

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Perfusión basada en objetivos: revisión integrativa sistemática.

Goal Directed Perfusion: A Systematic Integrative Review.

AUTOR: ROSSANA YAMETTI

Enfermera, Perfusionista.

Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña | UNPHU. Santo Domingo. República Dominicana.

RESUMEN

La perfusión basada en objetivos representa una evolución significativa en la circulación extracorpórea al centrarse en la individualización del soporte perfusional mediante el monitoreo continuo de parámetros fisiológicos críticos. Esta revisión integrativa sistemática analiza la evolución histórica de la perfusión basada en objetivos, sus fundamentos fisiológicos, parámetros utilizados, avances tecnológicos y resultados clínicos en cirugía cardíaca. Se realizó una búsqueda bibliográfica en PubMed, ScienceDirect, Springer, ClinicalKey Student y Google Scholar. Tras la depuración y análisis crítico de la evidencia, se incluyeron 24 publicaciones. Los resultados muestran que la perfusión basada en objetivos ha evolucionado desde modelos centrados en flujo y presión arterial hacia estrategias dinámicas basadas en parámetros metabólicos como el suministro de oxígeno indexado (DO_{2i}), la producción de dióxido de carbono indexada (VCO_{2i}) y la saturación venosa de oxígeno (SvO_2). La evidencia revisada sugiere una asociación entre el mantenimiento de valores óptimos de DO_{2i} y la disminución de insuficiencia renal aguda, hiperlactatemia y estancia hospitalaria prolongada. La incorporación de monitoreo continuo e inteligencia artificial ha favorecido una perfusión más precisa e individualizada. Persisten desafíos relacionados con la estandarización de protocolos, diferencias tecnológicas y necesidad de capacitación especializada.

Palabras clave: perfusión basada en objetivos; circulación extracorpórea; cirugía cardíaca; DO_{2i} ; insuficiencia renal aguda.

ABSTRACT

Goal-Directed Perfusion represents a significant evolution in extracorporeal circulation through individualized perfusion support and continuous monitoring of critical physiological parameters. This integrative systematic review analyzes the historical evolution of Goal-Directed Perfusion, its physiological basis, technological advances, and clinical outcomes in cardiac surgery. A literature search was performed in PubMed, ScienceDirect, Springer, ClinicalKey Student, and Google Scholar. Twenty-four studies were selected after critical analysis and screening. Findings show that Goal-Directed Perfusion evolved from traditional flow and pressure-based models toward dynamic strategies using indexed oxygen delivery (DO_{2i}), indexed carbon dioxide production (VCO_{2i}), and venous oxygen saturation (SvO_2). Maintaining optimal DO_{2i} values was associated with reduced acute kidney injury, hyperlactatemia, and prolonged hospital stay. Advanced monitoring systems and artificial intelligence have improved individualized perfusion management. However, challenges related to protocol standardization, technological variability, and specialized training remain.

Keywords: goal-directed perfusion; extracorporeal circulation; cardiac surgery; oxygen delivery; acute kidney injury.

Correspondencia: Rossana Yametti. UNPHU. Santo Domingo. República Dominicana. ry23-9763@unphu.edu.do. yamettirossana@gmail.com

TABLA DE ABREVIATURAS (ESPAÑOL / INGLÉS)

PBO	Perfusión Basada en Objetivos	Goal-Directed Perfusion
CEC	Circulación extracorpórea	Extracorporeal circulation
DO_{2i}	Suministro de oxígeno indexado	Indexed oxygen delivery
VCO_{2i}	Producción de dióxido de carbono indexada	Indexed carbon dioxide production
SvO_2	Saturación venosa de oxígeno	Venous oxygen saturation
IRA	Insuficiencia renal aguda	Acute kidney injury

INTRODUCCIÓN

La circulación extracorpórea constituye uno de los avances más importantes en la historia de la cirugía cardiovascular moderna. Desde el desarrollo de la primera máquina corazón-pulmón funcional y la realización de las primeras cirugías cardíacas exitosas a mediados del siglo XX, la perfusión cardiovascular ha experimentado una evolución constante orientada a mejorar la seguridad y supervivencia de los pacientes sometidos a cirugía cardíaca compleja. Sin

embargo, a pesar de los importantes avances tecnológicos alcanzados, la circulación extracorpórea continúa asociándose con múltiples complicaciones sistémicas relacionadas con hipoperfusión tisular, inflamación sistémica y alteraciones metabólicas.¹

Entre las principales complicaciones se encuentran la insuficiencia renal aguda, el síndrome de bajo gasto cardíaco, la hiperlactatemia, la disfunción neurológica y la respuesta inflamatoria sistémica. La evidencia científica ha demostrado que muchos de estos eventos adversos se relacionan directamente con una entrega inadecuada de oxígeno durante la perfusión. Tradicionalmente, el manejo perfusional se basó en parámetros generales de flujo sanguíneo y presión arterial media, sin considerar de manera individualizada las necesidades metabólicas de cada paciente.²⁻⁵

En este contexto surgió la perfusión basada en objetivos (PBO), también conocida como Goal-Directed Perfusion (GDP), como una estrategia orientada a optimizar la perfusión tisular mediante el monitoreo continuo de variables fisiológicas y metabólicas críticas durante la circulación extracorpórea. Este enfoque evolucionó a partir de conceptos previamente utilizados en la terapia dirigida por objetivos y posteriormente fue adaptado al campo de la perfusión cardiovascular.^{6,7}

La PBO propone mantener objetivos fisiológicos específicos relacionados principalmente con el suministro de oxígeno indexado (DO_{2i}), la producción de dióxido de carbono indexada (VCO_{2i}), la saturación venosa de oxígeno (SvO_2), el hematocrito y otros indicadores dinámicos de metabolismo tisular. Estudios clínicos relevantes identificaron que mantener valores de DO_{2i} por encima de determinados umbrales se asocia con reducción significativa de insuficiencia renal aguda y mejores desenlaces postoperatorios.^{3,8,9}

A pesar de los beneficios clínicos reportados, la implementación de la PBO continúa enfrentando retos importantes relacionadas con la falta de estandarización de protocolos, diferencias entre dispositivos de monitoreo, costos tecnológicos y necesidad de personal altamente capacitado. Además, persisten controversias respecto a los valores críticos ideales de algunos parámetros fisiológicos y sobre la aplicabilidad universal de determinados modelos de perfusión.¹⁴⁻¹⁷

Esta revisión integrativa sistemática analiza la evolución histórica de la PBO, sus fundamentos fisiológicos, parámetros críticos, avances tecnológicos, beneficios clínicos y desafíos actuales en cirugía cardíaca con circulación extracorpórea.

MÉTODOS

La presente investigación busca responder ¿Cómo ha evolucionado la perfusión basada en objetivos en adultos sometidos a cirugía cardíaca con circulación extracorpórea, y cuáles son los principales parámetros fisiológicos, herramientas tecnológicas y desenlaces clínicos reportados en la literatura?

Para ello se desarrolló una revisión integrativa sistemática de la literatura científica relacionada con la perfusión basada en objetivos en cirugía cardíaca con circulación extracorpórea. Este enfoque metodológico permitió integrar estudios observacionales, ensayos clínicos, revisiones narrativas, revisiones sistemáticas y publicaciones técnicas orientadas al análisis de la evolución conceptual, fisiológica y tecnológica de la PBO.

Población: adultos sometidos a cirugía cardíaca con CEC.

Intervención: Revisión sistemática sin intervención

Concepto: Perfusión basada en objetivos (PBO/GDP)/ DO_{2i} / VCO_{2i} / SvO_2 / lactato / monitoreo continuo.

Contexto: cirugía cardíaca adulta con circulación extracorpórea.

Periodo de búsqueda: 2005 - 2025

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos PubMed/MEDLINE, ScienceDirect, Springer, ClinicalKey Student y Google Scholar.

La estrategia de búsqueda se ejecutó mediante el algoritmo ("goal-directed perfusion" OR "goal directed perfusion" OR "oxygen delivery") AND ("cardiopulmonary bypass" OR "extracorporeal circulation") AND ("acute kidney injury" OR "renal injury" OR "lactate" OR "oxygen delivery index").

Inicialmente se identificaron 114 publicaciones potencialmente relevantes, mismas que fueron analizadas tomando como referencia los principios metodológicos de la guía PRISMA 2020 aplicables a revisiones sistemáticas en ciencias de la salud, considerando diseño, población, claridad de intervención, desenlaces reportados, aplicabilidad clínica y dificultades metodológicas

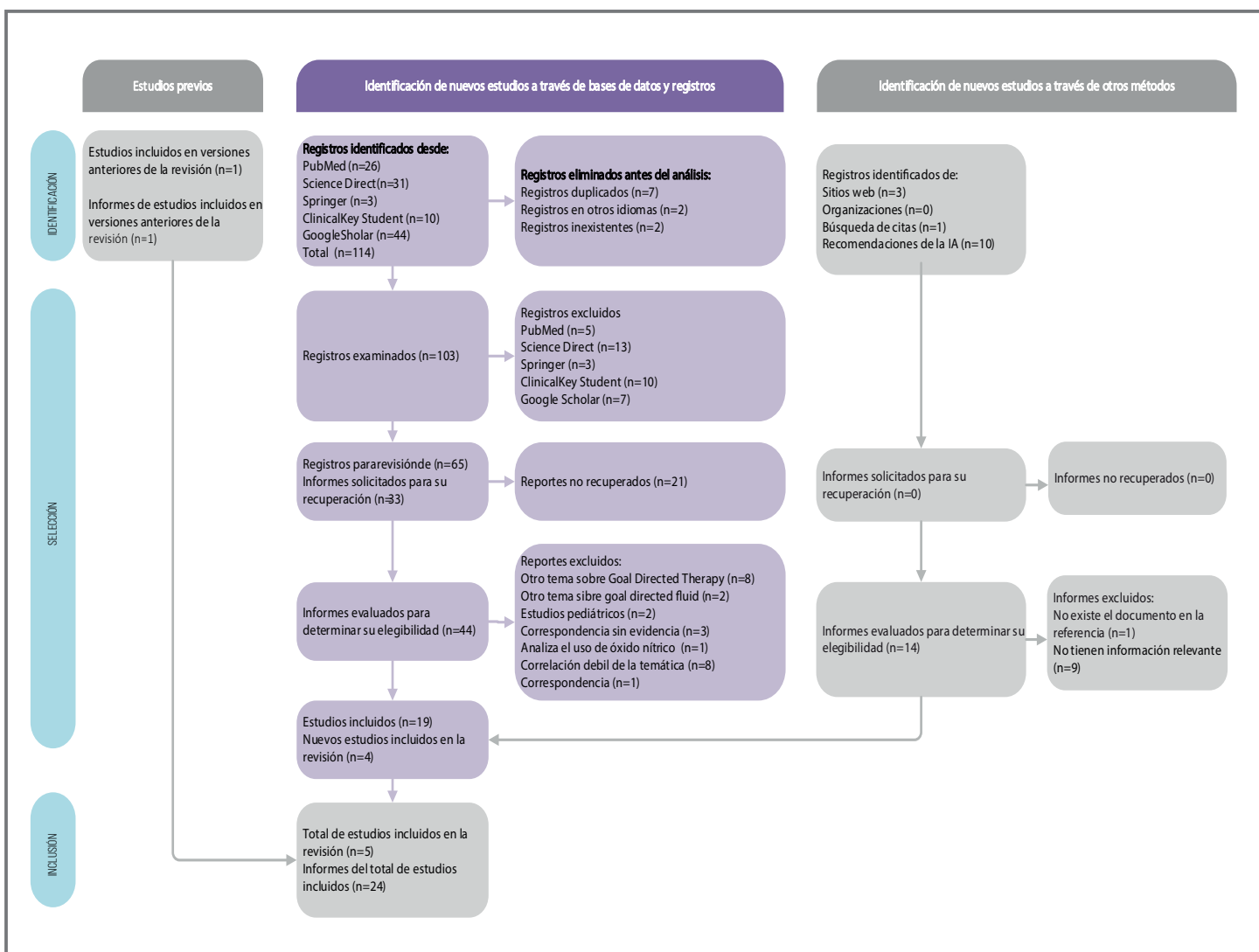


Figura 1. Diagrama de flujo de búsqueda PRISMA. Fuente: El autor.

Posteriormente se realizó un proceso de depuración realizada por un revisor mediante lectura de título, resumen y texto completo. La revisión se orientó a eliminar documentos duplicados, publicaciones pediátricas, artículos relacionados exclusivamente con terapia dirigida por objetivos y documentos sin información específica sobre parámetros de PBO.

Se incluyeron estudios realizados en población adulta sometida a cirugía cardíaca con circulación extracorpórea que abordaran parámetros fisiológicos relacionados con PBO, especialmente suministro de oxígeno indexado, producción de dióxido de carbono indexado, saturación venosa de oxígeno, hematocrito, metabolismo anaeróbico

y herramientas tecnológicas de monitoreo. Asimismo, se consideraron revisiones narrativas y documentos metodológicos relevantes para comprender la evolución conceptual y tecnológica de la técnica.

Se excluyeron publicaciones pediátricas, estudios enfocados exclusivamente en terapia dirigida por objetivos no relacionada con perfusión cardiovascular, documentos comerciales sin evidencia clínica y artículos con información insuficiente sobre parámetros fisiológicos o resultados clínicos.

Tras el proceso de selección, recuperación y análisis crítico de la evidencia disponible, se incluyeron 24 publicaciones

para el análisis final. La información recopilada se organizó de forma temática y cronológica para identificar la evolución histórica de la PBO, los principales parámetros utilizados, los avances tecnológicos incorporados y los resultados clínicos reportados.

Adicionalmente, se realizó una evaluación cualitativa de la heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos, considerando diferencias en protocolos perfusionales, umbrales de DO_2i , dispositivos de monitoreo y criterios de evaluación clínica.

TABLA 1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE LAS PUBLICACIONES.

PERIODO	AUTOR / AÑO	DO ₂ , OBJETIVO (ML/MIN/M ²)	VALORES DE CONTRASTE	¿DATOS DE MORTALIDAD?	¿DATOS DE MORBILIDAD?	¿DATOS DE ESTANCIA HOSPITALARIA?
≤2015	01. de Somer et al., 2011(2)	>262	<262	No	No	No
>2015	02. Ranucci et al., 2018(18)	≥280	<280	No	No	No
>2015	03. Ranucci et al., 2024(5)	-	NA	No	Si	No
>2015	04. Bhirowo et al., 2024(19)	-	NA	Sí	Sí	Sí
≤2015	05. Magruder et al., 2017(20)	>272	<272	Sí	No	No
>2015	06. Sray et al., 2019(21)	≥280	NA	No	No	No
>2015	07. Lukaszewski et al., 2019(22)	>272	-	No	No	No
>2015	08. Backer et al., 2017(6)	-	NA	No	No	No
>2015	09. Mukaida et al., 2019(23)	≥300	<300	No	No	Parcial
>2015	10. Magruder et al., 2022(24)	≥280	<280	No	No	No
>2015	11. Bousnina et al., 2020(25)	>270	<270	Si	Si	Si
>2015	12. Mukaida et al., 2023(26)	≥300	<300	No	No	No
>2015	13. Peng et al., 2023(27)	≥280	<280	Sí	Sí (CRRT)	Sí
>2015	14. Jules et al., 2025(28)	≥270	<270	Sí	Sí	Sí
>2015	15. Broadwin et al., 2022(7)	≥260	<260	Sí	Sí	Sí
>2015	16. Gatica et al., 2024(29)	≥260 - 272	NA	No	No	No
>2015	17. Oshita et al., 2025(30)	≥301 (H), ≥273 (M)	<301 (H), <273 (M)	Sí	Sí	Sí
>2015	18. Pruna et al., 2025(31)	Referencias a ≥280-300	NA	Referencial	Referencial	Referencial
≤2015	19. Ranucci et al., 2019(32)	≥272	<272	No	No	No
>2015	20. Condello et al., 2021(15)	-	NA	No	No	No
>2015	21. Wahba et al., 2024(17)	-	NA	No	No	No
>2015	22. Lukaszewski et al., 2023(33)	-	NA	No	No	No
>2015	23. Awawdeh et al., 2024(14)	≥272 (normot.) / ≥262 (hipot.)	NA	Referencial	Referencial	Referencial
>2015	24. Salenger et al., 2024(4)	≥280	<280	Sí	Sí	Sí

Fuente: El autor.

PARÁMETROS FISIOLÓGICOS Y METABÓLICOS DE LA PBO

El DO₂i constituye el principal parámetro de control en la PBO. La mayoría de estudios revisados recomiendan mantener valores superiores a 272–280 mL/min/m² durante la circulación extracorpórea para reducir el riesgo de hipoperfusión tisular e insuficiencia renal aguda.^{2,3,14}

El hematocrito también desempeña un papel fundamental debido a su influencia sobre la capacidad de transporte de oxígeno. La evidencia muestra que valores inferiores al 23% durante la circulación extracorpórea se asocian con mayor incidencia de complicaciones renales.^{5,9,32}

Otros parámetros complementarios incluyen el VCO₂i, la SvO₂, el lactato y el gradiente venoarterial de CO₂. Estos indicadores permiten valorar el equilibrio entre oferta y consumo de oxígeno, así como detectar tempranamente estados de metabolismo anaeróbico.⁸

La evolución reciente de la PBO ha impulsado el desarrollo de modelos multifactoriales como el Índice de Perfusión Dinámica Multifactorial, que integra variables preoperatorias e intraoperatorias para predecir complicaciones de manera más precisa.³⁴

RESULTADOS

La evidencia revisada demuestra una evolución progresiva de la perfusión basada en objetivos desde modelos centrados exclusivamente en flujo sanguíneo y presión arterial media hacia estrategias dinámicas sustentadas en parámetros fisiológicos y metabólicos individualizados. Los 24 estudios incluidos abarcaron publicaciones entre 2005 y 2025, incluyendo ensayos clínicos, estudios observacionales retrospectivos y prospectivos, revisiones narrativas, revisiones sistemáticas y desarrollos metodológicos.

Los resultados evidencian que el principal parámetro utilizado en PBO continúa siendo el suministro de oxígeno indexado (DO₂i), mismo que está asociado a la disminución de insuficiencia renal aguda postoperatoria, menor necesidad de terapia de reemplazo renal y disminución de estancia hospitalaria prolongada.^{3,7,35} Sin embargo, los valores considerados críticos variaron entre los diferentes estudios, con umbrales reportados entre 262 y 301 mL/min/m². A pesar de esta variabilidad, la mayoría de publicaciones coincidieron en recomendar valores mínimos entre 272 y 280 mL/min/m² durante la circulación extracorpórea.³

Asimismo, algunos trabajos incorporaron parámetros complementarios como VCO₂i, saturación venosa de oxígeno, lactato arterial y gradiente venoarterial de CO₂ con el objetivo de evaluar de manera más precisa el equilibrio entre oferta y consumo de oxígeno durante la circulación extracorpórea. La integración de estos parámetros permitió identificar estados de metabolismo anaeróbico y situaciones de hipoperfusión tisular no detectables únicamente mediante flujo sanguíneo o presión arterial media.⁸

TABLA 2. PARÁMETROS Y RESULTADOS DO ₂ /VCO ₂				
PARÁMETRO	GRUPO SEGURO	GRUPO CRÍTICO	P-VALOR	¿SIGNIFICATIVO?
	(DO ₂ /VCO ₂ ≥ 5,3)	(DO ₂ /VCO ₂ < 5,3)		
Pacientes (n)	77	57	—	—
IRA etapa 1 (n, %)	5 (6,5%)	18 (31,6%)	< 0,001	Si
VCO ₂ i pico (mL/min/m ²)	46,6 ± 7,4	47,7 ± 6,7	0,38	No
DO ₂ /VCO ₂ nadir	6,2 ± 0,7	4,5 ± 0,6	< 0,001	Si
Estancia hospitalaria (días)	9,6 ± 3,7	13,1 ± 6,5	< 0,001	Si

Fuente: El autor.

En relación con el hematocrito, múltiples estudios reportaron asociación entre hemodilución excesiva y mayor incidencia de complicaciones renales. Valores inferiores al 23% durante la circulación extracorpórea se relacionaron con incremento significativo del riesgo de insuficiencia renal aguda, especialmente cuando coexistían niveles bajos de DO₂i.¹⁰⁻¹²

Los resultados también evidenciaron una importante evolución tecnológica en la implementación de la PBO. Diversos estudios describieron la incorporación progresiva de sistemas de monitoreo continuo, sensores metabólicos, plataformas digitales y algoritmos predictivos destinados a optimizar el control perfusional en tiempo real.^{8,15}

TABLA 3. TABLA COMPARATIVA DE VALORES DE PROBABILIDAD (P-VALOR).		
COMPARACIÓN	(P-VALOR).	INTERPRETACIÓN
MRE vs. RDP	0,495	No significativa (los modelos son similares)
MRE vs. IPDM	0,004	Significativa (IPDM predice mejor)
RDP vs. IPDM	0,015	Significativa (IPDM predice mejor)

Fuente: El autor.

Más recientemente, los modelos multifactoriales de riesgo comenzaron a integrar variables dinámicas intraoperatorias con factores clínicos preoperatorios para anticipar complicaciones asociadas a hipoperfusión. Entre

estos modelos destaca el Índice de Perfusión Dinámica Multifactorial, desarrollado para mejorar la predicción de insuficiencia renal aguda mediante la integración de parámetros metabólicos y hemodinámicos.^{34,36}

No obstante, los resultados también revelaron restricciones importantes relacionadas con heterogeneidad metodológica, diferencias entre dispositivos de monitoreo y ausencia de consensos universales respecto a umbrales fisiológicos óptimos. Algunos estudios reportaron variaciones significativas en los valores de DO_{2i} y VCO_{2i} dependiendo del equipo utilizado, localización de sensores y fórmulas de cálculo aplicadas, lo que dificulta la comparación directa entre protocolos y centros quirúrgicos.

TABLA 4. DATOS DE DO_2 COMPARATIVOS (BAKER, 2017)				
PARÁMETRO	DISPOSITIVO / MÉTODO	VALOR REPORTADO	UNIDAD	DIFERENCIA VS. REFERENCIA
DO_{2i}	M4 distal al shunt	272	mL/min/m ²	Referencia
DO_{2i}	Bomba S5 (proximal)	292	mL/min/m ²	-20
DO_{2i}	Shunt con 700 mL	246	mL/min/m ²	26

Fuente: El autor.

A pesar de estas condiciones, la mayoría de publicaciones coincidieron en que la implementación de estrategias de PBO favorece una perfusión más individualizada y segura, orientada a optimizar la entrega de oxígeno y disminuir complicaciones postoperatorias asociadas a circulación extracorpórea.

AVANCES TECNOLÓGICOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El desarrollo tecnológico ha sido determinante en la evolución de la PBO. Los sistemas modernos de monitoreo continuo permiten registrar variables fisiológicas en tiempo real, facilitando ajustes dinámicos de la perfusión.³⁷

TABLA 5. DATOS DE VCO_2 COMPARATIVOS (BAKER, 2017)				
PARÁMETRO	DISPOSITIVO / MÉTODO	VALOR REPORTADO	UNIDAD	DIFERENCIA VS. REFERENCIA
VCO_2	M4 formula	52	mL/min/m ²	Referencia
VCO_2	PBO formula (gas analysis)	45	mL/min/m ²	-7

Fuente: El autor.

Actualmente, se investigan modelos predictivos basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático capaces de anticipar estados de hipoperfusión y optimizar la toma de decisiones clínicas durante la cirugía cardíaca.^{15,38,39}

Debido a la heterogeneidad sustancial en los diseños de estudio, definiciones de intervención, umbrales de DO_{2i} , desenlaces reportados y disponibilidad incompleta de datos cuantitativos comparables, no se realizó metaanálisis formal. En su lugar, se efectuó una síntesis narrativa estructurada e integrativa.

TABLA 6. INTERVALOS DE CONFIANZA ENTRE SRM, DPR Y MDPI.		
MODELO	ABC (95% CI)	INTERPRETACIÓN
MRE	0,696 (0,663–0,727)	Modelo aceptable, solo con datos preoperatorios
RDP	0,723 (0,691–0,753)	Ligeramente mejor, pero CI se superpone → NS
MDPI	0,769 (0,739–0,798)	Significativamente mejor; CI no se superpone

Fuente: Ranucci et al., (2024)36; traducido por el autor.

DISCUSIÓN

Una limitación metodológica a considerar es que los diagramas de bosque presentados en esta revisión no deben interpretarse como un metanálisis encubierto. Su inclusión responde a una necesidad de síntesis visual de estudios heterogéneos en términos de diseños, umbrales de DO_{2i} y poblaciones. Investigaciones previas en el campo de la perfusión cardiovascular han utilizado estrategias similares para comunicar hallazgos de revisiones sin combinar efectos estadísticamente. Se recomienda a los lectores interpretar estos gráficos como una herramienta exploratoria y no inferencial.

La perfusión basada en objetivos representa una de las transformaciones más importantes en la evolución contemporánea de la circulación extracorpórea. La evidencia revisada confirma una transición progresiva desde modelos tradicionales centrados en parámetros hemodinámicos generales hacia estrategias orientadas a objetivos fisiológicos individualizados, capaces de responder de manera dinámica a las necesidades metabólicas del paciente durante la cirugía cardíaca.⁴⁰

Uno de los hallazgos más relevantes observados en esta revisión es la consolidación progresiva del DO_{2i} como parámetro central de la PBO. La mayoría de estudios coinciden en que la disminución del suministro de oxígeno durante la circulación extracorpórea constituye uno de los principales mecanismos fisiopatológicos asociados al desarrollo de insuficiencia renal aguda postoperatoria.^{2,18} La identificación de umbrales críticos cercanos a 272–280 mL/min/m² permitió establecer objetivos más concretos para el manejo perfusional intraoperatorio.

permiten detectar alteraciones tisulares tempranas antes de que aparezcan manifestaciones clínicas evidentes o daño orgánico irreversible.^{27,33} En este sentido, la PBO no debe interpretarse únicamente como una estrategia de control de DO_{2i}, sino como un modelo dinámico orientado al equilibrio entre oferta y demanda metabólica.

Otro aspecto importante observado es la creciente incorporación de herramientas tecnológicas avanzadas en el manejo perfusional. Los sistemas modernos de monitoreo

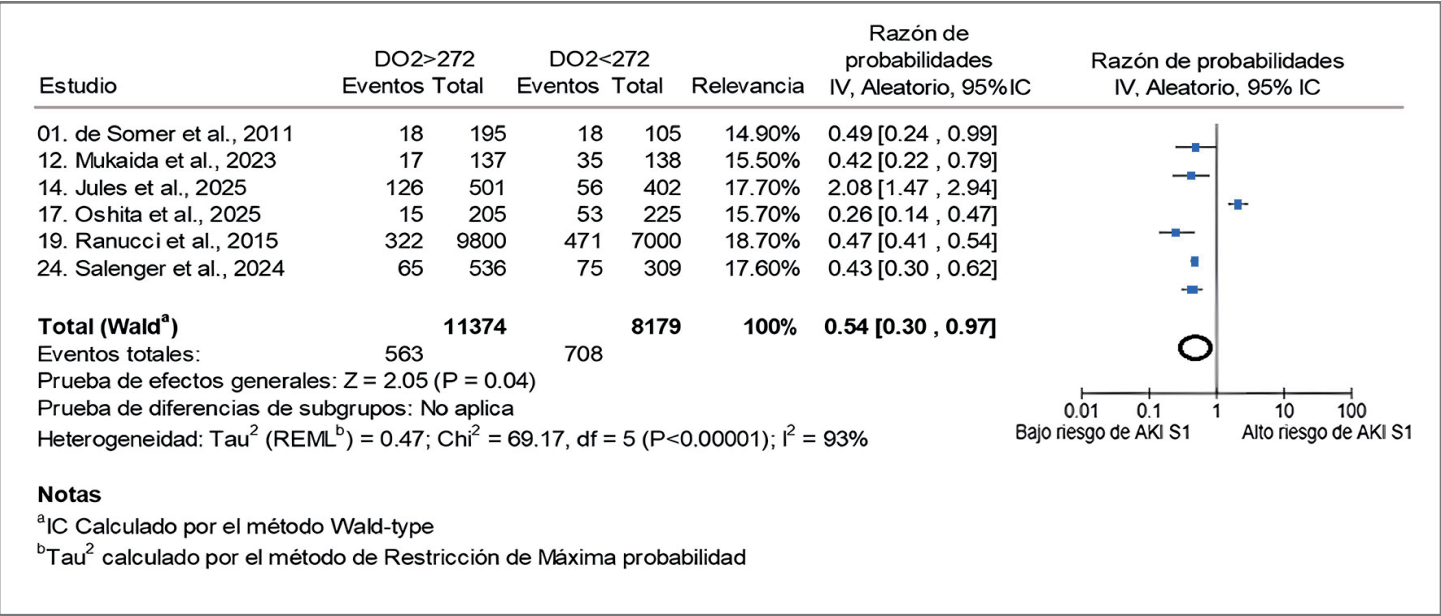


Figura 2. Diagrama de bosque intervención PBO vs. Perfusión tradicional (sin efecto combinado). Fuente: El autor / RevMan Cochrane.

No obstante, uno de los aspectos más relevantes identificados en esta revisión es la ausencia de un consenso absoluto respecto al valor óptimo universal de DO_{2i}. Algunos estudios proponen umbrales superiores a 300 mL/min/m², mientras otros consideran aceptables valores cercanos a 260 mL/min/m² dependiendo de variables clínicas, temperatura corporal, sexo y condiciones metabólicas del paciente.^{23,26} Esta variabilidad refleja que la PBO continúa en un proceso evolutivo y que probablemente el futuro de la perfusión cardiovascular se orientará hacia modelos aún más individualizados.

La incorporación progresiva de parámetros complementarios como VCO_{2i}, SvO₂, lactato y gradiente venoarterial de CO₂ evidencia una tendencia clara hacia una evaluación metabólica integral de la perfusión. Estos indicadores

continuo permiten registrar variables fisiológicas en tiempo real, favoreciendo ajustes más rápidos y precisos durante la circulación extracorpórea. Asimismo, la aparición de algoritmos predictivos y modelos basados en inteligencia artificial representa un avance significativo hacia una perfusión cardiovascular más automatizada y personalizada.^{4,7}

Sin embargo, los resultados también muestran que el desarrollo tecnológico no ha sido homogéneo entre instituciones ni regiones. Persisten diferencias importantes en disponibilidad de equipos, plataformas de monitoreo y capacidad de integración digital. Estas desigualdades limitan la estandarización de protocolos y dificultan la comparación directa entre estudios multicéntricos. Además, algunos trabajos demostraron variaciones relevantes en los valores de DO_{2i} y VCO_{2i} dependiendo

de la tecnología utilizada, posición de sensores y fórmulas matemáticas aplicadas para el cálculo metabólico.^{6,41}

Desde el punto de vista clínico, la mayoría de publicaciones reportaron beneficios asociados a la implementación de PBO, especialmente en reducción de insuficiencia renal aguda, hiperlactatemia y estancia hospitalaria prolongada. Sin embargo, los resultados relacionados con mortalidad y eventos cardiovasculares mayores continúan siendo heterogéneos. Algunos estudios evidenciaron mejoría significativa en desenlaces clínicos globales, mientras otros no encontraron diferencias estadísticamente relevantes.^{20,23,27,28}

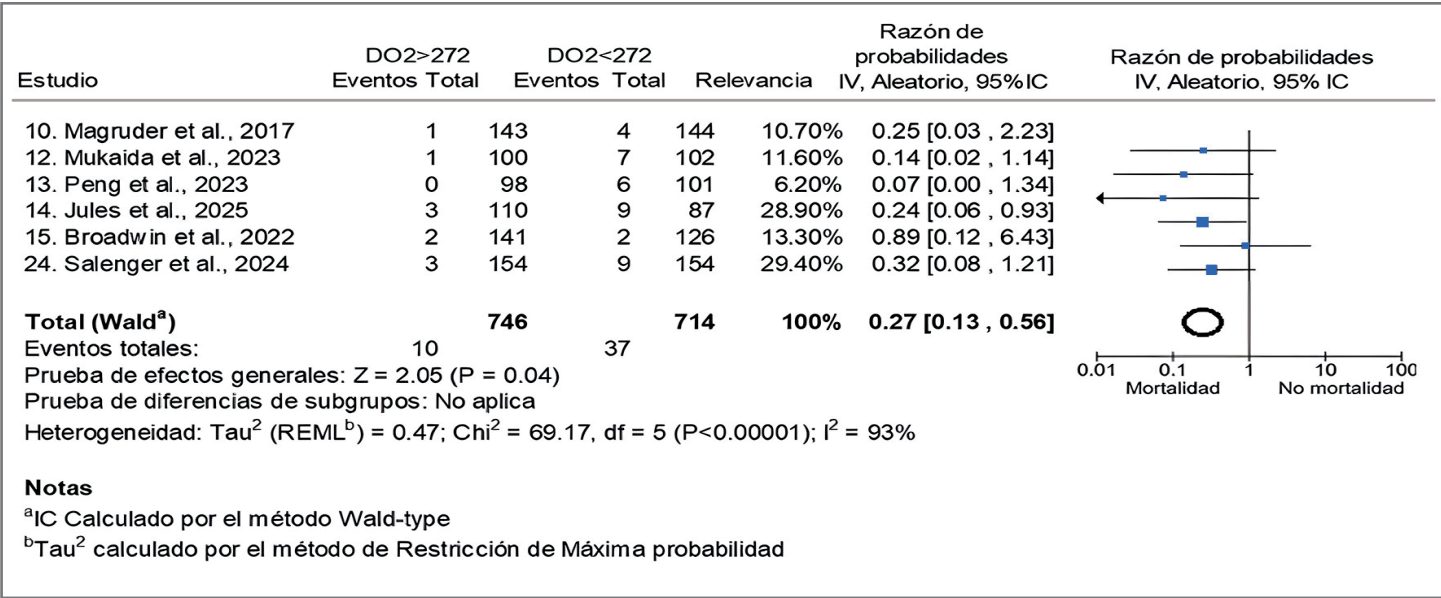


Figura 3. Diagrama de bosque de mortalidad y no mortalidad aplicando PBO y perfusión tradicional (sin efecto combinado). Fuente: El autor / RevMan Cochrane.

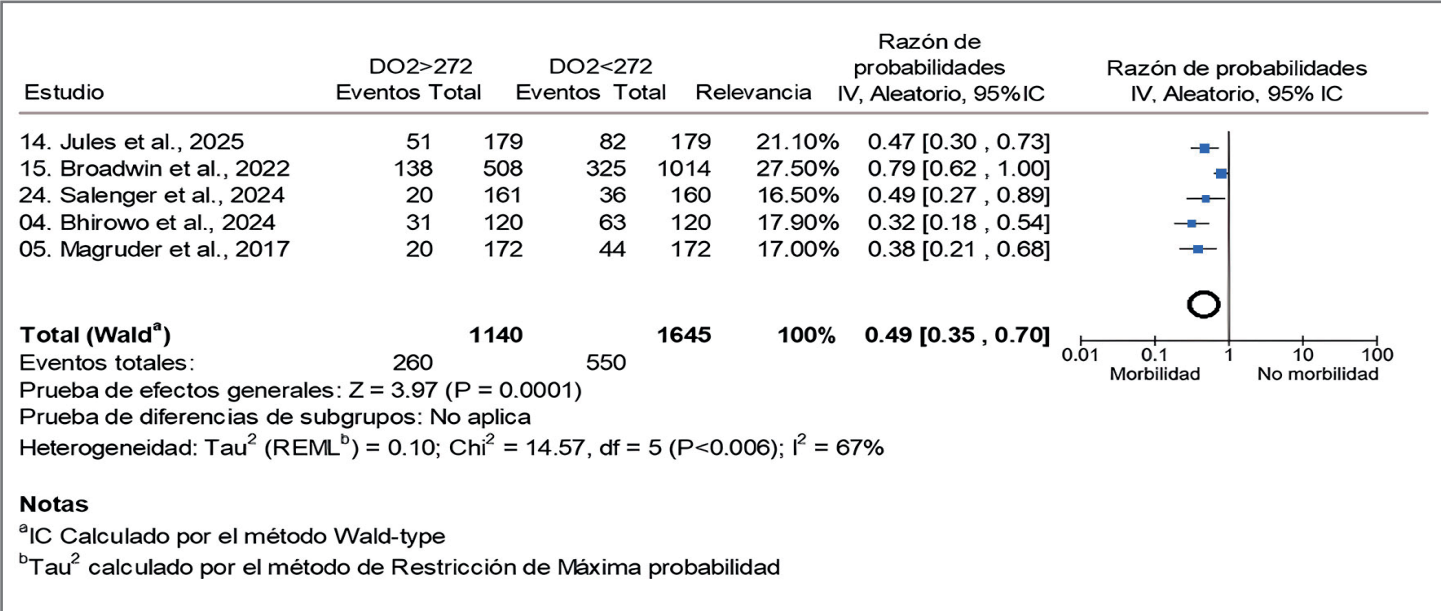


Figura 4. Diagrama de bosque de morbilidad y no morbilidad aplicando PBO y perfusión tradicional (sin efecto combinado). Fuente: El autor.

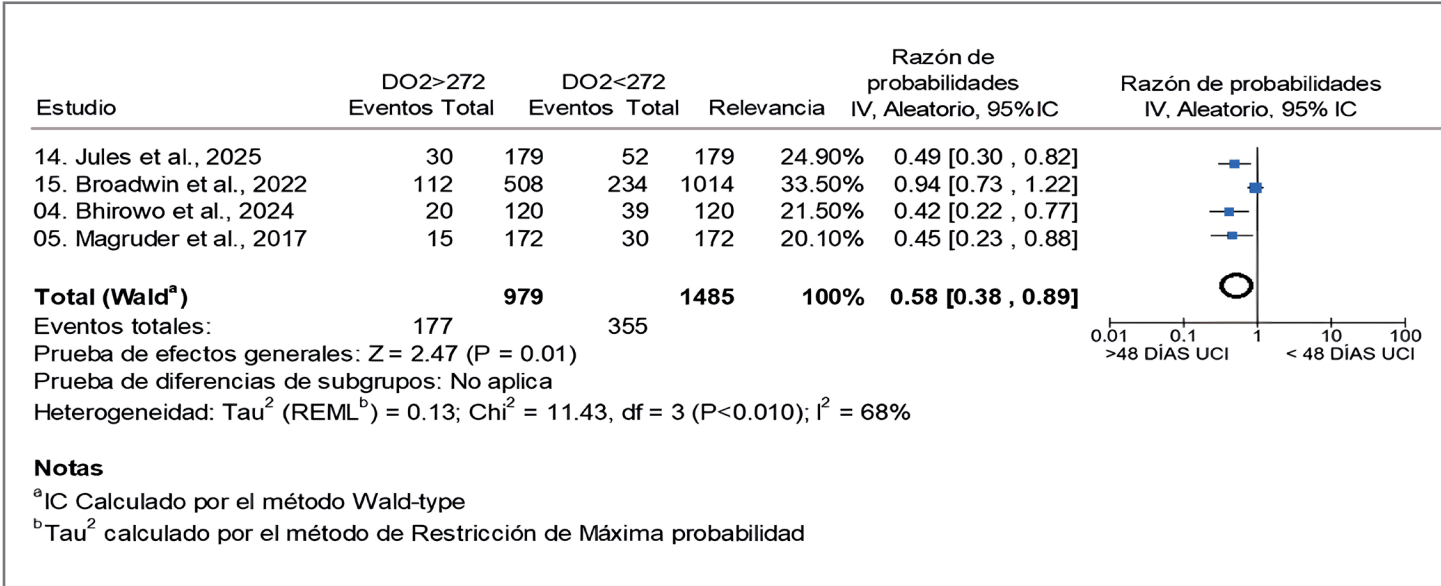


Figura 5. Diagrama de bosque de permanencia en Ci mayor a 48 días aplicando PBO y perfusión tradicional (sin efecto combinado).
Fuente: El autor / RevMan Cochrane.

Estas discrepancias probablemente se relacionan con múltiples factores, entre ellos heterogeneidad metodológica, diferencias en criterios de inclusión, variabilidad de protocolos perfusionales y diversidad tecnológica entre centros quirúrgicos. Además, muchos estudios presentan tamaños muestrales limitados o diseños retrospectivos que dificultan establecer relaciones causales definitivas.

Otro hallazgo importante es que la PBO ha evolucionado desde una estrategia exclusivamente técnica hacia un modelo multidisciplinario que involucra perfusionistas, cirujanos cardiovasculares, anestesiólogos e intensivistas. La adecuada implementación de protocolos basados en objetivos requiere no solo tecnología avanzada, sino también capacitación continua, interpretación fisiológica adecuada y toma de decisiones coordinada dentro del equipo quirúrgico.⁴²

La revisión también evidencia que uno de los principales desafíos actuales consiste en lograr estandarización internacional de los parámetros y protocolos utilizados. Aunque organizaciones científicas y guías recientes han avanzado en recomendaciones para circulación extracorpórea, aún existen diferencias significativas entre instituciones respecto a objetivos perfusionales, umbrales críticos y estrategias de monitoreo.^{17,40}

Adicionalmente, la implementación de PBO enfrenta barreras económicas importantes, especialmente en instituciones con recursos restringidos. Los sistemas de monitoreo continuo, sensores metabólicos y plataformas de análisis predictivo representan inversiones tecnológicas elevadas que pueden dificultar su adopción universal. Esta situación adquiere especial relevancia en países en desarrollo, donde las diferencias en infraestructura hospitalaria condicionan la aplicabilidad de protocolos avanzados de perfusión.

La evidencia disponible respalda la PBO como una estrategia prometedora para optimizar la seguridad y eficacia de la circulación extracorpórea. Su evolución futura probablemente estará orientada hacia integración de inteligencia artificial, automatización parcial de decisiones perfusionales y desarrollo de modelos predictivos más precisos capaces de individualizar completamente el soporte circulatorio intraoperatorio.

Finalmente, esta revisión permite identificar que la PBO continúa siendo un campo en expansión, donde la evolución tecnológica y la investigación clínica avanzan de forma paralela. La consolidación definitiva de la PBO como estándar universal dependerá de futuros estudios multicéntricos, validación de protocolos estandarizados y desarrollo de consensos internacionales que permitan reducir la heterogeneidad metodológica actualmente existente.

LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones más importantes que enfrentó este estudio, se puede mencionar la heterogeneidad metodológica de los estudios disponibles, la variabilidad entre dispositivos de monitoreo, diferencias en protocolos institucionales, las brechas económicas y ausencia de criterios internacionales completamente estandarizados. Estas limitaciones dificultan la comparación directa entre estudios y condicionan la implementación homogénea de la PBO en distintos entornos clínicos.

CONCLUSIONES

La perfusión basada en objetivos ha evolucionado desde un enfoque experimental centrado en variables hemodinámicas aisladas hacia un modelo integral de perfusión cardiovascular orientado por objetivos fisiológicos y metabólicos individualizados. La evidencia científica revisada demuestra que la incorporación de parámetros dinámicos como el suministro de oxígeno indexado, la producción de dióxido de carbono indexada, la saturación venosa de oxígeno y otros indicadores metabólicos ha permitido optimizar la monitorización intraoperatoria durante la circulación extracorpórea.

El mantenimiento de valores adecuados de DO_{2i} constituye uno de los principales pilares fisiológicos de la PBO y se relaciona consistentemente con reducción de insuficiencia renal aguda, menor hiperlactatemia y disminución de complicaciones postoperatorias asociadas a hipoperfusión tisular. No obstante, la revisión evidencia que aún no existe un consenso universal respecto a los umbrales fisiológicos ideales, lo que refleja la complejidad metabólica de la circulación extracorpórea y la necesidad de continuar desarrollando modelos más individualizados.

La evolución tecnológica ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la PBO. La incorporación de sistemas de monitoreo continuo, sensores metabólicos, plataformas digitales y herramientas basadas en inteligencia artificial ha favorecido una perfusión más precisa, dinámica y orientada a la prevención temprana de complicaciones. Asimismo, los modelos multifactoriales

de riesgo representan una tendencia emergente orientada hacia una toma de decisiones perfusionales más predictiva y personalizada.

Adicionalmente, la implementación de estrategias avanzadas de perfusión basada en objetivos continúa dependiendo de factores tecnológicos, económicos y formativos. La necesidad de personal altamente capacitado y la disponibilidad desigual de recursos hospitalarios representan desafíos importantes, especialmente en instituciones con limitaciones de infraestructura.

A pesar de estas dificultades, la PBO representa actualmente una de las estrategias más prometedoras para optimizar la seguridad y eficacia de la circulación extracorpórea en cirugía cardíaca. La tendencia futura apunta hacia una integración progresiva de inteligencia artificial, automatización de procesos perfusionales y modelos predictivos capaces de individualizar completamente el soporte circulatorio intraoperatorio.

Finalmente, son necesarios estudios multicéntricos prospectivos, consensos internacionales y procesos de estandarización metodológica que permitan consolidar la PBO como un estándar global de atención en cirugía cardiovascular. El desarrollo futuro de esta estrategia dependerá no solo del avance tecnológico, sino también de la capacidad de integrar conocimiento fisiológico, innovación clínica y formación especializada dentro de equipos multidisciplinarios de perfusión cardiovascular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Romaine Davis A. John Gibbon and His Heart-Lung Machine. 1st ed. Vol. 1. Pensilvania: University of Pennsylvania Press; 1991. 1-66 p
2. de Somer F, Mulholland JW, Bryan MR, Aloisio T, Van Nooten GJ, Ranucci M. O_2 delivery and CO_2 production during cardiopulmonary bypass as determinants of acute kidney injury: Time for a goal-directed perfusion management? Crit Care. 2011 Aug 10;15(4). doi:10.1186/cc10349 PubMed PMID: 21831302
3. Ranucci M, Romitti F, Isgrò G, Cotza M, Brozzi S, Boncilli A, et al. Oxygen delivery during cardiopulmonary bypass and acute renal failure after coronary operations. Annals of Thoracic Surgery. 2005 Dec;80(6):2213-20. doi:10.1016/j.athoracsur.2005.05.069 PubMed PMID: 16305874.

4. Salenger R, Fonner CE, Kampert C, Rea A, Evans C, Arora RC. Trial of Oxygen Delivery on Cardiopulmonary Bypass and Major Clinical Outcomes. *Annals of Thoracic Surgery Short Reports*. 2024 Dec. doi:10.1016/j.atssr.2024.05.012
5. Ranucci M, Aloisio T, Carboni G, Ballotta A, Pistuddi V, Menicanti L, et al. Acute Kidney Injury and Hemodilution During Cardiopulmonary Bypass: A Changing Scenario. *Annals of Thoracic Surgery*. 2015 Jul 1;100(1):95–100. doi:10.1016/j.athorac-sur.2015.02.034 PubMed PMID: 25916873.
6. Baker RA. Variation in Measurement and Reporting of Goal Directed Perfusion Parameters. *The Journal of ExtraCorporeal Technology*. 2017.
7. Broadwin M, Palmeri M, Kelting T, Groom R, Robich M, Lucas FL, et al. Goal Directed Perfusion Is Not Associated with a Decrease in Acute Kidney Injury in Patients Predicted to Be at High Risk for Acute Renal Failure after Cardiac Surgery. *Journal of Extra-Corporeal Technology*. 2022 Jun 1;54(2):128–34. doi:10.1051/ject/202254128 PubMed PMID: 35928338.
8. Karkouti K, Wijeyesundera DN, Yau TM, Callum JL, Cheng DC, Crowther M, et al. Acute kidney injury after cardiac surgery. Focus on modifiable risk factors. *Circulation*. 2009 Feb 3;119(4):495–502. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.108.786913 PubMed PMID: 19153273.
9. Ranucci M, Isgrò G, Romitti F, Mele S, Biagioli B, Giomarelli P. Anaerobic Metabolism During Cardiopulmonary Bypass: Predictive Value of Carbon Dioxide Derived Parameters. *Annals of Thoracic Surgery*. 2006 Jun;81(6):2189–95. doi:10.1016/j.athorac-sur.2006.01.025 PubMed PMID: 16731152.
10. Gay WJ, Ebert P. Functional, metabolic, and morphologic effects of potassium-induced cardioplegia. *Surgery*. 1973;74(2):90–284.
11. Naik SK, Knight A, Elliott MJ, Elliott M. A successful modification of ultrafiltration for cardiopulmonary bypass in children. *Perfusion*. 1991;6:41–50.
12. Bull B, Korpman R, Huse W, Briggs B. Heparin therapy during extracorporeal circulation. I. Problems inherent in existing heparin protocols. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1975 May;69:84–674.
13. Kremer P, Cahalan M, Beaupre P, Schröder E, Hanrath P, Heinrich H, et al. Intraoperative Überwachung mittels transoesophagealer zweidimensionaler Echokardiographie [Intraoperative monitoring using transesophageal 2-dimensional echocardiography]. *Anaesthesist*. 1985 Mar;34(3):7–111.
14. Al Awawdeh A, Iafrate M, Giovinazzo G. What are the minimal criteria of goal-directed perfusion (GDP) in adult cardiac surgery? *QScience Connect*. 2024 Nov 7;2024(1). doi:10.5339/connect.2024.spt.1
15. Condello I, Santarpino G, Nasso G, Moscarelli M, Fiore F, Speciale G. Management algorithms and artificial intelligence systems for cardiopulmonary bypass. *Perfusion (United Kingdom)*. SAGE Publications Ltd; 2022. p. 765–72. doi:10.1177/02676591211030762 PubMed PMID: 34250858.
16. Kennedy-Metz L, Dias R, Srey R, Rance G, Leissner K, Zorca S, et al. Human Factors Analysis of Goal-Directed Perfusion in Cardiac Surgery. In: *Healthcare and Medical Devices*. AHFE International; 2022. doi:10.54941/ahfe1002120
17. Wahba A, Kunst G, De Somer F, Agerup Kildahl H, Milne B, Kjellberg G, et al. 2024 EACTS/EACTAIC/EBCP Guidelines on cardiopulmonary bypass in adult cardiac surgery. *Interdisciplinary CardioVascular and Thoracic Surgery*. 2024 Feb 5;40(2). doi:10.1093/icvts/ivaf002
18. Ranucci M, Johnson I, Willcox T, Baker RA, Boer C, Baumann A, et al. Goal-directed perfusion to reduce acute kidney injury: A randomized trial. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2018 Nov 1;156(5):1918–1927.e2. doi:10.1016/j.jtcvs.2018.04.045 PubMed PMID: 29778331.
19. Yudo Pratomo B, Sudadi S, Yuli Setianto B, Tommy Novenanto T, Elvana F, Rayhan A, et al. Comparison GDP and conventional CPB impact on metabolism in cardiac center Sardjito general hospital. *F1000Res*. 2024 Sep 24;13:1092. doi:10.12688/f1000research.156333.
20. Magruder JT, Crawford TC, Harness HL, Grimm JC, Suarez-Pierre A, Wierschke C, et al. A pilot goal-directed perfusion initiative is associated with less acute kidney injury after cardiac surgery. In: *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. Mosby Inc.; 2017. p. 118–125.e1. doi:10.1016/j.jtcvs.2016.09.016 PubMed PMID: 27832832.
21. Rance G, Srey R, Shapeton AD, Leissner KB, Zenati MA. A Quick Reference Tool for Goal-Directed Perfusion in Cardiac Surgery. *Journal of Extra-Corporeal Technology*. 2019 Sep 1;51(3):172–4. doi:10.1051/ject/201951172 PubMed PMID: 31548741.
22. Lukaszewski M, Lukaszewski R, Kosiorowska K, Jasinski M. The use of data science to analyse physiology of oxygen delivery in the extracorporeal circulation. *BMC Cardiovasc Disord*. 2019 Dec 13;19(1). doi:10.1186/s12872-019-01301-6 PubMed PMID: 31835993.
23. Mukaida H, Matsushita S, Kuwaki K, Inotani T, Minami Y, Saigusa A, et al. Time-dose response of oxygen delivery during cardiopulmonary bypass predicts acute kidney injury. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2019 Aug 1;158(2):492–9. doi:10.1016/j.jtcvs.2018.10.148 PubMed PMID: 30578056.
24. Magruder JT, Weiss SJ, DeAngelis KG, Haddle J, Desai ND, Szeto WY, et al. Correlating oxygen delivery on cardiopulmonary bypass with Society of Thoracic Surgeons outcomes following cardiac surgery. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2022 Sep 1;164(3):997–1007. doi:10.1016/j.jtcvs.2020.12.008 PubMed PMID: 33485654.

25. Bousnina M, Jemel A, Soumer K, Sendi T, Ouerghi S, Marghli A. ARTICLE ORIGINAL Monitorage du transport artériel en oxygène sous circulation extra-corporelle: quelle implication sur la morbi-mortalité postopératoire ? Oxygen delivery monitoring under cardiopulmonary bypass: what implication on postoperative morbidity and mortality.
26. Mukaida H, Matsushita S, Yamamoto T, Minami Y, Sato G, Asai T, et al. Oxygen delivery-guided perfusion for the prevention of acute kidney injury: A randomized controlled trial. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2023 Feb 1;165(2):750-760. e5. doi:10.1016/j.jtcvs.2021.03.032 PubMed PMID: 33840474.
27. Peng Q, Cai M, Chen X, Lin T, Meng W, Guan L, et al. Nadir oxygen delivery during cardiopulmonary bypass in acute type A aortic dissection repair. *J Thorac Dis*. 2023 Sep 1;15(9):4859-68. doi:10.21037/jtd-23-561
28. Loeb J, Hariri G, Montana V, Carillion A, Hirwe A, Dureau P, et al. Implementation of a goal directed perfusion strategy to reduce cardiac surgery associated kidney injury: A before and after study. *J Clin Anesth*. 2025 Apr 1;103. doi:10.1016/j.jclinane.2025.111828
29. Gatica A, Muñoz-Valdivia C, Jan NVS, Ramos S. Goal-directed perfusion: Current practice in extracorporeal circulation techniques. *Revista Medica Clinica Las Condes*. 2024 Jan 1;35(1):8-13. doi:10.1016/j.rmcl.2023.11.003
30. Oshita T, Hiraoka A, Nakajima K, Muraki R, Arimichi M, Chikazawa G, et al. Impact of gender differences on optimal oxygen delivery thresholds to prevent acute kidney injury in cardiac surgeries with cardiopulmonary bypass. *JTCVS Open*. 2025 Apr 1. doi:10.1016/j.jxjon.2025.01.001
31. Pruna A, Monaco F, Asiller ÖÖ, Delrio S, Yavorovskiy A, Bello-mo R, et al. How Would We Prevent Our Own Acute Kidney Injury After Cardiac Surgery? *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2025 May 1. doi:10.1053/j.jvca.2025.01.019
32. Rasmussen SR, Kandler K, Nielsen R V., Cornelius Jakobsen P, Knudsen NN, Ranucci M, et al. Duration of critically low oxygen delivery is associated with acute kidney injury after cardiac surgery. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2019 Nov 1;63(10):1290-7. doi:10.1111/aas.13457 PubMed PMID: 31436307.
33. Lukaszewski M. Dilemmas of Adopting Goal-Directed Perfusion in Extracorporeal Circulation: A Narrative Review. *Innovations: Technology and Techniques in Cardiothoracic and Vascular Surgery*. SAGE Publications Ltd; 2023. p. 535-9. doi:10.1177/15569845231211904 PubMed PMID: 37997651.
34. Ranucci M, Baryshnikova E, Anguissola M, Mazzotta V, Scirea C, Cotza M, et al. Perfusion quality odds (PEQUOD) trial: validation of the multifactorial dynamic perfusion index as a predictor of cardiac surgery-associated acute kidney injury. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*. 2024 May 1;65(5). doi:10.1093/ejcts/ezae172 PubMed PMID: 38652571.
35. Suen WS, Mok CK, Chiu SW, Cheung KL, Lee WT, Cheung D, et al. Risk factors for development of acute renal failure (ARF) requiring dialysis in patients undergoing cardiac surgery. *Angiology*. 1998;49(10):789-800. doi:10.1177/000331979804900902 PubMed PMID: 9783643.
36. Ranucci M, Di Dedda U, Cotza M, Zamalloa Moreano K. The multifactorial dynamic perfusion index: A predictive tool of cardiac surgery associated acute kidney injury. *Perfusion (United Kingdom)*. 2024 Jan 1;39(1):201-9. doi:10.1177/02676591221137033 PubMed PMID: 36305847.
37. Hyasat B, Hani AB, Saraireh A Al, Kirmeen R Al, Sabha D, Yam-in S, et al. Real-time blood gas management: evaluating quantum perfusion system's accuracy against a standard blood gas analysis in CPB. *J Cardiothorac Surg*. 2025 Dec 1;20(1). doi:10.1186/s13019-025-03409-7.
38. O'Connor S, Yan Y, Thilo FJS, Felzmann H, Dowding D, Lee JJ. Artificial intelligence in nursing and midwifery: A systematic review. *J Clin Nurs*. 2023 Jul 31;32(13-14):2951-68. doi:10.1111/jocn.16478
39. Hadano H, Kamio T, Fukaguchi K, Sato M, Tsunano Y, Koyama H. Analysis of adverse events related to extracorporeal membrane oxygenation from a nationwide database of patient-safety accidents in Japan. *Journal of Artificial Organs*. 2024 Mar 1;27(1):15-22. doi:10.1007/s10047-023-01386-z PubMed PMID: 36795227.
40. Milojevic M, Milosevic G, Nikolic A, Petrovic M, Petrovic I, Bo-jic M, et al. Mastering the Best Practices: A Comprehensive Look at the European Guidelines for Cardiopulmonary Bypass in Adult Cardiac Surgery. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023. doi:10.3390/jcdd10070296 41. Newland RF, Baker RA, Woodman RJ, Barnes MB, Willcox TW. Predictive Capacity of Oxygen Delivery During Cardiopulmonary Bypass on Acute Kidney Injury. *Annals of Thoracic Surgery*. 2019 Dec 1;108(6):1807-14. doi:10.1016/j.athoracsur.2019.04.115 PubMed PMID: 31238029.
42. Willcox TW, Baker RA. Original Articles Incident Reporting in Perfusion: Current Perceptions on PIRS-2. *The Journal of Extra-Corporeal Technology*. 2020.

Fecha de recepción: 22 de mayo de 2026.

Fecha de aceptación: 11 de julio de 2026.