Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação — REASE

OPEN ACCESS

doi.org/ 10.51891/rease.v12i11.32256

PERFUSÃO HIPOTÉRMICA EM MÁQUINA VERSUS ARMAZENAMENTO ESTÁTICO A FRIO NA PRESERVAÇÃO RENAL PARA TRANSPLANTE: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA

HYPOTHERMIC MACHINE PERFUSION VERSUS STATIC COLD STORAGE IN KIDNEY PRESERVATION FOR TRANSPLANTATION: AN INTEGRATIVE LITERATURE REVIEW

PERFUSIÓN HIPOTÉRMICA EN MÁQUINA VERSUS ALMACENAMIENTO ESTÁTICO EN FRÍO EN LA PRESERVACIÓN RENAL PARA TRASPLANTE: UNA REVISIÓN INTEGRATIVA DE LA LITERATURA

Mariana Vale Heleno[1]
Matheus Valle Heleno[2]

RESUMO: O transplante renal é o tratamento de escolha para pacientes com doença renal terminal, mas seus resultados também dependem da preservação do órgão antes do transplante. Nesse sentido, é importante compreender as diferenças entre os métodos utilizados. Este estudo visa comparar a perfusão hipotérmica em máquina e o armazenamento estático a frio quanto à função tardia do enxerto, à recuperação renal e à sobrevida após o transplante. Trata-se de uma revisão integrativa, feita nas bases de dados PubMed e BVS, em outubro de 2026, com os descritores "Kidney Transplantation", "Hypothermic Machine Perfusion" e "Static Cold Storage", utilizando os operadores booleanos "AND" e "OR". Inicialmente, identificaram-se 216 artigos. A seleção considerou estudos publicados entre 2016 e 2026, realizados em humanos, com texto completo em inglês, espanhol e português. Excluíram-se duplicatas e estudos não relacionados ao tema. Ao final, 25 artigos compuseram a análise. Observou-se associação entre a perfusão hipotérmica e menor incidência de função tardia do enxerto, além de menor necessidade de diálise em alguns estudos. Entretanto, os benefícios sobre a sobrevida não foram uniformes. Assim, são necessárias novas pesquisas para esclarecer os resultados das diferentes estratégias de preservação.

Palavras-chave: Transplante renal. Perfusão hipotérmica em máquina. Armazenamento estático a frio.

ABSTRACT: Kidney transplantation is the treatment of choice for patients with end-stage kidney disease, but its outcomes also depend on organ preservation before transplantation. Therefore, it is important to understand the differences between the preservation methods used. This study aims to compare hypothermic machine perfusion and static cold storage regarding delayed graft function, renal recovery, and graft survival after transplantation. This integrative literature review was conducted using the PubMed and Virtual Health Library (VHL) databases in October 2026, with the search terms "Kidney Transplantation", "Hypothermic Machine Perfusion", and "Static Cold Storage", using the Boolean operators "AND" and "OR". Initially, 216 articles were identified. The selection included studies published between 2016 and 2026, conducted in humans, with full texts available in English, Spanish, or Portuguese. Duplicates and studies unrelated to the topic were excluded. A total of 25 articles were included in the analysis. An association was observed between hypothermic machine perfusion and a lower incidence of delayed graft function, as well as reduced dialysis requirements in some studies. However, benefits regarding graft survival were not consistent. Therefore, further research is needed to clarify the outcomes of different preservation strategies.

Keywords: Kidney transplantation. Hypothermic machine perfusion. Static cold storage.

[1] Estudante de Medicina. Universidade de Vassouras, Vassouras, Rio de Janeiro, Brasil.
[2] Estudante de Medicina. Universidade de Vassouras, Vassouras, Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMEN: El trasplante renal es el tratamiento de elección para pacientes con enfermedad renal terminal, pero sus resultados también dependen de la preservación del órgano antes del trasplante. En este sentido, es importante comprender las diferencias entre los métodos utilizados. Este estudio tiene como objetivo comparar la perfusión hipotérmica en máquina y el almacenamiento estático en frío en relación con la función retardada del injerto, la recuperación renal y la supervivencia del injerto después del trasplante. Se trata de una revisión integrativa realizada en las bases de datos PubMed y Biblioteca Virtual en Salud (BVS), en octubre de 2026, utilizando los descriptores "Kidney Transplantation", "Hypothermic Machine Perfusion" y "Static Cold Storage", combinados mediante los operadores booleanos "AND" y "OR". Inicialmente, se identificaron 216 artículos. La selección incluyó estudios publicados entre 2016 y 2026, realizados en humanos, con texto completo en inglés, español o portugués. Se excluyeron duplicados y estudios no relacionados con el tema. Finalmente, 25 artículos integraron el análisis. Se observó una asociación entre la perfusión hipotérmica y una menor incidencia de función retardada del injerto, además de una menor necesidad de diálisis en algunos estudios. Sin embargo, los beneficios sobre la supervivencia del injerto no fueron uniformes. Por lo tanto, se necesitan nuevas investigaciones para esclarecer los resultados de las diferentes estrategias de preservación.

Palabras clave: Trasplante renal. Perfusión hipotérmica en máquina. Almacenamiento estático en frío.

1 INTRODUÇÃO

O transplante renal constitui a modalidade terapêutica de escolha para grande parte dos pacientes com doença renal crônica em estágio terminal, proporcionando maior sobrevida e melhora da qualidade de vida em comparação à permanência em terapia dialítica. Entretanto, apesar dos avanços nas técnicas cirúrgicas, nos protocolos imunossupressores e no acompanhamento pós-transplante, a disponibilidade limitada de órgãos permanece como um dos principais obstáculos à ampliação desse tratamento.

Nesse contexto, a utilização de rins provenientes de doadores falecidos, incluindo aqueles com critérios expandidos e os doadores após parada circulatória, reforça a necessidade de métodos de preservação capazes de manter a viabilidade do enxerto e reduzir o risco de complicações após o transplante (HOSGOOD SA, et al., 2021; TINGLE SJ, et al., 2024).

A preservação do enxerto renal representa uma etapa determinante para o sucesso do transplante, uma vez que o órgão permanece submetido à isquemia durante o intervalo entre a captação e o restabelecimento da circulação sanguínea no receptor. Embora a hipotermia reduza a demanda metabólica dos tecidos, ela não impede completamente a depleção energética, o desequilíbrio iônico e as alterações celulares decorrentes da privação de oxigênio. Além disso, o restabelecimento da circulação pode desencadear processos inflamatórios e estresse oxidativo, caracterizando a lesão de isquemia-reperfusão. Essas alterações possuem relevância clínica por sua associação com a função tardia do enxerto, frequentemente definida pela necessidade de diálise na primeira semana após o transplante, e com o comprometimento da recuperação funcional renal (GASTEIGER S, et al., 2020; TEJCHMAN K, et al., 2021).

Entre os métodos empregados na conservação renal, o armazenamento estático a frio (*Static Cold Storage* — SCS) destaca-se pela simplicidade técnica, pela ampla disponibilidade e pelo menor custo operacional inicial. A técnica consiste na utilização de soluções específicas de preservação e na manutenção do órgão sob baixas temperaturas, com o objetivo de reduzir sua atividade metabólica e minimizar os danos decorrentes da isquemia. Entretanto, esse método não proporciona circulação contínua da solução durante o armazenamento nem permite o monitoramento dinâmico de parâmetros hemodinâmicos do enxerto. Tais limitações adquirem especial importância diante de períodos prolongados de isquemia fria e da utilização de órgãos provenientes de doadores com maior risco de disfunção pós-transplante (HOSGOOD SA, et al., 2021; TINGLE SJ, et al., 2024).

Em contrapartida, a perfusão hipotérmica em máquina (*Hypothermic Machine Perfusion* — HMP) apresenta-se como uma alternativa ao armazenamento estático a frio, permitindo a circulação contínua ou pulsátil de uma solução de preservação pela vasculatura renal, em condição hipotérmica. Além de favorecer a distribuição da solução pelos tecidos, a perfusão em máquina possibilita o monitoramento de parâmetros como fluxo e resistência vascular, permitindo acompanhar características da perfusão durante o período de preservação. Sua utilização tem sido investigada como estratégia para reduzir os efeitos da isquemia e melhorar a recuperação funcional dos enxertos, sobretudo em situações associadas a maior risco de função tardia (GASTEIGER S, et al., 2020; BRAT A, et al., 2022).

Estudos realizados nos últimos anos têm investigado os benefícios da HMP em comparação ao SCS, especialmente quanto à incidência de função tardia do enxerto, à recuperação da função renal e à sobrevida do órgão transplantado. Tedesco-Silva Junior H, et al. (2017), em ensaio clínico randomizado com receptores de rins provenientes de doadores falecidos, identificaram redução na ocorrência de função tardia do enxerto com a utilização da perfusão em máquina. Posteriormente, a revisão sistemática de Tingle SJ, et al. (2024) identificou benefícios da perfusão hipotérmica contínua não oxigenada em comparação ao armazenamento estático a frio, especialmente quanto à redução da função tardia e à preservação da sobrevida do enxerto.

Entretanto, os resultados observados podem variar conforme as características dos doadores, o tempo de isquemia e os protocolos utilizados durante a preservação. Entre as modalidades investigadas, encontram-se a perfusão hipotérmica contínua, a perfusão realizada ao final do período de armazenamento e a perfusão com suplementação de oxigênio. Embora

apresentem princípios semelhantes, essas estratégias diferem quanto ao momento e às condições de aplicação, o que pode influenciar os desfechos clínicos. Nesse sentido, Husen P, et al. (2021), ao avaliarem a perfusão hipotérmica oxigenada terminal, não observaram melhora significativa da função ou da sobrevida do enxerto em um ano quando comparada ao armazenamento estático isolado. Esse resultado evidencia a necessidade de distinguir as modalidades de perfusão, evitando a generalização de benefícios demonstrados em condições específicas.

Embora revisões sistemáticas anteriores tenham demonstrado a relevância da perfusão hipotérmica na preservação renal, as diferenças entre os protocolos utilizados, as características dos doadores e os desfechos avaliados ainda dificultam a comparação dos resultados disponíveis na literatura. Nesse contexto, a análise de estudos realizados em diferentes cenários clínicos permite compreender não apenas os benefícios associados à técnica, mas também as condições em que sua utilização apresenta resultados limitados ou inconclusivos. Dessa forma, uma revisão integrativa da literatura pode contribuir para a compreensão das vantagens e limitações dos métodos de preservação renal, além de identificar aspectos que necessitam de maior investigação científica.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo analisar comparativamente a perfusão hipotérmica em máquina e o armazenamento estático a frio na preservação de enxertos renais provenientes de doadores falecidos, por meio de uma revisão integrativa da literatura, considerando seus efeitos sobre a função tardia do enxerto, a recuperação funcional renal e a sobrevida do órgão transplantado, bem como a influência das diferentes estratégias e condições de preservação sobre esses desfechos.

2 MÉTODOS

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, a fim de analisar comparativamente a perfusão hipotérmica em máquina e o armazenamento estático a frio na preservação de enxertos renais destinados ao transplante. A revisão foi orientada pela seguinte questão norteadora: quais são os efeitos da perfusão hipotérmica em máquina, em comparação ao armazenamento estático a frio, sobre a função tardia do enxerto, a recuperação funcional renal e a sobrevida após o transplante renal?

As bases de dados utilizadas foram a Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e a National Library of Medicine (PubMed) em outubro de 2026. A busca pelos artigos foi realizada

considerando os descritores "Kidney Transplantation", "Hypothermic Machine Perfusion" e "Static Cold Storage", utilizando o operador booleano "AND" e “OR”.

A revisão foi realizada seguindo as seguintes etapas: estabelecimento do tema; definição dos critérios de elegibilidade; definição dos critérios de inclusão e exclusão; busca das publicações nas bases de dados; análise dos estudos encontrados e apresentação dos resultados. Foram incluídos artigos na íntegra publicados entre 2016 e 2026, nos idiomas português, inglês e espanhol, envolvendo ensaios clínicos randomizados, estudos de coorte e estudos observacionais comparativos realizados em humanos. Foram excluídos artigos duplicados, revisões de literatura, metanálises, relatos de caso, estudos realizados exclusivamente em animais e publicações que não apresentavam relação direta com o objetivo do estudo.

Inicialmente, identificaram-se 216 artigos. Após a exclusão das duplicatas, realizou-se a triagem por meio da leitura dos resumos, seguida da avaliação dos textos completos dos estudos potencialmente elegíveis. Os artigos selecionados foram submetidos a uma segunda conferência de seus textos completos, considerando os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos. Ao final desse processo, 25 estudos compuseram a amostra da revisão.

A extração dos dados foi realizada a partir da leitura dos textos completos, considerando os autores, o ano de publicação, o tipo de estudo e os principais resultados relacionados à função tardia do enxerto, à recuperação funcional renal e à sobrevida após o transplante. As informações foram organizadas em um quadro de síntese, permitindo a apresentação dos achados de cada estudo. As diferentes modalidades de perfusão foram consideradas separadamente, respeitando as características dos protocolos utilizados.

3 RESULTADOS

A busca realizada nas bases de dados PubMed e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) permitiu identificar publicações relacionadas à comparação entre a perfusão hipotérmica em máquina e o armazenamento estático a frio na preservação de enxertos renais. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, os estudos selecionados foram organizados conforme suas características metodológicas e os principais desfechos clínicos analisados, incluindo a função tardia do enxerto, a recuperação funcional renal e a sobrevida do órgão transplantado.

As modalidades de preservação avaliadas foram a perfusão hipotérmica convencional, o armazenamento estático a frio e estratégias que associaram períodos de armazenamento estático à perfusão em máquina. Também foram identificadas pesquisas sobre perfusão hipotérmica

oxigenada terminal e utilização da perfusão em máquina após outras modalidades de preservação. Em razão das diferenças entre os protocolos, os resultados dessas estratégias foram considerados separadamente dos estudos de comparação convencional.

Em ensaio clínico randomizado multicêntrico realizado no Brasil, Tedesco-Silva Junior H, et al. (2017) avaliaram 160 transplantes renais provenientes de 80 pares de rins de doadores falecidos, comparando a perfusão hipotérmica contínua ao armazenamento estático a frio. A incidência de função tardia do enxerto foi de 45% no grupo submetido à perfusão em máquina e de 61% no grupo de armazenamento estático (p = 0,031). A perfusão hipotérmica também esteve associada à redução do risco de função tardia do enxerto (OR = 0,49; IC 95%: 0,26–0,95). Entretanto, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na sobrevida dos pacientes ou dos enxertos durante o acompanhamento de um ano.

De maneira semelhante, Gasteiger S, et al. (2020), em estudo retrospectivo com pareamento por escore de propensão, analisaram 206 receptores de transplante renal, distribuídos igualmente entre os grupos de perfusão hipotérmica e armazenamento estático. A função tardia do enxerto ocorreu em 31,1% dos pacientes submetidos à perfusão em máquina e em 64,1% daqueles submetidos ao armazenamento estático (p < 0,001). A redução foi observada tanto em rins provenientes de doadores com critérios padrão quanto em órgãos de doadores com critérios expandidos.

Em estudo retrospectivo realizado na Letônia, Plūme P, et al. (2025) avaliaram 94 receptores de rins provenientes de 47 doadores após morte encefálica. Cada par de rins foi distribuído entre os métodos de perfusão hipotérmica em máquina e armazenamento estático a frio. A incidência de função tardia foi de 4,3% no grupo de perfusão e de 25,5% no grupo de armazenamento estático (p = 0,004). Além disso, o tempo médio de internação hospitalar foi inferior entre os receptores de rins preservados por perfusão em máquina, correspondendo a 11,81 dias, em comparação a 15,66 dias no grupo controle (p = 0,008).

Entre os estudos que investigaram estratégias sequenciais de preservação, Macech M, et al. (2026) compararam o armazenamento estático seguido de perfusão hipotérmica em máquina com o armazenamento estático isolado. Após o pareamento estatístico, foram analisados 102 receptores, distribuídos em dois grupos de 51 pacientes. A função tardia do enxerto ocorreu em 17,6% dos receptores submetidos à preservação sequencial e em 39,2% daqueles submetidos exclusivamente ao armazenamento estático (p = 0,027). Apesar dessa diferença, não foram

identificadas diferenças estatisticamente significativas na sobrevida dos pacientes ou dos enxertos durante o acompanhamento de 24 meses.

Por outro lado, Husen P, et al. (2021), em ensaio clínico randomizado multicêntrico, avaliaram a utilização de perfusão hipotérmica oxigenada terminal após armazenamento estático em rins provenientes de doadores com critérios expandidos. Dos 305 rins randomizados, 262 foram efetivamente transplantados e incluídos na análise. A sobrevida do enxerto após um ano foi de 92,1% no grupo submetido à perfusão oxigenada terminal e de 93,3% no grupo de armazenamento estático isolado (p = 0,71). A incidência de função tardia do enxerto também não apresentou diferença estatisticamente significativa, correspondendo a 23,6% e 28,1%, respectivamente (p = 0,40).

Em estudos observacionais de maior abrangência, Li Z, et al. (2025) identificaram menor incidência de função tardia do enxerto com HMP na análise de 2.208 pares de rins provenientes dos mesmos doadores (29,8% versus 36,1%; p < 0,001). Resultados semelhantes foram observados por Patel K, et al. (2018), que identificaram menor frequência dessa complicação com HMP (34,2% versus 42,0%; p < 0,001), sem diferenças significativas na sobrevida dos pacientes ou dos enxertos. Em contrapartida, Weberskirch S, et al. (2022) não encontraram diferença significativa na incidência de função tardia entre os grupos HMP e SCS (42,2% versus 43,2%).

Quanto às condições de preservação, Kox J, et al. (2018) identificaram menor incidência de função tardia com HMP em enxertos submetidos a até dez horas de isquemia fria (6,0% versus 28,1%; p = 0,002), embora a duração da isquemia tenha permanecido associada ao risco de disfunção. Já Ripa V, et al. (2026), ao compararem diferentes protocolos de perfusão em enxertos com isquemia fria prolongada, observaram menor incidência de função tardia com a preservação híbrida em relação à HMP contínua (43,4% versus 55,8%; p = 0,021). Esses resultados correspondem a comparações distintas e não devem ser interpretados como evidência de superioridade de uma única modalidade de preservação.

As características metodológicas e os principais resultados dos 25 estudos selecionados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Características metodológicas e principais resultados dos estudos incluídos na revisão integrativa

Estudo	Principais resultados
Adani et al. (2021) - Coorte retrospectiva	Em 154 transplantes (73 com SCS seguida de HMP e 81 com SCS), o grupo HMP teve isquemia fria mediana muito maior (29h57 vs. 11h25). Após pareamento, não foram observadas diferenças relevantes em DGF, complicações e creatinina em 1 ano. O achado sustenta viabilidade logística, mas não demonstra superioridade da HMP.
Asassfeh et al. (2026) - Coorte retrospectiva	Em 3.502 receptores, a HMP apresentou menor incidência de função tardia do enxerto em comparação ao SCS na ausência de perfusão regional normotérmica prévia (44,2% versus 53,8%; p = 0,001). Entretanto, após essa intervenção, não houve diferença significativa entre HMP e SCS (26,7% versus 27,0%; p = 0,98).
Axelsson et al. (2023) - Coorte retrospectiva pareada	Estudo de rins de doadores com critérios expandidos; compara HMP e SCS quanto a desfechos precoces e tardios. Não houve diferença significativa da duração mediana do DGF, sendo 8 dias no SCS e 9 no HMP.
Bellini et al. (2019) - Coorte retrospectiva pareada	Coorte retrospectiva com 33 receptores em cada grupo. HMP foi associada a menor DGF e melhor filtração glomerular estimada em 1 ano, sem diferença clara de sobrevida de enxerto e paciente; interpretação limitada por desenho não randomizado.
Brat et al. (2022) - Coorte histórica comparativa	Após adoção nacional de HMP, observou-se menor DGF em comparação à coorte histórica sob SCS (38,2% versus 43,7%). O desenho antes-depois não exclui mudanças assistenciais concomitantes.
Chang et al. (2025) - Estudo observacional piloto	Estudo piloto de apenas 16 receptores (9 HMP e 7 SCS): não identificou diferença estatisticamente significativa nos resultados clínicos imediatos. Amostra pequena e desequilíbrio entre grupos limitam as interferências.
Foucher et al. (2020) - Estudo de coorte multicêntrico	Em 2.019 receptores de rins provenientes de doadores com critérios expandidos, a HMP não demonstrou benefício significativo na sobrevida com enxerto funcionante em comparação ao SCS durante oito anos de acompanhamento.
Gasteiger et al. (2020) - Coorte retrospectiva pareada	Após pareamento por escore de propensão, a HMP associou-se a menor DGF em comparação com SCS em receptores de rins de doadores falecidos.
Husen et al. (2021) - Ensaio clínico randomizado	Ensaio clínico randomizado multicêntrico: 305 rins randomizados, 262 transplantados. A sobrevida do enxerto em 1 ano foi de 92,1% com HMP oxigenada terminal e 93,3% com SCS (p=0,71); sem diferenças significativas em DGF, função renal ou rejeição. Não representa HMP convencional.
Kotowski et al. (2026) - Estudo observacional comparativo	Em 40 receptores, a HMP apresentou redução significativa dos níveis de trombomodulina solúvel ao longo do tempo, sugerindo possível redução da lesão endotelial. Entretanto, não houve diferenças estatisticamente significativas entre HMP e SCS quanto à função renal nos primeiros sete dias após o transplante.
Kox et al. (2018) - Análise de subgrupos de ensaio randomizado	Análise secundária de um ensaio clínico prévio de 752 transplantes, mostrando benefício da HMP na redução de DGF mesmo em períodos curtos de isquemia fria de até 10 horas (6,0% versus 28,1%; p = 0,002). Entretanto, o tempo de isquemia fria permaneceu um fator de risco independente para função tardia, mesmo nos rins preservados por HMP.
Li et al. (2025) - Coorte retrospectiva	Em uma coorte de 59.859 receptores, a análise de 2.208 pares correspondentes demonstrou menor incidência de função tardia do enxerto com HMP em comparação ao SCS (29,8% versus 36,1%; p < 0,001). A análise ajustada também identificou associação entre HMP e menor risco de função tardia do enxerto.
Macech et al. (2026) - Coorte retrospectiva pareada	Na comparação pareada, SCS seguida de HMP prolongada apresentou DGF em 17,6% versus 39,2% com SCS, enquanto função renal e sobrevida em 24 meses foram semelhantes. Estuda estratégia sequencial.
Nakayama et al. (2026) - Coorte retrospectiva pareada	Após perfusão regional normotérmica prévia em ambos os grupos, DGF foi de 23,3% com HMP versus 30,5% com SCS; sem melhora demonstrada da função aos seis meses ou sobrevida em um ano. Intervenção combinada, não HMP isolada.

Estudo	Principais resultados
Patel et al. (2018) - Coorte retrospectiva populacional	Em 4.529 transplantes renais, a HMP apresentou menor incidência de função tardia do enxerto em comparação ao SCS (34,2% versus 42,0%; p < 0,001), além de menor tempo de recuperação. Entretanto, não foram observadas diferenças significativas na sobrevida dos pacientes ou dos enxertos.
Perez-Gutierrez et al. (2026) - Coorte retrospectiva	Em 120.438 transplantes renais, a HMP esteve associada à menor incidência de função tardia do enxerto em todos os intervalos de isquemia fria. Entretanto, após 36 horas de isquemia, observou-se maior risco de falência do enxerto censurada por óbito, independentemente do método de preservação.
Pinheiro et al. (2026) - Estudo observacional comparativo	A HMP associou-se a menor incidência de função tardia do enxerto em comparação ao SCS (25,0% versus 46,5%; p = 0,002), além de menores chances de DGF após ajuste (OR = 0,38; IC 95%: 0,21–0,69). Os receptores submetidos à HMP necessitaram de menos sessões de diálise e apresentaram menor tempo de internação, sem diferenças na função do enxerto, rejeição ou sobrevida em um ano.
Plume et al. (2025) - Coorte retrospectiva de rins pareados	Estudo de rins pareados: DGF ocorreu em 4,3% com HMP versus 25,5% com SCS; tempo de internação foi menor (11,81 versus 15,66 dias), apesar de maior isquemia fria no grupo HMP.
Ripa et al. (2026) - Coorte retrospectiva comparativa	Em enxertos com isquemia fria prolongada (≥20 horas), a preservação híbrida (HMP-SCS) apresentou menor incidência de função tardia do enxerto que a HMP contínua (43,4% versus 55,8%; p = 0,021). Maior duração da HMP associou-se à melhor função renal após 12 meses, sem diferenças significativas na sobrevida dos enxertos.
Ruberto et al. (2025) - Coorte retrospectiva comparativa	Estudo de HMP terminal não oxigenada de 2 horas. Não demonstrou diferença global significativa de sobrevida; possível redução de DGF em subgrupo de doadores com critérios expandidos, que deve ser interpretada como análise de subgrupo.
Tedesco-Silva Jr. et al. (2017) - Ensaio clínico randomizado	Ensaio clínico randomizado com 80 pares de rins. A HMP reduziu a DGF em comparação ao SCS (45% vs. 61%); sem diferença significativa na sobrevida do enxerto em 1 ano.
Tejchman et al. - Antioxidants (2021) - Estudo observacional comparativo	A HMP apresentou menores concentrações de malondialdeído (MDA), marcador de estresse oxidativo, em comparação ao SCS (p = 0,0004), além de evolução mais favorável dos níveis de ureia após o transplante. Entretanto, não foram observadas diferenças significativas na evolução da creatinina ou da diurese entre os grupos.
Tejchman et al. — Biomedicines (2021) - Estudo observacional comparativo	A HMP apresentou menores concentrações de endotelina-2 (ET-2) após 30 minutos de reperfusão (p = 0,017) e redução significativa de IL-18 ao longo desse período (p = 0,026). Entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre HMP e SCS quanto à recuperação da função renal nos primeiros sete dias após o transplante.
Weberskirch et al. (2022) - Coorte retrospectiva comparativa	Não foram observadas diferenças significativas na incidência de função tardia do enxerto entre HMP e SCS (42,2% versus 43,2%; p > 0,9999), nem nos níveis de creatinina após um ano. Entretanto, maior fluxo arterial e menor resistência vascular no início da HMP estiveram associados à função imediata do enxerto.
Yao et al. (2016) - Estudo observacional comparativo	Em 73 receptores com doadores após parada circulatória, HMP associou-se a menor DGF e melhor recuperação funcional em relação a SCS, sem diferença significativa em rejeição.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base nos estudos selecionados.

4 DISCUSSÃO

Os estudos analisados apontam que a HMP pode contribuir para a redução da função tardia do enxerto renal em comparação ao SCS, embora a magnitude desse benefício varie entre as pesquisas. Resultados favoráveis foram identificados tanto no ensaio clínico randomizado de Tedesco-Silva Junior H, et al. (2017) quanto nos estudos observacionais de Gasteiger S, et al. (2020), Patel K, et al. (2018) e Li Z, et al. (2025). A convergência desses achados, apesar das diferenças entre as populações investigadas, reforça a relevância da HMP na recuperação

funcional inicial do órgão transplantado. No entanto, a ausência de diferenças significativas em outras pesquisas, como a de Weberskirch S, et al. (2022), indica que os resultados não dependem exclusivamente do método de preservação, mas também das condições clínicas e das características dos enxertos avaliados.

A influência desses fatores torna-se particularmente evidente no estudo de Li Z, et al. (2025), no qual a incidência inicial de função tardia foi maior entre os receptores de rins preservados por HMP. Entretanto, os órgãos desse grupo apresentavam características de maior risco, incluindo tempos mais prolongados de isquemia fria e maior frequência de doadores idosos ou após parada circulatória. Após o pareamento de rins provenientes dos mesmos doadores, observou-se menor incidência de função tardia no grupo HMP, resultado também sustentado pelas análises ajustadas. Essa diferença demonstra a importância de considerar o perfil dos enxertos antes de atribuir determinado desfecho à técnica de preservação. Embora os estudos observacionais permitam avaliar populações numerosas e condições próximas da prática clínica, seus resultados permanecem sujeitos à influência de fatores de confusão. Nesse aspecto, os achados de Tedesco-Silva Junior H, et al. (2017), obtidos por meio de um ensaio clínico randomizado, oferecem evidência complementar em favor da redução da função tardia com a perfusão hipotérmica contínua.

Outro aspecto importante é a influência do tempo de isquemia fria sobre a recuperação do enxerto. A manutenção do órgão em condições hipotérmicas reduz sua atividade metabólica, mas não impede completamente as alterações celulares decorrentes da interrupção do suprimento sanguíneo. Kox J, et al. (2018) identificaram menor incidência de função tardia com HMP mesmo em rins submetidos a períodos relativamente curtos de isquemia, embora o aumento de sua duração tenha permanecido associado ao risco dessa complicação. Perez-Gutierrez A, et al. (2026) também observaram menor ocorrência de função tardia nos enxertos preservados por HMP em diferentes intervalos de isquemia fria, mas verificaram resultados menos favoráveis quanto à falência do enxerto quando esse período ultrapassa 36 horas. Esses achados indicam que a perfusão hipotérmica pode atenuar os efeitos da exposição isquêmica, sem eliminar completamente os riscos relacionados à preservação prolongada. Além disso, sugerem que o benefício da técnica deve ser interpretado considerando não apenas o método utilizado, mas também o tempo total durante o qual o órgão permaneceu fora da circulação sanguínea.

As diferenças entre os protocolos de perfusão também ajudam a compreender a heterogeneidade dos resultados. A HMP convencional, a perfusão hipotérmica oxigenada e as estratégias que combinam armazenamento estático e perfusão em máquina diferem quanto à duração, ao momento de aplicação e às condições de preservação. Macech M, et al. (2026) observaram menor incidência de função tardia com a utilização sequencial de SCS e HMP em comparação ao armazenamento estático isolado. Por outro lado, Husen P, et al. (2021), em ensaio clínico randomizado com rins provenientes de doadores com critérios expandidos, não identificaram melhora significativa da função ou da sobrevida do enxerto após a aplicação terminal de perfusão hipotérmica oxigenada. Ripa V, et al. (2026), ao compararem diferentes estratégias de perfusão em enxertos submetidos a períodos prolongados de isquemia fria, encontraram menor incidência de função tardia com o protocolo híbrido em relação à HMP contínua. Essas diferenças devem ser interpretadas considerando as particularidades de cada protocolo, uma vez que a duração, o momento de aplicação e as condições da perfusão podem influenciar os desfechos clínicos.

Embora a redução da função tardia represente um benefício relevante, sua ocorrência não determina, por si só, os resultados do transplante em longo prazo. Patel K, et al. (2018) identificaram menor incidência e resolução mais rápida dessa complicação entre os receptores de rins preservados por HMP, mas não observaram diferenças significativas na sobrevida dos pacientes ou dos enxertos. De forma semelhante, Foucher Y, et al. (2020) não demonstraram benefício significativo da perfusão em máquina sobre a sobrevida com enxerto funcionante durante o acompanhamento prolongado. A recuperação inicial da função renal constitui apenas uma das etapas que influenciam a evolução do transplante, sendo os resultados posteriores também relacionados a fatores imunológicos, características dos receptores e intercorrências clínicas. Além disso, diferenças no tempo de acompanhamento e no número de participantes podem limitar a capacidade de identificar benefícios tardios. Assim, a ausência de significância estatística em determinados desfechos não permite afirmar que os métodos sejam equivalentes, mas evidencia que a redução da função tardia não corresponde necessariamente a uma melhora comprovada da sobrevida.

A interpretação conjunta dessas evidências exige atenção às diferenças metodológicas entre os estudos. A presença de pesquisas retrospectivas, ensaios clínicos e análises de subgrupos, associada à diversidade dos perfis dos doadores e dos protocolos de preservação, dificulta a comparação direta dos resultados. Em estudos observacionais, a escolha preferencial

da HMP para órgãos considerados de maior risco pode interferir nas associações encontradas, mesmo quando são utilizados métodos estatísticos de ajuste. Além disso, a inclusão de investigações sobre perfusão convencional, oxigenada e sequencial amplia o alcance da revisão, mas exige que seus resultados sejam analisados conforme as particularidades de cada intervenção. A síntese apresentada também deve ser interpretada à luz dessas diferenças, especialmente pela ausência de uma estimativa quantitativa conjunta dos efeitos e de uma avaliação formal padronizada do risco de viés dos estudos incluídos. Essas limitações não invalidam os achados, mas restringem a possibilidade de estabelecer a magnitude dos benefícios ou de generalizá-los para todos os contextos de preservação renal.

5 CONCLUSÃO

A análise dos estudos selecionados indica que a perfusão hipotérmica em máquina apresenta benefícios em relação ao armazenamento estático a frio na preservação de enxertos renais provenientes de doadores falecidos, sobretudo pela menor incidência de função tardia do enxerto. Esse resultado foi identificado em diferentes populações de transplantados, incluindo receptores de órgãos submetidos a períodos prolongados de isquemia fria e provenientes de doadores com maior risco de disfunção. Em alguns estudos, a utilização da HMP também esteve associada à menor necessidade de diálise e à recuperação mais rápida da função renal. Entretanto, tais benefícios não foram observados de maneira uniforme, tampouco corresponderam necessariamente a diferenças significativas na sobrevida dos enxertos e dos receptores.

Os resultados também evidenciam que a comparação entre os métodos de preservação não pode ser dissociada das condições em que são empregados. O tempo de isquemia fria, as características dos doadores e as diferenças entre os protocolos de perfusão influenciam a interpretação dos desfechos encontrados. Estudos envolvendo perfusão hipotérmica convencional, perfusão oxigenada e estratégias sequenciais apresentaram resultados distintos, sem demonstrar superioridade consistente de uma única modalidade em todos os cenários avaliados. Além disso, embora algumas pesquisas tenham identificado alterações favoráveis em marcadores de estresse oxidativo e lesão endotelial, esses achados não foram acompanhados, de forma consistente, por melhorias significativas da função renal durante o acompanhamento clínico.

Assim, a perfusão hipotérmica em máquina constitui uma estratégia relevante para a preservação de enxertos renais, especialmente por seu potencial de reduzir complicações funcionais no período inicial após o transplante. Contudo, os resultados disponíveis ainda não permitem definir com precisão quais protocolos oferecem os maiores benefícios ou em quais condições sua utilização proporciona vantagens sustentadas em longo prazo. A diversidade metodológica dos estudos e as diferenças nos períodos de acompanhamento apontam para a necessidade de investigações comparativas com protocolos bem definidos, capazes de esclarecer a influência da duração da perfusão, do tempo de isquemia e das características dos enxertos sobre os resultados do transplante renal.

REFERÊNCIAS

ADANI GL, et al. Hypothermic machine perfusion can safely prolong cold ischemia time in deceased donor kidney transplantation: a retrospective analysis on postoperative morbidity and graft function. Artificial Organs, 2021; 45(5): 516-523.

ASASSFEH A, et al. Thoracoabdominal normothermic regional perfusion attenuates the protective effect of hypothermic machine perfusion on delayed graft function in DCD kidney transplantation. Journal of Transplantation, 2026; 2026: 8082011.

AXELSSON M, et al. Long and short-term effects of hypothermic machine perfusion vs. cold storage on transplanted kidneys from expanded criteria donors—a matched comparison study. Journal of Clinical Medicine, 2023; 12(17): 5531.

BELLINI MI, et al. Cold pulsatile machine perfusion versus static cold storage in kidney transplantation: a single centre experience. BioMed Research International, 2019; 2019: 7435248.

BRAT A, et al. Hypothermic machine perfusion as a national standard preservation method for deceased donor kidneys. Transplantation, 2022; 106(5): 1043-1050.

CHANG WB, et al. Initial clinical outcomes of hypothermic machine perfusion in deceased donor kidney transplantation: a pilot comparative feasibility study from South Korea. Transplantation Proceedings, 2025; 57(10): 1863-1868.

FOUCHER Y, et al. Comparison of machine perfusion versus cold storage in kidney transplant recipients from expanded criteria donors: a cohort-based study. Nephrology Dialysis Transplantation, 2020; 35(6): 1051-1059.

GASTEIGER S, et al. A retrospective propensity score matched analysis reveals superiority of hypothermic machine perfusion over static cold storage in deceased donor kidney transplantation. Journal of Clinical Medicine, 2020; 9(7): 2311.

HOSGOOD SA, et al. Advances in kidney preservation techniques and their application in clinical practice. Transplantation, 2021; 105(11): e202-e214.

HUSEN P, et al. Oxygenated end-hypothermic machine perfusion in expanded criteria donor kidney transplant: a randomized clinical trial. JAMA Surgery, 2021; 156(6): 517-525.

KOTOWSKI M, et al. Soluble thrombomodulin as a marker of endothelial injury in early post-transplant period: a comparative study of simple hypothermia and pulsatile machine perfusion in kidney graft preservation. Journal of Clinical Medicine, 2026; 15(1): 269.

KOX J, et al. The benefits of hypothermic machine preservation and short cold ischemia times in deceased donor kidneys. Transplantation, 2018; 102(8): 1344-1350.

LI Z, et al. A comprehensive analysis on the impact of hypothermic machine perfusion and its influence on delayed graft function. Transplantation Direct, 2025; 11(12): e1875.

MACECH M, et al. Hypothermic machine perfusion allows safe delay in kidney transplantation after cold storage. Journal of Clinical Medicine, 2026; 15(6): 2173.

NAKAYAMA T, et al. The benefit of sequential normothermic regional perfusion and hypothermic machine perfusion in kidney transplantation from donation after circulatory death donors. Clinical Transplantation, 2026; 40(8): e70641.

PATEL K, et al. Outcomes of donation after circulatory death kidneys undergoing hypothermic machine perfusion following static cold storage: a UK population-based cohort study. American Journal of Transplantation, 2018; 18(6): 1408-1414.

PEREZ-GUTIERREZ A, et al. Hypothermic perfusion mitigates extended cold ischemia time in kidney transplantation. Clinical Journal of the American Society of Nephrology, 2026; 21(1): 108-117.

PINHEIRO PMA, et al. Clinical and operational evaluation of hypothermic machine perfusion for kidney transplantation in a Brazilian reference center. Transplantation Proceedings, 2026; 58(7): 1279-1283.

PLŪME P, et al. Hypothermic machine perfusion vs. static cold storage in kidney transplantation: a retrospective paired-kidney study from Latvia. Medicina, 2025; 61(9): 1641.

RIPA V, et al. Hypothermic machine perfusion modifies the impact of cold ischemia time on kidney transplant outcomes: a single-center analysis. Transplantation Proceedings, 2026; 58(8): 1502-1509.

RUBERTO F, et al. Short (2-hour) non-oxygenated end-ischemic hypothermic perfusion versus cold storage in the setting of renal transplantation. Artificial Organs, 2025; 49(5): 831-841.

TEDESCO-SILVA JUNIOR H, et al. Randomized trial of machine perfusion versus cold storage in recipients of deceased donor kidney transplants with high incidence of delayed graft function. Transplantation Direct, 2017; 3(5): e155.

TEJCHMAN K, et al. Assessment of oxidative stress markers in hypothermic preservation of transplanted kidneys. Antioxidants, 2021; 10(8): 1263.

TEJCHMAN K, et al. The role of endothelins, IL-18, and NGAL in kidney hypothermic machine perfusion. Biomedicines, 2021; 9(4): 417.

TINGLE SJ, et al. Normothermic and hypothermic machine perfusion preservation versus static cold storage for deceased donor kidney transplantation. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2024; 7: CD011671.

WEBERSKIRCH S, et al. Dynamic parameters of hypothermic machine perfusion—an image of initial graft function in adult kidney transplantation? Journal of Clinical Medicine, 2022; 11(19): 5698.

YAO L, et al. Hypothermic machine perfusion in DCD kidney transplantation: a single center experience. Urologia Internationalis, 2016; 96(2): 148-151.