

PERFUSIÓN MIOCÁRDICA, NUEVAS TÉCNICAS

MYOCARDIAL PERFUSION, NEW TECHNIQUES

IGNACIO NOGUÉS¹

RESUMEN

A pesar de los avances de las últimas décadas en cuanto a diagnóstico y tratamiento de la enfermedad coronaria, esta continúa siendo la principal causa de muerte a nivel mundial. Por ello es que existe una continua búsqueda de nuevos y mejores métodos diagnósticos que intentan reducir su morbimortalidad. Actualmente contamos con una variedad de técnicas de gran difusión para la búsqueda de enfermedad coronaria y existe controversia sobre la superioridad de unas sobre otras. Algunas de estas se basan en el análisis anatómico de las arterias coronarias, tanto de forma invasiva con la cinecoronariografía, como no invasiva con la angiotomografía coronaria. Por otro lado, existen métodos diagnósticos que buscan identificar isquemia miocárdica, como el ecocardiograma-estrés y la cámara gamma. En los últimos años se desarrollaron nuevos métodos diagnósticos. Así, la resonancia magnética cardíaca con perfusión miocárdica se impuso como un método seguro y confiable para el análisis de isquemia y viabilidad miocárdica, y más recientemente, la tomografía computada con perfusión miocárdica demostró que con un único estudio es posible conocer la anatomía coronaria y al mismo tiempo correlacionarla con zonas de isquemia. El objetivo de esta revisión es describir el estado actual de estos dos últimos métodos.

Palabras clave: técnicas de imágenes cardíacas, imágenes de perfusión miocárdica, difusión por resonancia magnética.

ABSTRACT

Despite the progress in recent decades in terms of diagnosis and treatment of coronary disease, it remains the leading cause of death worldwide. There is a continuing search for new and better diagnostic methods trying to reduce morbidity and mortality. We currently have a variety of widely known techniques available to search for coronary disease and there is controversy about the superiority of one over the other. Some of these are based on the anatomical analysis of coronary arteries, both invasively with coronary angiography, and non-invasively with coronary computed tomography angiography. On the other hand, there are diagnostic methods that seek to identify myocardial ischemia, such as stress echocardiography and scintigraphy. In recent years, new diagnostic methods were developed. On the one hand, cardiac magnetic resonance myocardial perfusion has prevailed as a safe and reliable method for the analysis of ischemia and myocardial feasibility; and more recently, myocardial computed tomography perfusion showed that by a single study we can learn about the coronary anatomy and simultaneously correlate it with areas of ischemia. The objective of this review is to describe the current state of these last two methods.

Keywords: cardiac imaging techniques; myocardial perfusion imaging, diffusion magnetic resonance imaging.

REVISTA CONAREC 2016;32(134):077-082 | VERSIÓN WEB WWW.REVISTACONAREC.COM.AR

INTRODUCCIÓN

La enfermedad coronaria continúa siendo la primera causa de muerte en todo el mundo y la OMS estima que el 30% de las muertes son de causa cardiovascular^{1,2}. Datos recientes sugieren un descenso en la mortalidad de origen cardiovascular relacionado con el avance de los métodos de tratamiento y prevención. A raíz de esto, el manejo de pacientes con síntomas sugestivos de enfermedad coronaria hoy en día sigue siendo un escenario frecuente y desafiante. En ello radica la importancia de confirmar o descartar la presencia de isquemia miocárdica, lo que no siempre es sencillo. Actualmente contamos con una variedad de modalidades diagnósticas que permiten, a través de estudios funcionales o anatómicos, objetivar la presencia de enfermedad coronaria. La cinecoronariografía (CCG), de forma invasiva, y la angiotomografía coronaria (ATC), no invasiva, analizan la anatomía y la presencia de estenosis coronarias, agregando esta última información sobre el contenido de las placas coronarias y su consiguiente vulnerabilidad y riesgo de ruptura. No obstante, la evidencia demostró que el grado de estenosis no siempre predice el comportamiento hemodinámico de la placa y el

consiguiente desarrollo de isquemia miocárdica, requiriendo en algunos casos realizar otro estudio que brinde información fisiológica³. Entre los estudios funcionales, la tomografía computada con emisión de protón único (SPECT) y el ecocardiograma-estrés (ECE), ya sea con ejercicio o fármacos, son los métodos más difundidos para la búsqueda de isquemia miocárdica, aunque otros como la resonancia magnética cardíaca (RMC) con perfusión, métodos híbridos como SPECT/TC y más recientemente la perfusión miocárdica por tomografía computada (PMTC) aumentaron las posibilidades y mejoraron las capacidades diagnósticas⁴. El objetivo de este artículo es revisar en detalle las nuevas técnicas para el análisis de isquemia miocárdica: perfusión miocárdica por tomografía computada y resonancia magnética cardíaca.

ANÁLISIS ANATÓMICO Y ANGIOTOMOGRAFÍA CORONARIA

Los avances de los últimos años en tomografía han hecho posible el análisis de los vasos coronarios de forma no invasiva, convirtiendo a la ATC en una herramienta de gran utilidad al momento de evaluar pacientes con enfermedad coronaria o sospecha de la misma, gracias a la gran sensibilidad y el elevado valor predictivo negativo para su detección⁵. Entre las ventajas de la ATC están la capacidad de reconstruir en forma tridimensional los vasos epicárdicos y no solo de forma planar como la CCG, permite analizar la luz coronaria, muchas veces de morfología compleja, y conocer ciertas características presentes en las placas vulnerables: el valor de unidades *hounsfield* de la placa menor a 30, el tipo de remodelado vascular y la presencia de calcificaciones focales (*spotty calcification*) en el seno de la placa de ateroma⁶. Otro punto no menor es

1. Médico Staff, Servicio de Cardiología, Hospital Alemán. CABA, Rep. Argentina.

✉ **Correspondencia:** Dr. Ignacio Nogués | Servicio de Cardiología, Hospital Alemán. Avenida Pueyrredón 1640, (C1118AAT) CABA, Rep. Argentina | inogues@hospitalaleman.com.ar

El autor declara no poseer conflictos de intereses.

Recibido: 01/02/2016 | Aceptado: 08/03/2016

que al no ser invasiva se evitan los riesgos asociados con la CCG, como accidentes cerebrovasculares, sangrados y disección vascular.

Un metaanálisis publicado en 2012 que comparó ATC con CCG mostró una sensibilidad del 96%, especificidad del 86% y un excelente valor predictivo a 5 años^{7,8}.

Por lo anterior, la ATC se convirtió en uno de los estudios de elección para el manejo de pacientes con sospecha de enfermedad coronaria y riesgo bajo a intermedio sobre todo en el departamento de emergencias, donde sería de gran utilidad para definir pacientes y evitar internaciones innecesarias además de ser un estudio costo efectivo^{5,9-11}.

Las limitaciones de la ATC están dadas por artefactos de movimiento causados por arritmias y frecuencia cardíaca elevada al momento de la adquisición, alteraciones en la atenuación del miocardio por artefactos de *beam hardening* y calcificaciones extensas que no permiten analizar segmentos coronarios. Por otro lado, presenta bajo valor predictivo positivo debido a la limitada resolución espacial, que muchas veces no permite caracterizar correctamente lesiones intermedias (estenosis del 50-70% del área vascular)¹². Tanto la ATC como la CCG proveen excelente información de carácter anatómico, aunque ninguna de las dos es capaz de probar el compromiso hemodinámico causado por las estenosis. Múltiples estudios demostraron que una estenosis igual o mayor al 50% de la luz coronaria es un pobre predictor de isquemia reversible, con valores predictivos positivos entre 29% y 31%¹². Por lo tanto, para determinar si una estenosis coronaria es hemodinámicamente significativa y si compromete o no la normal perfusión miocárdica, ocasionalmente es necesario realizar un estudio de tipo funcional, ya sea con reserva de flujo fraccional (FFR) o con métodos no invasivos como SPECT, ECE o RMC¹³⁻¹⁵.

ACTUALIDAD DE LOS ESTUDIOS FUNCIONALES

Entre los más utilizados se encuentra el SPECT y el ECE. El primero analiza la reserva coronaria como subrogado de isquemia miocárdica y está indicado en pacientes con riesgo intermedio de eventos cardiovasculares¹⁶. Su sensibilidad es del 88,3% y su especificidad es de 75,8%¹⁷. El segundo, ya sea realizado con ejercicio o fármacos, evalúa alteraciones en la motilidad parietal. Posteriormente surgió la RMC con perfusión miocárdica. Utilizando equipos de 1,5 o 3 teslas, este estudio brinda información anatómica, funcional, de caracterización tisular e isquemia miocárdica. Entre sus ventajas se encuentran la posibilidad de realizar cortes en cualquier plano anatómico, su excelente resolución espacial y la no utilización de radiación ionizante. Aunque todavía no es posible analizar en profundidad la anatomía coronaria, existe un futuro promisorio en ese sentido para esta técnica.

Avances tecnológicos recientes en tomografía computada brindaron la posibilidad de realizar estudios funcionales con este método, agregando a la información anatómica la capacidad de analizar zonas con isquemia en un solo estudio.

PERFUSIÓN MIOCÁRDICA POR TC, ¿DÓNDE ESTAMOS?

Una herramienta diagnóstica que brinde información sobre la anatomía coronaria y la presencia de isquemia miocárdica en un mismo estudio sería revolucionario. En la última década surgieron una serie de estudios que intentarían demostrar su factibilidad utilizando diferentes tomógrafos de 16

y 64 columnas. Curi et al. compararon la PMTC con equipos de 64 columnas de detectores e infusión de dipiridamol con SPECT en pacientes con estenosis coronarias >70% en la CCG¹⁸. Los valores de sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo (VPP) y valor predictivo negativo (VPN) para la PMTC fueron de 88%, 79%, 66% y 93%, respectivamente, lo que demuestra la capacidad de detectar isquemia miocárdica y anatomía coronaria con una buena precisión diagnóstica y dosis de radiación aceptable.

Con el advenimiento de nuevos tomógrafos de doble fuente, otros de 320 filas de detectores (30 × 0,5 mm) que cubren hasta 16 cm y permiten adquirir en un solo latido imágenes de gran resolución, con baja radiación, esta técnica se difundió. En 2014 se publicó el estudio CORE 320, un estudio multicéntrico cuyo objetivo fue evaluar el poder diagnóstico de la ATC integrada con perfusión miocárdica para identificar lesiones coronarias (estenosis ≥50% en estudios de CCG), hemodinámicamente significativas, es decir que generen isquemia objetivable por SPECT¹⁹. Se incluyeron 381 pacientes en forma prospectiva, de entre 45 y 85 años, con enfermedad coronaria sospechada o conocida a los que se les realizaría una CCG por indicación clínica. Del total de los pacientes al momento de presentación, 9 mostraban angina inestable, 262 angina crónica estable y 120 dolores precordiales atípicos o síntomas sugestivos de enfermedad coronaria. Todos fueron sometidos a un SPECT y PMTC previamente a la CCG convencional. Se utilizaron tomógrafos Aquilion One Toshiba de 320 detectores e infusión de 0,14 mg/kg/min de adenosina para las fases de *stress*.

La asociación de ATC con análisis de la perfusión miocárdica demostró una sensibilidad del 80% (92-86%), especificidad del 74% (68-80%), valor predictivo positivo del 65% (58-72%) y valor predictivo negativo del 86% (80-90%). El área bajo la curva (AUC) para el método fue de 0,87, el intervalo de confianza 95% (IC95%), 0,84-0,91 para detectar estenosis ≥50% en CCG y defectos de perfusión por SPECT. En los pacientes sin antecedentes de infarto de miocardio (IAM) el AUC llegó a 0,93 (IC95%: 0,89-0,97). Por otro lado, la ATC sola mostró un poder diagnóstico significativamente menor ($p=0,02$), con un AUC de 0,84 (IC95%: 0,78-0,88). En conclusión, el estudio CORE 320 demostró la capacidad del método para localizar lesiones angiográficamente significativas (≥50% del diámetro luminal), con defectos de perfusión en el territorio correspondiente a la misma, sobre todo en pacientes sin antecedentes de IAM.

Recientemente se publicaron estudios que comparan la PMTC con la reserva fraccional de flujo mediante CCG y demostraron que la PMTC también puede detectar lesiones hemodinámicamente significativas. En un trabajo de Ko et al. se incluyeron 42 pacientes con al menos una estenosis ≥50% evidenciada por CCG, a los que se les realizó PMTC previo a la revascularización²⁰. Se obtuvieron valores de sensibilidad, especificidad, VPP y VPN del 76%, 84%, 82% y 79%, respectivamente.

Finalmente los nuevos equipos con doble energía permiten caracterizar el miocardio y la absorción de yodo en espectros de baja y alta energía, obteniendo en algunas publicaciones sensibilidades y especificidades cercanas al 93% y 99%, respectivamente, para detectar segmentos hipoperfundidos en comparación con la RMC²¹.

ASPECTOS TÉCNICOS Y FUNDAMENTOS DE LA PMTC

Esta técnica utiliza la distribución miocárdica de contraste como marcador de perfusión miocárdica. Las zonas hipoperfundidas se observan como zonas de menor intensidad luego de administrar contraste. Se ad-

quieren imágenes en reposo y bajo estrés. El estrés farmacológico es inducido por sustancias vasodilatadoras como adenosina, dipiridamol o regadenoson (agonista selectivo del receptor A2A). Una vez infundido el fármaco, se genera vasodilatación de los territorios coronarios indemnes generando hiperemia miocárdica en el territorio miocárdico irrigado por ella (reserva coronaria). Por otro lado, las arterias con estenosis críticas que limitan la autorregulación coronaria y su capacidad de vasodilatación no pueden generar hiperemia luego del estímulo farmacológico, demarcando zonas de hipoperfusión²².

Una vez adquiridas ambas fases, se analizan, y las zonas hipoperfundidas se clasifican en reversibles cuando solo son evidentes en la fase de estrés o en ambas fases pero más marcadas en las de estrés; por otro lado, se las clasifica como irreversibles cuando se observan en ambas con similar intensidad. Se debe tener en cuenta que no todos los defectos de perfusión objetivos en la fase de reposo se corresponden con zonas de infarto. En un estudio que comparó ATC de reposo con SPECT se observó que muchos de los defectos de perfusión observados en las ATC de reposo solo se reproducían en el SPECT bajo estímulo farmacológico y no en las imágenes de reposo²³. Existen dos teorías que explican esto. La primera es que la resolución espacial de la ATC es mayor, por lo que el SPECT no fue lo suficientemente sensible para detectarlas, y la segunda es que el contraste yodado podría generar algún tipo de vasodilatación en forma análoga a los fármacos^{12,21}.

En cuanto a la superioridad de realizar primero la fase de estrés o la de reposo existen opiniones diferentes en la bibliografía. Al adquirir la fase de estrés primero se lograría mayor contraste entre las zonas isquémicas y el miocardio normal evitando así la contaminación con el contraste circulante. Una limitante es que la frecuencia cardíaca podría mantenerse elevada alterando la consiguiente fase de reposo. En cambio, la ventaja de realizar el reposo primero es la posibilidad de realizar el estudio anatómico coronario con esta y, dado su elevado VPN, la ausencia o presencia de lesiones obstructivas permitirían decidir si se avanza o no con la fase de estrés, evitando estudios y radiación innecesarios.

RMC CON PERFUSIÓN

La RMC creció a pasos agigantados en la última década llegando a ser el estudio *gold standard* para cálculo de volúmenes y función ventricular²⁴. Utilizando secuencias de caracterización tisular, de perfusión de primer paso y de inversión recuperación para análisis de realce tardío, se obtiene con un solo estudio información anatómica, funcional y análisis de la presencia de edema, isquemia, fibrosis y viabilidad miocárdica de forma confiable y reproducible²⁴.

Secuencias turbo espín eco (TSE) potenciadas en T2 permiten visualizar la presencia y extensión de las zonas de edema miocárdico, correspondiéndose con "miocardio en riesgo"; en general, esta área excede en extensión a la zona con injuria irreversible. La diferencia entre ambas define el miocardio salvado²⁵⁻²⁶.

Por otro lado, la RMC con estrés hace foco en dos aspectos de la cascada isquémica: el análisis de la motilidad parietal en reposo y estrés farmacológico con dobutamina y el análisis de defectos de perfusión miocárdica con vasodilatadores²⁷. En diferentes publicaciones la primera mostró tener elevadas sensibilidad (86-89%) y especificidad (84-86%), siendo superior en algunos casos al ecocardiograma con dobutamina (sensibilidad del 86% frente al 74% y especificidad del 86% frente al 70%)²⁷⁻²⁹. La exactitud diag-

nóstica de la RMC se atribuyó a una mejor calidad de imagen, por la mejor visualización de los segmentos inferiores y laterales. Por otro lado, la seguridad del método es similar a la de otros que utilizan este fármaco (0,1% de efectos adversos mayores y 6% de efectos adversos menores); convirtiéndose en una herramienta útil y segura para estratificar y manejar pacientes con enfermedad coronaria^{27,30}.

Con secuencias de perfusión de primer paso, luego de la aplicación de un bolo de gadolinio se observa el pasaje de este a las cavidades cardíacas seguido de la distribución homogénea del mismo a través del miocardio. Las regiones con isquemia se observan como áreas no perfundidas e hipointensas²⁵⁻²⁶. De forma similar a la PMTC, una diferencia de intensidad de señal entre secuencias de reposo y estrés determina la presencia de isquemia miocárdica.

El compromiso de la microcirculación causado por fenómeno de no flujo se observa como zonas con ausencia de señal, rodeadas de zonas con realce tardío^{4,30,31}. Esto último es de gran importancia ya que es un marcador pronóstico de eventos clínicos (reinfarto, muerte, insuficiencia cardíaca y *stroke*), así como de remodelamiento cardíaco³⁰.

En relación al PET, Schwitter et al. obtuvieron una sensibilidad del 87% y una especificidad del 85% para la detección de lesión coronaria, al considerar como «patrón oro» la coronariografía, y una sensibilidad del 91% con una especificidad del 94%, con el PET³².

Los fármacos vasodilatadores utilizados para el estudio de perfusión miocárdica por RMC son los mismos descriptos para la PMTC. Como se dijo previamente, estos aumentan el flujo coronario, generando fenómeno de robo coronario en los vasos donde existen estenosis hemodinámicamente significativas, lo que se traduce en regiones hipoperfundidas en la secuencias de estrés²⁷.

Aunque la utilidad de ambos fármacos es similar, en un metaanálisis la perfusión con adenosina mostró mayor sensibilidad que el dipiridamol (90% [88-92%] vs. 86% [80-90%]; $p=0,022$) y una tendencia a mayor especificidad (81% [78-84%] vs. 77% [71-82%]; $p=0,065$)³³. Al comparar la perfusión con RMC vs. el SPECT en un estudio prospectivo, Juerg Schwitter et al. concluyeron que la primera es superior (AUC: 0,75 vs. 0,69) sobre todo en pacientes con enfermedad de múltiples vasos (0,80 vs 0,75)³⁴.

Por último, las secuencias de realce tardío permiten en el período agudo localizar zonas de injuria miocárdica, ya que al perderse la integridad de las membranas sarcoplasmáticas el gadolinio se acumula en el interior de las células, fenómeno que se observa entre los 7 y 10 días posinfarto. Luego, en la etapa crónica del infarto, el contraste se concentra en zonas con aumento de tejido intersticial y fibrosis. El patrón de realce tardío característico de la miocardiopatía isquémico-necrótica es subendocárdico con extensión hacia el subepicardio, siempre respetando los territorios de distribución coronaria^{35,36}.

En comparación con otros métodos, la RMC mostró tener una alta correlación con el PET para identificar zonas de necrosis³⁷. En relación al SPECT, un estudio que incluyó a 78 pacientes con antecedente de IAM reciente o IAM reperfundido, todos evaluados con SPECT y RMC en busca de necrosis (mediana tiempo de IAM al estudio de 7 días) demostró la superioridad de la RMC por sobre el SPECT (sensibilidad 97% vs. 87%; $p=0,008$)³⁸. El beneficio fue más marcado en pacientes con infartos chicos, ubicados en regiones no anteriores por electrocardiograma (ECG) (sensibilidad 98% vs. 84%; $p=0,03$) y para los IAM tipo no-Q (sensibilidad: 85 vs. 46%; $p=0,06$). Estos resultados podrían deberse a que la RMC tiene mejor resolución espacial.

La sola presencia de realce tardío en pacientes con sospecha de enfermedad coronaria es un marcador pronóstico de eventos cardiovasculares y de muerte en forma significativa³⁹.

Por último, existen publicaciones que compararon ambos métodos: PMTC y RMC. Delgado et al. compararon la perfusión miocárdica por RMC y perfusión miocárdica por ATC⁴⁰. Se incluyeron en forma prospectiva 56 pacientes. Finalmente, se realizó tomografía computarizada con protocolo de perfusión de estrés con adenosina, coronariografía y realce tardío y resonancia magnética con perfusión de estrés y realce tardío. En un análisis por segmentos, la sensibilidad, especificidad, VPP y VPN de la tomografía en comparación con la resonancia para detectar defectos de perfusión fueron del 76%, 99%, 89% y 98%, respectivamente, y para realce tardío, 64%, 99%, 82% y 99%, respectivamente. Estos resultados confirman que la ATC de doble fuente también permite analizar defectos de perfusión y viabilidad miocárdica de manera precisa y valorar conjuntamente la anatomía coronaria.

PROTOS DE ADQUISICIÓN Y OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES

En ambos métodos (RMC y ATC con perfusión) las imágenes son tomadas en apnea y gatilladas por ECG. La presencia de arritmia o la incapacidad de mantener una apnea alteran la calidad del estudio. En el caso de la ATC, es crucial un ritmo regular y frecuencia cardíaca por debajo de 60-65 latidos por minuto (dependiendo del tomógrafo utilizado). Se adquieren imágenes en reposo, de estrés farmacológico y finalmente se realiza el realce tardío (sobre todo en RMC). La duración del estudio varía según el método; 40-60 minutos aproximadamente para la RMC y 20-30 minutos la ATC.

El protocolo de adquisición de RMC se inicia con secuencias localizadoras, cortes axiales potenciados en T1 de 8-10 mm de espesor, seguidos de secuencias de cine-RMN (secuencia *balanced TFE*) longitudinales y en eje corto para el análisis de la anatomía y la motilidad regional, volúmenes de fin de diástole, fin de sístole, sistólico y fracción de eyección. En caso de realizar la secuencia de reposo primero, se toman imágenes dinámicas (perfusión de primer paso) simultáneamente con la infusión rápida de contraste (3-4 ml/s idealmente mediante bomba infusora), en una dosis de 0,075-1 mmol/kg seguido de 20-30 ml de solución fisiológica^{41,42}. Se programa la secuencia con tres cortes paralelos en eje corto ventricular equidistantes (basal, medial y apical). Para el estrés farmacológico se pueden utilizar diferentes drogas, como se explicó antes. En caso de dipiridamol la dosis utilizada es de 0,56 ml/kg/4 min y para la adenosina 140 µg/kg/min. Unos minutos después se inician las secuencias de estrés. De nuevo se infunde gadolinio para adquirir las imágenes de perfusión utilizando los mismos cortes anatómicos descriptos en secuencias de reposo. Después se adquieren secuencias de cine para el análisis de la motilidad parietal. Finalmente, se adquieren secuencias de inversión recuperación para realce tardío (RT) (7-10 minutos luego de la infusión de gadolinio) en cortes longitudinales y ejes cortos cubriendo todo el ventrículo izquierdo. Se pueden utilizar secuencias de SCOUT previo al RT para determinar el tiempo de inversión y anular correctamente el miocardio. Por último, en caso de ser necesario, con secuencias de contraste de fase se analizan flujos valvulares⁴³.

El estudio realizado de esta manera permite analizar perfusión miocárdica de reposo y estrés, motilidad parietal durante el reposo/estrés y la viabilidad miocárdica.

El protocolo de adquisición de la ATC varía según las diferentes publicacio-

nes. En el estudio CORE 320 se realizó primero la fase de reposo¹⁹. Una vez preparado el paciente con nitratos sublinguales y betabloqueantes, se infunde el contraste y se adquieren las imágenes de reposo para análisis de perfusión y anatómico. Se utilizó adenosina a 0,14 mg/kg/min durante 6 minutos, aunque se pueden utilizar otros como dipiridamol con iguales resultados. Finalmente se adquiere la fase de estrés. Una vez adquiridas las imágenes, estas son procesadas en una estación de trabajo. De esta manera es posible analizar anatomía coronaria, perfusión de reposo y estrés y superponer ambas para conocer la repercusión hemodinámica causada por las estenosis.

ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

El análisis de las imágenes obtenidas por PMTC se puede realizar de forma cualitativa y cuantitativa. Para el análisis cuantitativo se destaca la relación de perfusión transmural (TPR), obtenida por adquisición estática⁴³. La TPR es calculada por la media de la densidad en unidades *hounsfield* del subendocardio dividida por la media de la densidad subepicárdica de cada segmento miocárdico. Esa relación mostró que la PMTC es capaz de detectar y cuantificar defectos perfusionales⁴³.

El cálculo de la reserva de flujo coronario (RFC), obtenida por adquisición dinámica, es una técnica en desarrollo con un futuro muy promisorio. Esta presentó fuerte correlación con territorios isquémicos por SPECT, resonancia magnética, y con la presencia de enfermedad coronaria obstructiva significativa por la CCG asociada al FFR⁴⁴.

Ambos métodos son herramientas promisorias para el análisis cuantitativo de la PMTC, pero necesitan validación en estudios multicéntricos.

En el caso de la RMC, el análisis de las imágenes se hace en forma cualitativa, comparando las imágenes obtenidas en reposo con las obtenidas bajo efecto vasodilatador. Una falta de incremento de señal en algún segmento miocárdico en relación al resto del miocardio durante la perfusión de primer paso se considera un defecto de perfusión. Cuando el defecto aparece únicamente bajo efecto vasodilatador, se define como inducible. Existen *softwares* capaces de analizar la señal miocárdica en forma automática y generar curvas de perfusión que permiten realizar un análisis semicuantitativo. Por otro lado, pueden existir artefactos que se presentan en forma frecuente y dificultan el análisis. El de "rebordo oscuro", lineal, que se limita a los segmentos subendocárdicos simula con frecuencia isquemia subendocárdica, aunque a diferencia de esta es transitorio. Para diferenciarlos es importante saber que la aparición de un defecto en reposo y estrés va a favor de un artefacto aunque podría deberse a necrosis, lo que se aclara con secuencias de realce tardío.

CONCLUSIÓN

En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas para el análisis de la perfusión miocárdica. Entre ellas la perfusión miocárdica por RMC y ATC. Cada una de ellas tiene sus propias ventajas, como la capacidad de la ATC de analizar en detalle la anatomía coronaria, o la posibilidad que brinda la RMC de realizar caracterización tisular. A pesar de esto, al ser métodos que requieren de equipamiento, tecnologías y personal capacitado que no se encuentran en todos los centros, estas técnicas no lograron todavía una gran difusión. Teniendo en cuenta la calidad de los resultados, su elevada sensibilidad y especificidad para el diagnóstico de isquemia miocárdica, estas técnicas tienen asegurado un futuro promisorio.

BIBLIOGRAFÍA

- Roger VL, Go AS, Lloyd-Jones DM, Adams RJ, Berry JD, Brown TM, et al. Heart disease and stroke statistics—2011 update: a report from the American Heart Association. *Circulation* 2011;123:e18-e209.
- WHO. The top 10 causes of death. Geneva, Switzerland: World Health Organization; 2013.
- Hachamovitch R, Hayes SW, Friedman JD, Cohen I, Berman DS. Comparison of the short-term survival benefit associated with revascularization compared with medical therapy in patients with no prior coronary artery disease undergoing stress myocardial perfusion single photon emission computed tomography. *Circulation* 2003;107(23):2900-7.
- Meijboom WB, Meijis MF, Schuijf JD, Cramer MJ, Mollet NR, van Mieghem, et al. Diagnostic accuracy of 64-slice computed tomography coronary angiography: a prospective, multicenter, multivendor study. *J Am Coll Cardiol* 2008;52:2135-44.
- Miller JM, Rochitte CE, Dewey M, Arbab-Zadeh A, Niinuma H, Gottlieb I, et al. Diagnostic performance of coronary angiography by 64-row CT. *N Engl J Med* 2008;359(22):2324-36.
- Motoyama S, Kondo T, Sarai M, Sugiura A, Harigaya H, Saro E, et al. Multislice computed tomographic characteristics of coronary lesions in acute coronary syndromes. *J Am Coll Cardiol* 2007;50(4):319-26.
- Gorenou V, Schönemark MP, Hagen A. CT coronary angiography vs invasive coronary angiography in CHD. *GMS Health Technol Assess* 2012;8:Doc02.
- Hadamitzky M, Täubert S, Desève S, Byrne RA, Martinoff S, Schömig A, et al. Prognostic value of coronary computed tomography angiography during 5 years of follow-up in patients with suspected coronary artery disease. *Eur Heart J* 2013;34:3277-85.
- Finn S, Blankenship JC, Alexander KC, Bittl JA, Byrne GJ, Fletcher BJ, et al. ACC/AHA/AAST/PCNA/SCAI/STS Focused Update of the Guideline for the Diagnosis and Management of Patients With Stable Ischemic Heart Disease. A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines, and the American Association for Thoracic Surgery, Preventive Cardiovascular Nurses Association, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and Society of Thoracic Surgeons. *Circulation* 2014;130:1749-67.
- Cook TS, Galperin-Aizenberg M, Litt HL. Coronary and cardiac computed tomography in the emergency room: current status and future directions. *J Thorac Imaging* 2013;28:204-16.
- Maroules CD, Blaha MJ, El-Haddad MA, Ferencik M, Cury RC. Establishing a successful coronary CT angiography program in the emergency department: official writing of the Fellow and Resident Leaders of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (FIRST). *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2013;7:150-6.
- Vieira Fernandes F, Caldeira Cury R. Evaluación de isquemia miocárdica por tomografía computada con múltiples detectores. *Arq Bras Cardiol: Imagem cardiovasc* 2015;28(1):36-44.
- Tonino PA, De Bruyne B, Pijls NH, Siebert U, Ikeno F, van't Veer M, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention. *N Engl J Med* 2009;360:213-224.
- Gaemperli O, Schepis T, Valenta I, Koepfl 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.
- Di Carli MF, Dorbala S, Curillova Z, Kwong RJ, Goldhaber SZ, Rybicki FJ, Hachamovitch R. Relationship between CT coronary angiography and stress perfusion imaging in patients with suspected ischemic heart disease assessed by integrated PET-CT imaging. *J Nucl Cardiol* 2007;14:799-809.
- Klocke FJ, Baird MG, Lorell BH, Bateman TM, Messer JV, Berman DS, et al. ACC/AHA/ASNC guidelines for the clinical use of cardiac radionuclide imaging—executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/ASNC Committee to Revise the 1995 Guidelines for the Clinical Use of Cardiac Radionuclide Imaging). *Circulation* 2003;108:1404-18.
- Parker MW, Iskandar A, Limone B, Perugini A, Kim H, Jones C, et al. Diagnostic accuracy of cardiac positron emission tomography versus single photon emission computed tomography for coronary artery disease: a bivariate meta-analysis. *Circ Cardiovasc Imaging* 2012;5:700-7.
- Cury RC, Magalhães TA, Borges AC, Shiozaki AA, Lemos PA, Junior JS, et al. Dipyridamole stress and rest myocardial perfusion by 64-detector row computed tomography in patients with suspected coronary artery disease. *Am J Cardiol* 2010;106(3):310-5.
- Rochitte C, George R, Chen M, Arbab-Zadeh M, Dewey M, Miller J, et al. Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *European Heart Journal* 2014;35:1120-30.
- Ko BS, Cameron JD, Meredith IT, Leung M, Antonis PR, Nasis A, et al. Computed tomography stress myocardial perfusion imaging in patients considered for revascularization: a comparison with fractional flow reserve. *Eur Heart J* 2012;33(1):67-77.
- Weininger M, Schoepf UJ, Ramachandra A, Fink C, Rowe GW, Costello P, et al. Adenosine stress dynamic real time myocardial perfusion CT an adenosine stress first pass dual energy myocardial perfusion CT. for the assessment of acute chest pain: initial results. *Eur J Radiol* 2012;81(12):3703-10.
- Gould KL, Lipscomb K. Effects of coronary stenoses on coronary flow reserve and resistance. *Am J Cardiol* 1974;34:48-55.
- 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.
- Hundley WG, Bluemke DA, Finn JP, Flamm SD, Fogel MA, Friedrich MG. 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.
- Shapiro MD, Guarraia DL, Moloo J, Cury RC. Evaluation of acute coronary syndromes by cardiac magnetic resonance imaging. *Top Magn Reson Imaging* 2008;19:25-32.
- Karamitsos TD, Dall'Armellina E, Choudhury RP, Neubauer S. Ischemic heart disease: comprehensive evaluation by cardiovascular magnetic resonance. *Am Heart J* 2011;162:16-30.
- Estornell Erill J, González Colino R, Igual Muñoz B, López Lereu MP, Maceira González A, Pastor JM. Detección de isquemia mediante resonancia magnética cardíaca. *Rev Esp Cardiol Supl* 2006;6E:41-8.
- Zamorano J, Delgado J, Almería C, Moreno R, Gómez Sánchez MA, Rodrigo J, et al. Reason for discrepancies in identifying myocardial viability by thallium-201 redistribution, magnetic resonance imaging, and dobutamine echocardiography. *Am J Cardiol* 2002;90(5):455-9.
- Wahl A, Paetsch I, Roethemeyer S, Klein C, Fleck E, Nagel E. High-dose dobutamine-atropine stress cardiovascular MR imaging after coronary revascularization in patients with wall motion abnormalities at rest. *Radiology* 2004;233:210-6.
- Wu KC, Zerhouni EA, Judd RM, Lugo Olivieri CH, Barouch LA, Schulman SP, et al. Prognostic significance of microvascular obstruction by magnetic resonance imaging in patients with acute myocardial infarction. *Circulation* 1998;97:765-72.
- Karamitsos TD, Francis JM, Myerson S, Selvanayagam JB, Neubauer S. The role of cardiovascular magnetic resonance imaging in heart failure. *J Am Coll Cardiol* 2009;54:1407-24.
- Schwitzer J, Nanz D, Kneifel S, Bertschinger K, Buchi M, Knusel PR, et al. Assessment of myocardial perfusion in coronary artery disease by magnetic resonance: a comparison with positron emission tomography and coronary angiography. *Circulation* 2001;103:2230-5.
- Hamon M, Fau G, Née G, Ehtisham J, Morello R, Hamon M. Meta-analysis of the diagnostic performance of stress perfusion cardiovascular magnetic resonance for detection of coronary artery disease. *J Cardiovasc Magn Reson* 2010;12:29.
- Schwitzer J, Wacker CM, Wilke N, Al-Saadi N, Sauer E, Huettler K, et al. Superior diagnostic performance of perfusion-cardiovascular magnetic resonance versus SPECT to detect coronary artery disease: The secondary endpoints of the multicenter multivendor MR-IMPACT II (Magnetic Resonance Imaging for Myocardial Perfusion Assessment in Coronary Artery Disease Trial). *J Cardiovasc Magn Reson* 2012;14:61.
- Soriano CJ, Ridocci F, Estornell J, Jiménez J, Martínez V, De Velasco JA. Noninvasive diagnosis of coronary artery disease in patients with heart failure and systolic dysfunction of uncertain etiology, using late gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol* 2005;45:743-48.
- Klein C, Nekolla SC, Bengel FM, Momose M, Sammer A, Haas F, et al. Assessment of myocardial viability with contrast enhanced magnetic resonance imaging: comparison with positron emission tomography. *Circulation* 2002;105:162-7.
- Ibrahim T, Bülow HP, Hackl T, Hörnke M, Nekolla SG, Breuer M, et al. Diagnostic value of contrast-enhanced magnetic resonance imaging and single-photon emission computed tomography for detection of myocardial necrosis early after acute myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol* 2007;49(2):208-16.
- Kwong RY, Chan AK, Brown KA, Chan CW, Reynolds HG, Tsang S, et al. Impact of unrecognized myocardial scar detected by cardiac magnetic resonance imaging on event-free survival in patients presenting with signs or symptoms of coronary artery disease. *Circulation* 2006;113:2733-43.
- Delgado C, Vázquez M, Oca R, Vilar M, Trinidad C, Sanmartín M. Evaluación de la isquemia miocárdica con tomografía computarizada de doble fuente: comparación con la resonancia magnética. *Rev Esp Cardiol* 2013;66(11):864-70.
- Kramer CM, Barkhausen J, Flamm SD, Kim RJ, Nagel I. Standardized cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR) protocols, society for cardiovascular magnetic resonance: board of trustees task force on standardized protocols. *J Cardiovasc Magn Reson* 2008;10:35.
- Hamon M, Fau G, Née G, Ehtisham J, Morello R, Hamon M. Metaanalysis of the diagnostic performance of stress perfusion cardiovascular magnetic resonance for detection of coronary artery disease. *J Cardiovasc Magn Reson* 2010;12:29.
- Bucher AM, De Cecco N, Schoepf UJ, Wang R, Meinel G, Binukrishnan R. Cardiac CT for myocardial ischaemia detection and characterization—comparative analysis. *Br J Radiol* 2014;87:20140159.
- Bamberg F, Becker A, Schwarz F, Marcus RP, Greif M, von Ziegler F, et al. Detection of hemodynamically significant coronary artery stenosis: incremental diagnostic value of dynamic CT-based myocardial perfusion imaging. *Radiology* 2011;260(3):689-98.