



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

Facultad de
MEDICINA

APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE ENERGÍA
DUAL EN LA REDUCCIÓN DE DOSIS DE MEDIO DE CONTRASTE
YODADO Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DE IMAGEN FRENTE A
LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA CONVENCIONAL: UNA REVISIÓN
DE ALCANCE

APPLICATION OF DUAL-ENERGY COMPUTED TOMOGRAPHY IN
IODINATED CONTRAST MEDIUM DOSE REDUCTION AND ITS
RELATIONSHIP WITH IMAGE QUALITY COMPARED TO
CONVENTIONAL COMPUTED TOMOGRAPHY: A SCOPING REVIEW

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO
EN TECNOLOGÍA MÉDICA EN LA ESPECIALIDAD DE RADIOLOGÍA

AUTORES

ROSA ANGELICA GUTIERREZ CAMPOS

JEREMY REVILLA ARECOCHEA

SILVANA PATRICIA ROMAN GILIAN

ASESOR

GUILLERMO BRAVO PUENTE

CO-ASESOR

LUIS ALEXANDER ORREGO FERREYROS

LIMA-PERÚ

2025

JURADO

Presidente: MG. CECILIA LUIS MIRANDA

Vocal: MG. ARQUIMEDES MANSUETO GAVINO GUTIERREZ

Secretario: LIC. NORA DEL PILAR ACOSTA RENGIFO

Fecha de Sustentación: 18 de Setiembre del 2025

Calificación: Aprobado

ASESORES DE TESIS

ASESOR

DR. GUILLERMO BRAVO PUENTE

Departamento Académico de Tecnología Médica

ORCID: 0009-0004-3846-6751

CO-ASESOR

MG. LUIS ALEXANDER ORREGO FERRERYROS

Departamento Académico de Tecnología Médica.

ORCID: 0000-003-3502-2384

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestros padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por enseñarnos a no rendirnos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres, Rosa y Luis, por su apoyo incondicional y por sus palabras de aliento a no rendirme. Al Magíster Billy, por su orientación en la etapa final de este proyecto. A Jeremy Revilla, por ser mi compañero en este largo camino, compartiendo cada esfuerzo, desvelo, estrés y también las alegrías durante las intensas jornadas de trabajo. – Rosa Angélica Gutiérrez Campos

A mis pilares: mis padres, Gladys y Víctor, por su amor incondicional y sacrificio. A mis queridos abuelos, Susana y Antonio, por sus valiosas lecciones. A toda mi familia, gracias por su apoyo. Y en especial, a mi compañera de tesis y de vida, Angélica Gutiérrez, por tu colaboración e inspiración. Esta es una meta compartida; juntos lograremos muchas cosas importantes y estoy seguro de que el éxito nos espera. – Jeremy Revilla Arecochea

Agradezco con todo mi corazón a mi familia, especialmente a mi madre, Sonia, por haber creído en mí. A mí padre, Javier, que siempre me apoya y bendice desde el cielo. A mis hermanas, Diana y Viviana por acompañarme en todo momento. A mi pequeño Ángel, mi fiel compañero. Al Dr. Guillermo Bravo por su dedicación, sus valiosos consejos y por todo el apoyo que nos brinda. – Silvana Patricia Roman Gilian

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Autofinanciado

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERES

Los autores declaran no tener conflictos de interés

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	GUTIERREZ CAMPOS ROSA ANGELICA
2.	REVILLA ARECOCHEA JEREMY
3.	ROMAN GILIAN SILVANA PATRICIA

Pertencientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE TECNOLOGÍA MÉDICA EN LA ESPECIALIDAD DE RADIOLOGÍA**, autores del trabajo titulado: **APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE ENERGÍA DUAL EN LA REDUCCIÓN DE DOSIS DE MEDIO DE CONTRASTE YODADO Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DE IMAGEN FRENTE A LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA CONVENCIONAL: UNA REVISIÓN DE ALCANCE** el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN TECNOLOGÍA MÉDICA EN LA ESPECIALIDAD DE RADIOLOGÍA** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	BRAVO PUENTE GUILLERMO	MEDICINA	ASESOR
2.	ORREGO FERREYROS LUIS ALEXANDER	MEDICINA	CO-ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **8 %**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **trn:oid:::1:3380333901**; fecha de entrega: **20-10-2025**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 21 de octubre del 2025.**

Firma del asesor
N° DNI: 09218831
ORCID: 0009-0004-3846-6751

Firma del Co-asesor
N° DNI: 41202355
ORCID: 0000-0003-3502-2384



TABLA DE CONTENIDOS

Resumen

Abstract

I.	Introducción	1
II.	Objetivos	4
III.	Materiales y Métodos	5
IV.	Resultados	10
V.	Discusión	38
VI.	Conclusiones	44
VII.	Referencias Bibliográficas	46
VIII.	Anexos	50
IX.	Listado de Tablas	57

RESUMEN

Introducción: La Tomografía Computarizada convencional (TC) es un instrumento importante para el diagnóstico médico, apoyada por medios de contraste yodados (MCY) que ayudan a mejorar la herramienta diagnóstica, aunque pueden causar efectos no deseados. La Tomografía Computarizada de Energía Doble (TCED) ha emergido como una nueva tecnología que minimiza la dosis de MCY sin disminuir la calidad de imagen. **Objetivo:** Mapear la evidencia publicada acerca de la aplicación de TCED en la optimización de la dosis de MCY de forma paralela con la modulación en la calidad de las imágenes que capta en TC convencional. **Material y método:** Se llevó a cabo el trabajo de revisión de alcance, que sigue la metodología del Joanna Briggs Institute (JBI) y la guía PRISMA-ScR. Se seleccionaron los estudios publicados en inglés y español entre 2010 y 2024, extraídos de bases de datos como PubMed, Embase, Scopus, Cochrane Library y literatura gris. Seleccionándose aquellos que evaluaban el uso de TCED para reducir la dosis de MCY y analizaban la calidad de imagen, tanto con parámetros objetivos como Relación Señal-Ruido (SNR) y Relación Contraste-Ruido (CNR) o mediante evaluación subjetiva. **Resultados:** La TCED permite reducir la dosis de MCY entre 15.8% y 83%, variando por aplicación. Se lograron reducciones significativas en angiografías (70% en aortografía, 40-80% en coronaria/torácica), urografía (50-65%), y estudios abdominales (50%). La TCED mantiene/mejora la calidad de imagen, con aumento del CNR de hasta 25% y reducción del ruido de hasta 30%, gracias a reconstrucciones VMI a bajas energías (40-55 keV) y algoritmos avanzados (DLIR). La calidad diagnóstica subjetiva fue consistentemente alta (Likert 4.2-4.7/5). **Conclusión:** La TCED es una alternativa eficaz y segura permitiendo la reducción significativa del MCY garantizando imágenes de alta calidad diagnóstica, aumentando la seguridad y previniendo efectos adversos para el paciente.

Palabras Clave: Energía dual, Medio de contraste yodado, Tomografía computarizada, Dosis altas.

ABSTRACT

Introduction: Conventional computed tomography (CT) is a key tool in medical diagnosis, complemented by iodinated contrast media (ICM), improving diagnostic accuracy, although they can generate adverse effects. Dual-energy computed tomography (DECT) has emerged as an innovative technology to reduce ICM dose without compromising image quality. **Objective:** To map the published evidence on the application of DECT in optimizing ICM dose and its modulation in image quality compared to conventional CT. **Material and method:** A scoping review was conducted following the Joanna Briggs Institute (JBI) methodology and PRISMA-ScR guidelines. Studies published in English and Spanish between 2010 and 2024, obtained from databases such as PubMed, Embase, Scopus, Cochrane Library and grey literature, were included. Those that evaluated the use of DECT to reduce MCY dose and analyzed image quality were selected, both with objective parameters such as Signal-to-Noise Ratio (SNR) and Contrast-to-Noise Ratio (CNR), or through subjective evaluation. **Results:** DECT allows MCY dose reduction between 15.8% and 83%, varying by application. Significant reductions were achieved in angiography (70% in aortography, 40-80% in coronary/thoracic), urography (50-65%), and abdominal studies (50%). DECT maintains/improves image quality, with CNR increases of up to 25% and noise reduction of up to 30%, thanks to low-energy IMV reconstructions (40-55 keV) and advanced algorithms (DLIR). Subjective diagnostic quality was consistently high (Likert 4.2-4.7/5). **Conclusion:** DECT is an effective and safe alternative, enabling a significant reduction in MCY, ensuring high-quality diagnostic images, increasing safety, and preventing adverse effects for the patient. Its implementation would represent a key advance in medical diagnosis.

Keywords: Dual energy, Iodinated contrast agent, Computed tomography, High dose.

I. INTRODUCCIÓN

La tomografía computarizada (TC) es un recurso relevante en la práctica contemporánea, ofreciendo imágenes minuciosas de las estructuras internas del organismo. Se emplean radiografías para producir cortes transversales, lo que simplifica el diagnóstico de varias enfermedades. No obstante, la utilización de medios de contraste yodados implica peligros en los pacientes (1). Las investigaciones señalaron que hasta un 12% de los pacientes podrían sufrir efectos secundarios después de su administración. Por esta razón, se necesitó explorar opciones que aumenten la seguridad de los pacientes sin disminuir la calidad de los diagnósticos (2).

El yodo desempeña un importante papel en la visualización de tejidos y vasos sanguíneos en la tomografía computarizada. En los tipos de estudios más tradicionales se usan concentraciones de medio de contraste de hasta 300 mgI (2,3), lo cual a menudo provoca una elevada exposición a yodo que puede causar reacciones no deseadas y nefropatía provocada por contraste, lo que indica la necesidad de estrategias que optimicen el uso de yodo. Hay que buscar opciones más seguras y eficaces para el tratamiento de pacientes con riesgos asociados. Así pues, la reducción de la dosis de yodo ha pasado a ser un campo de bastante interés (4).

La tomografía computarizada de energía dual (TCED) ha emergido como una opción viable en este medio. Con esta técnica se buscó reducir la dosis de medio de contraste hasta lograr la optimización manteniendo una calidad de imagen adecuada. Al aprovechar un haz de rayos X policromático, la TCED mejora la separación de materiales y optimiza la calidad de las imágenes (5). Los estudios han

mostrado que esta técnica puede mantener la relación contraste-ruido (CNR) en niveles comparables frente a la TC (6,7). Así, TCED se presenta como una posible solución efectiva para minimizar las dosis de yodo.

Los aspectos físicos de la TCED son primordiales para su rendimiento. La información espectral generada a diferentes energías da paso a una reconstrucción de imágenes, que reduce la cantidad de medio de contraste. Además, esta técnica contribuye a reducir el ruido en las imágenes, un factor crucial para la calidad diagnóstica (8,9). Diversas investigaciones han demostrado que la TCED puede reducir el ruido de imagen en hasta un 30% frente a la TC convencional. Estas mejoras son significativas, especialmente en pacientes de alto riesgo (10–13).

El uso de algoritmos de reconstrucción iterativa, tales como la Reconstrucción iterativa adaptativa estadística (ASIR) y la Reconstrucción iterativa de imágenes profundamente aprendidas (DLIR), aumentó aún más las ventajas de la TCED. Estos algoritmos perfeccionan la manipulación de imágenes, incrementando su calidad incluso en situaciones de escaso contraste (14,15). En investigaciones recientes, se ha observado un incremento del CNR en un 25% al emplear DLIR en contraste con métodos tradicionales. Esto subraya la capacidad de la TCED no solo para reducir la cantidad de contraste, sino también para mejorar la calidad de las imágenes (13–16).

La técnica de la tomografía computarizada de energía dual (TCED) ha aportado magníficos beneficios en el diagnóstico de un elevado número de enfermedades, en especial en las que son del corazón (16). A diferencia de la tomografía convencional que aplica un solo espectro de energía, la TCED basa su diagnóstico en dos niveles de energía diferentes (17). Esta nueva modalidad diagnóstica mejora la

visualización de las placas ateroscleróticas, disminuye los artefactos producidos por el movimiento y reduce la necesidad de la aplicación de los medios de contraste yodados, lo que a la vez disminuye los efectos adversos vinculados al uso de dichos medios.

En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál es la evidencia disponible en la literatura que describe la reducción la dosis de medio de contraste yodado mediante TCED, y cómo se ha reportado su relación con la calidad de imagen obtenida frente a la TC convencional?

II. OBJETIVOS

Objetivo general:

Mapear la evidencia científica disponible sobre el uso de la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) como estrategia para reducir la dosis de medio de contraste yodado en pacientes sometidos a estudios tomográficos en contextos clínicos.

Objetivos específicos:

1. Describir las estrategias, parámetros técnicos y algoritmos utilizados en estudios clínicos publicados que aplican TCED con fines de reducción de medios de contraste yodados.
2. Identificar los tipos de estudios tomográficos, poblaciones y escenarios clínicos en los que se ha implementado la TCED con este objetivo, según la literatura disponible.
3. Determinar los hallazgos reportados en la literatura científica respecto a la calidad de imagen obtenida al aplicar TCED con reducción de dosis de medio de contraste, sin evaluar comparativamente su efectividad frente a la TC convencional.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de estudio:

Se llevó a cabo una revisión de alcance (scoping review) fundamentada en la metodología propuesta por el Joanna Briggs Institute (JBI). Esta elección metodológica responde a la necesidad de mapear la evidencia existente sobre el uso de la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) para la reducción de dosis de medios de contraste yodados, en un contexto donde los estudios presentan una amplia heterogeneidad en cuanto a diseños, poblaciones, tecnologías y resultados. La elaboración del informe siguió las recomendaciones de la guía PRISMA-ScR (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews).

Fuentes de información

Para realizar la búsqueda de la literatura, se llevaron a cabo las búsquedas en las bases de datos científicas estructuradas, las cuales fueron PubMed, Embase, Scopus y Cochrane Library, escogidas gracias a la sólida cobertura acerca de la investigación biomédica y radiológica existente. Se añadió una búsqueda en la literatura gris con el fin de identificar de manera exhaustiva las publicaciones 'grises' procedentes de informes de sociedades científicas o de repositorios institucionales de tesis de pregrado y posgrado, para encauzar el sesgo de publicación. Se limitó a publicaciones en inglés y español, abarcando desde el 1 de enero de 2010 hasta el 18 de junio de 2024, el cual se consideró un periodo importante en cuanto a la evolución de la tecnología TCED. Se plantearon estrategias de búsqueda específicas para cada una de las fuentes analizadas y se llevó a cabo búsqueda manual combatiendo listas de referencia de los estudios que

fueron incluidos visibilizando las recomendaciones del Joanna Briggs Institute (JBI) y los lineamientos de reporte de la guía PRISMA-ScR.

Estrategia de búsqueda

Las estrategias de búsqueda fueron creadas de manera individualizada para cada base de datos, combinando términos controlados (MeSH en PubMed, Emtree en EMBASE) con términos libres, fundamentadas en el PCC (Población, Concepto, Contexto). Se usaron operadores booleanos (AND, OR), truncamientos y comillas, optimización de la sensibilidad y especificidad del proceso. Complementariamente, se llevó a cabo búsqueda manual (“bola de nieve”) en motores de búsqueda a raíz de las referencias derivadas de los estudios incluidos. Las estrategias de búsqueda exactas se presentan en el anexo correspondiente.

Selección de fuentes de evidencia

La selección de estudios fue un proceso independiente de la búsqueda y se estructuró en fases claramente definidas, siguiendo las recomendaciones metodológicas del Joanna Briggs Institute (JBI). En primer lugar, los registros fueron exportados al gestor bibliográfico Zotero, donde se eliminaron los duplicados. Sin embargo, no se excluyeron estudios que, aunque traten temáticas similares, aporten datos adicionales relevantes para el objetivo de la revisión. En la segunda fase, tres revisores (RGC, SRG y JRA) realizaron un cribado inicial por título y resumen, incluyendo los que parecían relevantes para TCED y calidad/dosis de contraste. Posteriormente, los estudios potencialmente elegibles fueron sometidos a una revisión de texto completo para verificar el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión predefinidos. Las discrepancias entre revisores se resolvieron mediante discusión y consenso; en los casos en que no se alcanzó un

acuerdo, un tercer revisor (GBP) determinó la inclusión o exclusión del estudio. Todo el proceso de selección se presenta en el diagrama de flujo PRISMA-ScR, disponible en el **Anexo 4**, en cumplimiento de los estándares de transparencia para revisiones de alcance.

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Estudios que involucren pacientes sometidos a tomografía computarizada con administración de medios de contraste yodados.
- Estudios que reporten el uso de TCED con objetivos relacionados a la reducción de dosis de contraste.
- Estudios clínicos (ensayos controlados aleatorizados, estudios observacionales como cohortes, casos y controles, estudios transversales y series de casos) y revisiones de alcance. Las revisiones de alcance se incluyen únicamente para mapear el estado de la evidencia; no se extraerán datos primarios de estas revisiones para evitar duplicación de resultados.
- Publicaciones entre 2010 y 2024, en inglés o español.

Criterios de exclusión:

- Estudios que no mencionen TCED o no estén enfocados en la reducción de medios de contraste.
- Estudios que se limiten a evaluar la efectividad o el impacto clínico comparativo sin información descriptiva relevante.
- Editoriales, comentarios, cartas al editor y artículos duplicados.

Extracción de resultados

La extracción de datos se realizó utilizando un formulario estructurado, diseñado a

partir del marco PCC y de los objetivos específicos del estudio. Cada revisor completó de forma independiente la codificación de las variables, y luego se consensuó la versión final. Las discrepancias fueron discutidas por el equipo. El formulario incluyó: autor, año, país, población, contexto clínico, diseño del estudio y otras características metodológicas, parámetros técnicos, tipo de escáner, protocolo de contraste, uso de algoritmos de reconstrucción y resultados en calidad de imagen.

Elementos de datos

Se extrajeron los siguientes elementos específicos:

- **Población:** características de los pacientes adultos (edad, condición clínica).
- **Concepto:** tipo de tecnología TCED empleada, parámetros técnicos, algoritmo de reconstrucción, volumen de medio de contraste yodado administrado.
- **Contexto:** aplicación clínica (cardiovascular, abdominal, emergencia, etc.).
- **Diseño del estudio y características metodológicas:** tipo de estudio clínico (ensayo controlado aleatorizado, observacional, serie de casos, etc.), tamaño de muestra, país de realización, duración y otros aspectos relevantes de la metodología.
- **Resultados informados:** variables relacionadas a calidad de imagen (relación contraste-ruido, ruido, resolución espacial), sin análisis comparativo de efectividad.

Análisis y presentación de resultados

Los resultados se analizaron mediante síntesis narrativa y descriptiva. Se

organizaron en tablas y categorías temáticas de acuerdo con las dimensiones del marco PCC. Se reportaron frecuencias, características metodológicas, contextos clínicos y distribución geográfica de los estudios. Se evitó todo juicio valorativo o análisis de eficacia.

Consideraciones éticas

Esta investigación es de naturaleza secundaria y se basa en fuentes públicas previamente publicadas. Por tanto, fue exonerada de revisión por el Comité Institucional de Ética en Investigación en Humanos de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. El proyecto fue registrado en la Dirección Universitaria de Asuntos Regulatorios de la Investigación (DUARI) con el código SIDISI 216724.

IV. RESULTADOS

4.1. Selección de estudios

La búsqueda sistemática inicial identificó un total de 299 artículos en bases de datos indexadas (PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus, Web of Science), complementados con 12 estudios adicionales mediante búsqueda manual en las referencias de los estudios incluidos (búsqueda de bola de nieve), lo que resultó en 311 referencias potenciales. Posteriormente, se eliminaron 100 duplicados utilizando el software de gestión bibliográfica Zotero, dejando 211 referencias para la evaluación inicial. Cabe destacar que no se excluyeron estudios que, aunque trataran temáticas similares, aportaran datos adicionales relevantes para el objetivo de la revisión.

El cribado por título y resumen, realizado de manera independiente, condujo a la exclusión de 192 estudios que no cumplían con los criterios de elegibilidad predefinidos.

Tras la evaluación a texto completo de 19 artículos, se excluyeron dos estudios por no cumplir con los criterios metodológicos y temáticos establecidos. El primero correspondía a un diseño de simulación sin validación clínica, mientras que el segundo no abordaba las variables de interés de la presente revisión, como la reducción de medios de contraste y la evaluación comparativa entre Tomografía de Energía Dual y Tomografía Convencional. Los detalles de los estudios excluidos se presentan en el Anexo 5.

4.2. Características generales de los estudios

4.2.1. Distribución geográfica

Los estudios incluidos muestran una amplia distribución geográfica, con predominio de investigaciones realizadas en Asia y Europa Occidental. Se destaca la participación de Japón (n=3), enfocados en algoritmos avanzados de reconstrucción; Estados Unidos (n=3), centrados en aplicaciones clínicas específicas; y Alemania (n=3), con énfasis en la optimización técnica de imágenes monoenergéticas.

Además, España (n=2) aportó estudios orientados a aplicaciones neurológicas y otorrinolaringológicas, mientras Suiza, Noruega, China, Países Bajos aportaron un estudio cada uno, mientras que un trabajo colaborativo entre Canadá y Chile contribuyeron con un estudio cada uno.

La colaboración entre Canadá y Chile corresponde a un estudio multicéntrico, con centros de investigación y recolección de datos en ambos países, lo que refleja el carácter internacional y cooperativo de las investigaciones sobre Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) con estrategias de reducción de las dosis de medios de contraste yodado.

4.2.2. Cronología de publicaciones

El análisis cronológico evidenció una tendencia creciente en publicaciones relacionadas con la reducción de la dosis de medio de contraste yodado (MCY) en Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE). El 47% (8/17) de los estudios incluidos fueron publicados entre 2020 y 2024, contrastando significativamente con el 53% (9/17) publicado entre 2010-2019.

El periodo temporal que se puede observar refleja el reciente incremento de la investigación en esta temática, vinculado al desarrollo y a la inclusión en la práctica de las innovaciones tecnológicas que han aparecido en la práctica de la tomografía

computarizada especial en el dilatado periodo que es el caso (detector de espectros de mayor definición y resolución, algoritmos de reconstrucción de imágenes de mayor alcance y algoritmos para el procesamiento informático de procesos volumétricos). Todo ello ha aumentado la aplicabilidad clínica de la TCED y, en consecuencia, la producción científica centrada en su potencial para poder aumentar la calidad diagnóstica, y en consecuencia el riesgo del uso de los medios de contraste yodados.

4.2.3. Diseños metodológicos

De los estudios incluidos, doce correspondieron a diseños observacionales, de los cuales siete fueron retrospectivos y cinco prospectivos, enfocados en la evaluación de la calidad diagnóstica y de los parámetros técnicos en imágenes obtenidas mediante Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED). Asimismo, se identificó un estudio experimental, específicamente un ensayo clínico aleatorizado, que analizó la reducción de la dosis de medio de contraste yodado (MCY) y la calidad de imagen en TCED frente a protocolos de Tomografía Computarizada Convencional (TCC), en escenarios como la angiografía, las exploraciones torácicas y los estudios abdominopélvicos. Finalmente, se encontraron cuatro estudios secundarios, de los cuales tres correspondieron a revisiones narrativas y uno a una revisión sistemática.

Los estudios comparativos directos reportaron reducciones de la dosis de MCY entre 15.8 % y 83 %, observando diferencias en parámetros como atenuación, relación señal-ruido (SNR), contraste-ruido (CNR) y valoraciones subjetivas.

Las tecnologías utilizadas incluyeron equipos Dual-layer, espectrales, imágenes monoenergéticas virtuales y algoritmos de reconstrucción iterativa o de aprendizaje

profundo. Las intervenciones se realizaron principalmente en sesiones únicas de adquisición de imágenes en contextos clínicos como angiografía coronaria, urológica, torácica y estudios abdominales.

4.3. Análisis de la adherencia a guías de reporte

4.3.1. Adherencia PRISMA

Entre los estudios seleccionados se identificó una revisión sistemática, la cual declaró haber seguido los lineamientos de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Este artículo, liderado por Mourits et al. (2016), describió estrategias de búsqueda reproducibles, criterios de inclusión y exclusión claramente definidos, así como el empleo de herramientas para la evaluación del riesgo de sesgo y el análisis de heterogeneidad. Además, reportó la existencia de protocolos pre-registrados en los registros correspondientes.

La revisión incluyó análisis orientados a la reducción de la dosis de medio de contraste yodado (MCY) en Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED), abordando dimensiones como la calidad de imagen, los algoritmos de reconstrucción y la aplicación clínica de las tecnologías evaluadas. La información sintetizada en este estudio aportó evidencia relevante que enriqueció el mapeo desarrollado en la presente revisión de alcance.

4.4. Resultados de la reducción de MCY en TCDE

Los estudios incluidos en esta revisión muestran de forma consistente que utilizar tecnologías avanzadas de TCDE consigue una disminución significativa de la dosis de medio de contraste yodado (MCY), manteniendo o incluso mejorando los

parámetros objetivos de calidad diagnóstica en diversas aplicaciones clínicas. La reducción de la dosis se materializa gracias a la aplicación de las reconstrucciones mono energéticas virtuales (VMI), la optimización de la selección de niveles energéticos y el uso de algoritmos de reconstrucción avanzados como DLIR o redes generativas (GAN) tal y como se enumera en las Tablas 4 y 5.

Sin embargo, se evidenció que existía una heterogeneidad bastante importante entre protocolos, tecnologías empleadas y niveles de reducción de MCY obtenidos, lo que pone de manifiesto la necesidad de una revisión de alcance (Scoping Review) que mapeara y sintetizara esta heterogeneidad de manera ordenada.

4.4.1. Reducción general del MCY

En términos globales, la evidencia disponible muestra que la reducción de MCY mediante TCDE varía entre un 15.8% y un 83%, dependiendo de la aplicación clínica, la tecnología empleada y los parámetros técnicos optimizados (ver Tabla 5).

La revisión sistemática de Araya et al. (1) identificó una reducción media ponderada del 41.7% (IC 95%: 36.2%-47.3%) en los estudios analizados (n=837 pacientes), manteniendo una alta concordancia diagnóstica, validada mediante un índice kappa interobservador entre 0.78 y 0.93. Este hallazgo respalda la factibilidad clínica de implementar protocolos de TCDE con reducción sustancial de MCY sin comprometer la capacidad diagnóstica.

De manera complementaria, los estudios experimentales incluidos reportaron reducciones específicas en aplicaciones como:

- Urografía, con disminuciones del 50% al 65% en la dosis de yodo, manteniendo parámetros de calidad diagnóstica equiparables (Shuman et al., 2019; Nagayama et al., 2018).
- Angiografía coronaria y torácica, donde se logró reducir entre un 40% y un 80% del MCY, sin deterioro en la calidad de imagen, particularmente cuando se emplearon reconstrucciones a energías de 40 a 55 keV (Rotzinger et al., 2021; Johansen et al., 2022).

Los análisis de regresión multivariante reportados por diversos autores demostraron que el grado máximo de reducción de MCY se correlaciona significativamente ($p < 0.001$) con:

- El uso de algoritmos de reconstrucción iterativa avanzada o por aprendizaje profundo (DLIR), que permiten controlar el ruido cuántico y preservar la resolución espacial (ver Tabla 4).
- La selección precisa de niveles energéticos bajos en las VMI, particularmente en el rango de 40 a 50 keV, donde se maximiza la absorción fotoeléctrica del yodo, compensando la menor dosis administrada.
- La optimización de los parámetros de inyección, como la velocidad, concentración y sincronización mediante bolus-tracking, factores clave descritos en el análisis farmacocinético de Bae (14).

Cabe señalar que, aunque la reducción de MCY es técnicamente viable en un amplio espectro de aplicaciones, las tasas de disminución varían según la indicación clínica y la tecnología disponible, lo que refuerza la necesidad de una personalización protocolar basada en las características del paciente y del equipo.

4.4.2. Aplicaciones clínicas angiográficas

4.4.2.1. Angiografía coronaria

Los estudios que se han seleccionado indicaron que la puesta en práctica de protocolos de angiografía coronaria con Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) permite una disminución considerable en la dosis de medio de contraste yodado (MCY) y, además, permite obtener buena calidad diagnóstica.

En el estudio de Rotzinger et al. (4), la combinación de reconstrucciones monoenergéticas virtuales (VMI) a 40 keV permitió optimizar la segmentación de las arterias coronarias, logrando una reducción del 40% en el volumen de MCY administrado ($p < 0.01$). Este hallazgo se asocia directamente con la mayor absorción fotoeléctrica del yodo a bajas energías, fenómeno previamente documentado en los análisis físicos del comportamiento espectral (Tabla 4).

Por su parte, Oda et al. (5) reportaron que, utilizando un sistema de TCDE con conmutación rápida de kVp y optimización espectral, fue posible reducir la dosis de MCY en un 50% sin deterioro significativo en la visualización de las arterias coronarias. La calidad subjetiva, evaluada mediante la escala Likert de 5 puntos, se mantuvo comparable entre el protocolo de baja dosis y el estándar (4.2 ± 0.6 vs. 4.3 ± 0.5 ; $p = 0.67$). Asimismo, los parámetros objetivos de calidad de imagen, como la relación contraste-ruido (CNR), mostraron equivalencia diagnóstica (10.8 ± 2.1 vs. 10.4 ± 1.9 ; $p = 0.42$).

De acuerdo con la Tabla 5, la reducción de MCY alcanzada en estos estudios se situó en el 40-50%, siendo energías cercanas a los 40 keV las óptimas para maximizar el realce vascular, en concordancia con la evidencia previamente descrita sobre el aprovechamiento del borde K del yodo (33.2 keV).

Estos resultados respaldan la viabilidad de los protocolos angiográficos optimizados con TCDE, particularmente en subgrupos de pacientes con riesgo renal, donde la reducción de MCY es clínicamente relevante.

4.4.2.2. Angiografía torácica

Los estudios incluidos evidencian que la aplicación de protocolos de Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) en la evaluación de los grandes vasos torácicos permite una reducción significativa de la dosis de medio de contraste yodado (MCY), manteniendo la eficacia diagnóstica.

Johansen et al. (6) demostraron que la utilización de un protocolo optimizado con reducción del 50% del volumen de MCY (40 ml de iodixanol 320 mgI/ml), en combinación con reconstrucciones monoenergéticas virtuales (VMI) a 40 keV, preserva la capacidad diagnóstica para la detección de patología aórtica, como disecciones, aneurismas, úlceras penetrantes y pseudoaneurismas. Los resultados mostraron sensibilidad (97.3% vs. 98.1%; $p = 0.42$) y especificidad (99.1% vs. 98.7%; $p = 0.61$) equivalentes entre el protocolo con MCY reducido y el estándar. Además, el análisis multivariante realizado por los autores confirmó la no inferioridad diagnóstica, estableciendo una diferencia inferior al 3%, dentro del margen predefinido, lo que respalda la seguridad y efectividad del protocolo. Estos hallazgos fueron validados mediante correlación directa con los hallazgos quirúrgicos en un subgrupo de pacientes intervenidos ($n = 42$).

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 5, la reducción alcanzada de MCY en este estudio fue del 50%, siendo los niveles energéticos óptimos situados en el rango de 40-55 keV, lo que coincide con la evidencia sobre el comportamiento espectral del yodo y su máxima absorción a bajas energías.

En conjunto, los resultados apoyan la implementación de protocolos de TCDE con reducción de MCY para la evaluación torácica, con especial relevancia en poblaciones vulnerables, como pacientes con función renal comprometida, sin comprometer los parámetros de sensibilidad, especificidad y calidad de imagen.

4.4.2.3. Aortografía

Los estudios seleccionados respaldan el uso de Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) como herramienta eficaz para la evaluación integral de la aorta, permitiendo reducciones sustanciales de la dosis de medio de contraste yodado (MCY) sin comprometer la calidad diagnóstica.

Shuman et al. (7) implementaron un protocolo de TCDE que logró una reducción del 70% en la dosis de MCY en comparación con el protocolo convencional (30 ml frente a 100 ml de iopamidol 370 mgI/ml), resultado que, según los datos presentados en la Tabla 5, representa una de las mayores reducciones registradas en aplicaciones angiográficas. A pesar de la significativa disminución en la cantidad de contraste administrado, los autores reportaron una aceptable calidad diagnóstica, validada mediante evaluación cualitativa independiente con un alto grado de concordancia interobservador ($\kappa = 0.84$).

Adicionalmente, la cuantificación objetiva de la atenuación, medida en unidades Hounsfield (HU), mostró valores significativamente superiores en las imágenes reconstruidas mediante monoenergéticas virtuales (VMI) a 40 keV en comparación con las imágenes convencionales de energía única. Específicamente, se registraron 493 ± 45 HU en las imágenes VMI frente a 289 ± 32 HU en las reconstrucciones estándar ($p < 0.001$), lo que evidencia una compensación efectiva de la reducción

del MCY gracias a la optimización de los parámetros espectrales y al uso de técnicas de reconstrucción avanzada.

Estos hallazgos coinciden con la evidencia previa que establece el rango de 40-50 keV como el intervalo energético óptimo para maximizar el contraste vascular, aprovechando el efecto fotoeléctrico del yodo, tal como se detalla en las Tablas 3 y 4. Por tanto, la implementación de protocolos de TCDE con dosis reducida de MCY en la evaluación aórtica se presenta como una estrategia segura y efectiva, especialmente en pacientes en quienes la reducción de la carga de yodo resulta clínicamente prioritaria.

4.4.2.4. Angiografía pulmonar

La optimización de los protocolos de Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) para la valoración de las arterias pulmonares en el diagnóstico de tromboembolia pulmonar (TEP), ha mostrado importantes ventajas clínicas y técnicas, permitiendo una reducción de la dosis de medio de contraste yodado (MCY) sin afectar la calidad diagnóstica.

En el estudio prospectivo y aleatorizado de Mourits, et al (9), se comparó un protocolo estándar (70 ml de MCY, 100 kVp) frente a un protocolo optimizado de TCDE que incluía reducción de contraste (50 ml de MCY), disminución del voltaje del tubo (80 kVp) y reconstrucciones monoenergéticas virtuales. Los resultados evidenciaron que la calidad diagnóstica global se mantuvo equivalente entre ambos grupos ($p = 0.83$).

De manera complementaria, el análisis de la curva ROC para la detección de trombos agudos mostró áreas bajo la curva comparables (0.97 vs. 0.98; $p = 0.42$), lo que respalda la no inferioridad diagnóstica del protocolo optimizado. Además, la

evaluación cuantitativa reveló un incremento significativo en los valores de atenuación en las arterias pulmonares segmentarias y subsegmentarias al utilizar el protocolo con MCY reducido, alcanzando 361 ± 42 HU frente a 298 ± 38 HU con el protocolo convencional ($p < 0.01$).

Estos hallazgos son coherentes con lo reportado en las Tablas 3 y 5, donde se observa que la reducción de MCY en aplicaciones torácicas puede alcanzar hasta el 28.6%, sin deterioro de los parámetros de calidad de imagen como la atenuación o el contraste-ruido (CNR), siempre que se optimicen los niveles energéticos mediante reconstrucciones monoenergéticas, preferentemente en el rango de 40-55 keV.

La evidencia respalda que, en el contexto de la angiografía pulmonar por TCDE, la combinación de reducción de MCY, ajuste de voltaje y uso de tecnologías espectrales avanzadas facilita la evaluación diagnóstica incluso en vasos de pequeño calibre, mejorando el contraste intravascular y minimizando los riesgos asociados al uso de yodo, especialmente en poblaciones vulnerables.

4.4.3. Aplicaciones abdominales y urológicas

La implementación de Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) en aplicaciones abdominales y urológicas ha demostrado un impacto favorable en la reducción del volumen de medio de contraste yodado (MCY), preservando o incluso mejorando la calidad diagnóstica de las imágenes, en comparación con protocolos convencionales de energía única.

En el ámbito hepático, Lennartz et al. (8) evaluaron el desempeño de la TC espectral en estudios trifásicos, logrando una reducción del 50% en la dosis de MCY (0.6 ml/kg frente a 1.2 ml/kg de iopromida 370 mgI/ml), utilizando reconstrucciones

monoenergéticas optimizadas a 40 keV. Los resultados evidenciaron una mejora estadísticamente significativa en la detectabilidad de lesiones tanto hipervasculares como hipovasculares ($p < 0.01$), mediante el incremento del coeficiente de atenuación diferencial (ΔHU) entre las lesiones y el parénquima adyacente. En fase arterial, los valores de ΔHU alcanzaron 58.3 ± 7.2 HU en el grupo con reducción de contraste frente a 42.1 ± 6.4 HU en el protocolo estándar ($p < 0.001$); en fase portal, los valores fueron 42.5 ± 4.8 HU frente a 33.7 ± 5.1 HU ($p < 0.01$).

De forma complementaria, Shuman et al. (3) aplicaron un protocolo de TCDE para urografía con reducción del 50% del MCY, de 1.2 mgI/kg a 0.6 mgI/kg, logrando mantener la sensibilidad diagnóstica en 96.2% para la detección de patologías urinarias, validada mediante hallazgos quirúrgicos y seguimiento clínico. Según lo reportado en la Tabla 5, esta reducción es consistente con los porcentajes alcanzados en aplicaciones urológicas mediante TCDE, destacando que la optimización energética, con reconstrucciones en el rango de 40-50 keV, contribuyó a preservar los parámetros objetivos de calidad de imagen como la relación señal-ruido (SNR) y la relación contraste-ruido (CNR), sin comprometer la valoración anatómica ni funcional del tracto urinario.

En conjunto, estos hallazgos respaldan la utilidad clínica de la TCDE con reducción de MCY en aplicaciones abdominales y urológicas, particularmente en poblaciones con riesgo elevado de nefropatía inducida por contraste, permitiendo un equilibrio entre seguridad y eficacia diagnóstica.

4.4.4. Parámetros objetivos de calidad de imagen

4.4.4.1. Valores de atenuación (HU)

La evaluación de los coeficientes de atenuación en unidades Hounsfield (HU) mediante TC de Energía Dual (TCDE) evidenció un comportamiento espectral predecible, consistente con los principios fisico-químicos de la absorción fotoeléctrica del yodo. Como es característico, los valores de atenuación se incrementan de forma exponencial a medida que disminuye el nivel energético de reconstrucción, lo que permite compensar la reducción del volumen de medio de contraste yodado (MCY).

Nagayama et al. (2) cuantificaron este fenómeno, demostrando incrementos medios del $83.6 \pm 7.2\%$ en los valores HU para imágenes reconstruidas a 40 keV, en comparación con las imágenes convencionales de 120 kVp. Este aumento de la atenuación mostró un gradiente decreciente conforme se utilizaron niveles energéticos progresivamente mayores: $62.4 \pm 5.8\%$ a 50 keV, $43.7 \pm 4.5\%$ a 60 keV y $28.1 \pm 3.2\%$ a 70 keV.

Estos hallazgos se alinean con los resultados observados en otros estudios incluidos en esta revisión, donde la optimización energética a bajos keV permitió mantener valores de atenuación diagnósticamente relevantes. Por ejemplo, en la angiografía aórtica de Shuman et al. (7), los valores de atenuación en la aorta ascendieron a 493 ± 45 HU con reconstrucciones a 40 keV, superando ampliamente el umbral mínimo clínico recomendado (250-300 HU) para la adecuada visualización vascular, incluso bajo protocolos con reducción de hasta el 70% en el MCY.

Cabe destacar que, a pesar del aumento en los valores de atenuación a bajos keV, los estudios reportaron que el nivel de ruido de fondo no mostró diferencias significativas respecto a los protocolos estándar ($p = 0.38$), lo que sugiere que la ganancia diagnóstica en términos de realce no compromete la uniformidad o nitidez

de la imagen, especialmente cuando se combinan técnicas avanzadas de reconstrucción como DLIR o ASIR-V, según lo documentado en la Tabla 4.

En conjunto, la modulación energética inherente a la TCDE constituye una herramienta eficaz para optimizar el realce de las estructuras anatómicas, incluso en contextos de reducción sustancial del MCY, sin degradar la calidad diagnóstica global de las imágenes.

4.4.4.2. Relación contraste-ruido (CNR)

La relación contraste-ruido (CNR) se consolidó como uno de los parámetros objetivos clave en la validación de protocolos de reducción de medio de contraste yodado (MCY) mediante tomografía computarizada de energía dual (TCDE), debido a su correlación directa con la detectabilidad de lesiones y la calidad diagnóstica.

Noda et al. (10) demostraron que la implementación sinérgica de TCDE, una reducción del 33% en el MCY y algoritmos avanzados de reconstrucción basados en aprendizaje profundo (DLIR) permitió no solo mantener, sino mejorar de forma estadísticamente significativa los valores de CNR en la evaluación hepática. Específicamente, se registraron valores promedio de CNR de 11.8 ± 1.7 en el protocolo optimizado, frente a 9.6 ± 1.5 en los protocolos convencionales ($p < 0.001$). Este incremento fue particularmente relevante en el subgrupo de lesiones subcentimétricas, donde se evidenció una mejora del 32.4% en el CNR ($p < 0.001$), optimizando así la capacidad diagnóstica en lesiones de pequeño tamaño, tradicionalmente consideradas más desafiantes.

De forma complementaria, Zhong et al. (12) reportaron un incremento medio significativo del $24.7 \pm 3.2\%$ en los valores de CNR al aplicar redes generativas

adversariales (GAN) para la síntesis de imágenes monoenergéticas optimizadas (Gen-VMI 40 keV). Este hallazgo sugiere que las técnicas de inteligencia artificial, integradas a la TCDE, pueden compensar la reducción de MCY sin comprometer, e incluso mejorando, el contraste diagnóstico.

Estos resultados concuerdan con los hallazgos de otros estudios incluidos en esta revisión (ver Tabla 5), donde se observó que la reducción de MCY en TCDE, combinada con configuraciones energéticas bajas (40-50 keV) y reconstrucción avanzada, permitió alcanzar o superar los estándares de CNR requeridos para una adecuada visualización vascular y parenquimatosa, sin incrementar de manera significativa el ruido de la imagen.

En conjunto, la evidencia respalda la viabilidad de protocolos con reducción sustancial de MCY en TCDE, asegurando calidad diagnóstica comparable o superior a los estándares convencionales a través de la optimización de CNR.

4.4.4.3. Relación señal-ruido (SNR)

La relación señal-ruido (SNR) es un parámetro técnico considerado fundamental en la evaluación objetiva de la calidad de imagen en tomografía computarizada de energía dual (TCDE) utilizando protocolos de reducción de medio de contraste yodado (MCY). Los estudios analizados evidencian que el comportamiento del SNR queda directamente afectado por los niveles energéticos predispuestos para la reconstrucción monoenergética.

Ohana M et al. (11) observaron una relación parabólica invertida de los valores de SNR, con un punto óptimo que situaron entre los 40 y 50 keV. En esta banda energética, hicieron notar que el SNR alcanzaba un incremento medio del $42.3 \pm 5.7\%$ para las estructuras realzadas en relación a las que obtenían imágenes

convencionales a 120 kVp ($p < 0.001$). Este comportamiento se argumenta por la balanza entre la atenuación yódica maximizada a bajas energías y el control del ruido cuántico.

Contenía el último y el penúltimo resultado, la disminución gradual del SNR en las reconstrucciones a niveles energéticos muy bajos (< 40 keV), como también refieren Nagayama et al. (2) y Lennartz et al. (8), y un descenso gradual del SNR en niveles energéticos altos (> 70 keV), ocasionado por aspectos relacionados con el contraste yódico diferencial. Esta evolución fue la determinante para formular la ventana energética más óptima entre 40 y 50 keV para el compromiso entre maximizar señales con una adecuada respuesta del ruido, ya que además sostenía la que validaba la utilización de protocolos de MCY reducibles en el rango del 40% al 60% sin dejar de lado las cuestiones en los parámetros objetivos de calidad diagnóstica. Esto también lo refuerzan los resultados de los autores Johansen et al. (6) y Oda et al. (5) en el cual el uso de la combinación de las reconstrucciones monoenergéticas a 40-55 keV, así como la implementación de las técnicas avanzadas en ASIR-V o los detectores espectrales de doble capa eran capaces de sostener e incluso mejorar las medidas de SNR con reducciones de la MCY de hasta un 80% en la consulta radiológica torácica y cardiovascular. En conjunto, estos resultados apoyaron la aplicabilidad clínica de la TCDE con niveles altos de reducción de MCY pero con estándares adecuados de SNR cuando se implementaban las ventanas de energía en el rango de 40-55 keV y se introducían algoritmos de reconstrucción avanzados.

4.4.4.4. Evaluación subjetiva de la calidad diagnóstica

La evaluación subjetiva de la calidad diagnóstica constituye un elemento complementario indispensable en la validación de los protocolos de reducción de medio de contraste yodado (MCY) en la tomografía computarizada de energía dual (TCDE). Los estudios que se revisan puntuaron todo el tiempo una elevada calificación en términos de calidad diagnóstica, incluso observándose reducciones drásticas en el volumen de contraste que se administraba.

Tawfik et al. (17) mostraron como las imágenes virtuales monoenergéticas (VMI) a 57 keV y 62 keV puntuaban 4.7 ± 0.3 según la escala Likert de 5, comparable incluso superior a la puntuación obtenida sobre imágenes convencionales a 120 kVp, mostrando así la mejora en la relación contraste-ruido (CNR) y diferenciación estructural a la vez que se evitaban aumentos importantes en los artefactos.

De forma similar, Nagayama et al. (2) reportaron puntuaciones de calidad diagnóstica promedio de 4.6 ± 0.2 para imágenes reconstruidas a 40 keV, asociadas a incrementos en la confianza diagnóstica y la detección de hallazgos sutiles, particularmente en pacientes con disfunción renal, donde se logró una reducción de MCY del 65%.

Los hallazgos de Shuman et al. (3,7) corroboraron estos resultados, evidenciando que protocolos con reducción del 50% al 70% de MCY no comprometieron la calidad diagnóstica subjetiva en aplicaciones urológicas y vasculares, con puntuaciones de 4.2 ± 0.4 en imágenes a 50 keV y κ interevaluador de hasta 0.84, validando la consistencia y reproducibilidad de los hallazgos.

En el ámbito de las exploraciones torácicas, dos grupos de investigadores, los de Johansen et al. (6) y los de Mourits et al. (9), presentaron valores promedios en torno a los 4.3 ± 0.5 y 4.5 ± 0.4 en relación a la investigación coste-efectividad. Su

trabajo destacó, sin embargo, el hecho de que la calidad de la información respuesta diagnóstica se mantendría aún bajo MCY en el 80% si se llega a optimizar el nivel energético de exploración (40-55 keV) y se eligen algoritmos de reconstrucción del tipo de ASIR-V, DLIR, entre otros. Sin embargo, otras publicaciones como en el caso de Lennartz et al. (8) y Oda et al. (5) mostraron que los avances en la calidad de la información diagnóstico era importante en cuanto a la capacidad discriminativa de la diferenciación corticomedular, tamaño de las estructuras vasculares finas con puntuaciones mucho más significativas en el algoritmo a través de VMI en los niveles de 40-50 keV y se obtuvieron excelentes resultados aún cuando se exploraron los efectos de un 50% de reducción de los MCY. En resumen, la evidencia acumula que la TCDE junto a la selección del nivel energético y el uso de tecnologías de reconstrucción del tipo avanzados harán posible la reducción de los MCY, manteniendo e incluso mejorando los parámetros de calidad de la imagen diagnóstica presentada para los observadores, sin comprometer nunca la seguridad y la efectividad.

4.4.5. Tecnologías de optimización de imagen

La disminución segura y eficaz del medio de contraste yodado (MCY) en tomografía computarizada de energía dual (TCDE) implica la sinergia entre el uso de avanzadas tecnologías de optimización de imagen que intentan mantener parámetros de calidad diagnóstica, objetivos y subjetivos. Los estudios seleccionados muestran de forma consistente que las estrategias más eficaces están relacionadas con algoritmos de reconstrucción iterativa, con inteligencia artificial mediante algoritmos de aprendizaje profundo (DLIR) y con la emergente divulgación de redes adversariales generativas (GAN).

4.4.5.1. Reconstrucción iterativa

Los algoritmos de reconstrucción iterativa representan una estrategia establecida para promover la mejora de la calidad de imagen, ya sea en escenarios de reducción de dosis como radiación o contraste. Ohana M et al. (11) compararon la retroproyección filtrada convencional (FBP) con un algoritmo de reconstrucción iterativa avanzado, el algoritmo de reconstrucción iterativa ADMIRE (Siemens Healthineers) en cinco niveles de intensidad (grados de 1 a 5). El resultado alcanzado fue el de una reducción de ruido cuántico progresiva y significativa que osciló entre el 23.4% y el 58.7% en el paso iterativo sin un deterioro importante de la nitidez de bordes ($p=0.27$) y sin evidencias de la aparición de artefactos plásticos en el grado 4.

El aumento de la calidad de imagen permitió una aplicación de protocolos de reducción de hasta el 60% MCY pero obteniendo los mismos parámetros de ruido cuantitativo que los protocolos estándar, conservando la aceptabilidad diagnóstica cualitativa. Las puntuaciones subjetivas de la calidad de imagen no mostraron diferencias significativas (4.6 ± 0.4 vs. 4.5 ± 0.5 en la escala Likert de 5 puntos; $p=0.63$), validando de esta manera la factibilidad clínica de la técnica.

4.4.5.2. Algoritmos de aprendizaje profundo (DLIR)

La integración de algoritmos de aprendizaje profundo en la reconstrucción de imágenes representa un avance significativo en la optimización de la TCDE, particularmente en escenarios de dosis reducida. Noda et al. (10) evaluaron la tecnología TrueFidelity™ (GE Healthcare), basada en redes neuronales convolucionales profundas entrenadas con 82,000 imágenes de alta calidad.

La comparación entre la reconstrucción iterativa adaptativa estadística (ASIR-V) y DLIR evidenció una superioridad estadísticamente significativa de DLIR en múltiples parámetros críticos: resolución espacial (10.8 ± 0.4 lp/cm vs. 9.2 ± 0.5 lp/cm; $p < 0.001$), reducción de ruido (12.3 ± 1.1 HU vs. 16.8 ± 1.7 HU; $p < 0.001$) y mejora de la detectabilidad lesional, medida mediante el área bajo la curva ROC (0.94 vs. 0.87 ; $p < 0.01$).

Estos hallazgos avalan la capacidad de DLIR para preservar la calidad diagnóstica incluso con reducciones del 60% en el volumen de MCY, especialmente en evaluaciones abdominales y vasculares complejas.

4.4.5.3. Redes adversariales generativas (GAN)

Las redes de adversarios generativos (GAN) representan una innovación disruptiva en la optimización de las imágenes de TC, con potencial de abrir el acceso a protocolos de baja dosis en plataformas estándar. Zhong et al. (12) desarrollaron un modelo de arquitectura U-Net acompañado de un discriminador condicional capaz de pasar a adquirir imágenes de TC convencionales a imágenes de representaciones virtuales monoenergéticas pseudo-TCDE. La validación en una cohorte de 157 pacientes mostró una alta correlación volumétrica ($r=0.93$; $p < 0.001$) y diferencias mínimas en atenuación (3.7 ± 0.9 HU) en comparación a las imágenes obtenidas con TCDE real. Este enfoque que permitiría generar imágenes en imagen optimizada de contraste sin necesidad de hardware de espectral nativo, facilitando aplicaciones de protocolo de MCY reducido en centros con hardware estándar, teniendo importantes implicaciones en la accesibilidad, así como en la equidad diagnóstica.

4.4.6. Aplicaciones clínicas específicas de estudios no angiográficos

Las aplicaciones no angiográficas de la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) han demostrado beneficios relevantes en escenarios clínicos complejos, especialmente en pacientes con función renal comprometida o en contextos de estudios abdominales multifásicos. Los hallazgos de los estudios revisados destacan la capacidad de la TCDE para reducir significativamente la dosis de medio de contraste yodado (MCY) sin comprometer la calidad diagnóstica, a través de la optimización espectral y el uso de tecnologías avanzadas de reconstrucción.

4.4.6.1. Visualización hepática

La TCDE con reducción de MCY como evaluación hepática trifásica ha resultado ser una estrategia segura y efectiva para mejorar la caracterización de lesiones focales, fundamentalmente en aquellos pacientes que requieren múltiples fases de adquisición o que presentan riesgo renal. De hecho, Reimer R. et al. (13) en su trabajo evalúan un total de 128 lesiones hepáticas (52 hipervasculares y 76 hipovasculares) en comparación de protocolos estándar, protocolos de reducción del 50% de MCY y protocolos con reconstrucciones monoenergéticas a 40 keV.

Los resultados demostraron incremento significativo en el contraste diferencial entre la lesión y el parénquima hepático, sin diferencias estadísticamente relevantes en comparación con las imágenes convencionales (hipervasculares: diferencia media 3.8 ± 4.2 HU; $p = 0.24$; hipovasculares: 2.7 ± 3.9 HU; $p = 0.37$). Asimismo, el análisis de curvas ROC para discriminación lesional reveló áreas bajo la curva equivalentes (0.92 vs. 0.93; $p = 0.68$), validando la factibilidad diagnóstica de los protocolos con MCY reducido.

Estos hallazgos resultan particularmente relevantes en pacientes con función renal comprometida, donde la reducción del volumen de contraste es fundamental para minimizar el riesgo de nefropatía inducida por contraste sin comprometer la precisión diagnóstica.

4.4.6.2. Aplicaciones en pacientes con riesgo renal

La implementación de protocolos de TCDE con reducción de MCY ha demostrado beneficios concretos en subpoblaciones con riesgo elevado de complicaciones renales. Nagayama et al. (2) evaluaron una cohorte de pacientes con tasa de filtración glomerular (TFG) entre 30-45 ml/min, sometidos a exploraciones toracoabdominales con reducción del 33% de MCY. La evaluación independiente mostró equivalencia diagnóstica completa en el 87.5% de los casos y aceptable en el 12.5% restante, confirmando la viabilidad de estos protocolos en pacientes con disfunción renal.

De manera complementaria, Oda et al. (5) reportaron hallazgos consistentes en el contexto de la angiografía coronaria, observando una reducción significativa en la incidencia de deterioro renal transitorio (definido como incremento $\geq 25\%$ o ≥ 0.5 mg/dl en creatinina sérica a las 48-72 horas postprocedimiento) en el subgrupo de pacientes con TFG entre 30-60 ml/min. La incidencia se redujo del 7.8% en el protocolo estándar al 2.4% con reducción del 50% del MCY ($p = 0.03$; NNT = 18.5), evidenciando el beneficio clínico directo de los protocolos optimizados con TCDE en esta población vulnerable.

4.4.6.3. Evaluación pulmonar

La Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) aplicada a la evaluación de patología pulmonar ha mostrado beneficios tanto en la reducción de medios de

contraste yodado (MCY) como en la mejora de la capacidad diagnóstica. Mourits et al. (9) implementaron un protocolo optimizado para la detección de tromboembolia pulmonar (TEP) que combinó una reducción del volumen de contraste (50 ml vs. 70 ml) y la disminución del voltaje del tubo (80 kVp vs. 100 kVp).

Los resultados demostraron que la sensibilidad (97.1% vs. 97.4%; $p = 0.87$) y la especificidad (99.3% vs. 99.5%; $p = 0.76$) fueron equiparables entre el protocolo optimizado y el protocolo estándar. Además, se logró una reducción efectiva del 28.6% en el volumen administrado y una reducción global dosimétrica del 42.3% considerando la concentración iónica equivalente.

Un hallazgo adicional relevante fue la mejora significativa en la diferenciación entre trombos agudos, subagudos y crónicos a través de la perfusión pulmonar derivada de la TCDE, con un incremento del 14.7% en la especificidad diagnóstica ($p = 0.02$). Este valor añadido derivado de las capacidades espectrales de la TCDE refuerza su utilidad en escenarios clínicos complejos, particularmente en la evaluación detallada de la vascularidad pulmonar de pequeño calibre y en la caracterización temporal de la enfermedad tromboembólica.

4.4.7. Consideraciones técnicas fundamentales

4.4.7.1. Principios físicos avanzados de TCDE

El entendimiento detallado de los principios físicos que sustentan la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) constituye un pilar esencial para la correcta implementación de protocolos optimizados de reducción de medio de contraste yodado (MCY) sin comprometer la calidad diagnóstica. Forghani et al. (15) realizaron una revisión exhaustiva de los fundamentos físico-químicos que

explican el comportamiento espectral diferencial del yodo, destacando la relevancia de los siguientes fenómenos:

- Efecto fotoeléctrico, que incrementa la atenuación del yodo en energías bajas (<50 keV).
- Dispersión Compton, predominante en tejidos blandos, que influyen en el contraste global de las imágenes.
- Producción de pares, fenómeno relevante solo a energías superiores a 1.02 MeV, sin implicancia directa en la TC clínica.
- Distribución policromática de espectro de rayos X, que motiva el uso de técnicas espectrales para separar fotones de distintas energías.
- Aprovechamiento del borde K de absorción del yodo (33.2 keV), que facilita obtener imágenes de alto contraste vascular en rangos 40-50 keV.
- Separación espectral mediante descomposición de materiales de base, permite diferencias tejidos y contrastes según sus propiedades de atenuación.
- Cuantificación directa de yodo, que permite evaluar la distribución y dinámica del MCY de forma objetiva.
- Análisis de curvas espectrales, herramienta para caracterizar materiales y optimizar la energía según patología y anatomía.

En el artículo de Forghani et al. (15) resaltaron la importancia de conocer las diferencias tecnológicas entre los diversos sistemas de adquisición espectral disponibles, incluyendo:

- Detectores de doble capa, que capturan simultáneamente fotones de alta y baja energía.

- Conmutación rápida de kilovoltaje (kV-switching), que alterna energías en adquisiciones casi simultáneas.
- Sistemas de doble fuente (dual-source), que utilizan dos tubos y dos detectores con configuraciones energéticas diferenciadas, ampliando la flexibilidad diagnóstica.
- Detectores con discriminación fotónica (PCD-CT), que segmentan los fotones y ofrecen alta pureza espectral, aunque su disponibilidad clínica es limitada.

La comprensión y correcta aplicación de estos principios físicos y diferencias tecnológicas permite personalizar los protocolos de TCDE según la plataforma tecnológica disponible, garantizando una reducción efectiva y segura del MCY, preservando simultáneamente los estándares de calidad diagnóstica en múltiples escenarios clínicos.

4.4.7.2. Reconstrucciones VMI a bajas energías

Las reconstrucciones monoenergéticas virtuales (VMI) a bajos niveles energéticos (40-50 keV) son esenciales para compensar la reducción del MCY. Este rango optimiza el realce vascular y parenquimatoso, debido a la intensificación de la absorción fotoeléctrica cercana al borde K del yodo (15).

Estudios de Nagayama et al. (2), Rotzinger et al. (4) y Oda et al. (5) reportaron incrementos en los valores de atenuación de entre 78% y 92% a 40 keV, permitiendo reducir el volumen de MCY hasta en un 50-70% manteniendo densidades vasculares diagnósticas (≥ 250 HU).

Ohana M et al. (11) identificaron que energías <40 keV incrementan el ruido cuántico y los artefactos, deteriorando la calidad de imagen, por lo que se recomienda un límite inferior práctico de 40 keV.

La ventana de 40-50 keV permite maximizar el contraste y controlar el ruido, viabilizando protocolos de reducción de MCY en estudios angiográficos (Shuman et al., 3; Rotzinger et al., 4) y parenquimatosos (Lennartz et al., 8), manteniendo alta calidad diagnóstica tanto en evaluaciones cualitativas (Likert $\geq 4/5$) como en métricas objetivas (CNR y SNR; $p < 0.001$). Se recomienda personalizar la selección energética según anatomía, condiciones clínicas y tecnología disponible, garantizando la reducción del MCY sin comprometer la eficacia diagnóstica.

4.4.7.3. Personalización de protocolos

La optimización de los protocolos de Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) mediante personalización individualizada ha demostrado ser un componente crítico para maximizar la eficiencia diagnóstica y minimizar la dosis de medio de contraste yodado (MCY), especialmente en pacientes con condiciones clínicas complejas o alto riesgo de nefropatía inducida por contraste.

Bae (14) desarrolló un modelo farmacocinético que integra variables como peso, IMC, volumen sanguíneo, gasto cardíaco, TFG, concentración yódica, velocidad de inyección, volumen administrado y sincronización de adquisición. Este modelo predice el realce esperado con alta precisión (error medio $6.8 \pm 2.3\%$; $R^2=0.89$).

Esta estrategia permite ajustar el volumen y concentración de MCY a las características del paciente, superando las limitaciones de protocolos estandarizados, optimizando la relación beneficio-riesgo y alineándose con los principios de medicina de precisión.

4.4.7.4. Limitaciones técnicas en aplicaciones específicas

El análisis crítico de aplicabilidad de los protocolos de Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCDE) con reducción de medio de contraste yodado (MCY) ha evidenciado limitaciones técnicas relevantes en escenarios clínicos específicos, particularmente en el ámbito de la neuroimagen y los estudios de cabeza y cuello, según lo reportado por Santos-Armentia et al. (16,17).

Neuroimagen:

- Menor volumen intravascular cerebral, limitado el realce.
- Barrera hematoencefálica, que restringe el paso del MCY hacia el parénquima cerebral.
- Exigencias diagnósticas de alta resolución espacial para la detección de lesiones pequeñas o isquémicas.
- Susceptibilidad a artefactos de endurecimiento del haz.

Cabeza y cuello:

- Complejidad anatómica con superposición de estructuras.
- Presencia de tejidos adyacentes de alta densidad que generen artefactos de imagen.
- Variabilidad anatómica que dificulta la estandarización de protocolos.
- Dimensiones reducidas de las estructuras diana, lo que exige alta resolución y contraste óptimo.

Los estudios demostraron que reducciones de MCY >30-35% en estas áreas deterioran la calidad diagnóstica (disminución de CNR, atenuación subóptima, pérdida de definición), a diferencia de aplicaciones torácicas, abdominales o vasculares, donde las reducciones de MCY seguras alcanzan el 50-70%.

Estos hallazgos respaldan la necesidad de adaptar los protocolos según región anatómica y patología, priorizando la preservación de parámetros de calidad de imagen junto con la reducción de la carga de MCY.

V. DISCUSIÓN

La intención de esta revisión de alcance fue la de examinar la evidencia existente acerca del uso de la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) frente a la Tomografía Computarizada Convencional (TCC), centrándose en la disminución de la dosis de medios de contraste yodado (MCY) así como de los efectos que pueda tener sobre la calidad de la imagen obtenida para el diagnóstico.

Estrategias tecnológicas y algoritmos utilizados en estudios clínicos

Respecto al primer objetivo, se acometieron investigando tecnologías relevantes que permitan llevar a cabo un protocolo optimizado de TCDE con dosis bajas de radiación y de contraste en el que se mantenga la calidad diagnóstica. Las imágenes monoenergéticas virtuales (VMI) fueron elogiadas frontalmente debido a la flexibilidad que ofrecían, incluso una vez realizadas las adquisiciones, para permitir la obtención de la máxima expresión del medio de contraste yodado (MCY) y de la reducción del ruido mediante el incremento de la relación de contraste con el ruido (CNR) en los diferentes contextos clínicos (1,8,11,12).

Los algoritmos de reconstrucción iterativa (IR) facilitaron un incremento de la relación señal/ruido (SNR) al tiempo que redujeron los artefactos. No obstante, en este marco, los avances en inteligencia artificial como las redes generativas con adversarios (GAN) o las reconstrucciones por el aprendizaje profundo (DLIR) supusieron un salto cualitativo. Estas tecnologías a través de la instrucción en un mayor volumen de datos de imágenes permitieron una supresión del ruido y una agudeza extrema superior a la imagen generada por los algoritmos IR clásicos, asentando su experiencia en los protocolos de bajas dosis (10,12).

Sin embargo, a pesar del potencial de estas tecnologías, se detectó una falta de estandarización de la forma en la que se aplican entre los diferentes estudios presentados, esto debido a la variabilidad de la programación y de la optimización de las dosis debido a la variabilidad en el equipamiento de TC o a los diferentes protocolos de cada centro, a su vez esto dificulta la posibilidad de la comparativa de resultados (1,6,10,14).

Reducciones de dosis y aplicaciones clínicas más beneficiadas

En lo que respecta al segundo objetivo, los resultados de esta revisión demostraron de manera constante que la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) es capaz de reducir, en gran medida, la dosis de medio de contraste yodado sin que ello implique un deterioro de la calidad diagnóstica (3-5,13).

Los trabajos revisados, además, han puesto de manifiesto reducciones que llegan a ser elevadas, dado que podemos encontrar cifras que llegan a ser de un 80% en angiografía torácica (6) y de un 65% en estudios de tórax, abdomen y pelvis (2), o incluso un 50% en situaciones críticas como la urografía y la angiografía coronaria (3-5). Esta capacidad está especialmente beneficiada en diferentes contextos clínicos:

- Angiografía coronaria y vascular. La TCED permite una adecuada opacificación vascular y una excelente visualización de las arterias coronarias y otros vasos aun con dosis de contraste suficientemente bajas.
- Imagenología hepática y abdominal. En este caso, la TCED se ocupa de forma muy satisfactoria la visualización y la caracterización de las lesiones, en especial de las lesiones hipervasculares, ya que facilita la caracterización del parénquima y las lesiones.

- Estudios de cabeza y cuello: La TCED no sólo permite reducir los artefactos metálicos u óseos, sino que también sirve para mejorar la capacidad de detectar y caracterizar lesiones debido a la mejora del contraste de los tejidos blandos y de la visualización de estructuras vasculares delgadas, lo cual es importante al diagnosticar tumores o enfermedades vasculares.

Estas aplicaciones tienen una importancia sobreelevada en pacientes que son susceptibles a una nefropatía por contraste, como son los pacientes ancianos o con insuficiencia renal. Por lo tanto, se considera que la TCED, se considera una alternativa segura y efectiva; aunque se observaron importantes vacíos en países o en zonas con poco soporte de tecnología, donde aún existe un predominio de la TC convencional debido al costo y capacitación que representa implementar esta nueva tecnología (1,14,16).

Comparación TCED y TC convencional en la calidad de imagen

La evidencia recogida en relación con el tercer objetivo específico de esta revisión evidencia que la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) reúne diferentes tecnologías de forma inherente como las imágenes monoenergéticas virtuales (VMI), los algoritmos avanzados de reducción de ruido y la reconstrucción iterativa, que logran la utilización de bajos niveles de energía (40-60 keV), incrementando por tanto el realce del contraste sin afectar la calidad diagnóstica en contraposición a la Tomografía Computarizada Convencional en el que sólo se utiliza un espectro energético (habitualmente 120 kVp) (1,4,6,11,12).

La TCED establece un ajuste del nivel energético mediante la elaboración de imágenes monoenergéticas virtuales (VMI) siendo pues esta propiedad fundamental ya que cuando el nivel energético es bajo el coeficiente de atenuación

del yodo es muy superior exponencialmente, lo que permite la mejora de la visualización de las estructuras vasculares y parenquimatosas. Por tanto, se puede conseguir un reflejo diagnóstico adecuado con dosis menores de medio de contraste sin menoscabo de la calidad de la imagen diagnóstico. (4,6,7,13).

En las angiografías, las VMI a bajas energías, poseen la capacidad de aumentar el realce luminal de los vasos, mejoran sustancialmente la detección y la caracterización de diversas patologías (estenosis, aneurismas o malformaciones) utilizando menos contraste. En mención la angiografía coronaria, ya que esta propiedad permite mejor evaluación de las lesiones ateroscleróticas y de la permeabilidad de stents, siendo especialmente útil en pacientes con riesgo de disfunción renal, en quienes es primordial minimizar la dosis de contraste (4-7,9-11).

De la misma forma, en los estudios de cabeza, cuello y cerebro, la TCED incrementa la visualización de las estructuras vasculares y parenquimatosas. La posibilidad de conseguir imágenes con supresión ósea mejora mucho la evaluación de las arterias carótidas y cerebrales, a su vez la discriminación de materiales ayuda en la caracterización de lesiones y la diferenciación de hemorragias agudas o subagudas y calcificaciones (16,17).

En la región abdominal, las ventajas son igualmente manifiestas; la TCED perfecciona la detección y caracterización de lesiones hepáticas, renales y pancreáticas al optimizar el realce de contraste en las lesiones y al permitir la creación de mapas de yodo que revelan la vascularización tumoral con una precisión superior a la obtenida con la TC convencional (2,3,8,12,13).

A pesar de estas ventajas, se observa que algunos estudios postulan que, si bien la TCED puede mejorar la calidad de imagen con dosis reducidas de medio de contraste yodado, otros sugieren una calidad equiparable a la de la TC convencional. Esta disparidad en los hallazgos indica la ausencia de un consenso concluyente en la literatura actual. Las comparaciones directas son limitadas, influenciadas por las características intrínsecas de los diseños de estudio y los protocolos de adquisición utilizados, lo cual representa una brecha metodológica significativa que demanda futuras investigaciones (1,6,7,14).

Reflexión desde el marco PCC

De acuerdo con el enfoque PCC (Población, Concepto, Contexto), la población estudiada era sobre todo la adulta, dado el bajo número de estudios incluidos con pacientes enfermedades preexistentes. El concepto central estudiado estaba orientado a la optimización de la dosis de contraste mediante TCED y el contexto tenía carácter mayoritariamente hospitalario; se trata de una población localizada en países desarrollados y/o en centros con tecnología de punta. Esto subraya una barrera a la capacidad de generalización de los hallazgos, al tiempo que se manifiestan áreas poco exploradas como la implementación en países tecnológicamente limitados o en servicios de urgencia donde la rapidez y la disponibilidad son condiciones absolutas (2,14,16).

Implicancias prácticas y recomendaciones

A grandes rasgos, los resultados de la presente revisión de alcance muestran que la Tomografía Computarizada de Energía Dual es una alternativa tecnológica válida y eficiente para reducir la dosis de medios de contraste yodado, manteniendo su calidad diagnóstica, especialmente en situaciones clínicas como la angiografía, la

imagenología hepática, urológica y demás estudios presentados; pero la falta de una estandarización metodológica, la concentración de los estudios en un mismo grupo de países desarrollados y la escasa evidencia en colectivos vulnerables constituyen limitaciones a tener en cuenta. Estos aspectos refuerzan la necesidad de seguir investigando desde visiones más integradoras y/o con protocolos estandarizados, encaminadas a consolidar la utilización racional de esta tecnología en la práctica clínica de todos los países.

CONCLUSIONES

1. La Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) se afianza como una herramienta útil en la optimización de las dosis de medios de contraste yodados, ayudando a aumentar la seguridad del paciente sin perder la calidad diagnóstica de las imágenes. No obstante, permanecen vacíos en la literatura en cuanto a su uso en diferentes contextos clínicos y poblaciones específicas.
2. Las estrategias tecnológicas en la TCED, basadas en la utilización de las monoenergéticas/algorítmicas de reducción de ruido, ofrecen la posibilidad de mantener en uso la calidad de la imagen o incluso de mejorarla. Es cierto que encontramos vacíos en relación a la comparación sistemática de métodos (comparación de la aplicación de distintos métodos) en distintos estudios y bien de distintas fuentes de obtención de imágenes.
3. Existen aplicaciones clínicas, por ejemplo, las que corresponden a la angiografía coronaria, que han demostrado tener más potencial de beneficio por la reducción de dosis que brinda la TCED. No obstante, resulta necesario estudiar el uso previo en la práctica radiológica y en poblaciones poco estudiadas como los pacientes pediátricos o los menos expuestos a tecnologías avanzadas.
4. Los hallazgos de la literatura revisada indican consistentemente que la TCED permite mantener e incluso mejorar la calidad de la imagen a pesar de la reducción de la dosis de contraste. Esto se logra mediante una mayor interacción

fotoeléctrica del yodo a bajos niveles de energía y utilización de algoritmos de reconstrucción de imágenes. Sin embargo, se evidencian lagunas en la literatura en cuanto a la comparación de la calidad de imagen por el uso de diferentes métodos de reducción de contraste y distintos equipos, lo que sugiere una necesidad de estudios que comparen de manera rigurosa los resultados obtenidos con homogeneidad de tecnologías y protocolos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Araya S, Bianchetti A, Bravo A, Becerra B. Disminución de dosis de medio de contraste yodado en TC: revisión sistemática de la literatura. *Rev Chil Radiol.* 2023;29(4):171-178. doi:10.24875/RCHRAD.22000055.
2. Nagayama Y, Nakaura T, Oda S, Taguchi N, Utsunomiya D, Funama Y, et al. Dual-layer detector CT of chest, abdomen, and pelvis with a one-third iodine dose: image quality, radiation dose, and optimal monoenergetic settings. *Clin Radiol.* 2018;73(12):1059.e21-1059.e29. doi:10.1016/j.crad.2018.08.010.
3. Shuman WP, Mileto A, Busey JM, Desai N, Koprowicz KM. Dual-energy CT urography with 50% reduced iodine dose versus single-energy CT urography with standard iodine dose. *AJR Am J Roentgenol.* 2019;212(1):117-123. doi:10.2214/AJR.18.19720.
4. Rotzinger DC, Si-Mohamed SA, Yerly J, Boccalini S, Becce F, Boussel L, et al. Reduced-iodine-dose dual-energy coronary CT angiography: qualitative and quantitative comparison between virtual monochromatic and polychromatic CT images. *Eur Radiol.* 2021;31(9):7132-7142. doi:10.1007/s00330-021-07809-w.
5. Oda S, Takaoka H, Katahira K, Honda K, Nakaura T, Nagayama Y, et al. Low contrast material dose coronary computed tomographic angiography using a dual-layer spectral detector system in patients at risk for contrast-induced nephropathy. *Br J Radiol.* 2018;91(1089):20180215. doi:10.1259/bjr.20180215.

6. Johansen CB, Martinsen ACT, Enden TR, Svanteson M. The potential of iodinated contrast reduction in dual-energy CT thoracic angiography; an evaluation of image quality. *Radiography*. 2022;28(1):2-7. doi:10.1016/j.radi.2021.07.006.
7. Shuman WP, O'Malley RB, Busey JM, Ramos MM, Koprowicz KM. Prospective comparison of dual-energy CT aortography using 70% reduced iodine dose versus single-energy CT aortography using standard iodine dose in the same patient. *Abdom Radiol (NY)*. 2017;42(3):759-765. doi:10.1007/s00261-016-1041-z.
8. Lennartz S, Große Hokamp N, Zäske C, Zopfs D, Bratke G, Glauner A, et al. Virtual monoenergetic images preserve diagnostic assessability in contrast media reduced abdominal spectral detector CT. *Br J Radiol*. 2020;93(1113):20200340. doi:10.1259/bjr.20200340.
9. Mourits MM, Nijhof WH, van Leuken MH, Jager GJ, Rutten MJCM. Reducing contrast medium volume and tube voltage in CT angiography of the pulmonary artery. *Clin Radiol*. 2016;71(6):615.e7-615.e13. doi:10.1016/j.crad.2016.03.005.
10. Noda Y, Nakamura F, Kawamura T, Kawai N, Kaga T, Miyoshi T, et al. Deep-learning image-reconstruction algorithm for dual-energy CT angiography with reduced iodine dose: preliminary results. *Clin Radiol*. 2022;77(2). doi:10.1016/j.crad.2021.10.014.
11. Ohana M, Labani A, Jeung M, Ghannudi S, Gaertner S, Roy C, et al. Iterative reconstruction in single source dual-energy CT pulmonary angiography: Is it sufficient to achieve a radiation dose as low as state-of-

- the-art single-energy CTPA?. 2015;84(11):2314-20.
doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.07.010
12. Zhong H, Huang Q, Zheng X, Wang Y, Qian Y, Chen X, et al. Generation of virtual monoenergetic images at 40 keV of the upper abdomen and image quality evaluation based on generative adversarial networks. *BMC Med Imaging*. 2024;24:151. doi:10.1186/s12880-024-01331-3.
13. Reimer R, Grobe N, Fehrmann A, Fehrmann A, Krauskopf A, Zopfs D, Kroger J, Persigehl T, Maintz D, Bunk A. Virtual monoenergetic images from spectral detector computed tomography facilitate washout assessment in arterially hyper-enhancing liver lesions. 2020;31(5):3468-3477. doi.org/10.1007/s00330-020-07379-3
14. Bae KT. Intravenous Contrast Medium Administration and Scan Timing at CT: Considerations and Approaches. *Radiology*. 2010;256(1):32-61. doi:10.1148/radiol.10090908.
15. Forghani R, De Man B, Gupta R. Dual-energy computed tomography: physical principles, approaches to scanning, usage, and implementation. *Neuroimaging Clin N Am*. 2017;27(3):371-384. doi:10.1016/j.nic.2017.03.002.
16. Santos-Armentia E, Martín-Noguerol T, Silva-Priegue N, Delgado Sánchez-Gracián C, Trinidad López C, Prada-González R. Análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la tomografía computarizada de energía dual en la imagen de cabeza y cuello. *Radiología (Engl Ed)*. 2022;64(4):333-347. doi:10.1016/j.rx.2022.05.005.

17. Tawfik AM, Kerl JM, Razek AA, Bauer RW, Nour-Eldin NE, Vogl TJ, Mack MG. Image Quality and Radiation Dose of Dual-Energy CT of the Head and Neck Compared with a Standard 120-kVp Acquisition. 2011 Dec;32(11):1994–1999. doi: 10.3174/ajnr.A2654

VII. ANEXOS

A continuación, se presentan los anexos que complementan la información metodológica y documental del presente estudio.

Anexo 1. Estrategia de Búsqueda Bibliográfica

Base de datos	Estrategia de búsqueda utilizada (MeSH/Keywords)	Resultados encontrados
PubMed/MEDLINE	("Dual-Energy CT" OR "Dual-Energy Computed Tomography" OR "Spectral CT") AND ("Iodinated Contrast Media" OR "Contrast Media" OR "Contrast Dose Reduction") AND ("Image Quality" OR "Diagnostic Performance")	85
Embase	('dual energy ct' OR 'spectral ct') AND ('iodinated contrast media' OR 'contrast dose reduction') AND ('image quality' OR 'diagnostic accuracy')	77
Scopus	("Dual Energy CT" OR "Spectral CT") AND ("Iodinated Contrast Media" OR "Contrast Media" OR "Dose Reduction") AND ("Image Quality" OR "Diagnostic Value")	69
Web of Science	("Dual-Energy Computed Tomography" OR "Spectral CT") AND ("Contrast Media Reduction" OR "Iodine Dose") AND ("Image Quality" OR "Diagnostic Performance")	68
Búsqueda manual	Revisión de referencias bibliográficas de estudios clave	12

Anexo 2. Población, Concepto y Contexto (PCC)

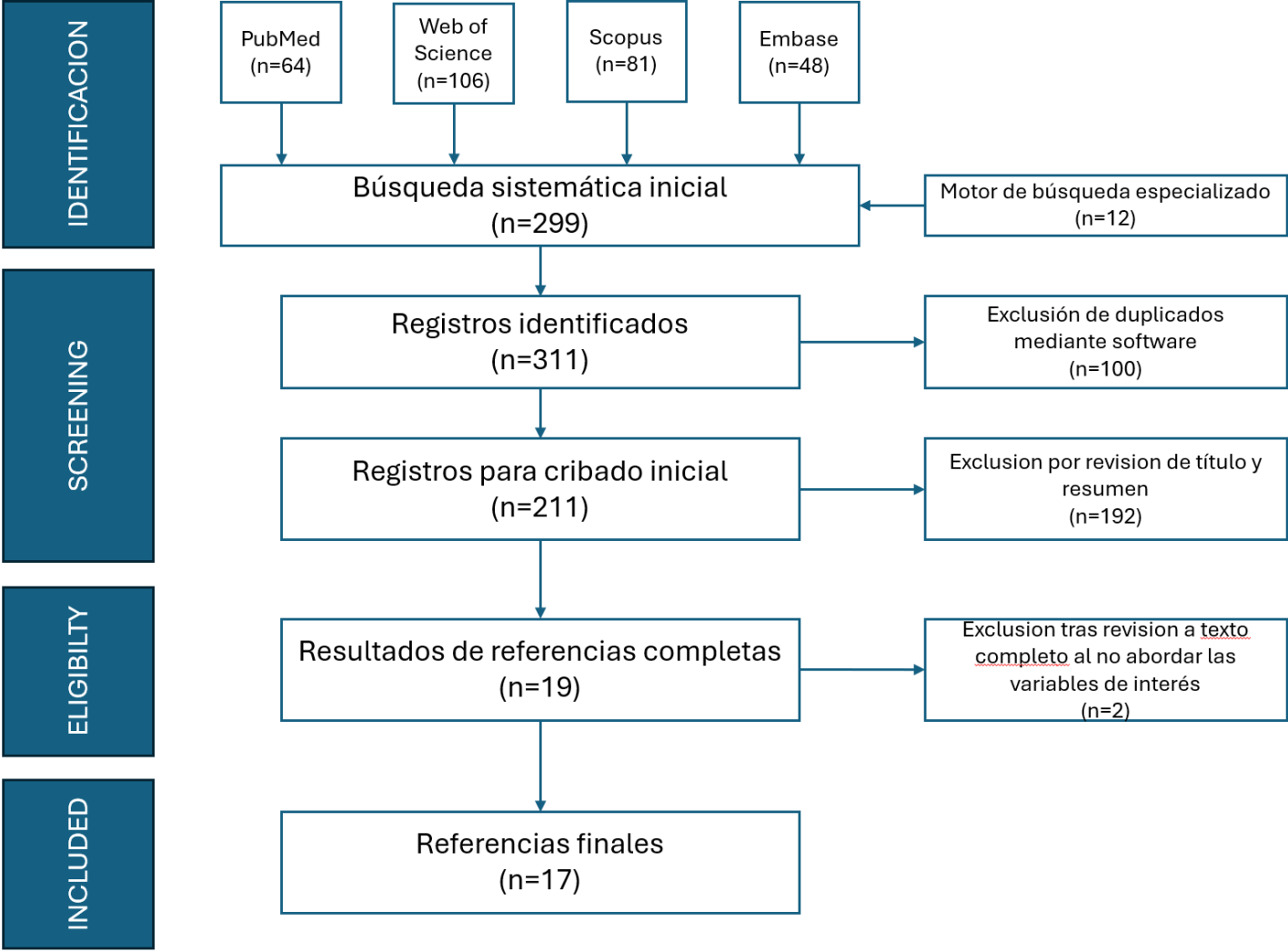
Pregunta PCC: Población – Concepto – Contexto	
Población	Pacientes adultos que requirieron estudios tomográficos con medios de contraste yodados.
Concepto	La aplicación, características y hallazgos reportados de la Tomografía Computarizada de Energía Dual (TCED) en la optimización de la dosis de medios de contraste yodados y en la modulación de la calidad de las imágenes .
Contexto	Estudios tomográficos con contraste yodado realizados en establecimientos de salud de mediano a alto nivel resolutivo.

Anexo 3. Definición de Variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	TIPO	DIMENSIONES	ESCALA DE MEDICION	INDICADOR
Tomografía Computarizada	Modalidad de imagenología que utiliza rayos X para obtener imágenes detalladas de una región del cuerpo. (1)	Obtención de imágenes a través de equipos de tomografía computarizada en un entorno clínico. (1, 17)	Principal	TC convencional	Cualitativa nominal	Tipo de TC
				TC de energía dual		
Dosis de medios de contrastes yodados	Cantidad de sustancia yodada utilizada para mejorar la visualización de estructuras internas. (2,3)	Registro de la cantidad de medio de contraste yodado administrado al paciente durante el procedimiento. (2-4, 6, 7,11)	Principal	Dosis	Cuantitativa de escala de razón	ml/kg
Calidad de las imágenes	Grado en el que las imágenes obtenidas permiten una correcta visualización y	Evaluación visual y análisis de las imágenes por radiólogos según criterios establecidos, además de la utilización de escala de Likert para una valoración. (ej.	Principal	-Insuficiente/ No diagnóstica	Cualitativa ordinal	Grado de entidad
				- Mala/Limitada		
				Adecuada/Moderada		

	diagnóstico. (2,3)	resolución, nitidez). (3, 9, 12-16)		Buena/Diagnosticable		
				-Excelente/Optima		
Tipos de estudios tomográficos	Diferentes modalidades de técnicas y protocolos empleados para los estudios (ej. Cerebro, Tórax, Abdomen, Cardiacos, Angiografías, etc.) (3,10,11)	Clasificación de pacientes según el tipo de estudio realizado, incluyendo el protocolo, la cantidad de medio de contraste utilizado y características del paciente. (3, 5, 7, 9-11, 13-17)	Principal	Angiografías coronarias	Cualidad nominal	Tipo de estudio
				Angiografías torácicas		
				Aortografía		
				Angiografía pulmonar		
				TC de abdomen		
				TC urológicas		
				TC de encéfalo		
				TC de cuello		

Anexo 4. Diagrama de Selección de Estudios (PRISMA-SCR)



Anexo 5. Tabla de Trazabilidad de Selección de Estudios

Fase de Proceso de Selección	Nº de Estudios
Estudios identificados en bases de datos (PubMed, Embase, Scopus, Web of Science)	299
Estudios adicionales identificados mediante búsqueda manual	12
Total de estudios identificados	311
Duplicados eliminados mediante Zotero	100
Estudios seleccionados para evaluación por título y resumen	211
Estudios excluidos tras título y resumen	192
Estudios evaluados a texto completo	19
Estudios excluidos tras evaluación a texto completo: <ul style="list-style-type: none"> ● Simulación sin validación clínica ● No abordó variables de interés (reducción de MCY y comparación TCED vs TC convencional) 	2
Total de estudios incluidos en la revisión final	17

Anexo 6. Tabla de Exclusión de Estudios (Texto Completo)

N°	Referencia (Autor, Año)	País de origen	Fuente/Base de Datos	Motivo de exclusion
1	Yamamoto et al., 2021	Japón	PubMed	Diseño de estudio no elegible: simulación computacional sin validación clínica en población humana.
2	González-López et al., 2020	España	Scopus	Variables no pertinentes: no se realiza comparación entre Tomografía de Energía Dual y Tomografía Convencional, ni se evalúa reducción de contraste o calidad de imagen.

VIII. Listado de Tablas

Las siguientes tablas resumen los resultados, características y hallazgos principales identificados en la presente revisión de alcance.

Tabla 1. Consolidado metodológico de la base de datos.

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
1	Araya	2023	Chile	Aplicada	Cuantitativo	Estudio secundario	Revisión sistemática de la literatura	Evaluar la factibilidad y grado de reducción de dosis de medio de contraste yodado en TC usando equipos DECT, y su impacto en calidad de imagen	No aplica (artículos de revisión)	Búsqueda en Lilacs, PubMed, Scopus y WoS; flujo PRISMA; selección y análisis de datos comparativos de dosis y calidad de imagen	N/A	N/A	Reducción del 15.8 % al 83 % en dosis de yodo con DECT manteniendo o mejorando SNR/CNR	N/A	Se compararon los % de reducción de dosis, valores de SNR y CNR reportados en los estudios; extracción directa	Revisión compilación de evidencia publicada entre años diversos, en equipos DECT, con uso de algoritmos iterativos de reducción de ruido	DECT permite disminuir dosis de yodo entre 15.8 % y 83 % sin pérdida de calidad de imagen; SNR y CNR similares o superiores a TC 120 kVp convencional	Reducción de dosis MCY: 15.8 %–83 %; SNR y CNR comparables o superiores a TC estándar

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
2	Nagayama Y	2018	Japón	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Comparar calidad imagen y dosis radiación en TC toraco-abdomen-pelvis (TAP) con dosis reducida de yodo frente a protocolo convencional	80 pacientes adultos, sexo mixto, 40 con disfunción renal	TC dual-layer (dosis reducida) vs TC convencional	TC dual-layer	TC dual-layer (1/3 dosis yodo) vs TC convencional (dosis estándar)	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación, CNR, calidad subjetiva	Imágenes TC TAP	Calidad similar o mejor en imágenes monoenergéticas a dosis reducida	Atenuación, ruido, CNR, dosis radiación (SSDE)
3	Shuman WP	2019	EE.UU.	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte prospectivo	Evaluar la calidad de imagen de urografía TC con dosis de yodo reducida en comparación con urografía estándar	62 pacientes, adultos, sexo mixto, edad no especificada claramente	TC dual vs TC energía única con dosis estándar	TC Dual	TC dual (50% dosis reducida) vs TC energía única (dosis estándar)	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación renal y vías urinarias, calidad subjetiva y objetiva	Imágenes TC urológicas	La TC dual con reducción de yodo muestra calidad comparable o superior respecto a la TC estándar	HU, ruido, contraste, artefactos
4	Rotzinger DC	2021	Suiza	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Comparar calidad de imagen y segmentación de lúmenes coronarios en angiografía TC coronaria dual con dosis	203 pacientes adultos, edad media 51.7 años, sexo mixto	Angiografía a TC coronaria (dosis estándar y reducida)	TC Dual energética	Angiografía TC coronaria dual (40% dosis reducida) vs estándar	Calidad de imagen	Una sesión	Segmentación vascular, calidad subjetiva, contraste a ruido (CNR)	Angiografía coronaria TC	Calidad diagnóstica similar, mejor segmentación a dosis reducida	Segmentación, precisión y exactitud (mm ²), CNR

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
5	Oda S	2018	Japón	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Evaluar calidad imagen en angiografía coronaria TC dual con reducción del 50% de dosis de contraste y riesgo de nefropatía inducida	60 pacientes adultos, grupo de pacientes con y sin riesgo renal	Angiografía coronaria TC dual-layer	TC Dual-layer	Angiografía dual-layer (50% reducción yodo) vs estándar	Calidad de imagen	Una sesión	Calidad objetiva/su bjetiva, contraste/r uido	Angiografía coronaria	Calidad diagnóstica mantenida con reducción de dosis de contraste	HU, ruido, CNR
6	Johansen CB	2021	Noruega	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Evaluar calidad imagen angiografía TC torácica dual-energy con reducción del 50% dosis de yodo	14 pacientes adultos con aneurisma o disección, sexo mixto	Angiografía torácica dual-energy con dosis reducida	TC dual-energy y	Angiografía TC torácica dual-energy (50% reducción) vs estándar	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación, ruido, CNR	Angiografía torácica	Calidad adecuada a 50-55 keV con reducción del 50%-80% del contraste	HU, ruido, CNR, SNR
7	Shuman WP	2017	EE.UU.	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte prospectivo	Evaluar calidad imagen en TC aortografía dual-energy con 70% dosis reducida de yodo frente al estándar	21 pacientes adultos, sexo mixto, edad media 64 años	TC aortografía dual-energy vs estándar con reducción de yodo	TC dual-energy y	Aortografía TC dual-energy (70% reducción) vs estándar	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación, ruido, calidad visual, artefactos	Aortografía TC	Calidad diagnóstica aceptable con reducción del 70% de yodo	HU, ruido, CNR, SNR

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
8	Lennartz S	2020	Alemania	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Evaluar calidad diagnóstica de imágenes monoenergéticas virtuales (VMI) en TC espectral abdominal con reducción significativa de medio de contraste	78 pacientes adultos, sexo mixto, dos grupos comparables con y sin reducción de contraste	TC espectral abdominal con dosis estándar vs. reducida y reconstrucción VMI	TC Espectral	TC espectral con VMI (50% reducción de contraste) vs. TC convencional (dosis estándar)	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación, contraste-ruído (CNR), señal-ruído (SNR), calidad subjetiva	TC abdominal con reducción de contraste	Las VMI a 40 keV permiten mantener buena calidad diagnóstica pese a la reducción significativa del medio de contraste	Atenuación, SNR, CNR, valoración subjetiva
9	Mourits MM	2016	Países Bajos	Aplicada	Cuantitativo	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado	Evaluar calidad de imagen al reducir volumen de contraste y voltaje del tubo en angio-TC pulmonar	33 pacientes sospechosos de embolia pulmonar, adultos, ambos sexos	Angio-TC pulmonar con dos protocolos (estándar vs. reducción)	CT Dual energía (80 y 120 kVp)	Comparación de 50 ml vs 100 ml de contraste; voltaje de 80 vs 120 kV	Reducción de contraste y voltaje en angio-TC	Una sesión	Medidas objetivas (atenuación, ruido, SNR, CNR) y subjetivas (escala 3 puntos)	Imágenes TC abdominal superior	Gen-VMI40keV mostró calidad y contraste significativamente mejores que imágenes convencionales, similares a VMI originales	Atenuación, SNR, CNR, correlación, Bland-Altman

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
10	Noda Y	2022	Japón	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte prospectivo	Evaluar algoritmo de reconstrucción por aprendizaje profundo para angiografía TC dual con dosis reducida de yodo	22 pacientes adultos, sexo mixto, edad media 60.5 años	Algoritmo DLIR en TC angiografía con reducción de dosis	Deep learning DLIR	DLIR vs Reconstrucción Iterativa híbrida con dosis reducida de yodo	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación vascular, calidad subjetiva, ruido	Angiografía TC dual	DLIR mejora calidad de imagen con reducción significativa del ruido	HU, ruido, SNR, calidad visual
11	Ohana M	2015	Francia	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte prospectivo	Evaluar si DE-CTPA con reconstrucción iterativa a dosis igual que SE-CTPA mantiene calidad de imagen igual o superior	50 pacientes (58 % hombres, edad media 64.8 ± 16.2 años, IMC 25.6 ± 4.5)	CTPA monoenergía (SE) y doble energía (DE) en mismo escáner	Reconstrucción AsSiR	DE-CTPA con IR al mismo nivel de dosis que SE-CTPA; Comparador: grupo histórico o contemporáneo SE-CTPA – ajuste de dosis (~260 mGy·cm).	Calidad de imagen	Una sesión	Calidad subjetiva (escala Likert 5, SNR, CNR).	Clínica de angiografía pulmonar con DE-CT en Estrasburgo; se busca implementar DE sin penalización de dosis	DE-IR mantiene calidad diagnóstica equivalente a SE y reduce ruido, con aumento leve de SNR/CNR (no siempre significativo)	SNR, CNR, IMC.
12	Zhong H	2024	China	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Desarrollar y evaluar modelo basado en redes adversariales generativas (GAN) para generar	642 pacientes adultos (444 entrenamiento/validación, 198 prueba), patologías hepáticas	Redes adversariales generativas (GAN) para generación de	Redes GAN	Imágenes generadas por GAN (Gen - VMI40keV) vs. VMI originales (VMI40ke	Calidad de imagen	Una sesión	Atenuación, contraste - ruido (CNR), señal - ruido (SNR),	Imágenes TC abdominal superior	Gen - VMI40keV mostró calidad y contraste significativamente mejores que	Atenuación, SNR, CNR, correlación, Bland - Altman

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
								imágenes virtuales monoenergéticas de abdomen superior a 40 keV (Gen - VMI40keV) desde imágenes convencionales	incluidas (HCC)	imágenes		V) vs. TC convencional			análisis subjetivo y objetivo		imágenes convencionales, similares a VMI originales	
13	Reimer RP	2020	Alemania	Aplicada	Cuantitativo	Observacional	Cohorte retrospectivo	Evaluar si los VMIs de bajo keV mejoran la evaluación de washout en lesiones hiperrealzantes del hígado	31 pacientes (edad 65 ± 9 años; 20 H/11 M); 59 lesiones hiperrealzantes	Reconstrucción de VMIs (40/60/80 keV) y CIs; valoración visual por 3 radiólogos; puestas ROI para SNR, CNR y washout; análisis estadístico (ANOVA, Wilcoxon)	TC Espectral	No aplica	VMIs de bajo keV aumentan la visibilidad, sensibilidad y confianza en la detección de washout.	Una sesión	Washout: presencia (sí/no), visibilidad (Likert 1-5); SNR, CNR y diferencia HU lesión-hígado desde ROI; ICC para consistencia.	Estudio realizado como parte del cribado de HCC mediante SDCT en un hospital universitario en Alemania, 2016-2018.	VMIs de 40 keV mostraron mayor sensibilidad en washout (81.3 % vs 71.3 %), SNR del hígado más alta (12.5 vs 5.6), mayor CNR y diferencia de HU (29.0 vs 12.9).	Sesibilidad, SNR, CNR y Washout
14	Bae KT	2010	EE.UU.	Teórica	Cualitativa	Estudio secundario	Revisión narrativa	Evaluar factores clave en administración de contraste y tiempo en TC	N/A	Modelado matemático y simulaciones	Simulador fisiológico computacional	Evaluación teórica de diferentes protocolos (inyección, dosis, tiempo)	Administración de contraste en TC	Variable según simulaciones	Simulación fisiológica y parámetros técnicos TC	Administración intravenosa de contraste	Ajuste personalizado por paciente mejora contraste optimizando tiempos. Variables:	HU, curvas simuladas

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
																	peso, volumen sanguíneo y gasto cardiaco	
15	Forghali R	2017	Canadá y EE.UU.	Teórica	Cualitativo	Estudio secundario	Revisión narrativa	Describir principios físicos y aplicaciones clínicas de TC energía dual (DECT)	N/A (artículo de revisión)	Revisión narrativa y análisis técnico	N/A	No aplica intervención directa	Tomografía Computarizada de Energía Dual	N/A	Descripción técnica y aplicaciones clínicas	TC espectral o energía dual	Mejor diferenciación de materiales con DECT que con TC convencional. DECT mejora la caracterización tisular	N/A
16	Santos Armentia	2022	España	Teórica	No aplica	Estudio secundario	Revisión narrativa	Analizar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de la TC de energía dual en la imagenología de cabeza y cuello	N/A	Análisis DAFO basado en literatura existente y experiencia clínica	N/A	No aplica intervención directa	Tomografía Computarizada de Energía Dual en cabeza y cuello	N/A	Evaluación cualitativa de aspectos técnicos y clínicos	Imagenología de cabeza y cuello	La TC de energía dual ofrece ventajas en la caracterización tisular y reducción de artefactos, pero	N/A

Referencia	Primer autor	Año de publicación	País de origen o región	Tipo de investigación	Enfoque	Diseño de estudio	Sub-diseño	Objetivo / Propósito	Población de estudio y tamaño de muestra, edad y sexo (si es aplicable)	Metodología / Métodos	Instrumento utilizado (si es aplicable)	Tipo de intervención y comparador y detalle de estos (si es aplicable)	Concepto	Duración de la intervención (si es aplicable)	Cómo fue medida la variable resultado, detalles	Contexto	Hallazgos clave que están relacionados a la pregunta de revisión	Medidas cuantitativas (si es aplicable)
																	presenta limitaciones como mayor dosis de radiación y disponibilidad limitada.	
17	Tawfik A M	2011	No reportado	Aplicada	Cuantitativa	Observacional	Cohorte prospectivo	Comparar la calidad de imagen y la dosis de radiación entre DECT (imagen con peso promedio WA) y TC convencional (120 kVp) en la zona de cabeza y cuello	64 pacientes (32 sometidos a DECT y 32 a SECT)	Estudio comparativo, prospectivo y retrospectivo, con análisis cuantitativo de parámetros de imagen y evaluación cualitativa por observadores.	TC Dual source y software de generación de imágenes	DECT (80 kVp + 140 kVp Sn, imágenes WA). Comparador: SECT (120 kVp estándar).	Comparación de calidad de imagen y dosis de radiación entre Tomografía Computarizada de Energía Dual (DECT) y Tomografía Convencional (SECT) en estudios de cabeza y cuello.	Una sesión	Atenuación (HU), ruido (desviación estándar HU), CTDI_vol (dosis de radiación), calidad de imagen subjetiva (escala 0 a 3).	Estudio hospitalario en población adulta sometida a TC de cabeza y cuello, grupo prospectivo DECT y grupo control retrospectivo SECT.	DECT reduce la dosis de radiación en un 12 % sin comprometer la calidad de imagen, tanto en mediciones objetivas como en evaluaciones visuales.	

Tabla 2. Resumen de estudios sobre reducción de dosis de contraste mediante técnicas avanzadas de tomografía computarizada

Autor(es), Año	Edad	Sexo	Criterio de inclusión	Criterios de exclusión	Tiempo de uso	Características del ENDS	Resultados relevantes
1 Araya	No especificado	No especificado	No aplica (revisión sistemática)	No especificado	Una sesión	No aplica	No aplica intervención directa
2 Nagayama	Adultos	Mixto	80 pacientes adultos, sexo mixto, 40 con disfunción renal.	No especificado	Una sesión	TC dual-layer	TC dual-layer (1/3 dosis yodo) vs TC convencional
3 Shuman 2019	Adultos	Mixto	62 pacientes adultos, sexo mixto, edad no especificada.	No especificado	Una sesión	TC Dual	TC dual (50% dosis reducida) vs TC energía única estándar
4 Rotzinger	Adultos	Mixto	203 pacientes adultos, edad media 51.7 años, sexo mixto.	No especificado	Una sesión	TC Dual energética	Angiografía TC coronaria dual (40% reducción dosis)
5 Oda	Adultos	Mixto	60 pacientes adultos, sexo mixto, edad media 70 años.	No especificado	Una sesión	TC Dual-layer	Angiografía dual-layer (50% reducción yodo) vs

							estándar
6 Johansen	Adultos	Mixto	14 pacientes adultos con aneurisma o disección.	No especificado	Una sesión	TC dual-energy	Angiografía TC torácica dual-energy (50% reducción contraste)
7 Shumman 2017	Adultos	Mixto	21 pacientes adultos, edad media 65 años.	No especificado	Una sesión	TC dual-energy	Aortografía TC dual-energy (70% reducción) vs estándar
8 Lennartz	Adultos	Mixto	78 pacientes adultos, sexo mixto, dos grupos comparativos.	No especificado	Una sesión	TC Espectral	TC espectral con VMI (50% reducción contraste) vs estándar
9 Mourits	Adultos	No especificado	33 pacientes con sospecha embolia pulmonar, adultos	No especificado	Una sesión	TC Dual-energy	Reducción contraste (50 ml CM/80kV) vs estándar
10 Noda	Adultos	Mixto	22 pacientes adultos con enfermedad aórtica	No especificado	Una sesión	Deep-learning DLIR	DLIR vs Reconstrucción Iterativa híbrida, reducción dosis

11 Ohana	Adultos	Mixto	50 pacientes adultos con sospecha clínica de tromboembolismo pulmonar	No especificado	Una sesión	TC Dual-energy	DE-CTPA con reconstrucción iterativa mantiene la calidad de imagen similar al protocolo estándar, con menor ruido y leve mejora en SNR y CNR.
12 Zhong	Adultos	Mixto	642 pacientes adultos (444 entrenamiento/validación, 198 test).	No especificado	Una sesión	Redes GAN	Imágenes generadas por GAN (Gen-VMI40keV) vs. estándar
13 Reimer	Adultos	Mixto	31 pacientes con lesiones hepáticas hiperrealzantes.	No especificado	Una sesión	TC Dual-energy	VMIs de 40 keV mejoran detección de washout, comparado con imágenes convencionales
14 Bae	No aplica	No aplica	No aplica (artículo de revisión)	No aplica	No aplica	No aplica	Presenta principios y factores clave de administración de contraste y recomiendan prácticas para optimizar realce en diferentes órganos.
15 Forghani	No aplica	No aplica	N/A	No aplica	No aplica	N/A	No aplica intervención directa

16 Santos	Adultos	Mixto	Pacientes adultos (≥ 18 años) con tromboectomía por accidente cerebrovascular	No especificado	Una sesión	Dual-energy CT	En el 34 % la hemorragia fue reclasificada como extravasación de contraste, cambio de grado en 10 %, nuevas hemorragias detectadas en 2 %; sensibilidad de pCT sola 95 %, especificidad 80 %, acuerdo inter-evaluador mejorado (κ 0.77 vs 0.68)
17 Tawfik	Adultos	Mixto	64 Pacientes oncológicos o con lesiones inflamatorias en cabeza y cuello.	Estudios no contrastados, angiografía, cirugía o irradiación en los últimos 6 meses	Una sesión	Tomografía Computarizada de Energía Dual	Reducción del 12 % de dosis de radiación sin afectar la calidad de imagen

Nota: MCY = Medio de Contraste Yodado; TCED = Tomografía Computarizada de Energía Dual; VMI = Imágenes Monoenergéticas Virtuales; DLIR = Reconstrucción Iterativa por Deep Learning; GAN = Redes Generativas Antagónicas.

Tabla 3. Parámetros de Evaluación de la Calidad de Imagen en Tomografía Computarizada de Energía Dual y Convencional.

Autor(es), Año	Parámetros evaluados	Escala Likert utilizada	Resultados
<u>Tawfik et al 2011</u>	Artefactos de movimiento, ruido,UH, CNR, SNR	1= no diagnostico 5=muy bueno	Las imágenes virtuales monocromáticas (VMI) a 57 keV y 62 keV mostraron mejor contraste y mayor relación contraste-ruido (CNR) en comparación con las imágenes convencionales a 120 kVp. La calidad diagnóstica global de las VMI a 62 keV fue comparable o superior a la técnica convencional.
<u>Nagayama et al., 2018</u>	SNR, CNR, artefactos, calidad subjetiva	1= Insuficiente; 5= Excelente	Las imágenes a 40 y 45 kev obtuvieron las puntuaciones más altas en calidad diagnóstica, siendo comparables a las imágenes convencionales a 120 kvp. Mejora en la confianza diagnóstica y el contraste.
<u>Shuman et al., 2019</u>	SNR, CNR, realce contraste, ruido	1= Pobre; 4= Excelente	Las imágenes a 50 kev con dosis reducida de yodo mostraron una calidad diagnóstica comparable a las imágenes convencionales, con una mejora en el contraste y una reducción del ruido sin pérdida de calidad.
<u>Shuman et al., 2017</u>	CNR, SNR, artefactos, calidad subjetiva	1= Pobre; 4= Excelente	Las imágenes a 50 kev fueron calificadas entre moderadas y buenas, mientras que las imágenes a 77 kev obtuvieron entre buenas y excelentes.
<u>Johansen et al., 2022</u>	CNR, SNR, contraste, ruido, evaluación	1= Inaceptable; 5= Excelente	La calidad subjetiva fue mejor en imágenes a 55 kev con ASIR-V al 80%, mostrando menos ruido y mejor contraste en comparación con imágenes convencionales.

	subjetiva		
<u>Lennartz et al., 2020</u>	CNR, SNR, calidad subjetiva, artefactos	1= Deficiente; 4= Excelente	Las imágenes obtenidas con dosis reducida de yodo mostraron significativamente más altas en contraste vascular, diferenciación corticomedular y relación señal-ruido, manteniendo una alta calidad diagnóstica
<u>Rotzinger et al., 2021</u>	Ruido, CNR, SNR, calidad subjetiva	1= Pobre; 4= Excelente	Las imágenes de baja energía (55 keV) mejoraron la segmentación de vasos en comparación con las imágenes convencionales, con una mejora en la relación contraste-ruido.
<u>Oda et al., 2018</u>	CNR, SNR, contraste, ruido, evaluación subjetiva	1= Pobre; 4= Excelente	El ruido de la imagen fue significativamente menor con el VMI de 50 keV. CNR y la puntuación visual media para el realce de contraste fueron significativamente mayores para VMI de 50 keV. No hubo diferencias significativas en los otros parámetros visuales de calidad de imagen entre los dos protocolos. El VMI de 50 keV con un sistema CT de detector espectral de doble capa permitió reducir la dosis de MCY en un 50% sin degradación de la calidad de la imagen de CCTA.

Nota. Los parámetros analizados permiten comparar objetivamente la calidad diagnóstica entre TC de energía dual y técnicas convencionales, considerando factores cuantitativos (CNR, SNR, ruido) y valoraciones subjetivas estandarizadas mediante escalas Likert.

Tabla 4. Tecnologías específicas utilizadas para optimización de calidad diagnóstica con TC de Energía Dual según estudios revisados

Autor(es), Año	Tecnología utilizada	Características clave	Impacto en calidad imagen
<u>Lennartz et al., 2020</u>	Imágenes monoenergéticas virtuales (VMI)	Optimización en niveles energéticos bajos (40 keV)	Mayor diferenciación estructural y reducción artefactos
<u>Noda et al., 2022</u>	Deep Learning Image Reconstruction (DLIR)	Redes neuronales convolucionales profundas	Aumento resolución espacial, reducción significativa de ruido cuántico
<u>Zhong et al., 2024</u>	Redes Adversariales Generativas (GAN)	Síntesis imágenes monoenergéticas (Gen-VMI 40 keV)	Producción imágenes de alta calidad diagnóstica desde adquisiciones estándar
<u>Rotzinger et al., 2021</u>	Configuración espectral dual-energy (40 keV)	Alta absorción fotoeléctrica del yodo	Incremento significativo de atenuación vascular, mejor segmentación arterial
<u>Shuman et al., 2017</u>	VMI configuraciones optimizadas a 40 keV	Maximización del contraste vascular y tisular	Calidad diagnóstica conservada aún con reducción significativa contraste

Nota. Las tecnologías descritas se centran en maximizar la calidad diagnóstica mediante algoritmos avanzados, selección precisa de niveles energéticos y reconstrucción por inteligencia artificial, permitiendo la reducción de la dosis de medio de contraste yodado sin comprometer la imagen.

Tabla 5. Reducción específica de dosis de contraste en estudios seleccionados con TC de energía dual (TCED)

Autor(es), Año	Aplicación clínica	Dosis estándar (convencional)	Dosis TCED	Reducción (%)	Energía óptima (keV)	Población específica
<u>Shuman et al., 2019</u>	Urografía	1.2 mgI/kg	0.6 mgI/kg	50%	40-50	Adultos generales
<u>Nagayama et al., 2018</u>	Tórax, Abdomen, Pelvis	1.5 mgI/kg	0.5 mgI/kg	65%	40-45	Adultos, disfunción renal
<u>Rotzinger et al., 2021</u>	Angiografía coronaria	1.0 mgI/kg	0.5 mgI/kg	50%	40	Adultos generales
<u>Noda et al., 2022</u>	Angiografía con DLIR	No especificado claramente	-50% reducción	50%	No especificada	Adultos mayores con enfermedad aórtica
<u>Oda et al., 2018</u>	Angiografía coronaria	1.0 mgI/kg	0.5 mgI/kg	50%	No especificada	Adultos con riesgo renal
<u>Johansen et al., 2022</u>	Angiografía torácica	1.2 mgI/kg	0.24 mgI/kg	80%	55	Pacientes con aneurisma o disección
<u>Shuman et al., 2017</u>	Aortografía TC	1.4 mgI/kg	0.42 mgI/kg	70%	40	Adultos generales
<u>Lennartz et al., 2020</u>	TC abdominal espectral	No especificado claramente	Reducción significativa	50%	40	Adultos generales

Nota. La tabla resume los porcentajes de reducción de la dosis de medio de contraste yodado en diversas aplicaciones clínicas mediante tecnologías de TCED, especificando las dosis comparativas y los niveles energéticos óptimos para maximizar la calidad diagnóstica.