

O papel dos exames de imagem na avaliação da circulação pulmonar*

The role of imaging techniques in the assessment of pulmonary circulation

André Hovnanian, Eduardo Menezes, Susana Hoette,
Carlos Jardim, Dany Jasinowodolinski, Rogério Souza

Resumo

O conhecimento sobre a estrutura e a função da circulação pulmonar evoluiu sensivelmente nas últimas décadas. A utilização de exames de imagem não invasivos para a avaliação da anatomia e da função dos vasos pulmonares e do coração ganhou ainda mais importância com o advento de tratamentos até então indisponíveis. Além do auxílio para o diagnóstico, as informações obtidas têm se mostrado fundamentais para o estabelecimento de prognósticos e como parâmetro de sucesso dos tratamentos. A presente revisão discute os diversos métodos que podem ser utilizados para a avaliação da circulação pulmonar por imagens existentes nos dias de hoje, desde técnicas amplamente disponíveis e de relativa baixa complexidade técnica, como a radiografia de tórax, até métodos complexos e promissores, como a tomografia de impedância elétrica.

Descritores: Circulação pulmonar; Diagnóstico por imagem; Hipertensão pulmonar.

Abstract

Knowledge of the structure and function of pulmonary circulation has evolved considerably in the last few decades. The use of non-invasive imaging techniques to assess the anatomy and function of the pulmonary vessels and heart has taken on added importance with the recent advent of novel therapies. Imaging findings not only constitute a diagnostic tool but have also proven to be essential for prognosis and treatment follow-up. This article reviews the myriad of imaging methods currently available for the assessment of pulmonary circulation, from the simple chest X-ray to techniques that are more complex and promising, such as electrical impedance tomography.

Keywords: Pulmonary circulation; Diagnostic imaging; Hypertension, pulmonary.

Introdução

Muito tempo decorreu para que a fisiologia da circulação pulmonar pudesse ser compreendida. O impedimento esbarrava na impossibilidade do estudo direto do território vascular pulmonar empregando-se as técnicas disponíveis no começo do século XX. Até o fim da década de 30, não havia um método capaz de trazer informações nem sobre a interação cardiopulmonar, nem sobre a relação ventilação/perfusão. O marco histórico deu-se em 1940, quando a integração dos trabalhos fisiológicos de Cournard et al.⁽¹⁾ com o registro radiográfico de Forssmann de 1929,⁽²⁾ documentando a presença de um cateter em seu próprio coração,

culminou com a cateterização do ventrículo direito (VD) e das artérias pulmonares, revolucionando o conhecimento no âmbito da medicina cardiorrespiratória. O acesso às medidas hemodinâmicas de pressão e fluxo, bem como medidas de gases sanguíneos, trouxeram uma oportunidade ímpar para o avanço no estudo da circulação pulmonar, que passou a ser reconhecida como um sistema arterial exclusivo, caracterizado por alta complacência e baixa resistência, capaz de acomodar grandes volumes e altos fluxos sanguíneos com baixas pressões.⁽³⁾

Não foi somente o aspecto fisiológico da circulação pulmonar a ser compreendido pelo

* Trabalho realizado no Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.

Apoio financeiro: Nenhum.

Endereço para correspondência: Rogério Souza. Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, HCFMUSP, Avenida Dr. Enéas de Carvalho Aguiar, 44, 5º andar, Bloco II, CEP 05403-000, São Paulo, SP, Brasil.

Tel/Fax: 55 11 3069-5695. E-mail: rogerio.souza@incor.usp.br

Recebido para publicação em 2/5/2011. Aprovado, após revisão, em 11/5/2011.

estudo hemodinâmico invasivo. O método também se mostrou capaz de revelar a situação anatômica dos vasos pulmonares e das câmaras cardíacas direitas, transformando-se em uma valiosa ferramenta de imagem.

Contemplado o estado anatômico e funcional da circulação pulmonar, consagrou-se a cateterização cardíaca direita no estudo do território vascular pulmonar, especialmente na condição de doença, como na hipertensão pulmonar (HP). Todavia, ainda que considerado o padrão ouro, o método esbarra em importantes limitações para os dias atuais: apresenta caráter invasivo, alto custo e emprego de radiação. Surgiu assim o momento para o desenvolvimento de técnicas não invasivas de monitorização da circulação pulmonar.

Um grande esforço vem sendo realizado para a identificação de métodos de imagem não invasivos que se mostrem capazes de refletir o estado anatômico e funcional da circulação pulmonar de maneira acurada e reproduzível. Contudo, estudar a circulação pulmonar de maneira não invasiva é bastante difícil. Em primeiro lugar, porque nenhum método tem sensibilidade suficiente para avaliar o ponto mais importante da circulação pulmonar, sede da maior parte das doenças, a microcirculação. Em segundo lugar, porque boa parte das informações sobre o território vascular pulmonar é indireta. Doente, a pequena circulação perde a exclusividade de alta complacência e baixa resistência.⁽³⁾ Os efeitos da perda de elasticidade e do aumento de impedância vascular recaem diretamente sobre o VD. Logo, obter e compreender a imagem do VD pode refletir indiretamente a condição da circulação pulmonar. No entanto, também é difícil estudar o VD; as razões encontram-se na sua disposição anatômica em relação ao ventrículo esquerdo (VE), sua geometria crescêntica complexa e suas paredes finas. Tudo isso faz da avaliação da função sistólica, dos volumes e da massa miocárdica um desafio para os métodos de imagem não invasivos.

Os métodos disponíveis empregam diferentes tecnologias de imagem para gerar informação sobre a circulação pulmonar. A radiografia de tórax é o exemplo mais simples. Apesar de suas limitações, o exame pode revelar anormalidades não identificadas clinicamente. Bastante difundidas e praticadas, a ecocardiografia e a

TC das artérias pulmonares (angio-TC) oferecem valiosas informações sobre as câmaras direitas e artérias pulmonares. Novas técnicas de TC e de ressonância magnética (RM) vêm revelando um importante papel no estudo dinâmico da microcirculação em tempo real. A inovadora tomografia de impedância elétrica (TIE) surge como uma ferramenta com potencial promissor.

No presente artigo de revisão, apresentam-se as características, as limitações e o papel das diferentes tecnologias de imagem disponíveis para o estudo da circulação pulmonar, assim como para o diagnóstico e o manejo da HP e do tromboembolismo pulmonar (TEP).

Radiografia de tórax

A radiografia de tórax deve estar entre os exames iniciais na avaliação da HP por seu fácil acesso, baixo custo e grande auxílio no diagnóstico.

Pacientes com diagnóstico confirmado de HP apresentam alterações na radiografia de tórax em mais de 85% dos casos.⁽⁴⁾ As principais alterações encontradas são aumento do calibre das artérias pulmonares no nível dos hilos, em 78% dos casos (Figura 1); afilamento periférico dos vasos, em 62%; e periferia pulmonar hiperlucente, em 9% (Figura 2).

O aumento do calibre das artérias pulmonares no nível dos hilos pode ser avaliado pela medida do diâmetro das artérias interlobares. O limite máximo do diâmetro transversal da artéria interlobar direita, medido de sua face lateral até a coluna de ar do brônquio intermediário, é de 16 mm em homens e de 15 mm em mulheres.⁽⁵⁾ Devido à dificuldade de se realizar a avaliação da artéria pulmonar esquerda na incidência posteroanterior, deve-se avaliar o vaso na radiografia em perfil, partindo da transparência circular criada pelo brônquio do lobo superior esquerdo (que é visto telescopado), até a margem posterior do vaso que cavalga o brônquio; o limite máximo do normal é de 18 mm (Figura 1). O índice hilar torácico (soma da medida separada dos hilos pulmonares em relação ao diâmetro torácico total) maior do que 38% é classicamente descrito, e está presente em aproximadamente 75% dos pacientes com HP (Figura 1).⁽⁶⁾ Raramente pode ser evidenciada a calcificação vascular, localizada geralmente no tronco da artéria pulmonar (TAP) ou em seus ramos hilares. Essa alteração é mais

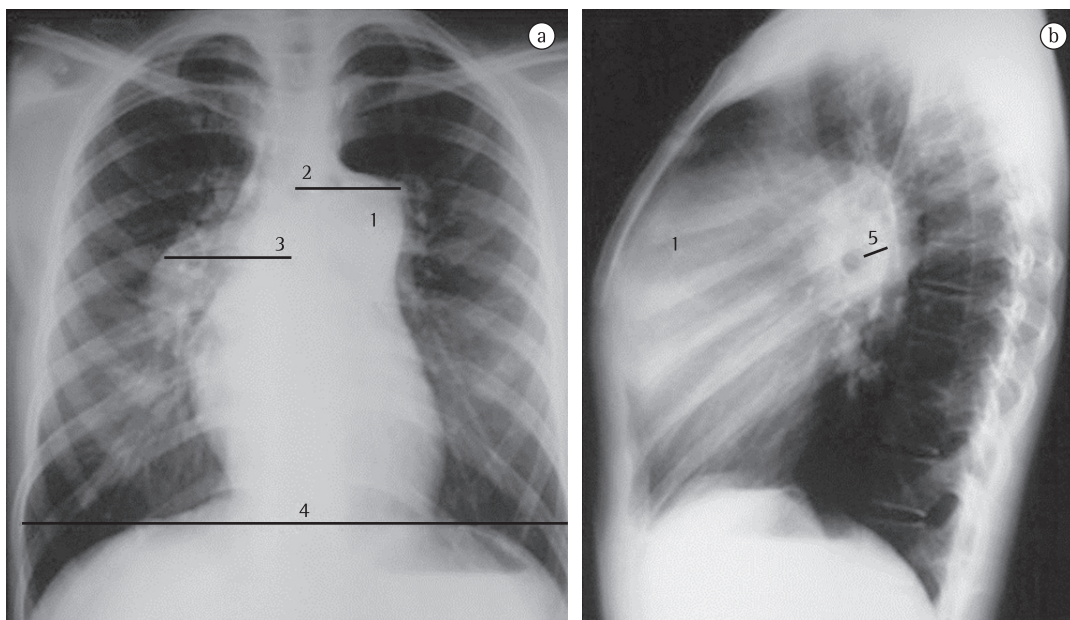


Figura 1 – Radiografia de tórax em incidência posteroanterior (em a) e em perfil (em b) de uma paciente de 28 anos portadora de hipertensão arterial pulmonar idiopática. Notar a dilatação do tronco da artéria pulmonar (1), o índice hilar torácico (2) + (3) > 38% (4) e a artéria pulmonar esquerda > 18 mm (5) no perfil.

frequentemente relacionada a cardiopatias congênicas e embolia central crônica.

A radiografia de tórax pode auxiliar no diagnóstico diferencial com doenças do parênquima pulmonar, insuficiência cardíaca,

DPOC e cifoescoliose, podendo levar a suspeita de doença tromboembólica pulmonar quando se notam áreas de oligemia, consolidações múltiplas sugestivas de infartos pulmonares ou assimetria entre as artérias pulmonares principais (Figura 2).⁽⁷⁾

Embora a presença de HP possa ser sugerida pela radiografia convencional, a especificidade desse método e o grau de acurácia na estimativa de sua gravidade são controversos.⁽⁷⁾ Inúmeros fatores alteram as medidas das artérias interlobares, como, por exemplo, o tamanho do paciente, a distância entre a ampola do raio X e o filme e a distância entre a artéria pulmonar e o filme. Muitos parâmetros utilizados são subjetivos, e as medidas possuem baixa correlação com o grau de HP.⁽⁷⁾

Ainda assim, guardadas suas limitações, a radiografia simples de tórax figura centralmente na investigação inicial de dispneia, bem como na avaliação inicial de pacientes com suspeita de HP.

Ecocardiografia

A ecocardiografia com Doppler transtorácico é o método não invasivo mais sensível para a estimativa da pressão de artéria pulmonar (PAP) na suspeita de HP.⁽⁸⁾

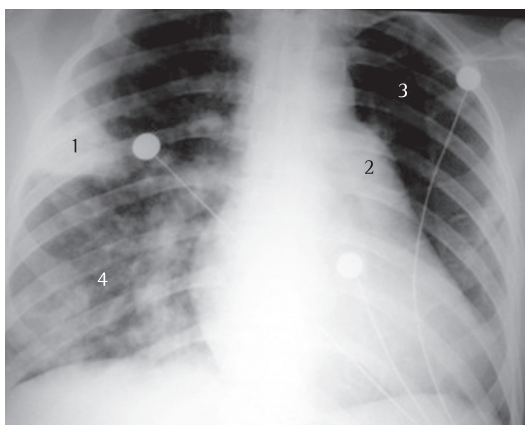


Figura 2 – Radiografia de tórax em incidência anteroposterior de uma paciente de 41 anos. Notar opacidade em cunha subsegmentar no lobo superior direito (1), sugestiva de infarto pulmonar; abaulamento do 2º arco (2), sugestivo de hipertensão pulmonar; oligemia no pulmão esquerdo (3); e opacidades nodulares de limites imprecisos (4). A paciente apresentava coriocarcinoma metastático com embolia tumoral.

Contudo, a fração de ejeção e os volumes do VD não podem ser calculados usando as equações matemáticas normalmente aplicadas ao estudo do VE. Por esse motivo, diversos parâmetros ecocardiográficos foram desenvolvidos para avaliar a função do VD e a condição hemodinâmica da artéria pulmonar. O método mais praticado baseia-se na identificação da *tricuspid regurgitation* (TR, regurgitação tricúspide). A medida da TR fornece uma estimativa do gradiente pressórico entre as câmaras cardíacas direitas. Os primeiros trabalhos datam de meados da década de 80,^(9,10) nos quais fora empregada a técnica de Doppler de onda contínua. A técnica consiste em medir a velocidade de pico da regurgitação tricúspide (V_{TR}), que oferece uma estimativa do

fluxo regurgitante do VD para o átrio direito (Figura 3). Aplicando-se a equação simplificada de Bernoulli ($\Delta P = 4 \times V_{TR}^2$), é possível converter a medida de fluxo em uma estimativa de pressão. Adicionando a esse gradiente pressórico uma estimativa da pressão de átrio direito, obtém-se o valor da pressão sistólica de pico do VD (PsVD), uma aproximação da pressão sistólica de artéria pulmonar (PsAP), desde que ausentes obstruções na via de saída do VD. O resultado de PsVD > 35-40 mmHg é sugestivo de HP.⁽¹⁰⁾ Na presença de fluxo regurgitante baixo, a estimativa da PsVD torna-se menos sensível, porquanto a intensidade de sinal de eco é baixa, o que pode subestimar os valores de pressão. Mas situações de TR muito intensa também podem subestimar as medidas de pressão porque resultam em

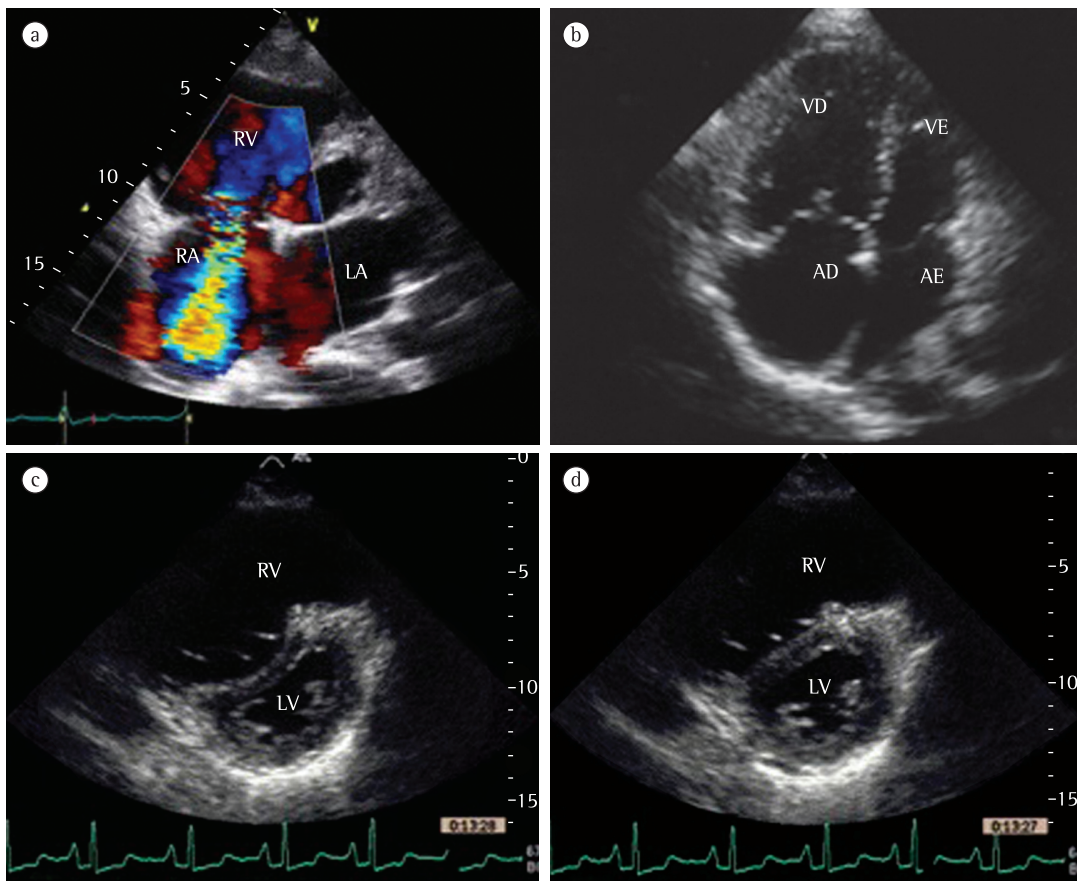


Figura 3 - Imagens de ecocardiografia. Notar a intensidade do sinal do jato de regurgitação tricúspide durante a sístole ventricular com o uso de Doppler contínuo (em a) e a dilatação das câmaras cardíacas direitas (em b). Notar a sobrecarga pressórica no ventrículo direito (RV) levando a movimentação paradoxal do septo interventricular (IV) para a esquerda e redução de tamanho do ventrículo esquerdo (LV) durante a diástole (em c), sendo que durante a sístole ventricular, o septo IV ainda apresenta-se retificado (em d). Imagens cedidas pelo Dr. Fabio Lario, médico assistente do Serviço de Ecocardiografia do Instituto do Coração do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo.

equalização das pressões entre o átrio direito e o VD, dificultando o sinal ao Doppler. Por outro lado, o método também pode superestimar os valores de PsVD.

Outra maneira de estimar a PsAP através da ecocardiografia é a proposta por um grupo de autores,⁽¹¹⁾ que mede o índice de compressibilidade da veia cava inferior. Esses autores observaram uma forte correlação entre o valor de pressão de átrio direito e o referido índice. Com uma medida da pressão de átrio direito mais fidedigna, cai o percentual de erro na estimativa da PsAP pela equação de Bernoulli, tornando o método mais acurado.

Visando melhorar a acurácia do sinal de eco, nos anos 90, a adição de materiais de contraste endovenosos à técnica de Doppler de onda contínua trouxe a oportunidade de melhoria da sensibilidade do método. Materiais, como microbolhas de glicose a 5%, albumina humana sonicada e indocianina verde, aumentam a intensidade do eco sem afetar a V_{TR} . Um grupo de autores observou,⁽¹²⁾ em uma população pequena de 39 pacientes (na maior parte portadores de doenças de câmaras cardíacas esquerdas), que a estimativa da PsAP com o uso de contraste foi menor do que no cateterismo cardíaco direito e apresentou um erro de ± 5 mmHg em 51% dos pacientes e de ± 10 mmHg em 82% desses em relação ao exame invasivo.

No início deste século, outros dois índices ganharam popularidade na avaliação ecocardiográfica de pacientes com HP. Em uma população de 26 pacientes com HP (à época denominada primária), Tei et al.⁽¹³⁾ descreveram um índice combinado da função diastólica e sistólica, denominado *Tei index*, o qual é obtido dividindo-se a soma dos intervalos isovolumétricos sistólico e diastólico pelo tempo de ejeção. O *Tei index* mostrou bom acurácia na medida da PsVD e bom valor preditivo de sobrevida nessa população. Descrito em 1984 para o VE, o índice *tricuspid annular plane systolic excursion* (TAPSE) reflete o deslocamento longitudinal do ânulo tricúspide durante a sístole ventricular e se correlaciona fortemente com a fração de ejeção do VD. Por ser uma medida direta que não depende da geometria ventricular, o TAPSE é bastante reprodutível e de fácil obtenção. Em 2006, um grupo de autores⁽¹⁴⁾ mostrou que o achado de TAPSE < 1,8 cm identifica uma população de

pacientes com disfunção mais avançada de VD e que o valor correlaciona-se com menor sobrevida em 19 meses, particularmente naqueles com hipertensão arterial pulmonar (HAP).

Alguns outros parâmetros ecocardiográficos também podem ser usados na avaliação de HP. A medida do TR no momento da abertura da valva pulmonar é usada para fornecer uma estimativa da pressão diastólica de artéria pulmonar (PdAP).⁽¹⁵⁾ A resistência vascular pulmonar também pode ser estimada e apresenta correlação com a medida hemodinâmica invasiva.⁽¹⁶⁾ A contração atrial e o subsequente aumento da pressão intracavitária resultam na formação de uma onda característica, denominada onda "a". A ausência de onda "a" na curva de PAP ou a redução de seu tamanho é um sinal bastante sugestivo de HP, provavelmente associado à elevação da PdAP; contudo, em pacientes com disfunção de VD, a onda "a" normal não exclui HP. A medida da aceleração de fluxo na artéria pulmonar também apresenta boa acurácia na detecção de PAP elevada, representando uma estimativa da pressão média de artéria pulmonar (PmAP).⁽¹⁷⁾ Além disso, o achado de intervalo de tempo sistólico do VD aumentado figura como um sinal ecocardiográfico bastante específico de HP, mas é pouco sensível.⁽¹⁶⁾ Outros sinais ecocardiográficos, como aumento das câmaras cardíacas direitas, derrame pericárdico, disfunção de VD, movimentação paradoxal do septo interventricular e redução dos volumes de enchimento do VE, também corroboram a presença de HP (Figura 3).⁽¹⁸⁾ Guardadas suas limitações e bem avaliados e interpretados à luz do contexto clínico, todos esses parâmetros podem ter utilidade no diagnóstico e no seguimento de pacientes com HP.

Diferentes valores de PsAP podem ser encontrados em diferentes condições e populações, incluindo idade, nível de exercício, nível de condicionamento físico e estresse. Podem apresentar valores de PsVD acima de 40 mmHg 6% dos indivíduos com mais de 50 anos e 5% daqueles com índice de massa corpórea acima de 30 kg/m².⁽¹⁸⁾ A interpretação de valores discretamente aumentados deve ser, portanto, cautelosa.

No contexto de TEP agudo, a ecocardiografia apresenta um importante valor. Ainda que sem poder diagnóstico, exceto em situação de TEP "a cavaleiro" que pode ser visualizado

com Doppler, o método tem a capacidade de prever a mortalidade associada a um evento tromboembólico e talvez auxiliar no processo de tomada de decisão terapêutica. Ao trazer informações morfológicas e funcionais sobre o VD, a ecocardiografia analisa diretamente a magnitude do efeito da obstrução da circulação pulmonar sobre o mesmo. Analisando a coorte de um grande estudo populacional,⁽¹⁹⁾ um grupo de autores⁽²⁰⁾ observou que o achado de disfunção de VD em ecocardiograma basal apresenta um alto valor preditivo para menor sobrevivência em 30 dias. O risco de morte, apresentado nesse estudo, quase dobrou nos pacientes com tal disfunção. Em uma revisão sistemática,⁽²¹⁾ os resultados combinados de cinco estudos ecocardiográficos sobre o tema revelaram um risco relativo para a predição de morte de 2,5 (IC95%: 1,2-5,5) em pacientes com o achado de disfunção de VD. Esse achado tem grande importância porque identifica um subgrupo de pacientes de alto risco para complicações que, à admissão, apresentam-se estáveis do ponto de vista hemodinâmico.

Em resumo, a ecocardiografia apresenta-se largamente disponível e tem baixo custo e boa segurança. Embora limitada, a ecocardiografia representa uma importante ferramenta diagnóstica e de seguimento na HP e no TEP quando utilizada em combinação com outros marcadores.

Cintilografia de inalação/perfusão

O principal papel da cintilografia de inalação/perfusão nos pacientes com HP é a diferenciação entre hipertensão associada à doença tromboembólica crônica e outras causas de HP.

Assim como na embolia pulmonar aguda,⁽²²⁾ o papel da cintilografia já está bem validado na investigação de pacientes com HP. Em 1994, foi publicado um estudo que reuniu 75 pacientes com causas já documentadas de HP.⁽²³⁾ Dos 25 casos de embolia pulmonar crônica, houve resultados de alta probabilidade em 24 (96%) e de probabilidade intermediária em 1. Por outro lado, dos 35 casos de HP primária, houve resultados de baixa probabilidade em 33 (94%), de probabilidade intermediária em 1 e de alta probabilidade em 1. Nos casos de HP secundária (não tromboembólica), o resultado foi menos acurado: dos 15 casos estudados, houve

resultados de baixa probabilidade em 10 (67%), de probabilidade intermediária em 3 (20%) e de alta probabilidade em 2 (13%). Devido ao pior rendimento nesse último grupo de pacientes, a grande importância da cintilografia, no contexto da HP, é a de descartar a doença tromboembólica, sendo que um exame de baixa probabilidade efetivamente exclui essa patologia. Outro estudo demonstrou que, mesmo quando comparada à TC com multidetectores (TCMD), a sensibilidade da cintilografia é muito superior a dessa na detecção de embolia pulmonar crônica (96% vs. 51%).⁽²⁴⁾

O padrão da cintilografia nos pacientes com HP primária usualmente é o de pobre perfusão na periferia pulmonar (*mottled pattern*).⁽²⁵⁾ Existe uma certa correlação entre o grau de alteração perfusional na HP primária e o prognóstico do paciente.⁽²⁵⁾

Ocasionalmente múltiplos pequenos defeitos perfusionais podem ser evidenciados em doença veno-oclusiva pulmonar, hemangiomatose capilar pulmonar, mediastinite fibrosante, vasculite pulmonar e sarcoma de artéria pulmonar.

A última diretriz para HP⁽²⁶⁾ coloca a cintilografia como uma modalidade diagnóstica de escolha para afastar o diagnóstico de TEP crônico. O encontro de resultado negativo ou de baixa probabilidade em um paciente com HP praticamente afasta o diagnóstico, ao passo que o resultado de alta probabilidade tem uma especificidade de 96% para o diagnóstico de TEP crônico através do encontro de um ou mais defeitos segmentares de perfusão (Figura 4).⁽²⁶⁾

TC

A obtenção de imagem com a técnica de TC consiste essencialmente na rotação de um sistema de tubo de raios X e de detectores ao redor do corpo, trazendo uma inovação em relação à radiografia simples: a visualização em corte e sem sobreposição das diversas estruturas anatômicas. Contudo, por ser um sistema pesado, a velocidade de aquisição da imagem sempre foi uma importante limitação do método, prejudicando particularmente o estudo das estruturas torácicas sempre em constante movimento.

O desenvolvimento de tomógrafos com múltiplos detectores, também denominados *multislice*, revolucionou a história da TC, pondo

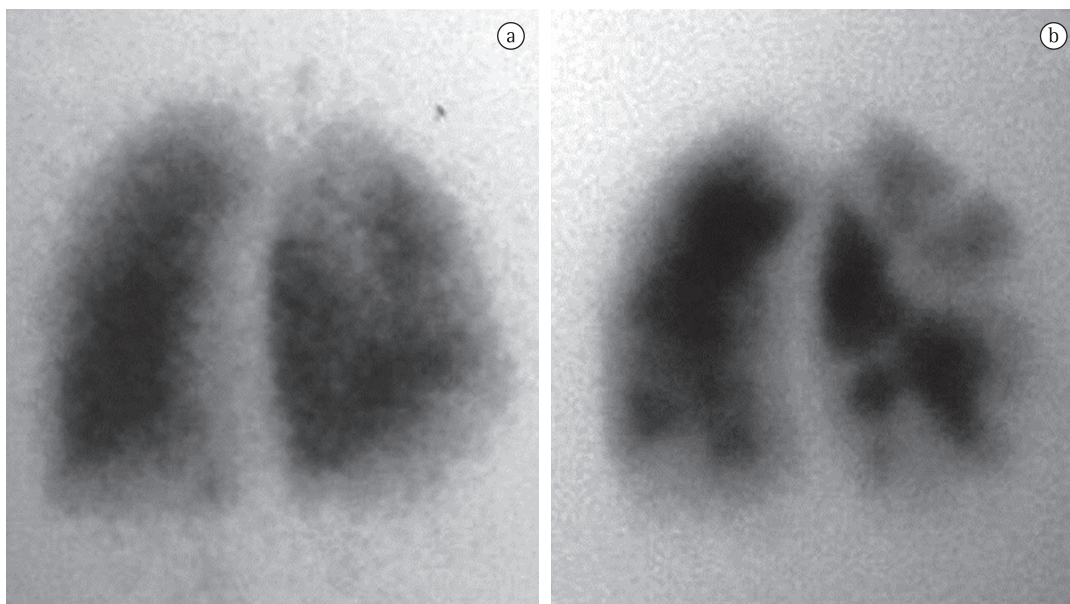


Figura 4 – Imagens de cintilografia pulmonar de ventilação-perfusão de um paciente de 59 anos em investigação etiológica de hipertensão pulmonar com angiotomografia de artérias pulmonares com resultado normal. Imagens em posição oblíqua posterior direita: ventilação (em a) e perfusão (em b). Notar a distribuição normal da ventilação e os múltiplos defeitos segmentares bilaterais de perfusão, predominantes em pulmão direito. O paciente recebeu o diagnóstico de tromboembolismo pulmonar crônico distal.

fim à prolongada limitação temporal. Quando comparada à tecnologia convencional, a TCMD permite que um volume maior de tecidos ou de estruturas seja representado em cortes mais finos (0,60-1,25 mm vs. 2-5 mm) em tempos mais curtos (2-8 s vs. 18-30 s), aprimorando a resolução espacial e reduzindo a ocorrência de artefatos de movimento, tudo isso em uma única pausa inspiratória.

No estudo da circulação pulmonar, a combinação da tecnologia da TCMD com a injeção automatizada de contraste intravenoso possibilita a distinção anatômica das estruturas vasculares e a opacificação dos vasos pulmonares com grande qualidade. Além disso, a característica quase isotrópica dos *voxels* aperfeiçoa sensivelmente a reformatação da imagem, otimizando a obtenção de imagens multiplanares.

No âmbito da HP, a angio-TC apresenta importância diagnóstica e tem grande valor na investigação etiológica.⁽²⁷⁾ O método permite o estudo da imagem do VD, do TAP e da circulação pulmonar periférica.

A imagem do VD pode ser visualizada com alta resolução espacial na angio-TC. Dilatação, hipertrofia, retificação e abaulamento do

septo interventricular são achados que se correlacionam fortemente com a presença de HP (Figura 5). No entanto, tradicionalmente, a imagem tomográfica do VD é apenas estática, acarretando importante limitação no seu estudo funcional. A aplicação do *gating* eletrocardiográfico, ou seja, o acoplamento da aquisição da imagem com o fenômeno elétrico cardíaco, traz uma solução parcial para essa limitação, permitindo a reconstrução da imagem em qualquer fase do ciclo cardíaco e o acesso a medidas de função e volumes ventriculares.⁽²⁸⁾

Tecnicamente bem realizada, a angio-TC fornece imagens com grande precisão anatômica do TAP e oferece a possibilidade de sua avaliação morfológica. A medida do TAP, em cortes axiais, é realizada no nível de sua bifurcação ortogonalmente ao maior eixo e lateralmente à aorta ascendente. Em um estudo de 32 casos de HP,⁽²⁹⁾ o diâmetro do TAP de 28,6 mm associou-se fortemente à presença de HP observada por estudo hemodinâmico invasivo. Em uma população pequena de 5 casos de HP associada ao HIV,⁽³⁰⁾ a medida de mais de 29 mm revelou sensibilidade de 87% e especificidade de 89% no diagnóstico de HP; associado à presença de relação artéria/

brônquio > 1 em mais de três lobos pulmonares, esse achado fez o método atingir especificidade de 100%.⁽³¹⁾ Achados bastante semelhantes foram observados em um estudo retrospectivo de pacientes com HP associada a doenças do parênquima pulmonar.⁽³¹⁾

No estudo da circulação pulmonar periférica, a angio-TC é capaz de acessar de maneira uniforme e com opacificação quase constante vasos de até 2-3 mm com alta resolução e sem sobreposição de imagens. Essa característica contribui fortemente para o estudo anatômico da circulação pulmonar, mas quando se trata de visualização e quantificação de fluxo na microcirculação pulmonar, novamente o método perde no aspecto funcional. A limitação ao fluxo de sangue na microcirculação por ocasião de vasoconstrição e remodelamento vascular, característicos da HP, pode ser visualizada na TCAR, em janela de parênquima, como imagem de perfusão em mosaico, presente em pacientes com HP de diferentes causas (Figura 5).⁽³²⁾ Podem-se observar também áreas de maior atenuação do parênquima pulmonar que podem ser atribuídas à redistribuição de fluxo na microcirculação quando o número e o calibre dos vasos encontram-se aumentados nessas regiões. Ambos os fenômenos, perfusão em mosaico e redistribuição de fluxo, são achados particularmente mais prevalentes no TEP crônico. Uma nova tecnologia de imagem, a *dual-source* TC, na qual a imagem é obtida utilizando-se dois tubos de raios X com diferentes quilovoltagens, é capaz de acessar

regionalmente a perfusão pulmonar com maior acurácia, trazendo uma informação funcional.⁽³³⁾ Essa tecnologia possibilita a obtenção do estudo angiotomográfico e perfusional em um único exame.

Bastante estudada, a angio-TC conquistou um amplo espaço na avaliação do TEP agudo, tornando-se um exame tão acurado quanto à angiografia pulmonar, mas desprovido do caráter invasivo. Uma série de estudos coloca a angio-TC como a primeira modalidade diagnóstica de imagem no estudo do TEP agudo.⁽³⁴⁻³⁶⁾ O motivo está nas suas diversas vantagens: sua alta resolução permite a visualização de artérias e falhas de enchimento até a porção distal da vasculatura pulmonar, atingindo vasos subsegmentares de 2-3 mm (Figura 6); apresenta ótima concordância interobservador, bastante superior ao estudo cintilográfico; e sua sensibilidade é tão alta que um exame negativo pode indicar a suspensão de terapia anticoagulante com segurança.⁽³⁷⁾

Deve-se ter cuidado, no entanto, com os perigos inerentes ao método. Fatores técnicos ou fisiopatológicos podem levar a interpretação de pseudofalhas de enchimento, trazendo resultados falso-positivos. Devem ser levados em consideração a possibilidade de artefato de movimento em pacientes taquicárdicos, o intervalo de tempo entre a injeção do contraste e a aquisição da imagem e a ocorrência do fenômeno de vasoconstrição hipóxica em regiões mal aeradas. O aparecimento de tomógrafos de 64 canais abriu espaço para outro perigo:

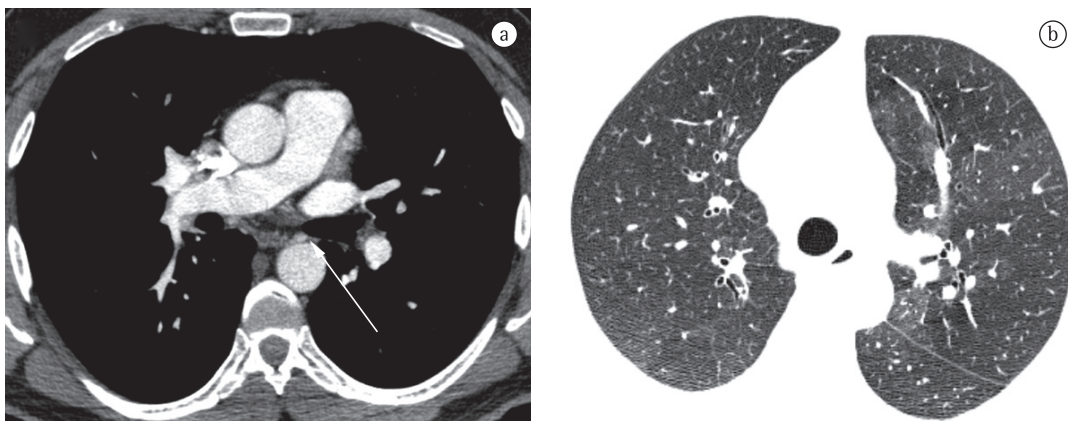


Figura 5 - Imagens de angio-TC (em a) e TCAR (em b) de um paciente portador de hipertensão pulmonar trombótica. Notar em a o aumento do tronco da artéria pulmonar e o aumento do calibre das artérias brônquicas (seta). Em b, imagem de perfusão em mosaico.

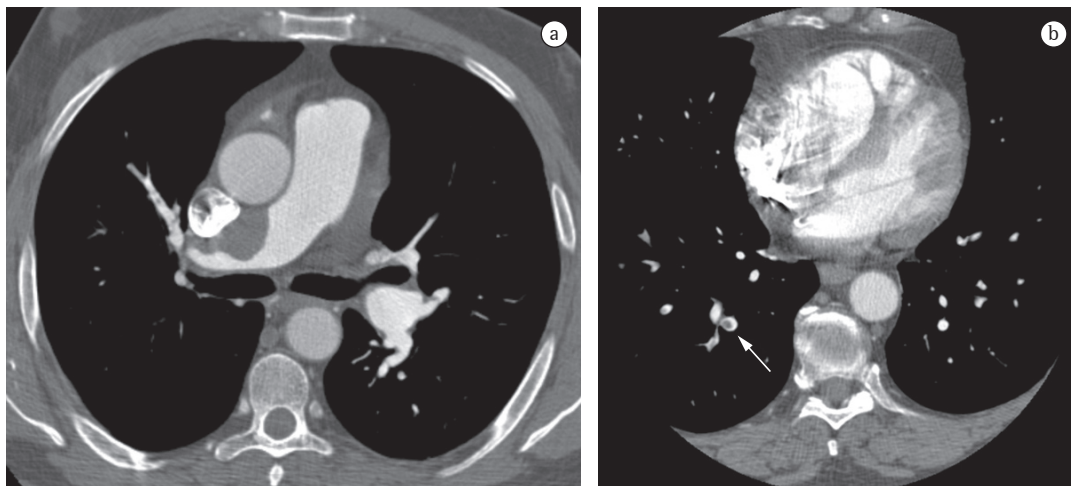


Figura 6 – Imagens de angio-TC de pacientes com tromboembolismo crônico (em a) e agudo (em b). Notar em a o aumento do tronco da artéria pulmonar e imagem de trombo excêntrico na artéria pulmonar direita. Em b, a seta demonstra imagem de falha de enchimento central em um ramo arterial subsegmentar.

a possibilidade de excesso de resultados falso-positivos, que foi afastada em um estudo recente.⁽³⁸⁾

Ao analisar com alta resolução a imagem do VD, a angio-TC pode figurar como um marcador na estratificação de risco de pacientes com TEP agudo, tradicionalmente feita por ecocardiografia.⁽³⁹⁾ Está bem estabelecido que o encontro de disfunção de VD determinada por ecocardiografia identifica um subgrupo de pacientes com alto risco para complicações, pior prognóstico e maior mortalidade. A reconstrução multiplanar da imagem do coração em quatro câmaras⁽⁴⁰⁾ ou a obtenção de cortes dos ventrículos em plano axial⁽⁴¹⁾ permite o cálculo de uma razão simples: diâmetro diastólico do VD ÷ diâmetro diastólico do VE (razão VD/VE). O encontro de um valor > 0,90 correlaciona-se fortemente com a disfunção de VD determinada por ecocardiografia⁽⁴²⁾ e traz um potencial de custo-efetividade e de marcador prognóstico para a angio-TC. Em uma recente revisão sistemática analisando os resultados combinados de dois estudos de tomografia sobre o tema,⁽²¹⁾ encontrou-se um risco relativo para a predição de morte de 2,3 (IC95%: 0,90-5,98) quando do achado de disfunção de VD. Em situação de TEP crônico distal, por outro lado, a angio-TC apresenta limitações, dando lugar à cintilografia de inalação/perfusão como exame de escolha.⁽⁴³⁾

RM

A RM traz grandes perspectivas no estudo da circulação pulmonar. O método concentra excelentes características, como baixa dependência de operadores, grande acurácia e reprodutibilidade entre estudos.⁽⁴⁴⁾

A RM pode ser utilizada para o estudo do parênquima e da circulação pulmonar, assim como para a análise dinâmica do coração. No estudo do parênquima pulmonar, a RM acompanha-se de algumas desvantagens: baixa densidade de prótons no parênquima, resultando em uma relação sinal/ruído baixa; perda de sinal por ocasião dos movimentos fisiológicos dos órgãos intratorácicos; e a combinação de ar e de tecidos moles, gerando uma maior suscetibilidade a artefatos. Apesar desses problemas, alguns ajustes na forma de aquisição da imagem fazem da RM uma ferramenta interessante no estudo do parênquima pulmonar, de tal forma que alguns estudos sugerem a equivalência dos seus achados aos da TC para aplicações específicas, não devendo, no entanto, ser empregada ainda para essa finalidade na rotina clínica.⁽⁴⁵⁾ Ainda não existe uma avaliação sistemática da RM no estudo do parênquima de pacientes com HP.

Desde 1993, quando foi publicada a técnica batizada como angiorressonância magnética (ARM) contrastada em três dimensões,⁽⁴⁶⁾ muitos avanços foram realizados no estudo dos vasos intratorácicos. Essa técnica consiste na administração de contraste paramagnético com

aquisições ultrarrápidas de imagem ponderadas em T1, resultando em alta resolução espacial ao longo de períodos de apneia inferiores a 30 s.

Dentre as utilidades da ARM pulmonar, destaca-se a grande importância na detecção de embolia pulmonar aguda ou crônica. Nesse contexto, em um estudo publicado em 2002,⁽⁴⁷⁾ avaliaram-se 141 pacientes com suspeita de TEP e com cintilografia perfusional alterada. A sensibilidade e a especificidade da ARM para embolias segmentares e centrais mostraram-se comparáveis às da arteriografia pulmonar (84% e 100% respectivamente). Entretanto, para embolias subsegmentares, a sensibilidade desse método foi baixa (40%). Outros estudos^(48,49) confirmam esses achados, tendo a ARM um papel muito interessante para os pacientes com suspeita de TEP que possuam contraindicações ao uso de contraste iodado ou que desejem evitar a radiação ionizante. Outra aplicação promissora se refere à avaliação não invasiva de pacientes com HAP. Um grupo de autores⁽⁵⁰⁾ avaliou o emprego da RM para a avaliação de pacientes respondedores à prova de vasodilatação com NO inalado. Analisando a distensibilidade média da artéria pulmonar, observou-se uma sensibilidade de 100% na identificação de pacientes respondedores, com uma especificidade de 56% quando comparada à avaliação hemodinâmica com cateter de artéria pulmonar.

O estudo funcional da microcirculação também é possível através da RM. Um grupo de autores⁽⁵¹⁾ comparou alterações perfusionais encontradas na RM e na cintilografia de perfusão pulmonar em pacientes com embolia pulmonar, pneumonia e DPOC. Os exames eram avaliados por dois observadores, sendo evidenciada uma correlação regular (variação do coeficiente kappa: 0,52-0,57) entre as duas técnicas.

O grande emprego da RM na HP continua sendo o estudo do VD. Essa técnica permite a aquisição de imagens dinâmicas de contração miocárdica com alta resolução e não depende de condições anatômicas (enfisema pulmonar, obesidade, etc.), como acontece na ecocardiografia.

A RM cardíaca tem especial importância no paciente com HP no estudo dos seguintes parâmetros (Figura 7):

- Morfologia ventricular: imagens tomográficas que permitem a avaliação do tamanho e do volume das câmaras

cardíacas, da espessura da parede e da massa muscular. O volume diastólico final do VD encontra-se significativamente aumentado na HP. Um grupo de autores⁽⁵²⁾ estudou o papel da RM cardíaca na avaliação prognóstica de pacientes com HP e observou que pacientes com aumento do volume diastólico do VD e redução do volume sistólico do VD ou do volume diastólico do VE apresentam pior prognóstico em seguimento de 12 meses. O estudo sugere que a RM pode ser utilizada também como ferramenta de seguimento e de avaliação da resposta ao tratamento.⁽⁵²⁾ A RM também pode analisar a massa ventricular direita, que, por ocasião do aumento de pós-carga, encontra-se significativamente aumentada. Evidências sugerem que o índice de massa do VD tenha boa correlação com a PmAP.⁽⁵³⁾

- Função ventricular: imagens dinâmicas que reproduzem todo o ciclo cardíaco podem ser obtidas com o *gating* eletrocardiográfico e apresentam grande precisão e reprodutibilidade na análise da função ventricular.⁽⁵⁴⁾ Outra ferramenta interessante é a avaliação da disfunção diastólica do VD e o comportamento desse mediante tratamento.
- Configuração do septo interventricular: distorções da morfologia normal do septo interventricular podem ser observadas em pacientes com HP. Essas alterações podem ser quantificadas e possuem correlação com a PmAP e com o prognóstico.⁽⁵⁵⁾
- Análise de fluxos: através do uso de contrastes e de aquisição sequencial de imagens, podem ser obtidas medidas de fluxo volumétrico, o que oferece dados para medida do débito cardíaco, avaliação de regurgitações valvulares, padrões de enchimento diastólico dos ventrículos e quantificação de *shunts* cardíacos. A aquisição de medidas do débito cardíaco por RM cardíaca possui vantagens sobre a termodiluição por não ser invasiva, por depender menos de variações de um ciclo cardíaco para o outro e por não sofrer interferências tão pronunciadas da TR.⁽⁵⁶⁾
- Avaliação de viabilidade miocárdica: a avaliação do contraste miocárdico após a infusão de gadolínio pode evidenciar

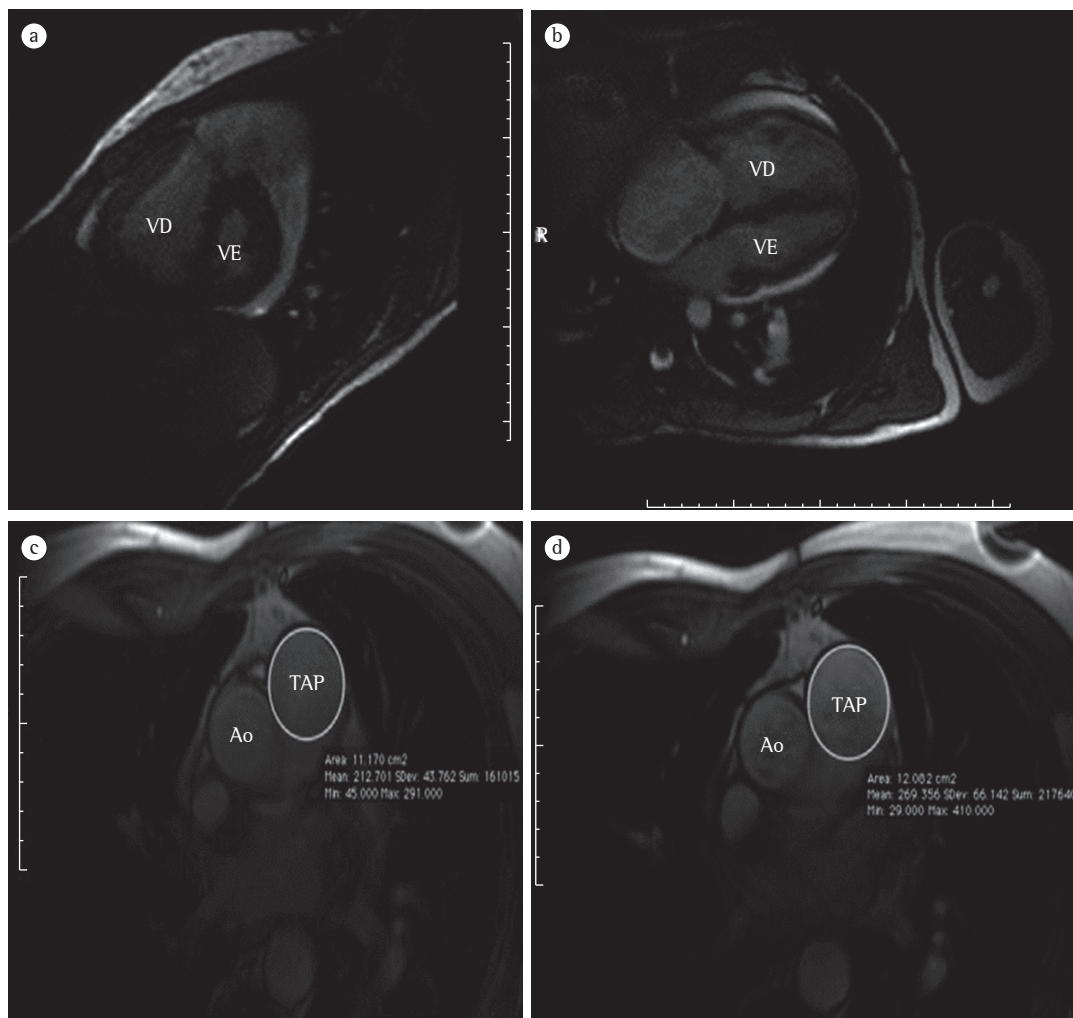


Figura 7 - Imagens de ressonância magnética de um paciente de 35 anos portador de hipertensão arterial pulmonar idiopática. Em a e b, notar a dilatação do ventrículo direito (VD), a retificação do septo interventricular e o aumento de massa do VD. Imagens de aquisição em plano axial ao final da diástole (em c) e ao final da sístole (em d). Notar o diâmetro do tronco da artéria pulmonar (TAP) maior do que o da aorta (Ao), a diferença de calibre do TAP durante a diástole e a sístole, permitindo uma estimativa da pulsatilidade do TAP, e a maior contrastação do TAP durante a sístole ventricular.

diretamente áreas não viáveis no miocárdio. Um grupo de autores⁽⁵⁷⁾ descreveu um padrão de realce miocárdico em pacientes com HP. Observou-se um retardo de contrastação em pontos de inserção septal do VD e no septo interventricular em 23 de 25 pacientes estudados. A intensidade dos achados teve correlação com pior função do VD.

O método ainda possui um potencial promissor no estudo molecular tanto da circulação pulmonar quanto do coração. É possível, por exemplo, avaliar e quantificar áreas e o grau de apoptose in vivo.⁽⁵⁸⁾

A RM apresenta alto custo e menor disponibilidade em nosso meio. Ainda que preliminares, os achados sobre sua aplicação como ferramenta diagnóstica e prognóstica no estudo da HP parecem ter um potencial promissor.

TIE

Diversas terminologias podem ser empregadas para definir o conceito de impedância elétrica: a relação entre o gradiente de voltagem gerado em um circuito elétrico e a corrente elétrica resultante, a combinação de resistividade e de

reatância e a oposição total que um circuito oferece ao fluxo de corrente alternada para uma determinada frequência. Essencialmente, quanto mais resistivo (ou menos condutor) um circuito, uma estrutura ou mesmo um tecido for, maior será seu valor de impedância elétrica.

Um sistema desenvolvido na década de 80 no Reino Unido possibilita a medida do valor de impedância de uma estrutura ou de um tecido através da distribuição em linha de pares de eletrodos colocados em contato com sua superfície. O direcionamento de correntes elétricas de baixa amperagem e baixa frequência ao longo desses eletrodos gera um gradiente de voltagem, que, por sua vez, resulta em um fluxo de elétrons que pode ser estimado ou medido. Um algoritmo matemático de reconstrução de imagem é capaz de transformar o valor medido de impedância elétrica em pixels, o elemento mínimo para a formação de imagem. Distribuindo os eletrodos transversalmente em faixa, pode-se obter uma imagem transversa e seccional da distribuição de impedância elétrica referente ao plano geométrico contemplado pelos eletrodos. Esse sistema é a TIE.

As propriedades biológicas do tórax trazem uma grande oportunidade de estudo com a TIE, uma vez que ar e sangue, dois materiais com resistividades opostas, compartilham do mesmo compartimento e variam seus volumes ritmicamente ao longo do ciclo cardiorrespiratório. A variação periódica de volume sanguíneo intratorácico por ocasião do trabalho cardíaco e a distensão da microcirculação pulmonar resultante da passagem de sangue pelos vasos pulmonares estão associadas à variação cíclica das propriedades elétricas do parênquima pulmonar ao longo do tempo. O aumento do volume de sangue (cinco vezes menos resistivo que o ar) no parênquima pulmonar resulta em uma diminuição de 1% na impedância elétrica pulmonar.

A TIE pode visualizar variações regionais de fluxo sanguíneo de duas maneiras: na primeira, baseada na técnica de diluição indicadora, um fluido eletricamente condutor é usado como material de contraste à semelhança dos estudos de TC e RM. O segundo método analisa as variações de impedância no parênquima pulmonar resultantes da variação de volume sistólico ao longo do ciclo cardíaco, ciclo a ciclo. O acoplamento da aquisição da imagem

com a onda R do eletrocardiograma (técnica *ECG-gated*) filtra as oscilações relacionadas à ventilação, obtendo-se apenas aquelas devidas à circulação. A imagem resultante provavelmente reflete a pulsatilidade ou a distensibilidade da microcirculação pulmonar.

A HAP constitui um ótimo modelo de doença na microcirculação pulmonar. O remodelamento vascular afeta diretamente as propriedades de distensibilidade da microcirculação. Reduzida a complacência vascular com conseqüente menor acomodação de volume, a variação de impedância elétrica na HP provavelmente encontra-se também diminuída. A TIE foi empregada em pacientes com HP para avaliar a resposta vascular ao teste de vasodilatador com epoprostenol durante um estudo hemodinâmico invasivo.⁽⁵⁹⁾ De uma população de 8 pacientes, 7 não atingiram critério de resposta; nesses pacientes, a TIE não mostrou variação de impedância. No único paciente que apresentou resposta ao teste de vasodilatador, observou-se uma forte correlação entre o aumento da variação de impedância e a queda na PmAP e na resistência vascular pulmonar, independente do aumento no volume sistólico. Em um segundo estudo,⁽⁶⁰⁾ analisaram-se as diferenças no sinal de impedância da circulação pulmonar em 21 pacientes com HAP idiopática (HAPI) e em 30 indivíduos saudáveis. O resultado observado foi uma redução na variação de impedância no grupo HAPI, trazendo subsídios para a aplicação da TIE no estudo da circulação pulmonar e da HP.

Um tomógrafo de 32 eletrodos vem sendo desenvolvido no Brasil para o estudo da perfusão pulmonar. Alguns achados de sua aplicação no contexto de HAPI (Figura 8) são animadores e demonstram não só a redução do valor de impedância elétrica, tal qual nos dois estudos anteriores, como também a alteração da morfologia da onda de impedância, o que pode se correlacionar com a onda de pulso da circulação pulmonar.

Referências

1. Courmand A, Riley RL, Breed ES, Baldwin ED, Richards DW, Lester MS, et al. Measurement of cardiac output in man using the technique of catheterization of the right auricle or ventricle. *J Clin Invest.* 1945;24(1):106-16.

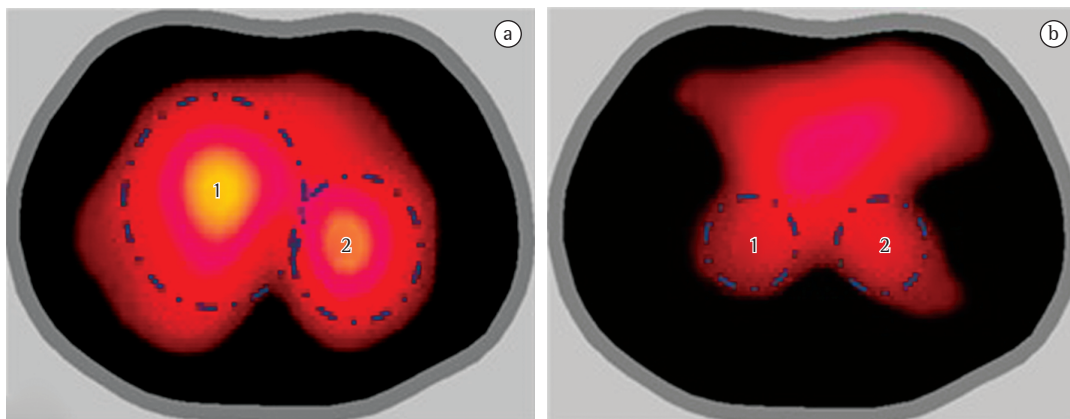


Figura 8 – Imagens de tomografia de impedância elétrica obtidas na altura do 4º espaço intercostal de uma paciente de 27 anos com resultado normal (em a) e de uma paciente de 31 anos portadora de hipertensão arterial pulmonar idiopática há 20 anos (em b). Notar a diferença no sinal de variação de impedância elétrica (intensidade e extensão) nas áreas 1 e 2, provavelmente associada à complacência vascular normal (em a) e reduzida (em b).

- Steckelberg JM, Vlietstra RE, Ludwig J, Mann RJ, Werner Forssmann (1904--1979) and his unusual success story. *Mayo Clin Proc.* 1979;54(11):746-8.
- Souza R. Assessment of compliance in pulmonary arterial hypertension. *Eur Heart J.* 2008;29(13):1603-4.
- Paciocco G, Kazerooni E, Bossone E, Ricciardi M, Cascade E, Rubenfire M. Radiologic features in primary pulmonary hypertension. *Chest.* 1998;114(4 Suppl):375S.
- Lupi HE, Horwitz S, Tejada VM, Dumont C, Galland F. Indications and radiological measurements in the evaluation of pulmonary artery hypertension [Article in Spanish]. *Arch Inst Cardiol Mex.* 1975;45(1):34-42.
- Lupi E, Dumont C, Tejada VM, Horwitz S, Galland F. A radiologic index of pulmonary arterial hypertension. *Chest.* 1975;68(1):28-31.
- Trow TK, McArdle JR. Diagnosis of pulmonary arterial hypertension. *Clin Chest Med.* 2007;28(1):59-73, viii.
- Celermajer DS, Marwick T. Echocardiographic and right heart catheterization techniques in patients with pulmonary arterial hypertension. *Int J Cardiol.* 2008;125(3):294-303.
- Berger M, Haimowitz A, Van Tosh A, Berdoff RL, Goldberg E. Quantitative assessment of pulmonary hypertension in patients with tricuspid regurgitation using continuous wave Doppler ultrasound. *J Am Coll Cardiol.* 1985;6(2):359-65.
- Kitabatake A, Inoue M, Asao M, Masuyama T, Tanouchi J, Morita T, et al. Noninvasive evaluation of pulmonary hypertension by a pulsed Doppler technique. *Circulation.* 1983;68(2):302-9.
- Pepi M, Tamborini G, Sganzerla P, Moruzzi P, Galli C, Fiorentini C, et al. The noninvasive estimation of right atrial pressure improves the Doppler evaluation of the pulmonary systolic pressure [Article in Italian]. *Cardiologia.* 1991;36(2):117-22.
- Tokushima T, Utsunomiya T, Yoshida K, Ogawa T, Kido K, Ohtsubo Y, et al. Estimation of the systolic pulmonary arterial pressure using contrast-enhanced continuous-wave Doppler in patients with trivial tricuspid regurgitation. *Jpn Heart J.* 1999;40(3):311-20.
- Tei C, Dujardin KS, Hodge DO, Bailey KR, McGoon MD, Tajik A, et al. Doppler echocardiographic index for assessment of global right ventricular function. *J Am Soc Echocardiogr.* 1996;9(6):838-47.
- Forfia PR, Fisher MR, Mathai SC, Houston-Harris T, Hemnes AR, Borlaug BA, et al. Tricuspid annular displacement predicts survival in pulmonary hypertension. *Am J Respir Crit Care Med.* 2006;174(9):1034-41.
- Lanzarini L, Fontana A, Lucca E, Campana C, Klersy C. Noninvasive estimation of both systolic and diastolic pulmonary artery pressure from Doppler analysis of tricuspid regurgitant velocity spectrum in patients with chronic heart failure. *Am Heart J.* 2002;144(6):1087-94.
- Selimovic N, Rundqvist B, Bergh CH, Andersson B, Petersson S, Johansson L, et al. Assessment of pulmonary vascular resistance by Doppler echocardiography in patients with pulmonary arterial hypertension. *J Heart Lung Transplant.* 2007;26(9):927-34.
- Bossone E, Duong-Wagner TH, Paciocco G, Oral H, Ricciardi M, Bach DS, et al. Echocardiographic features of primary pulmonary hypertension. *J Am Soc Echocardiogr.* 1999;12(8):655-62.
- McQuillan BM, Picard MH, Leavitt M, Weyman AE. Clinical correlates and reference intervals for pulmonary artery systolic pressure among echocardiographically normal subjects. *Circulation.* 2001;104(23):2797-802.
- Goldhaber SZ, Visani L, De Rosa M. Acute pulmonary embolism: clinical outcomes in the International Cooperative Pulmonary Embolism Registry (ICOPER). *Lancet.* 1999;353(9162):1386-9.
- Kucher N, Rossi E, De Rosa M, Goldhaber SZ. Prognostic role of echocardiography among patients with acute pulmonary embolism and a systolic arterial pressure of 90 mm Hg or higher. *Arch Intern Med.* 2005;165(15):1777-81.
- Sanchez O, Trinquart L, Colombet I, Durieux P, Huisman MV, Chatellier G, et al. Prognostic value of right ventricular dysfunction in patients with

- haemodynamically stable pulmonary embolism: a systematic review. *Eur Heart J*. 2008;29(12):1569-77.
22. Value of the ventilation/perfusion scan in acute pulmonary embolism. Results of the prospective investigation of pulmonary embolism diagnosis (PIOPED). The PIOPED Investigators. *JAMA*. 1990;263(20):2753-9.
 23. Worsley DF, Palevsky HI, Alavi A. Ventilation-perfusion lung scanning in the evaluation of pulmonary hypertension. *J Nucl Med*. 1994;35(5):793-6.
 24. Tunariu N, Gibbs SJ, Win Z, Gin-Sing W, Graham A, Gishen P, et al. Ventilation-perfusion scintigraphy is more sensitive than multidetector CTPA in detecting chronic thromboembolic pulmonary disease as a treatable cause of pulmonary hypertension. *J Nucl Med*. 2007;48(5):680-4.
 25. Fukuchi K, Hayashida K, Nakanishi N, Inubushi M, Kyotani S, Nagaya N, et al. Quantitative analysis of lung perfusion in patients with primary pulmonary hypertension. *J Nucl Med*. 2002;43(6):757-61.
 26. Hoepfer MM, Barberà JA, Channick RN, Hassoun PM, Lang IM, Manes A, et al. Diagnosis, assessment, and treatment of non-pulmonary arterial hypertension pulmonary hypertension. *J Am Coll Cardiol*. 2009;54(1 Suppl):S85-96.
 27. Ley S, Kreitner KF, Fink C, Heussel CP, Borst MM, Kauczor HU. Assessment of pulmonary hypertension by CT and MR imaging. *Eur Radiol*. 2004;14(3):359-68.
 28. McLure LE, Peacock AJ. Imaging of the heart in pulmonary hypertension. *Int J Clin Pract Suppl*. 2007;(156):15-26.
 29. Kuriyama K, Gamsu G, Stern RG, Cann CE, Herfkens RJ, Brundage BH. CT-determined pulmonary artery diameters in predicting pulmonary hypertension. *Invest Radiol*. 1984;19(1):16-22.
 30. Bugnone AN, Viamonte M Jr, Garcia H. Imaging findings in human immunodeficiency virus-related pulmonary hypertension: report of five cases and review of the literature. *Radiology*. 2002;223(3):820-7.
 31. Tan RT, Kuzo R, Goodman LR, Siegel R, Haasler GB, Presberg KW. Utility of CT scan evaluation for predicting pulmonary hypertension in patients with parenchymal lung disease. Medical College of Wisconsin Lung Transplant Group. *Chest*. 1998;113(5):1250-6.
 32. Sherrick AD, Swensen SJ, Hartman TE. Mosaic pattern of lung attenuation on CT scans: frequency among patients with pulmonary artery hypertension of different causes. *AJR Am J Roentgenol*. 1997;169(1):79-82.
 33. Thieme SF, Becker CR, Hacker M, Nikolaou K, Reiser MF, Johnson TR. Dual energy CT for the assessment of lung perfusion--correlation to scintigraphy. *Eur J Radiol*. 2008;68(3):369-74.
 34. Remy-Jardin M, Ghaye B, Remy J. Spiral computed tomography angiography of pulmonary embolism. *Eur Resp Mon*. 2003;27:124-43.
 35. Ferretti GR, Bosson JL, Buffaz PD, Ayanian D, Pison C, Blanc F, et al. Acute pulmonary embolism: role of helical CT in 164 patients with intermediate probability at ventilation-perfusion scintigraphy and normal results at duplex US of the legs. *Radiology*. 1997;205(2):453-8.
 36. Mayo JR, Remy-Jardin M, Müller NL, Remy J, Worsley DF, Hossein-Foucher C, et al. Pulmonary embolism: prospective comparison of spiral CT with ventilation-perfusion scintigraphy. *Radiology*. 1997;205(2):447-52.
 37. Goodman LR, Lipchik RJ, Kuzo RS, Liu Y, McAuliffe TL, O'Brien DJ. Subsequent pulmonary embolism: risk after a negative helical CT pulmonary angiogram--prospective comparison with scintigraphy. *Radiology*. 2000;215(2):535-42.
 38. Sohns C, Amarteifio E, Sossalla S, Heuser M, Obenauer S. 64-Multidetector-row spiral CT in pulmonary embolism with emphasis on incidental findings. *Clin Imaging*. 2008;32(5):335-41.
 39. Quiroz R, Kucher N, Schoepf UJ, Kipfmüller F, Solomon SD, Costello P, et al. Right ventricular enlargement on chest computed tomography: prognostic role in acute pulmonary embolism. *Circulation*. 2004;109(20):2401-4.
 40. Kamel EM, Schmidt S, Doenz F, Adler-Etehami G, Schnyder P, Qanadli SD. Computed tomographic angiography in acute pulmonary embolism: do we need multiplanar reconstructions to evaluate the right ventricular dysfunction? *J Comput Assist Tomogr*. 2008;32(3):438-43.
 41. Schoepf UJ, Kucher N, Kipfmüller F, Quiroz R, Costello P, Goldhaber SZ. Right ventricular enlargement on chest computed tomography: a predictor of early death in acute pulmonary embolism. *Circulation*. 2004;110(20):3276-80.
 42. van der Meer RW, Pattynama PM, van Strijen MJ, van den Berg-Huijsmans AA, Hartmann IJ, Putter H, et al. Right ventricular dysfunction and pulmonary obstruction index at helical CT: prediction of clinical outcome during 3-month follow-up in patients with acute pulmonary embolism. *Radiology*. 2005;235(3):798-803.
 43. Dias BA, Jardim C, Hovnanian A, Fernandes CJ, Souza R. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension: diagnostic limitations [Article in Portuguese]. *J Bras Pneumol*. 2008;34(7):532-6.
 44. Ley S, Kreitner KF, Fink C, Heussel CP, Borst MM, Kauczor HU. Assessment of pulmonary hypertension by CT and MR imaging. *Eur Radiol*. 2004;14(3):359-68.
 45. Biederer J, Both M, Graessner J, Liess C, Jakob P, Reuter M, et al. Lung morphology: fast MR imaging assessment with a volumetric interpolated breath-hold technique: initial experience with patients. *Radiology*. 2003;226(1):242-9.
 46. Prince MR, Yucel EK, Kaufman JA, Harrison DC, Geller SC. Dynamic gadolinium-enhanced three-dimensional abdominal MR arteriography. *J Magn Reson Imaging*. 1993;3(6):877-81.
 47. Oudkerk M, van Beek EJ, Wielopolski P, van Ooijen PM, Brouwers-Kuyper EM, Bongaerts AH, et al. Comparison of contrast-enhanced magnetic resonance angiography and conventional pulmonary angiography for the diagnosis of pulmonary embolism: a prospective study. *Lancet*. 2002;359(9318):1643-7.
 48. Meaney JF, Weg JG, Chenevert TL, Stafford-Johnson D, Hamilton BH, Prince MR. Diagnosis of pulmonary embolism with magnetic resonance angiography. *N Engl J Med*. 1997;336(20):1422-7.
 49. Ersoy H, Goldhaber SZ, Cai T, Luu T, Rosebrook J, Mulkern R, et al. Time-resolved MR angiography: a primary screening examination of patients with suspected pulmonary embolism and contraindications to administration of iodinated contrast material. *AJR Am J Roentgenol*. 2007;188(5):1246-54.
 50. Jardim C, Rochitte CE, Humbert M, Rubinfeld G, Jasinowodolinski D, Carvalho CR, et al. Pulmonary artery

- distensibility in pulmonary arterial hypertension: an MRI pilot study. *Eur Respir J*. 2007;29(3):476-81.
51. Amundsen T, Torheim G, Kvistad KA, Waage A, Bjermer L, Nordlid KK, et al. Perfusion abnormalities in pulmonary embolism studied with perfusion MRI and ventilation-perfusion scintigraphy: an intra-modality and inter-modality agreement study. *J Magn Reson Imaging*. 2002;15(4):386-94.
52. van Wolferen SA, Marcus JT, Boonstra A, Marques KM, Bronzwaer JG, Spreeuwenberg MD, et al. Prognostic value of right ventricular mass, volume, and function in idiopathic pulmonary arterial hypertension. *Eur Heart J*. 2007;28(10):1250-7.
53. Saba TS, Foster J, Cockburn M, Cowan M, Peacock AJ. Ventricular mass index using magnetic resonance imaging accurately estimates pulmonary artery pressure. *Eur Respir J*. 2002;20(6):1519-24.
54. Hoepfer MM, Tongers J, Leppert A, Baus S, Maier R, Lotz J. Evaluation of right ventricular performance with a right ventricular ejection fraction thermodilution catheter and MRI in patients with pulmonary hypertension. *Chest*. 2001;120(2):502-7.
55. Roeleveld RJ, Marcus JT, Faes TJ, Gan TJ, Boonstra A, Postmus PE, et al. Interventricular septal configuration at mr imaging and pulmonary arterial pressure in pulmonary hypertension. *Radiology*. 2005;234(3):710-7.
56. Mousseaux E, Tasu JP, Jolivet O, Simonneau G, Bittoun J, Gaux JC. Pulmonary arterial resistance: noninvasive measurement with indexes of pulmonary flow estimated at velocity-encoded MR imaging--preliminary experience. *Radiology*. 1999;212(3):896-902.
57. Blyth KG, Groenning BA, Martin TN, Foster JE, Mark PB, Dargie HJ, et al. Contrast enhanced-cardiovascular magnetic resonance imaging in patients with pulmonary hypertension. *Eur Heart J*. 2005;26(19):1993-9.
58. Sosnovik DE, Schellenberger EA, Nahrendorf M, Novikov MS, Matsui T, Dai G, et al. Magnetic resonance imaging of cardiomyocyte apoptosis with a novel magneto-optical nanoparticle. *Magn Reson Med*. 2005;54(3):718-24.
59. Smit HJ, Vonk Noordegraaf A, Marcus JT, Boonstra A, de Vries PM, Postmus PE. Determinants of pulmonary perfusion measured by electrical impedance tomography. *Eur J Appl Physiol*. 2004;92(1-2):45-9.
60. Smit HJ, Vonk-Noordegraaf A, Boonstra A, de Vries PM, Postmus PE. Assessment of the pulmonary volume pulse in idiopathic pulmonary arterial hypertension by means of electrical impedance tomography. *Respiration*. 2006;73(5):597-602.

Sobre os autores

André Hovnanian

Médico. Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.

Eduardo Menezes

Médico. Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.

Susana Hoette

Médica. Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.

Carlos Jardim

Médico Assistente Doutor. Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.

Dany Jasinowodolinski

Médico. Grupo de Hipertensão Pulmonar, Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.

Rogério Souza

Professor Livre-Docente. Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração, Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – InCor/HCFMUSP – São Paulo (SP) Brasil.