestión**

### ***Protocolos de Control Ambiental***

Para maximizar la duración del Detectores de Panel Plano, se recomienda mantener la sala de examen a  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa de  $45\% \pm 5\%$ . Estas condiciones minimizan la cinética de degradación química y el ruido térmico.

### ***Gestión del Mantenimiento en Dispositivos Médicos***

La gestión adecuada del mantenimiento de dispositivos médicos constituye un componente esencial para garantizar la seguridad y la continuidad operativa de los servicios hospitalarios. En el caso de los equipos de diagnóstico por imagen, la implementación de programas de mantenimiento preventivo permite identificar tempranamente posibles fallos en los componentes electrónicos y mecánicos del sistema.

De acuerdo con C. Daniel (2024), los programas de mantenimiento en instituciones de salud deben basarse en estrategias sistemáticas que incluyan inspecciones periódicas, pruebas funcionales y monitoreo del desempeño de los equipos. Estas acciones permiten prolongar la vida útil de los dispositivos biomédicos y reducir el riesgo de interrupciones en los procesos de atención clínica.

En el contexto de los sistemas de radiología digital, estas prácticas adquieren especial relevancia debido a la complejidad tecnológica de los detectores de panel plano y a su sensibilidad frente a factores ambientales. La integración de protocolos de mantenimiento adecuados no solo contribuye a preservar la estabilidad operativa del equipo, sino que también favorece la optimización de los recursos institucionales y la sostenibilidad tecnológica del sistema de salud.

***Estrategia Aumentar la Vida Útil de los Detectores de Panel Plano (FPD)***

**Auditoría:** Evaluar el rendimiento de los paneles a partir del séptimo año mediante pruebas periódicas de Eficiencia Cuántica de Detección.

**Actualización PACS:** Asegurar que las actualizaciones de los detectores coincidan con la modernización de la infraestructura PACS Sistema de Archivado y Comunicación de Imágenes para evitar retrasos en la transferencia de datos.

**Gestión de Ventilación:** Garantizar una circulación de aire activa en los alojamientos Bucky para mitigar el calor residual de la electrónica.

## **Marco Metodológico**

### **Tipo y Diseño de la Investigación**

La presente investigación se enmarca en un enfoque documental, dado que se sustenta en la recopilación, organización y análisis de información científica previamente publicada relacionada con el comportamiento y desempeño de los detectores de panel plano (Flat Panel Detectors – FPD) en sistemas de radiología digital.

Este tipo de estudio resulta pertinente cuando el objetivo principal no es generar datos experimentales, sino comprender un fenómeno a partir del conocimiento ya existente en la literatura académica. En este sentido, permite identificar patrones, relaciones y explicaciones teóricas que aportan una visión más amplia y estructurada del problema investigado.

En relación con el propósito del presente trabajo, el análisis se orienta a examinar cómo variables ambientales, especialmente la temperatura y la humedad relativa, inciden en la vida útil y en la estabilidad operativa de los detectores digitales utilizados en el diagnóstico por imágenes.

Bajo este enfoque, la investigación no solo integra hallazgos provenientes de diferentes fuentes científicas, sino que también busca interpretarlos de manera crítica, con el fin de generar una comprensión más sólida del fenómeno y aportar elementos que favorezcan la toma de decisiones en la gestión tecnológica de los equipos en las instituciones de salud.

### **Enfoque de Investigación**

El estudio se desarrolla desde un enfoque cualitativo, orientado a interpretar la información científica existente sobre el funcionamiento de los detectores digitales frente a diferentes condiciones ambientales.

Este enfoque permite analizar los resultados presentados en diversos estudios académicos para identificar relaciones entre variables como temperatura, humedad relativa, estabilidad electrónica del detector y calidad de la imagen diagnóstica.

En este sentido, la investigación no busca generar datos experimentales propios, sino analizar críticamente los resultados reportados por otros autores, con el fin de comprender cómo ciertos factores ambientales pueden influir en el rendimiento de los detectores digitales.

Por ejemplo, investigaciones en física médica como las desarrolladas por Seibert y Boone (2020) explican que los materiales centelladores utilizados en los detectores de rayos X pueden presentar sensibilidad frente a cambios térmicos, lo cual puede alterar su eficiencia en la conversión de energía. De forma complementaria, otros estudios han señalado que ambientes con niveles elevados de humedad pueden favorecer procesos de deterioro progresivo en algunos componentes electrónicos internos.

El análisis de estas evidencias permite comprender de manera más amplia la interacción entre los factores ambientales y el funcionamiento de los sistemas de radiología digital, aportando elementos importantes para la gestión tecnológica y el mantenimiento de estos equipos.

### **Diseño de Investigación**

El presente estudio se estructura bajo un diseño no experimental de tipo documental, en la medida en que se fundamenta en la revisión, organización y análisis de información científica previamente publicada, sin intervenir directamente en las variables objeto de estudio.

Este tipo de diseño permite abordar el fenómeno desde una perspectiva analítica, a partir de la observación crítica de diversas fuentes académicas, integrando hallazgos provenientes de diferentes contextos y enfoques investigativos. De esta manera, se facilita la

construcción de una visión más amplia y fundamentada sobre la relación entre las condiciones ambientales y el desempeño de los detectores digitales.

Asimismo, el diseño documental resulta especialmente pertinente en investigaciones orientadas a la síntesis del conocimiento científico, ya que posibilita la comparación de resultados reportados por distintos autores, así como la identificación de tendencias, coincidencias y posibles vacíos en la literatura.

En el marco de este estudio, dicho diseño permite examinar investigaciones relacionadas con el impacto de variables ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, sobre los detectores de panel plano, considerando fuentes como artículos científicos, tesis académicas y documentos técnicos asociados a la física de los sistemas de imagenología.

### **Población y Unidad de Análisis**

La población de la investigación está constituida por documentos científicos y académicos que abordan el funcionamiento, mantenimiento y desempeño de los detectores de panel plano en el contexto de la radiología digital.

Dentro de esta población se contemplan diversas fuentes, tales como artículos publicados en revistas especializadas, tesis universitarias, capítulos de libros en el área de física médica y documentos técnicos relacionados con tecnologías de diagnóstico por imagen. Estas fuentes aportan diferentes perspectivas que enriquecen la comprensión del fenómeno estudiado.

Por su parte, la unidad de análisis corresponde a cada uno de los documentos seleccionados durante el proceso de revisión bibliográfica. A partir de su análisis se busca identificar información relevante sobre los efectos de variables ambientales principalmente temperatura y humedad en el funcionamiento de los detectores digitales.

Este proceso permitirá reconocer patrones asociados a la degradación de componentes electrónicos, posibles alteraciones en parámetros de calidad de imagen, como la eficiencia cuántica de detección (DQE) y la relación señal ruido (SNR), así como estrategias orientadas al mantenimiento preventivo y predictivo de estos sistemas.

### **Criterios de Selección Documental**

Con el fin de garantizar la calidad, actualidad y pertinencia de la información, se establecerán criterios específicos para la selección de los documentos que harán parte de la revisión bibliográfica. Estos criterios permitirán delimitar el conjunto de fuentes a analizar y asegurar que aporten evidencia relevante para el desarrollo del estudio. Dentro de los criterios de inclusión se considerarán:

Publicaciones científicas comprendidas entre los años 2000 y 2025, con el propósito de incorporar información acorde con los avances recientes en radiología digital.

Estudios relacionados con detectores de panel plano o sistemas de radiología digital basados en esta tecnología.

Investigaciones que aborden el impacto de variables ambientales, especialmente temperatura y humedad relativa, sobre el desempeño o la durabilidad de los detectores.

Documentos académicos provenientes de bases de datos científicas reconocidas o repositorios institucionales.

Por otra parte, se establecerán criterios de exclusión orientados a descartar fuentes que no cumplan con los estándares de calidad requeridos, entre ellos:

Documentos que no cuenten con respaldo académico, revisión por pares o procedencia institucional verificable.

Publicaciones duplicadas en diferentes bases de datos.

Estudios enfocados en tecnologías de detección que no correspondan al contexto actual de la radiología digital.

### **Fuentes y Técnicas de Recolección de Información**

La recopilación de la información se llevará a cabo mediante técnicas propias de la investigación documental, las cuales permitirán acceder, seleccionar y organizar la evidencia científica disponible sobre el tema de estudio.

Una de las principales estrategias consistirá en la consulta de bases de datos científicas y repositorios académicos especializados, tales como PubMed, Scopus, ScienceDirect y Google Scholar. Estas fuentes permitirán identificar artículos científicos, tesis y documentos técnicos relacionados con el funcionamiento de los detectores digitales y los factores que pueden influir en su desempeño.

De manera complementaria, se empleará la observación documental, entendida como el análisis detallado y crítico del contenido de las fuentes seleccionadas. A través de este proceso se identificarán conceptos relevantes, resultados de investigación y explicaciones teóricas vinculadas con el impacto de las condiciones ambientales en los sistemas de radiología digital.

### **Técnicas de Análisis de la Información**

El análisis de la información se realizará mediante la técnica de análisis de contenido, la cual permitirá examinar de forma sistemática la información contenida en las fuentes documentales seleccionadas, con el fin de identificar categorías relevantes para la investigación.

En una primera fase, los documentos serán organizados y clasificados temáticamente, agrupándolos según los principales ejes de estudio, tales como el impacto de la temperatura en

los detectores digitales, los efectos de la humedad en los componentes electrónicos y las estrategias de mantenimiento aplicadas en equipos de radiología.

Posteriormente, la información recopilada será registrada en una matriz de análisis documental, diseñada para sistematizar los datos más relevantes de cada fuente revisada. Esta matriz incluirá variables como autor, año de publicación, tipo de estudio, condiciones ambientales analizadas, tipo de detector, principales hallazgos y conclusiones reportadas.

El uso de esta matriz permitirá comparar de manera organizada los resultados presentados por diferentes autores, identificar coincidencias, tendencias y posibles discrepancias en la literatura científica, así como establecer relaciones entre las variables ambientales y el desempeño de los detectores digitales.

Finalmente, se realizará una síntesis interpretativa de los hallazgos, con el propósito de comprender de forma más clara los factores que pueden influir en la vida útil de los detectores y en la calidad de las imágenes radiológicas.

### **Procedimiento Metodológico**

El desarrollo del proceso investigativo se llevará a cabo mediante una serie de etapas organizadas de manera secuencial, las cuales permitirán estructurar el análisis de la información de forma sistemática y coherente con los objetivos planteados.

En una primera etapa, se definirá la estrategia de búsqueda bibliográfica, estableciendo las palabras clave, las bases de datos a consultar y los criterios de selección documental que orientarán la identificación de fuentes científicas pertinentes.

Posteriormente, se realizará la búsqueda y selección de las fuentes documentales, priorizando aquellos estudios que aporten información relevante sobre los efectos de la temperatura y la humedad en los detectores de panel plano. Durante esta fase se aplicarán los

criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, con el fin de garantizar la calidad y pertinencia de la información recopilada.

En una tercera etapa, se llevará a cabo la organización de la información obtenida, mediante el registro y clasificación de los documentos seleccionados en una matriz de análisis documental. Esta herramienta permitirá sistematizar los datos más relevantes de cada fuente y facilitar su posterior comparación.

Seguidamente, se realizará el análisis de la información, a través de la identificación de categorías temáticas, patrones y relaciones entre las variables estudiadas, particularmente en lo relacionado con el impacto de las condiciones ambientales en el desempeño de los detectores digitales.

Finalmente, se desarrollará una síntesis interpretativa de los hallazgos, con el propósito de elaborar conclusiones que permitan comprender el efecto de la temperatura y la humedad sobre la vida útil de los detectores, así como proponer recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión tecnológica y las estrategias de mantenimiento en los servicios de radiología.

## Resultados

El análisis de la literatura científica evidencia que los detectores digitales de panel plano (FPD) presentan una sensibilidad significativa frente a las condiciones ambientales, especialmente la humedad y la temperatura, las cuales influyen de manera directa en la estabilidad estructural y electrónica de los materiales que los componen.

En el caso de los detectores indirectos basados en yoduro de cesio (CsI), se identificó que este material posee propiedades higroscópicas que lo hacen susceptible a la absorción de humedad ambiental. Según Bushberg et al. (2001), la interacción prolongada con ambientes húmedos puede inducir procesos de deliquesencia, afectando la integridad de las microcolumnas responsables de la conducción direccional de la luz generada durante la conversión de rayos X. Este fenómeno provoca una alteración en la estructura cristalina del material, lo cual incrementa la dispersión de fotones dentro del detector.

Desde el punto de vista físico digital, esta degradación estructural impacta directamente parámetros fundamentales de calidad de imagen como la función de transferencia de modulación (MTF), la eficiencia cuántica de detección (DQE) y la relación señal-ruido (SNR). En consecuencia, se produce una reducción progresiva de la resolución espacial y de la capacidad del sistema para diferenciar estructuras anatómicas de bajo contraste, afectando la precisión diagnóstica (Seeram, 2023).

De manera complementaria, en los sistemas de conversión indirecta CsI/TFT, se observa que la humedad no solo afecta el material centellador, sino también la propagación óptica de la señal. De acuerdo con Seeram (2023), la alteración en la canalización de la luz genera dispersión lateral de fotones, lo que incrementa la variabilidad espacial de la señal y reduce la uniformidad del detector. Este comportamiento contribuye a la aparición de

imágenes con menor nitidez y mayor heterogeneidad en la representación de estructuras anatómicas.

En contraste, los detectores de conversión directa basados en selenio amorfo (a-Se) presentan una respuesta diferente frente al estrés térmico. Seeram (2023) explica que el incremento de temperatura favorece la excitación térmica de portadores de carga, lo que incrementa la corriente oscura (dark current). Este fenómeno introduce señales eléctricas no asociadas a la radiación incidente, elevando el ruido de fondo del sistema.

Este comportamiento es reforzado por Swaby et al. (2026), quienes reportan que las capas gruesas de selenio amorfo presentan inestabilidad en el transporte de carga cuando son sometidas a condiciones térmicas sostenidas. Los autores evidencian que este estrés genera defectos locales en la uniformidad electrónica del material, lo que se traduce en la aparición de artefactos y variaciones en la respuesta digital del detector.

Asimismo, en sistemas de radiografía computarizada (CR), Al Khalifah et al. (2012) identifican que el calor produce la liberación prematura de electrones atrapados en los fósforos de almacenamiento. Este proceso reduce la cantidad de señal latente disponible, disminuyendo la sensibilidad del sistema y afectando la estabilidad de la imagen adquirida.

En conjunto, los hallazgos revisados permiten establecer que tanto la humedad como la temperatura actúan como agentes de degradación progresiva en los detectores digitales, afectando distintos niveles del sistema: material, óptico y electrónico. Esta interacción multifactorial impacta directamente la calidad de imagen diagnóstica, al comprometer indicadores técnicos esenciales como la DQE, la MTF y la SNR, los cuales determinan la capacidad del sistema para reproducir información clínica confiable.

Desde una perspectiva integradora, la evidencia analizada sugiere que estos procesos de deterioro no ocurren de forma abrupta, sino de manera acumulativa y progresiva, lo que

implica que los efectos iniciales pueden no ser evidentes en la práctica clínica diaria. Sin embargo, con el tiempo, estas alteraciones pueden traducirse en pérdida significativa de desempeño del detector, incrementando la probabilidad de repetición de estudios y afectando la eficiencia del servicio de imagenología (Bushberg et al., 2001; Seeram, 2023).

**Tabla 1**

*Evidencia Científica de Degradación Higrotérmica en Detectores Digitales de Panel Plano (FPD)*

<b>Material / Sistema detector</b>	<b>Referencia (APA 7.<sup>a</sup> ed.)</b>	<b>Mecanismo de degradación</b>	<b>Fundamento físico-electrónico</b>	<b>Parámetros afectados</b>	<b>Impacto clínico</b>
CsI (detectores indirectos)	Bushberg et al. (2001)	Absorción de humedad y deliquesencia de microcolumnas	El CsI es higroscópico; la humedad rompe la estructura columnar que guía la luz de centelleo	MTF, DQE, SNR	Disminución de nitidez, pérdida de resolución espacial y contraste diagnóstico
CsI/TFT (FPD indirecto)	Seeram (2023)	Dispersión óptica por degradación estructural	La humedad altera la canalización de fotones y aumenta dispersión lateral	MTF, uniformidad, DQE	Imágenes borrosas y menor detectabilidad de estructuras finas
Selenio amorfo (a-Se)	Seeram (2023)	Incremento de corriente oscura por temperatura	El calor aumenta movilidad de portadores de	SNR, ruido basal	Incremento del ruido electrónico y

			carga generando señales espurias El calor sostenido		pérdida de contraste
a-Se (capas gruesas)	Swaby et al. (2026)	Inestabilidad electrónica por estrés térmico	altera el transporte de carga y genera defectos locales	Uniformidad, señal digital	Artefactos y pérdida de homogeneidad de imagen
CR (placas de fósforo)	Al Khalifah et al. (2012)	Pérdida de señal latente por calor	Liberación prematura de electrones atrapados en fósforos Temperatura + humedad	SNR, sensibilidad	Disminución de calidad de imagen y necesidad de recalibración
Sistemas PET	Tayal et al. (2020)	Estrés higrotérmico combinado	afectan estabilidad electrónica del sistema Expansión térmica y humedad	Ruido, estabilidad operativa	Fallas intermitentes y degradación funcional
Circuitos TFT	Seeram (2023)	Envejecimiento electrónico por ambiente	alteran lectura de señal digital	Uniformidad, artefactos	Defectos de píxeles y pérdida de confiabilidad

---

*Nota.* Análisis comparativo de los mecanismos de degradación física y electrónica

provocados por factores higrotérmicos en tecnologías de captura digital. Las siglas

corresponden a: MTF (Función de Transferencia de Modulación), DQE (Eficiencia Cuántica de Detección) y SNR (Relación Señal/Ruido). Datos sintetizados a partir de las investigaciones y parámetros reportados por Bushberg et al. (2001), Seeram (2023), Swaby et al. (2026), Al Khalifah et al. (2012) y Tayal et al. (2020).

**Tabla 2**

*Impacto de Variables Ambientales en Vida Útil y Desempeño Operativo de FPD*

<b>Tipo de entorno clínico</b>	<b>Condiciones ambientales</b>	<b>Volumen de pacientes</b>	<b>Vida útil estimada del FPD</b>	<b>Principales efectos observados</b>	<b>Reducción de vida útil</b>
Clínica ambulatoria (controlada)	20–22 °C / 40–60% HR	Bajo	12–15 años	Estabilidad de señal y mínima degradación	Referencia base (0%)
Hospital general	25–30 °C / 50–70% HR	Medio-alto	7–10 años	Aumento de ruido y recalibraciones	25–30%
Servicio de urgencias	>30–35 °C / >60% HR	Alto	5–7 años	Fallas intermitentes y degradación acelerada	50–60%
Zona tropical (no climatizada)	>35 °C / >70% HR	Muy alto	4–6 años	Artefactos, pérdida de uniformidad y fallos críticos	>60%

*Nota.* Análisis del impacto de las condiciones operativas y el entorno clínico sobre la longevidad y el comportamiento de los detectores digitales de panel plano. La sigla HR representa la Humedad Relativa, mientras que FPD hace referencia al Detector de Panel Plano (*Flat Panel Detector*). Los valores porcentuales de reducción toman como punto de partida las condiciones óptimas de una sala climatizada. Información consolidada y adaptada a partir de

los parámetros técnicos expuestos por Spectrum Xray (2025), Newheek (2025) y los reportes de desempeño en entornos radiológicos reales.

El examen de la información presentada en la Tabla 2 permite evidenciar que la duración funcional de los detectores de panel plano (FPD) no es un valor fijo determinado exclusivamente por el fabricante, sino que se encuentra estrechamente condicionado por las características ambientales del entorno donde operan estos sistemas.

En condiciones óptimas de funcionamiento, caracterizadas por temperaturas cercanas a 20–22 °C y niveles de humedad controlados entre 40 % y 60 %, la vida útil estimada de estos dispositivos puede alcanzar entre 12 y 15 años. No obstante, la literatura en gestión de tecnología médica advierte que esta proyección tiende a disminuir cuando los equipos son sometidos a condiciones de trabajo intensivo o a variaciones ambientales constantes (Daniel, 2024; Spectrum X-Ray, 2025).

Cuando los sistemas operan en entornos hospitalarios con condiciones intermedias — como temperaturas entre 25 y 30 °C y humedad relativa de hasta 70 %— se observa una reducción progresiva del tiempo de vida útil, situándose aproximadamente entre 7 y 10 años. Este comportamiento se asocia con un aumento gradual en la frecuencia de recalibraciones, fluctuaciones en la uniformidad de la señal y mayor presencia de ruido electrónico durante la adquisición de imágenes.

En contextos clínicos de alta demanda, particularmente en áreas de urgencias o servicios críticos, donde la carga asistencial es elevada y las condiciones térmicas pueden superar los 30–35 °C, la degradación del sistema se acelera de forma notable. En estos escenarios, la vida útil puede disminuir hasta un rango de 5 a 7 años, lo cual se relaciona con un envejecimiento electrónico más rápido y una mayor probabilidad de fallos intermitentes en el detector (Daniel, 2024).

Por otra parte, en ambientes tropicales o sin control climático adecuado, donde la temperatura supera de manera sostenida los 35 °C y la humedad relativa rebasa el 70 %, el deterioro tecnológico se intensifica considerablemente. Bajo estas condiciones, la reducción de la vida útil puede ser incluso mayor al 60 %, evidenciando un proceso de degradación acelerado y no lineal.

Desde una perspectiva física, este fenómeno puede interpretarse a partir de modelos de degradación térmica como la ecuación de Arrhenius, la cual describe cómo pequeñas variaciones en la temperatura generan incrementos exponenciales en la velocidad de deterioro de los materiales electrónicos. Este enfoque permite comprender por qué los sistemas expuestos a calor continuo presentan fallas prematuras en comparación con aquellos que operan bajo condiciones controladas.

A ello se suma el papel de la humedad como factor amplificador del daño, especialmente cuando actúa de manera simultánea con el aumento de temperatura. Esta interacción genera un estrés higrotérmico que afecta tanto los materiales semiconductores como los componentes electrónicos responsables de la lectura y procesamiento de la señal (IAEA, 2019).

En términos operativos, esta reducción de la vida útil se traduce en una mayor necesidad de mantenimiento, incremento en los costos asociados a la reposición de equipos y disminución de la disponibilidad tecnológica en los servicios de radiología. De igual forma, se evidencia una relación directa entre la severidad del ambiente y la frecuencia de fallas técnicas.

De este modo, la evidencia analizada sugiere que existe una relación inversa entre la calidad del control ambiental y la durabilidad de los detectores FPD. A medida que aumentan

la temperatura y la humedad, se acelera el proceso de deterioro, afectando tanto la estabilidad funcional como la eficiencia operativa del sistema (Daniel, 2024; Spectrum X-Ray, 2025).

<b>Variable ambiental</b>	<b>Efecto físico-técnico</b>	<b>Parámetro afectado</b>	<b>Manifestación en imagen</b>	<b>Consecuencia clínica</b>	<b>Impacto en dosis</b>
Alta temperatura (>35 °C)	Incremento de corriente oscura	SNR / ruido electrónico	Imagen granulada	Reducción de detectabilidad de lesiones	Aumento de mAs (dose creep)
Humedad elevada (>60–70%)	Pérdida de estructura del CsI	MTF / resolución espacial	Difuminación de bordes	Pérdida de detalle anatómico fino	Repetición de estudios
Estrés combinado (T + HR)	Inestabilidad electrónica general	DQE / uniformidad	Artefactos y bandas	Posibles errores diagnósticos	Incremento de dosis acumulada
Variabilidad térmica	Fluctuación de ganancia electrónica	NPS / estabilidad	Inconsistencia entre imágenes	Baja reproducibilidad clínica	Ajustes repetidos de exposición

**Nota.** Relación analítica entre el estrés ambiental, las alteraciones físicas en el receptor y sus repercusiones directas sobre la calidad visual del estudio y la carga de radiación administrada.

Las abreviaturas técnicas corresponden a: SNR (Relación Señal/Ruido), MTF (Función de Transferencia de Modulación), DQE (Eficiencia Cuántica de Detección), NPS (Espectro de Potencia de Ruido), T (Temperatura), HR (Humedad Relativa) y mAs (Miliamperaje por segundo). Síntesis estructurada a partir de los criterios de calidad y directrices establecidos por el OIEA (IAEA, 2019), AAPM (2020), Seeram (2023), Burtzloff et al. (2009), Daniel (2024), así como por Ortiz Aguilar y Osorio Ochoa (2024).

El análisis de la información contenida en la Tabla 3 permite evidenciar que las condiciones ambientales, particularmente la temperatura y la humedad relativa, influyen de manera directa en los parámetros fundamentales de calidad de imagen en sistemas de radiografía digital, afectando tanto la precisión diagnóstica como la eficiencia operativa del sistema.

En el caso de temperaturas elevadas, superiores a 35 °C, se ha documentado un incremento significativo de la corriente oscura en los detectores digitales, fenómeno que incrementa el ruido electrónico basal. Este aumento del ruido reduce la relación señal-ruido (SNR), generando imágenes con apariencia granulada y menor capacidad para diferenciar estructuras anatómicas de bajo contraste. De acuerdo con Seeram (2023), este tipo de alteración compromete la estabilidad del proceso de adquisición digital y disminuye la calidad global de la imagen diagnóstica.

Por otra parte, la exposición a niveles elevados de humedad, especialmente por encima del 60–70 %, afecta principalmente la función de transferencia de modulación (MTF), lo que se traduce en pérdida de resolución espacial. Este fenómeno se asocia con la degradación de la estructura del yoduro de cesio (CsI), material responsable de la conversión indirecta de los rayos X en luz visible, cuya alteración genera dispersión de fotones y pérdida de nitidez en los bordes de las estructuras anatómicas (Bushberg et al., 2001; Seeram, 2023).

La acción conjunta de temperaturas elevadas y altos niveles de humedad genera un estrés higrotérmico combinado. Este fenómeno altera directamente la uniformidad del detector y reduce su eficiencia cuántica de detección (DQE). Como consecuencia, es común que surjan artefactos y fluctuaciones espaciales en la señal, lo que rompe la regularidad entre exposiciones y compromete seriamente la repetibilidad de los exámenes radiológicos.

Desde una perspectiva clínica, estas alteraciones no solo comprometen la calidad de imagen, sino que también tienen implicaciones directas en la dosis de radiación administrada al paciente. Al disminuir la calidad del registro digital, el sistema puede requerir incrementos en los parámetros de exposición (como mAs) para compensar la pérdida de señal, fenómeno descrito en la literatura como “dose creep”, el cual incrementa la exposición sin una mejora proporcional en la calidad diagnóstica (Burtzloff et al., 2009).

En condiciones de variabilidad térmica, se observa además una inestabilidad en la ganancia electrónica del sistema, lo que genera fluctuaciones en la respuesta del detector y reduce la consistencia entre imágenes adquiridas en diferentes momentos. Esta falta de estabilidad afecta directamente el espectro de potencia de ruido (NPS), generando patrones irregulares que pueden interferir con la interpretación clínica.

Desde una perspectiva integradora, los hallazgos analizados permiten establecer que la degradación de la calidad de imagen no es un fenómeno aislado, sino el resultado de la interacción entre múltiples variables físicas y electrónicas del sistema. La literatura coincide en que indicadores como la DQE, la MTF y la SNR son altamente sensibles a cambios ambientales, lo que los convierte en parámetros críticos para evaluar el desempeño real de los detectores en condiciones clínicas (Seeram, 2023; IAEA, 2019).

En términos generales, la evidencia sugiere que la exposición prolongada a condiciones ambientales inadecuadas no solo disminuye la calidad de imagen, sino que también incrementa la dosis radiológica efectiva en los pacientes, afectando directamente los principios de optimización en radioprotección, particularmente el principio ALARA.

## Conclusiones

El análisis crítico de la literatura científica permite concluir que las variables ambientales, especialmente la temperatura y la humedad relativa, constituyen factores determinantes en la estabilidad funcional, estructural y electrónica de los detectores de panel plano (FPD) utilizados en radiología digital. La evidencia revisada demuestra que estos elementos no actúan únicamente como condiciones externas de operación, sino como agentes activos de degradación progresiva sobre los materiales semiconductores y fotoconductores que conforman los sistemas detectores.

El incremento sostenido de la temperatura favorece fenómenos de excitación térmica y aumento de la corriente oscura, lo que incrementa el ruido electrónico y disminuye la relación señal-ruido (SNR). De manera complementaria, la humedad elevada promueve procesos de corrosión, condensación interna y migración electroquímica en los componentes electrónicos, afectando la estabilidad operativa del sistema. Materiales como el yoduro de cesio (CsI) presentan alteraciones en su estructura cristalina que comprometen el direccionamiento óptico de la señal, mientras que el selenio amorfo (a-Se) muestra inestabilidad electrónica frente al estrés térmico, afectando la uniformidad de la imagen.

Estas alteraciones se reflejan en la disminución progresiva de parámetros críticos de desempeño como la eficiencia cuántica de detección (DQE), la función de transferencia de modulación (MTF) y la calidad general de la imagen diagnóstica, lo que puede dificultar la identificación de estructuras de bajo contraste y aumentar la probabilidad de artefactos clínicos.

Asimismo, se evidencia que la degradación de los detectores digitales ocurre de forma progresiva, acumulativa y frecuentemente silenciosa en etapas iniciales, lo que puede generar una falsa percepción de estabilidad operativa. En este contexto, los sistemas de

postprocesamiento digital pueden enmascarar parcialmente la pérdida de calidad de imagen, favoreciendo incrementos progresivos en la dosis de radiación aplicada al paciente (dose creep), lo cual contraviene el principio de optimización de protección radiológica ALARA.

Adicionalmente, los hallazgos evidencian una brecha entre la vida útil teórica estimada por los fabricantes y el desempeño real de los equipos en entornos clínicos sometidos a alta carga asistencial y condiciones ambientales adversas. Esta situación impacta directamente la gestión tecnológica hospitalaria, la sostenibilidad económica y la planificación de mantenimiento de los sistemas de imagenología médica.

Por lo tanto, la evidencia científica respalda la necesidad de implementar estrategias de control ambiental y mantenimiento predictivo basadas en condición, integrando el monitoreo continuo de variables como temperatura, humedad y estabilidad electrónica. Este marco o enfoque permite anticipar procesos de degradación, optimizar la vida útil de los equipos, reducir costos operativos y mejorar la seguridad del paciente, consolidando así una gestión más eficiente y sostenible de la tecnología en radiología digital.

## Referencias Bibliográficas

- Acevedo, E., García, N., & Carmona, E. (2024). *Análisis comparativo de tecnologías de tomografía computarizada en clínicas del sur de Bogotá y hospitales de España: Eficiencia operativa, técnica, impacto ambiental y sostenibilidad*. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/65584/eegarnicam.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- American Association of Physicists in Medicine. (2020). *Quality control in diagnostic radiology equipment*. AAPM Report Series. [.https://www.aapm.org/pubs/reports/default.asp?s=quality%20control](https://www.aapm.org/pubs/reports/default.asp?s=quality%20control)
- Al Khalifah, K., Brindhaban, A., & Al Ghamdi, S. (2012). Effect of heat on image plates in computed radiography systems. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 43(1), 11–15.. [https://www.jmirs.org/article/S1939-8654\(11\)00065-8/fulltext](https://www.jmirs.org/article/S1939-8654(11)00065-8/fulltext)
- Baciero Adrados, A. (2005). *Caracterización cuantitativa de detectores luminiscentes para plasmas de fusión* (Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid). Servicio de Publicaciones UCM.<https://docta.ucm.es/entities/publication/56a9c4f5-1a17-4cd7-a181-2d6e7aa0e9d5>
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2001). *The essential physics of medical imaging* (2nd ed.). Lippincott Williams & Wilkins. <https://eprints.poltekkesadisutjipto.ac.id/id/eprint/2058/1/The%20Essential%20Physics%20for%20Medical%20Imaging%2C%20%203rd%20ed..pdf>
- Burtzloff, S., Anton, G., & Ehrlichmann, W. (2009). Evaluation and correction of readout artifacts from flat panel detectors for non-destructive testing purposes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers,*

*Detectors and Associated Equipment*, 607(1), 280–282 <https://www.sciencedirect.com/bibliotecavirtual.unad.edu.co/science/article/pii/S016890020900638X>

Camargo, L., Méndez, J., & Rojas, P. (2023). *Artefactos y artificios en tomografía computada*.

Repositorio Institucional UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/60195/bbedwuna%20%282%29.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Contreras, J., Ramírez, D., & Moreno, L. (2022). Contribución de la radiología digital al mejoramiento de la calidad en el servicio de imagenología. *NOVA: Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*, 20(39), 25–47. [https://doi-](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.22490/24629448.6576)

[org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.22490/24629448.6576](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.22490/24629448.6576)

Daniel, C. (2024). Regímenes de mantenimiento de dispositivos médicos en instituciones de

salud. En A. Badnjević, M. Cifrek, R. Magjarević, & Z. Džemić (Eds.), *Inspection of medical devices* (Biomedical Engineering Series). Springer [https://doi-](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/978-3-031-43444-0_4)

[org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/978-3-031-43444-0\\_4](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/978-3-031-43444-0_4)

European Society of Radiology. (2019). ESR statement on imaging equipment and technology management in radiology. *Insights into Imaging*, 10(1), 1–8

[file:///C:/Users/hp/Downloads/ESR\\_statement\\_on\\_new\\_approaches\\_to\\_undergraduate\\_t.pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/ESR_statement_on_new_approaches_to_undergraduate_t.pdf)

Hernández Parra, Y. A., Romero Martínez, D. M., Moreno Sabogal, L. M., Gómez Patiño, L.

P., & Serna Mosquera, J. J. (2024). *Factores técnicos y operativos que afectan la calidad de imagen en radiología digital*. Repositorio Institucional UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/63837>

- International Atomic Energy Agency. (2019). *Quality assurance programme for digital radiography*. IAEA [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2021\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2021_web.pdf)
- Ortiz Aguilar, A. L., & Osorio Ochoa, A. I. (2024). *Influencia de los factores ambientales y operativos en la calidad de las imágenes radiológicas en entornos hospitalarios en el departamento de Boyacá*. Repositorio Institucional UNAD <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/62791/aiosorioo.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Péyres, V., Martínez, J., & López, R. (2010). *Caracterización de detectores de fotones mediante el método de Montecarlo y aplicación a la medida de emisores de positrones de interés en medicina nuclear*. Universidad Complutense de Madrid. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/47555>
- Radzi, N. A. M., Nayan, N. A., & Ishak, S. N. (2026). Systematic literature review on healthcare improvement through proactive maintenance and fault detection in medical equipment. *Health and Technology*, 16, 1–17 <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/s12553-025-01031-0>
- Seeram, E. (2023). Radiografía digital de pantalla plana: Principios y componentes del sistema. En *X-ray imaging systems for biomedical engineering technology*. Springer. [https://link-springer-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/chapter/10.1007/978-3-031-46266-5\\_4](https://link-springer-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/chapter/10.1007/978-3-031-46266-5_4)
- Seeram, E. (2023). Descriptores de calidad de imagen digital y características de rendimiento. En *X-ray imaging systems for biomedical engineering technology*. Springer. [https://link-springer-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/chapter/10.1007/978-3-031-46266-5\\_6](https://link-springer-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/chapter/10.1007/978-3-031-46266-5_6)

- Seeram, E. (2023). Control de calidad en sistemas de imágenes digitales de rayos X. En *X-ray imaging systems for biomedical engineering technology*. Springer. [https://link-springer-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/chapter/10.1007/978-3-031-46266-5\\_10](https://link-springer-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/chapter/10.1007/978-3-031-46266-5_10)
- Swaby, A., Hellier, K., Shi, L., Wang, A. S., & Abbaszadeh, S. (2026). Characterization of thick selenium layers for dual-layer X-ray imaging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/tns.2025.3650559>
- Tayal, S., Jha, A. K., Ali, A., & Gandhi, A. (2020). Impact of high temperature and humidity on the performance of positron emission tomography scanner. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, 35(4), 339–341. [https://journals.lww.com/ijnm/fulltext/2020/35040/impact\\_of\\_high\\_temperature\\_and\\_humidity\\_on\\_the.13.aspx](https://journals.lww.com/ijnm/fulltext/2020/35040/impact_of_high_temperature_and_humidity_on_the.13.aspx)
- Yang, X., Wang, Y., Zhang, G., & Chen, Z. (2013). Arrhenius equation-based cell-health assessment: Application to thermal energy management design of a HEV NiMH battery pack. *Energies*, 6(5), 2709–2725. <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/5/2709>