

Artículo original

# Evaluación de la isquemia miocárdica con tomografía computarizada de doble fuente: comparación con la resonancia magnética

Carlos Delgado<sup>a,\*</sup>, María Vázquez<sup>b</sup>, Roque Oca<sup>a</sup>, Manuel Vilar<sup>b</sup>, Carmen Trinidad<sup>a</sup> y Marcelo Sanmartín<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Servicio de Radiodiagnóstico, Hospital POVISA, Vigo, Pontevedra, España

<sup>b</sup> Servicio de Cardiología, Hospital POVISA, Vigo, Pontevedra, España

Historia del artículo:

Recibido el 31 de enero de 2013

Aceptado el 31 de mayo de 2013

On-line el 12 de septiembre de 2013

Palabras clave:

Cardiopatía isquémica

Tomografía computarizada

con multidetector

Imagen de perfusión miocárdica

RESUMEN

**Introducción y objetivos:** La tomografía computarizada presenta dificultades para determinar qué lesiones coronarias condicionan repercusión en el miocardio, y es necesario realizar pruebas de inducción de isquemia. El objetivo del estudio es analizar la seguridad diagnóstica de la tomografía computarizada de doble fuente para valorar perfusión y viabilidad miocárdica en sospecha de cardiopatía isquémica, en comparación con la resonancia magnética.

**Métodos:** Estudio prospectivo de 56 pacientes consecutivos, 39 varones (69,6%), de 23-81 (media, 63 ± 10) años de edad. Se realizó tomografía computarizada (con el protocolo: 1, perfusión de estrés con adenosina; 2, coronariografía y 3, realce tardío) y resonancia magnética con perfusión de estrés y realce tardío en menos de 30 días. Dos observadores en consenso analizaron la perfusión y el realce tardío.

**Resultados:** Se analizaron 952 segmentos miocárdicos y 168 territorios vasculares. En un análisis por segmentos, sensibilidad, especificidad, valores predictivos positivo y negativo de la tomografía en comparación con la resonancia para detectar defectos de perfusión fueron del 76, el 99, el 89 y el 98%, y para realce tardío, el 64, el 99, el 82 y el 99%. Por territorios vasculares, el 78, el 97, el 86 y el 95% (defectos de perfusión) y el 72, el 99, el 93 y el 97% (realce tardío). La dosis media de radiación fue 8,2 ± 2 mSv.

**Conclusiones:** La tomografía computarizada de doble fuente permite analizar defectos de perfusión y viabilidad miocárdica de manera precisa y valorar conjuntamente la anatomía coronaria.

© 2013 Sociedad Española de Cardiología. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

## Myocardial Ischemia Evaluation With Dual-source Computed Tomography: Comparison With Magnetic Resonance Imaging

ABSTRACT

**Introduction and objectives:** Computed tomography does not accurately determine which coronary lesions lead to myocardial ischemia and consequently further tests are required to evaluate ischemia induction. The aim of this study was to compare diagnostic accuracy between dual-energy computed tomography and magnetic resonance imaging in the assessment of myocardial perfusion and viability in patients suspected of coronary artery disease.

**Methods:** A prospective study was performed in 56 consecutive patients (39 men [69.6%]; mean age [standard deviation], 63 [10]; range, 23-81). Computed tomography was performed with the following protocol: 1, adenosine stress perfusion; 2, coronary angiography; and 3, delayed enhancement. Magnetic resonance imaging for the evaluation of stress perfusion and delayed enhancement was performed within 30 days. Two observers in consensus analyzed the perfusion and delayed enhancement images.

**Results:** We studied 952 myocardial segments and 168 vascular territories. In a per-segment analysis, the sensitivity, specificity, and positive and negative predictive values of computed tomography compared with magnetic resonance were 76%, 99%, 89%, and 98% for perfusion defects, and 64%, 99%, 82%, and 99% for delayed enhancement, respectively. In a per-vascular territory analysis, the same measures were 78%, 97%, 86%, and 95% for perfusion defects, and 72%, 99%, 93%, and 97% for delayed enhancement, respectively. The mean radiation dose was 8.2 (2) mSv.

**Conclusions:** Dual-source computed tomography may allow accurate and concomitant evaluation of perfusion defects and myocardial viability and analysis of coronary anatomy.

Full English text available from: [www.revespcardiol.org/en](http://www.revespcardiol.org/en)

© 2013 Sociedad Española de Cardiología. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords:

Ischemic heart disease

Multidetector computed tomography

Myocardial perfusion imaging

\* Autor para correspondencia: Servicio de Radiodiagnóstico, Hospital POVISA, Salamanca 5, 36211 Vigo, Pontevedra, España.

Correo electrónico: [cdelgado@povisa.es](mailto:cdelgado@povisa.es) (C. Delgado).

## Abreviaturas

IPM: imágenes de perfusión miocárdicas  
 RM: resonancia magnética  
 TC: tomografía computarizada  
 TCDE: tomografía computarizada de doble energía  
 TCDF: tomografía computarizada de doble fuente

## INTRODUCCIÓN

La coronariografía por tomografía computarizada (TC) es una técnica útil para valorar las arterias coronarias de pacientes sin enfermedad coronaria conocida. Su alto valor predictivo negativo excluye con seguridad enfermedad coronaria en pacientes cuya prueba es normal<sup>1</sup>. Sin embargo, de haberla, es difícil predecir qué estenosis darán como resultado un deterioro del flujo miocárdico<sup>2</sup>, especialmente cuando existen importantes calcificaciones o son de gravedad intermedia. La cuantificación de la estenosis no indica de manera certera la isquemia miocárdica. El papel del diagnóstico por imagen en la isquemia miocárdica no es completo si no se verifica la limitación funcional causada por la estenosis coronaria<sup>3</sup>.

El estado hemodinámico de la enfermedad coronaria se puede valorar con las imágenes de perfusión miocárdica (IPM) durante el estrés inducido por el ejercicio o fármacos<sup>4</sup>. Las técnicas para detectar defectos de perfusión miocárdica en la práctica clínica habitual son la tomografía computarizada por emisión monofotónica (*single photon emission computed tomography* [SPECT]) y la resonancia magnética (RM), que tiene el valor añadido de obtener imágenes de realce tardío, que ayudan a diagnosticar la necrosis miocárdica<sup>5-7</sup>.

Estudios recientes de IPM con TC han demostrado que se puede representar el miocardio isquémico y que los resultados coinciden con los de la SPECT y la angiografía coronaria convencional<sup>8-10</sup>. La TC de doble fuente (TCDF), con dos tubos de rayos X y sus correspondientes paneles de detectores, presenta ventajas importantes: realizar adquisiciones con alto *pitch* y baja dosis de radiación<sup>11</sup> y la adquisición con TC de doble energía (TCDE), que consiste en que cada tubo de rayos X funciona con energías diferentes. Con esta técnica se puede generar mapas de color que permiten la evaluación del estado de la perfusión miocárdica mediante el análisis del volumen de yodo que hay en el miocardio.

Estudios recientes de IPM con TCDE indican una elevada precisión para detectar isquemia miocárdica<sup>12</sup>. Además, la combinación de la IPM con TCDE incrementa el valor diagnóstico de la TC-coronariografía para detectar estenosis coronarias significativas<sup>13</sup>. Por otro lado, la adquisición de alto *pitch* ha mostrado buena precisión en la valoración de la viabilidad miocárdica con baja dosis de radiación en comparación con la RM, aunque conlleva más «ruido» en la imagen<sup>14</sup>. La obtención del análisis de la anatomía coronaria, la repercusión funcional de las lesiones y la necrosis-viabilidad miocárdica combinados en una única prueba podría ser el deseado «one-stop shop» de las exploraciones complementarias en enfermedad coronaria.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la precisión diagnóstica de la TCDF para valorar la perfusión y la viabilidad miocárdica en pacientes con sospecha clínica de cardiopatía isquémica, en comparación con la RM.

## MÉTODOS

### Población de estudio

Se realizó un estudio prospectivo que incluyó a los pacientes que acudieron a la consulta de cardiología por sospecha clínica de

isquemia e indicación de prueba de estrés. A todos se les propuso realizar una TCDF y una RM cardíaca con un intervalo entre pruebas < 30 días. Se excluyó a los pacientes con asma, alergia al contraste yodado o el gadolinio, ritmo cardíaco irregular, marcapasos, insuficiencia renal con filtrado glomerular < 60 ml/min, miocardiopatía hipertrófica, miocardiopatía dilatada con fracción de eyección del ventrículo izquierdo < 30% o insuficiencia cardíaca en grado funcional III o IV.

El protocolo del estudio fue aprobado por el comité de ética institucional y todos los pacientes dieron su consentimiento informado por escrito antes de la inclusión.

### Estudios de imagen

#### Protocolo de tomografía computarizada cardíaca

Se instruyó a los pacientes para que no tomaran café, té ni bloqueadores beta orales en las 24 h previas a la exploración. Se tomaron en el brazo derecho dos accesos venosos (18-G para administración del contraste, 20-G para infusión de adenosina). Se midió la frecuencia cardíaca y la presión arterial.

Todas las exploraciones se realizaron en un equipo 128-TCDF (Flash Definition®, Siemens; Forchheim, Alemania) con el siguiente protocolo:

#### Tomografía computarizada de doble energía con estrés para valorar la perfusión miocárdica

Una vez realizado el topograma y planificado el estudio desde la bifurcación traqueal hasta el diafragma en dirección craneocaudal, se administró adenosina mediante una bomba de perfusión (Alaris System, Cardinal Health; Ohio, Estados Unidos) a una velocidad constante a dosis de 140 µg/kg/min; 3 min después, se administró contraste yodado: 60 ml de iopromida (Ultravist 370, Bayer Schering Pharma; Berlín, Alemania), seguido de 60 ml de suero salino, a 4 ml/s, utilizando una inyectora (Stellant Dual, Medrad; Pennsylvania, Estados Unidos). Se realizó una adquisición retrospectiva sincronizada con el electrocardiograma con técnica de energía dual y modulación de la dosis, con las siguientes características técnicas: tiempo de rotación, 330 ms; *pitch* adaptativo a la frecuencia cardíaca, 0,2-0,43; colimación, 0,6 mm; resolución temporal, 165 ms. Un tubo funcionando con 165 mAs/rot a 100 kV y el otro con 140 mAs/rot a 140 kV. La modulación de dosis se realizó con técnica MinDose utilizando toda la corriente del tubo entre el 60 y el 75% del ciclo cardíaco y reduciéndola al 4% fuera de esa ventana temporal.

Para conseguir un adecuado realce, se utilizó *bolus tracking* colocando una región de interés en el arco aórtico con un umbral de disparo a 160 UH. Se añadió un retraso de 10 s para garantizar la adecuada perfusión del miocardio.

La infusión de adenosina se finalizó al terminar la adquisición. se vigiló cuidadosamente la presión arterial, el electrocardiograma y los síntomas clínicos.

Para la reconstrucción de las imágenes, se usó un algoritmo de reconstrucción monosegmentario que utiliza datos de una rotación completa de ambos detectores. Los datos fueron reconstruidos en diástole entre el 60 y el 75% del intervalo R-R, con grosor de corte de 3 mm, incremento de reconstrucción de 1,5 mm y filtro de reconstrucción D30f.

#### Tomografía computarizada-coronariografía para valorar la anatomía coronaria

Transcurridos 5 min, se realizó TC-coronariografía. Si no existía contraindicación y la frecuencia cardíaca era > 65 lpm, se administraba bloqueador beta (5-15 mg de metoprolol intravenoso).

En caso de que la frecuencia cardiaca fuera estable y  $< 65$  lpm, se realizó adquisición prospectiva con técnica de alto *pitch*. En caso de que no fuera posible, se realizaba adquisición helicoidal electrocardiograma-retrospectivo. A todos se administró 0,5-1 mg de nitroglicerina sublingual.

Los parámetros técnicos para la adquisición prospectiva con alto *pitch* fueron: colimación, 0,6 mm ( $128 \times 0,6$  mm); tiempo de rotación, 280 ms; corriente efectiva, 370 mAs con técnica de modulación CARE DOSE, 100 o 120 Kv según el peso fuera  $< 80$  o  $> 80$  kg respectivamente; *pitch*, 3,4 y resolución temporal, 75 ms. La adquisición se realizó en sentido caudocraneal comenzando al 60% del intervalo R-R.

En la adquisición retrospectiva, los parámetros técnicos fueron: colimación, 0,6 mm ( $128 \times 0,6$  mm); tiempo de rotación tubo, 280 ms, 100 o 120 Kv según el peso fuera  $< 80$  o  $> 80$  kg respectivamente; corriente efectiva, 370 mAs; *pitch* adaptativo a frecuencia cardiaca, 0,2-0,43; modulación de dosis MinDose utilizando la máxima corriente del tubo entre el 60 y el 75% del ciclo cardiaco y reduciéndola al 4% fuera de esa ventana temporal.

El realce vascular se consiguió administrando 60 ml de iopromida (Ultravist 370, Bayer Schering Pharma), seguidos de 60 ml de suero salino, a flujo constante de 6 ml/s. Se utilizó *bolus tracking* colocando una región de interés en aorta ascendente con un umbral de disparo de 100 UH.

En todos los casos la reconstrucción de las imágenes se realizó con grosor de corte de 0,6 mm, incremento de reconstrucción de 0,4 mm y filtro de reconstrucción de B26f. Cuando la adquisición fue retrospectiva, la reconstrucción se obtuvo en la fase del ciclo cardiaco donde mejor se valoraban las arterias coronarias.

Se consideró estenosis significativa cuando en el análisis cuantitativo fue  $> 50\%$ .

Las imágenes del miocardio de esta serie se evaluaron como perfusión en reposo.

#### Tomografía computarizada para valorar la viabilidad miocárdica

Siete minutos después, se realizó una adquisición prospectiva con técnica de alto *pitch*, con las mismas características que la TC-coronariografía, a excepción de que se utilizó baja dosis de radiación con 80 kV y 300 mAs/rot. No se administró contraste intravenoso ni ningún otro fármaco.

La reconstrucción de las imágenes se realizaron con grosor de corte de 0,6 mm, incremento de reconstrucción de 0,4 mm y filtro de reconstrucción B26f.

#### Protocolo resonancia magnética cardiaca

Se realizaron con una RM de 1,5 T (Achieva, Philips Medical Systems; Eindhoven, Países Bajos), utilizando antena de superficie de cinco elementos específica para estudios cardiacos (SENSE Cardiac, Philips Medical Systems), con el siguiente protocolo:

##### Perfusión de primer paso en estrés

Se administró adenosina intravenosa mediante bomba de perfusión (Alaris System, Cardinal Health) a dosis de 140  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ . La presión arterial, frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno se monitorizaron a intervalos de 1 min. A los 3 min, se inyectó un bolo de contraste intravenoso de 0,05 mmol/kg de gadobutrol (Bayer Schering Pharma) a 4 ml/s más 40 ml de suero salino a 4 ml/s, mediante vena antecubital en el brazo contrario a la infusión de adenosina. Se realizó la perfusión de primer paso utilizando una secuencia turbo-eco de gradiente (TEG) potenciada en T1 (tiempo de repetición, 2,2 ms; tiempo de eco, 1,04 ms; ángulo,  $50^\circ$ ; grosor de corte, 10 mm) en el eje corto incluyendo base, tercio medio y ápex del ventrículo izquierdo. Las imágenes

se adquirieron en la telediástole para maximizar la señal intravascular.

##### Perfusión de primer paso en reposo

Aproximadamente 5 min después de realizar la perfusión de estrés, se administró nuevamente contraste y se realizó la perfusión basal con la misma técnica.

##### Viabilidad miocárdica

Tras una espera de 10 min, se adquirieron las imágenes de realce tardío. Antes de adquirir las imágenes de viabilidad, se calculaba el valor del tiempo óptimo de inversión, que mejor anulaba la señal del miocardio, con una secuencia ecoplanar-TEG (tiempo de repetición, 40 ms; tiempo de eco, 5 ms; ángulo,  $15^\circ$ ; grosor de corte, 10 mm). La secuencia del realce tardío fue una TEG tridimensional potenciada en T1 y con preparación tisular (tiempo de repetición, 3,9-4,3 ms; tiempo de eco, 1,2-1,3 ms; ángulo,  $15^\circ$ ; grosor de corte, 10 mm). Todas se adquirieron en apnea y en los ejes corto y largo del ventrículo izquierdo y en plano de cuatro cámaras.

#### Posprocesado de las imágenes e interpretación

Las reconstrucciones de la TC y la RM fueron interpretadas independientemente por dos observadores (con 10 y 8 años de experiencia en imagen cardiaca) para cada uno de los 17 segmentos miocárdicos de la clasificación de la *American Heart Association*, sin que conociesen los resultados de otras pruebas. Posteriormente analizaron las imágenes en consenso para resolver cualquier discrepancia que hubiese.

Para valorar las IPM de la TCDE, se generaron mapas de yodo en el eje corto cardiaco, con grosor de corte de 5 mm, mediante el *software* de posprocesado Syngo Multimodality Workplace (Syngo Dual Energy, Siemens). Los defectos de perfusión se definieron como áreas contiguas y circunscritas con disminución o ausencia de yodo en relación con el miocardio normal del ventrículo izquierdo<sup>15</sup>.

Para evaluar la viabilidad miocárdica en la TC, se realizaron reconstrucciones multiplanares en una estación de trabajo Leonardo (Siemens) en los ejes corto y largo y en el plano de cuatro cámaras, con grosor de corte de 10 mm.

La comparación entre TC y RM en cuanto al análisis de perfusión y viabilidad miocárdica se hizo tomando la RM como patrón de referencia.

#### Dosis de radiación

La dosis de radiación efectiva para el estudio de TC se calculó multiplicando el producto dosis-longitud por el factor de conversión para el tórax ( $k = 0,014 \text{ mSv} / \text{mGy} \times \text{cm}$ ) según la fórmula: dosis efectiva estimada (mSv) = producto dosis-longitud (mGy-cm)  $\times 0,014$  (factor de conversión en tórax; mSv / mGy  $\times \text{cm}$ )<sup>16</sup>.

#### Análisis estadístico

En el análisis estadístico descriptivo, las variables cuantitativas se expresan como media  $\pm$  desviación estándar y las variables cualitativas, como frecuencias o porcentajes.

Con la RM cardiaca como estándar de referencia, la precisión diagnóstica de la TC para valorar defectos de perfusión miocárdicos y realce tardío se expresó en términos de sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo y valor predictivo negativo.

Las variables cualitativas se evaluaron mediante el test de la  $\chi^2$ .

**Tabla 1**

Características clínicas de los pacientes

Características	Datos
Edad (años)	63,2 ± 8,4
Sexo	
Varones	39
Mujeres	17
Peso (kg)	76,6 ± 9,9
Índice de masa corporal	28,9 ± 2,9
FC en reposo (lpm)	63 ± 9
Factores de riesgo	
Diabetes mellitus	16
Hipertensión arterial	28
Fumadores	12
Dislipemia	27
Tratamiento	
Ácido acetilsalicílico	24
Bloqueadores beta	19
Estatinas	27
Dosis de radiación de TC (mSv)	
Total	8,2 ± 2,4
TCDE	5,2 ± 1,2
TC-coronariografía	2,5 ± 2,1
TC realce tardío	0,48 ± 0,19

FC: frecuencia cardiaca; TC: tomografía computarizada; TCDE: tomografía computarizada de doble energía.

## RESULTADOS

### Población de estudio

El protocolo se completó en 56 de los 68 pacientes remitidos, y se excluyó a 12 pacientes porque no dieron su consentimiento para realizar la RM.

Las características clínicas de los pacientes y las dosis de radiación se resumen en la [tabla 1](#). La indicación de las pruebas fue dolor torácico en 51 pacientes y alteraciones del electrocardiograma en 5. Un paciente se había sometido a cirugía de revascularización coronaria y 6, a implante de *stents* coronarios. El promedio de tiempo entre la TC y la RM cardiaca fue de 10,8 ± 5,1 días.

### Tomografía computarizada cardiaca

#### Tomografía computarizada de doble energía para perfusión miocárdica

Tras la administración de adenosina, la frecuencia cardiaca aumentó de 63,7 ± 9,3 lpm en reposo a 75,5 ± 13,8 lpm. No hubo complicaciones mayores que impidiesen terminar el estudio, aunque 9 pacientes presentaron bloqueos auriculoventriculares 2:1; 3, malestar torácico y 4, cefalea. Todas estas complicaciones cedieron tras suspender la adenosina. La dosis efectiva estimada fue de 5,2 ± 1,2 mSv. Se encontraron defectos de perfusión en 17 de 56 pacientes (30,3%), 29 de 168 territorios arteriales (17,2%) y 55 de 952 segmentos miocárdicos estudiados (5,7%).

#### Tomografía computarizada-coronariografía

A 44 pacientes se les realizó adquisición prospectiva con alto *pitch* (frecuencia cardiaca, 57 ± 6 lpm) y a 12, adquisición

retrospectiva (frecuencia cardiaca, 73 ± 5 lpm). La dosis efectiva estimada fue de 2,5 ± 2,1 mSv. En un análisis por paciente, 27 tenían coronarias normales o estenosis < 50%; 15, estenosis significativa (11 monovaso, 2 bivaso y 2 trivaso) y 14, al menos una de las arterias no valorable por artefacto o calcificación grave. En un análisis por arteria, la descendente anterior fue normal o sin estenosis significativas en 37 casos, con estenosis significativa en 5 e imposible de valorar en 14; la coronaria derecha, en 34, 8 y 14 y la circunfleja, en 37, 8 y 11 respectivamente.

#### Tomografía computarizada para viabilidad miocárdica

Se observó hiperrealce en 10 de 56 pacientes (17,8%), 14 de 168 territorios arteriales (8,3%) y 28 de 952 segmentos miocárdicos estudiados (2,9%). La dosis efectiva estimada fue de 0,48 ± 0,19 mSv.

### Resonancia magnética cardiaca

En los 56 pacientes se obtuvieron imágenes de buena calidad para valorar los defectos de perfusión y el realce tardío. Se encontraron defectos de perfusión en 21 (37,5%) pacientes, 33 (19,6%) territorios arteriales y 68 (7,1%) segmentos miocárdicos. Se observó hiperrealce tardío en 12 (21,4%) pacientes, 18 (10,7%) territorios arteriales y 37 (3,8%) segmentos miocárdicos.

### Comparación entre imágenes de perfusión miocárdicas con tomografía computarizada cardiaca y resonancia magnética cardiaca

En la [tabla 2](#) se muestran los valores de sensibilidad, especificidad y valores predictivos negativo y positivo de la TC cardiaca para los defectos de perfusión e hiperrealce tardío.

De los 62 segmentos miocárdicos con defectos de perfusión en TCDE, 55 se detectaron en la perfusión de primer paso en la RM ([fig. 1](#)); sin embargo, 7 no fueron coincidentes; 15 segmentos con alteración de la perfusión en RM no fueron coincidentes con la perfusión en TCDE.

En 28 segmentos se encontró hiperrealce tardío en TC, de los cuales 23 coincidieron con la RM. Hubo 13 hiperrealces en RM que no se vieron en TC ([fig. 2](#)).

### Tomografía computarizada-coronariografía frente a defectos de perfusión miocárdicos

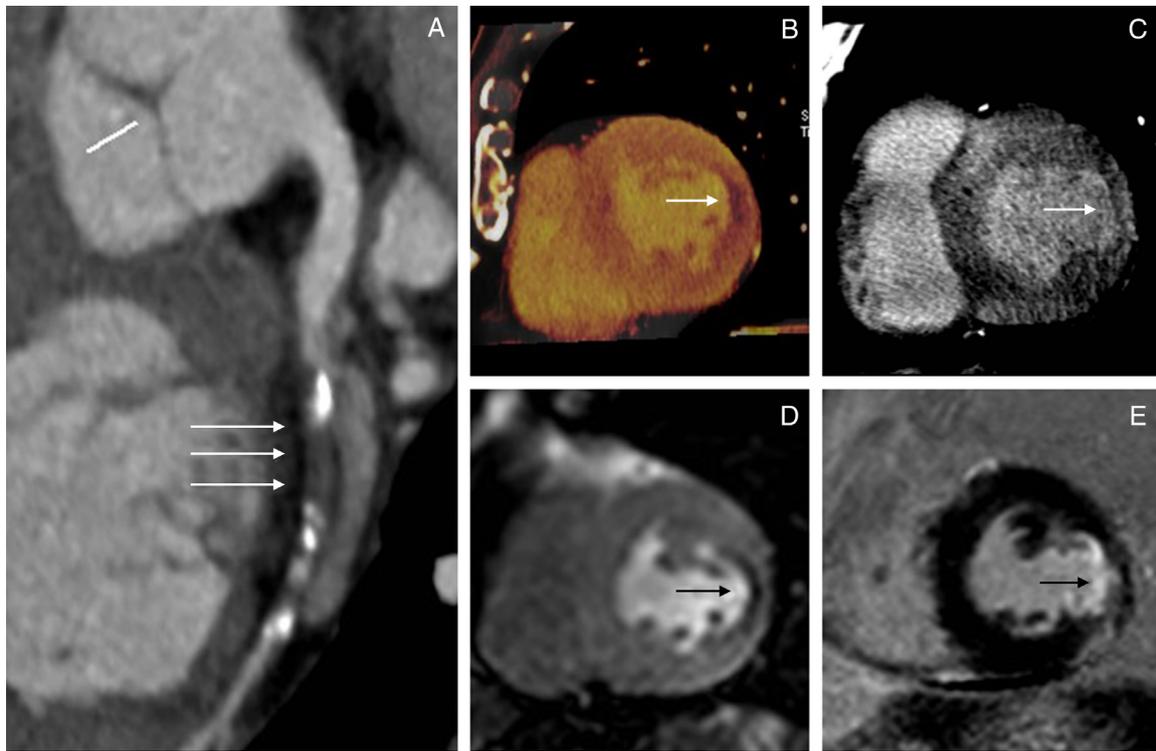
Se encontraron 21 arterias coronarias con estenosis > 50% y 107 sin estenosis. La [tabla 3](#) detalla la relación entre los hallazgos en la TC-coronariografía y la presencia de defecto de perfusión. De los 14 pacientes con al menos una de las arterias coronarias no valorable, se observó defecto de perfusión por TC en el territorio correspondiente en 3 pacientes.

**Tabla 2**

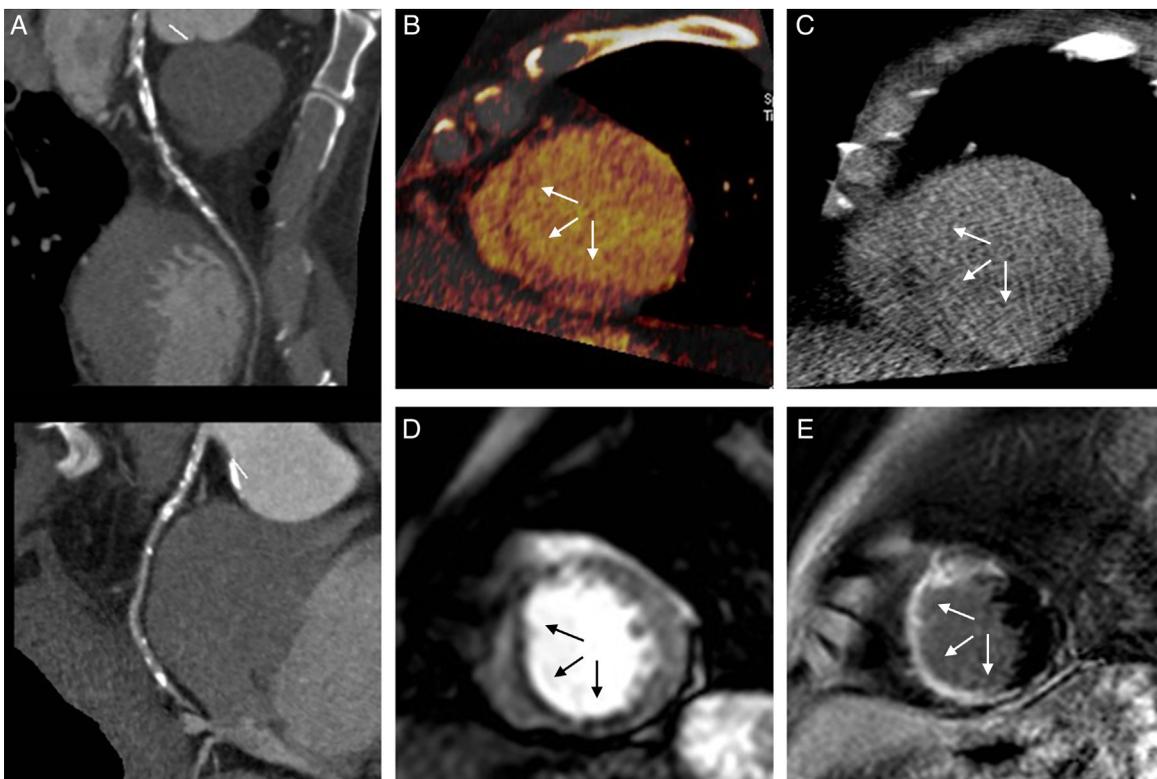
Resultados del estudio con la tomografía computarizada de doble fuente en la valoración de defectos de perfusión e hiperrealce tardío

	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	VPP (%)	VPN (%)
<i>Defectos de perfusión en estrés</i>				
Segmentos	76	99	89	98
Territorios	78	97	86	95
<i>Hiperrealce tardío</i>				
Segmentos	64	99	82	99
Territorios	72	99	93	97

VPN: valor predictivo negativo; VPP: valor predictivo positivo.



**Figura 1.** Caso concordante entre tomografía computarizada y resonancia magnética. Varón de 67 años con estenosis significativa en arteria circunfleja (A), defecto de perfusión en cara lateral del ventrículo izquierdo en tomografía computarizada (B) y resonancia magnética (D). Realce tardío evidenciado con ambas técnicas (C y E).



**Figura 2.** Falso negativo en la tomografía computarizada de viabilidad con coronarias patológicas. Varón de 72 años con lesiones en descendente anterior (A) y defecto de perfusión en el septo en tomografía computarizada (B) y resonancia magnética (D). Realce tardío en resonancia magnética (E), que no se aprecia en tomografía computarizada (C).

**Tabla 3**

Relación de la estenosis en la tomografía computarizada-coronariografía con los defectos de perfusión tanto en la tomografía computarizada de doble energía como en la resonancia magnética

Arterias	Estenosis significativa en TC-coronariografía	Defecto de perfusión TCDE		Defecto de perfusión RM	
		Negativo	Positivo	Negativo	Positivo
DA	No	36	1	35	2
	Sí	1	4	2	3
	No valorable	12	2	12	2
CD	No	33	1	29	5
	Sí	0	8	1	7
	No valorable	11	3	10	4
CX	No	35	2	35	2
	Sí	2	6	2	6
	No valorable	9	2	9	2

CD: arteria coronaria derecha; CX: arteria circunfleja; DA: arteria descendente anterior; TC: tomografía computarizada; TCDE: tomografía computarizada con doble energía en estrés; RM: resonancia magnética en estrés.

## DISCUSIÓN

El presente estudio indica que la TCDF es una técnica diagnóstica factible y con aceptables resultados diagnósticos para la valoración de la perfusión miocárdica en comparación con la RM. El estudio con TC posibilita además una imagen de las arterias coronarias que ayuda a la estratificación pronóstica de la aterosclerosis.

La TC-coronariografía es una técnica excelente para la valoración de la enfermedad coronaria; sin embargo, no proporciona información de la perfusión miocárdica, ya que el flujo coronario se mantiene hasta que la estenosis no supera el 80% de la luz<sup>17</sup>. Por lo tanto, en muchas ocasiones en que se diagnostica enfermedad coronaria, solo se puede valorar la repercusión en la perfusión miocárdica mediante pruebas de estrés.

El desarrollo tecnológico de los equipos de TC ha hecho posible que se pueda realizar estudios de perfusión con buena calidad y dosis de radiación adecuada. Blankstein et al<sup>18</sup> han comunicado que los estudios de IPM con TCDF en estrés tienen una sensibilidad del 93% y una especificidad del 74% para detectar estenosis coronarias en comparación con la SPECT. Rocha-Filho et al<sup>19</sup> publicaron que la adición de las IPM incrementa la precisión diagnóstica en el estudio de TC-coronariografía, lo que ofrece la oportunidad para la evaluación simultánea de la anatomía y la perfusión en un solo examen.

Recientemente Bettencourt et al<sup>20</sup> han demostrado las altas sensibilidad y especificidad de las IPM tanto por TC como por RM para la detección de las estenosis coronarias significativas en un estudio en el que el patrón de referencia fue la fracción del flujo de reserva, y han puesto de manifiesto que un protocolo de TC que integre anatomía y perfusión puede ser tan eficaz como la perfusión-RM para detectar lesiones coronarias significativas.

Otra forma más novedosa de valorar las IPM es la TCDE, mediante la cual se puede generar un mapa de yodo analizando la distribución de este en el miocardio, basándose en las características específicas de absorción de rayos X por el yodo con niveles de alta y baja energía<sup>21</sup>. Ko et al<sup>12,13</sup> publicaron que la TCDE es segura para valorar los defectos de perfusión miocárdicos en comparación con la RM. Además demostraron que los estudios de perfusión con mapa de yodo incrementan la seguridad diagnóstica de la TC-coronariografía en pacientes con enfermedad coronaria conocida.

La TC también puede valorar el realce tardío, ya que el yodo es un contraste extracelular que persiste cuando hay necrosis miocárdica. La TCDF con técnica de alto *pitch* se ha demostrado de buena precisión en la valoración del realce tardío con baja dosis de radiación, aunque conlleva más «ruido» de la imagen<sup>14</sup>.

En nuestro trabajo se realizó un novedoso protocolo, con una TCDF de segunda generación, valorando la perfusión miocárdica con energía dual y mapa de yodo, las arterias coronarias y el realce tardío con técnica de alto *pitch*. A diferencia de otros estudios, se incluyó a sujetos con sospecha clínica de enfermedad coronaria en la consulta del cardiólogo, sin prueba de imagen alguna que documentara con anterioridad la existencia de enfermedad coronaria. De hecho, la prevalencia de enfermedad coronaria en nuestra población es relativamente baja. Los valores de nuestro estudio para valorar la IPM con mapa de yodo en comparación con la RM son parecidos a los de Ko et al<sup>12</sup>, que hacen una comparación similar pero en sujetos con enfermedad coronaria conocida. Sin embargo, la sensibilidad para detectar el hiperrealce tardío fue tan solo del 64%, probablemente influido por el bajo kilovoltaje utilizado, que hace que las imágenes presenten mucho «ruido».

También se estudió la anatomía de las arterias coronarias, y se observó una excelente correlación entre la estenosis de la arteria coronaria con los defectos de perfusión tanto en TCDE como en RM. En nuestro estudio, 3 pacientes con coronarias no valorables mostraron alteraciones de la perfusión en la TC, y se les cambió el manejo y se los remitió a realización de coronariografía.

## Limitaciones

Son varias las limitaciones que tiene nuestro estudio. En primer lugar, se trata de un estudio realizado en un único centro. Por lo tanto, se necesita de estudios prospectivos, aleatorizados y multicéntricos para valorar el uso de este protocolo en el estudio de la cardiopatía isquémica.

La IPM con mapa de yodo es una técnica introducida recientemente y no está documentado cómo se debe realizarla para obtener una imagen óptima (velocidad y cantidad de contraste administrado, tiempo de inicio de la adquisición, características técnicas, etc.). Además, en ocasiones se observan artefactos de endurecimiento del haz que pueden dar lugar a falsos positivos. Se necesita un aprendizaje de la técnica que ayude a protocolizar mejor la adquisición y mejore la interpretación de imágenes.

Otro problema es que la perfusión de mapa de yodo no es dinámica, solo se valora la distribución del yodo en un instante y puede que este no sea el momento óptimo en que haya más diferencia de atenuación entre el miocardio mal perfundido y el normal. La imagen estática, además, carece de datos cuantitativos de perfusión como flujo arterial y volumen sanguíneo.

Solo utilizamos la RM como patrón de referencia, sin estudios invasivos como la coronariografía para valorar las estenosis coronarias y el flujo de reserva coronario.

Por último, la dosis de radiación en nuestro protocolo sigue siendo considerablemente alta ( $8,2 \pm 2,4$  mSv), aunque es menor que en los estudios de perfusión con SPECT ( $12,3 \pm 4,3$  mSv)<sup>22</sup>.

### Implicaciones para la práctica clínica

A pesar de todas estas limitaciones, en ausencia de contraindicaciones la TCDF es una técnica diagnóstica que ofrece aceptables resultados en la valoración de la isquemia miocárdica. Esto puede ayudar a valorar la repercusión funcional, con la misma prueba, en los casos de estenosis coronaria difícil de cuantificar porque, por ejemplo, hay mucho calcio. Esto permitiría identificar de manera más precisa a pacientes subsidiarios de coronariografía por alteraciones en la IPM.

### CONCLUSIONES

La TCDF es una técnica prometedora para valorar los defectos de perfusión y la viabilidad miocárdica que permite valorar conjuntamente la anatomía coronaria con una aceptable dosis de radiación. Se necesitan estudios multicéntricos más amplios que permitan conocer su verdadero valor.

### CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

### BIBLIOGRAFÍA

- Budoff MJ, Dowe D, Jollis JG, Gitter M, Sutherland J, Halamert E, et al. Diagnostic performance of 64-multidetector row coronary computed tomographic angiography for evaluation of coronary artery stenosis in individuals without known coronary artery disease: results from the prospective multicenter ACCURACY (Assessment by Coronary Computed Tomographic Angiography of Individuals Undergoing Invasive Coronary Angiography) trial. *J Am Coll Cardiol.* 2008;52:1724-32.
- Meijboom WB, Van Mieghem CA, Van Pelt N, Weustink A, Pugliese F, Mollet NR, et al. Comprehensive assessment of coronary artery stenoses: computed tomography coronary angiography versus conventional coronary angiography and correlation with fractional flow reserve in patients with stable angina. *J Am Coll Cardiol.* 2008;52:636-43.
- Smith SC, Feldman TE, Hirshfeld JW, Jabobs AK, Kern MJ, King SB, et al. ACC/AHA/SCAI 2005 guideline update for percutaneous coronary intervention: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/SCAI Writing Committee to Update the 2001 Guidelines for Percutaneous Coronary Intervention). *J Am Coll Cardiol.* 2006;47:e1-121.
- Rademakers F. Necesidad clínica de evaluación de la isquemia. *Rev Esp Cardiol.* 2013;66:161-2.
- Hendel RC, Berman DS, Di Carli MF, Heidenreich PA, Henkin RE, Pellikka PA, et al. ACCF/ASNC/ACR/AHA/ASE/SCCT/SCMR/SNM 2009 appropriate use criteria for cardiac radionuclide imaging: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the American Society of Nuclear Cardiology, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and the Society of Nuclear Medicine: endorsed by the American College of Emergency Physicians. *Circulation.* 2009;119:e561-87.
- Monmeneu JV, Bodí V, López-Lereu MP, Sanchis J, Núñez J, Chaustre F, et al. Análisis mediante resonancia magnética cardiaca del miocardio salvado tras infarto. Predictores e influencia en el remodelado adverso ventricular. *Rev Esp Cardiol.* 2012;65:634-41.
- Hundley WG, Bluemke DA, Finn JP, Flamm SD, Fogel MA, Friedrich MG, et al. ACCF/ACR/AHA/NASCI/SCMR 2010 expert consensus document on cardiovascular magnetic resonance: a report of the American College of Cardiology Foundation Task Force on Expert Consensus Documents. *J Am Coll Cardiol.* 2010;55:2614-62.
- Kurata A, Mochizuki T, Koyama Y, Haraikawa T, Suzuki J, Shigematsu Y, et al. Myocardial perfusion imaging using adenosine triphosphate stress multi-slice spiral computed tomography: alternative to stress myocardial perfusion scintigraphy. *Circ J.* 2005;69:550-7.
- George RT, Silva C, Cordeiro MA, DiPaula A, Thompson DR, McCarthy WF, et al. Multidetector computed tomography myocardial perfusion imaging during adenosine stress. *J Am Coll Cardiol.* 2006;48:153-60.
- Kido T, Kurata A, Higashino H, Inoue Y, Kanza RE, Okayama H, et al. Quantification of regional myocardial blood flow using first-pass multidetector-row computed tomography and adenosine triphosphate in coronary artery disease. *Circ J.* 2008;72:1086-91.
- Leschka S, Stolzmann P, Desbiolles L, Baumüller S, Goetti R, Schertler T, et al. Diagnostic accuracy of high-pitch dual-source CT for the assessment of coronary stenoses: first experience. *Eur Radiol.* 2009;19:2896-903.
- Ko SM, Choi JW, Song MG, Shin JK, Chee HK, Chung HW, et al. Myocardial perfusion imaging using adenosine-induced stress dual-energy computed tomography of the heart: comparison with cardiac magnetic resonance imaging and conventional coronary angiography. *Eur Radiol.* 2011;21:26-35.
- Ko SM, Choi JW, Hwang HK, Song MG, Shin JK, Chee HK. Diagnostic performance of combined noninvasive anatomic and functional assessment with dual-source CT and adenosine-induced stress dual-energy CT for detection of significant coronary stenosis. *Am J Roentgenol.* 2012;198:512-20.
- Goetti R, Feuchtner G, Stolzmann P, Donati OF, Wieser M, Plass A, et al. Delayed enhancement imaging of myocardial viability: low-dose high-pitch CT versus MRI. *Eur Radiol.* 2011;21:2091-9.
- Ruzsics B, Schwarz F, Schoepf UJ, Lee YS, Bastarrika G, Chiaramida SA, et al. Comparison of dual-energy computed tomography of the heart with single photon emission computed tomography for assessment of coronary artery stenosis and of the myocardial blood supply. *Am J Cardiol.* 2009;104:318-26.
- Morin RL, Gerber TC, McCollough CH. Radiation dose in computed tomography of the heart. *Circulation.* 2003;107:917-22.
- Gaemperli O, Schepis T, Valenta I, Koepfli P, Husmann L, Scheffel H, et al. Functionally relevant coronary artery disease: comparison of 64-section CT angiography with myocardial perfusion SPECT. *Radiology.* 2008;248:414-23.
- Blankstein R, Shturman LD, Rogers IS, Rocha-Filho JA, Okada DR, Sarwar A, et al. Adenosine-induced stress myocardial perfusion imaging using dual-source cardiac computed tomography. *J Am Coll Cardiol.* 2009;54:1072-84.
- Rocha-Filho JA, Blankstein R, Shturman LD, Bezerra HG, Okada DR, Rogers IS, et al. Incremental value of adenosine-induced stress myocardial perfusion imaging with dual-source CT at cardiac CT angiography. *Radiology.* 2010;254:410-9.
- Bettencourt N, Chiribiri A, Schuster A, Ferreira N, Sampaio F, Pires-Morais G, et al. Direct comparison of cardiac magnetic resonance and multidetector computed tomography stress-rest perfusion imaging for detection of coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol.* 2013;61:1099-107.
- Ruzsics B, Lee H, Zwerner PL, Gebregziabher M, Costello P, Schoepf UJ. Dual-energy CT of the heart for diagnosing coronary artery stenosis and myocardial ischemia-initial experience. *Eur Radiol.* 2008;18:2414-24.
- Okada DR, Ghoshhajra BB, Blankstein R, Rocha-Filho JR, Shturman LD, Rogers IS, et al. Direct comparison of rest and adenosine stress myocardial perfusion CT with rest and stress SPECT. *J Nucl Cardiol.* 2010;17:27-37.