

DIEGO MAXIMILIANO GARCÍA FLORES

CORRELACIÓN ENTRE EL GASTO CARDÍACO MEDIDO POR ULTRASONIDO TRANSTORÁCICO DOPPLER  
Y EL MÉTODO DE FICK MODIFICADO SEGÚN LAS FÓRMULAS PARA ESTIMAR EL CONSUMO DE  
OXÍGENO EN PACIENTES CON INESTABILIDAD HEMODINÁMICA.

2025



# Universidad Autónoma de Querétaro

## Facultad de Medicina

CORRELACIÓN ENTRE EL GASTO CARDÍACO MEDIDO POR  
ULTRASONIDO TRANSTORÁCICO DOPPLER Y EL MÉTODO DE FICK  
MODIFICADO SEGÚN LAS FÓRMULAS PARA ESTIMAR EL CONSUMO  
DE OXÍGENO EN PACIENTES CON INESTABILIDAD HEMODINÁMICA

### Tesis

Que como parte de los requisitos  
para obtener el Diploma de

ESPECIALIDAD EN MEDICINA INTERNA

Presenta:

Méd. Gral. Diego Maximiliano García Flores

Dirigido por:

Méd. Esp. Elba Susana Padilla Ávila

Co-Director

Méd. Esp. Sergio Adrián Zúñiga Mendoza

Querétaro, Qro. a 23 de octubre del 2025

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Medicina

CORRELACIÓN ENTRE EL GASTO CARDÍACO MEDIDO POR ULTRASONIDO  
TRANSTORÁCICO DOPPLER Y EL MÉTODO DE FICK MODIFICADO SEGÚN LAS  
FÓRMULAS PARA ESTIMAR EL CONSUMO DE OXÍGENO EN PACIENTES CON  
INESTABILIDAD HEMODINÁMICA.

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el diploma de la Especialidad en **Medicina  
Interna**

Presenta:

Méd. Gral. Diego Maximiliano García Flores

Dirigido por:

Méd. Esp. Elba Susana Padilla Ávila

Co-Director

Méd. Esp. Sergio Adrián Zúñiga Mendoza

Med. Esp. Elba Susana Padilla Ávila

Presidente

Med. Esp. Sergio Adrián Zúñiga Mendoza

Secretario

Med. Esp. Teresa Nadia Flores Orta

Vocal

Med. Esp. Eliodoro Castro Montes

Suplente

M.C.E. Martha Leticia Martínez Martínez

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario noviembre 2025.  
México.

## Resumen

**Introducción:** El shock es la expresión clínica de la falla circulatoria y el gasto cardíaco (GC) es la forma de monitorizarlo. El método acuñado en 1870 por Fick es un referente para este cálculo, pero su aplicación requiere medición directa del consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>). Los modelos matemáticos de LaFarge, Dehmer, Bergstra y MET pueden predecir el VO<sub>2</sub>. Sin embargo, diversos estudios han mostrado falta de correlación de estos con mediciones directas, aunque con salvedades relacionadas a la metodología y contexto en que se aplican. **Objetivo:** Correlacionar el gasto cardíaco medido por ultrasonido transtorácico Doppler y el método de Fick modificado según las fórmulas de LaFarge, Bergstra, Dehmer y por equivalente metabólico de trabajo para estimar el consumo de oxígeno en pacientes con inestabilidad hemodinámica. **Material y métodos:** Se trata de un estudio observacional, transversal y correlacional, realizado en pacientes del Hospital General de Querétaro, durante el año 2025, en una muestra de 132 pacientes, mayores a 18 años, con definición de choque. Se obtuvieron muestras de sangre arterial y venosa central para el cálculo del Fick modificado y se midió el GC por ecocardiografía Doppler. **Resultados:** Los participantes fueron hombres en un 56%, en promedio de 55.1 años, peso 69.4 kg, talla de 163.42 cm, IMC de 25.9 m<sup>2</sup>, y SC de 1.74 m<sup>2</sup>. La mayoría cursó con choque distributivo en un 95.45%, sólo 4.54% tuvieron causa cardíaca. La fórmula de LaFarge demostró mayor correlación con el GC Doppler, con una R de Pearson de 0.401 (P < 0.001), seguido por Dehmer en pacientes con sedación (R 0.393, P <0.001) y MET (R 0.377, P <0.001). Al análisis por subgrupos se observó que en determinados rangos de edad, SC, FC, hemoglobina y SaO<sub>2</sub> se obtiene un coeficiente de correlación fuerte, en promedio de 0.82 con p <0.001 entre los 6 modelos estudiados, aunque con una N promedio de 17.83 ± 5.72 pacientes. **Conclusiones:** Se demostró que el gasto cardíaco por método de Fick modificado correlaciona con el medido por ultrasonido transtorácico Doppler. Se observó que la edad, SC, FC, hemoglobina y SaO<sub>2</sub> influyeron en mayor medida en los resultados.

**Palabras clave:** Fick, LaFarge, Bergstra, Dehmer, MET, gasto cardíaco.

## Summary

**Introduction:** Shock is the clinical manifestation of circulatory failure, and cardiac output (CO) is the method used to monitor it. The method developed by Fick in 1870 is a benchmark for this calculation, but its application requires direct measurement of oxygen consumption (VO<sub>2</sub>). The mathematical models of LaFarge, Dehmer, Bergstra, and MET can predict VO<sub>2</sub>. However, several studies have shown a lack of correlation between these models and direct measurements, although with caveats related to the methodology and context in which they are applied. **Objective:** To correlate cardiac output measured by transthoracic Doppler ultrasound with the modified Fick method, using the formulas of LaFarge, Bergstra, Dehmer, and metabolic equivalent of work, to estimate oxygen consumption in hemodynamically unstable patients. **Materials and methods:** This is an observational, cross-sectional, and correlational study conducted in patients at the General Hospital of Querétaro during 2025, in a sample of 132 patients over 18 years of age, with a definition of shock. Arterial and central venous blood samples were obtained for the calculation of the modified Fick score, and cardiac output (CO) was measured by Doppler echocardiography. **Results:** Participants were 56% male, with a mean age of 55.1 years, weight 69.4 kg, height 163.42 cm, BMI 25.9 m<sup>2</sup>, and body surface area (BSA) 1.74 m<sup>2</sup>. The majority (95.45%) presented with distributive shock; only 4.54% had a cardiac cause. The LaFarge formula showed the strongest correlation with Doppler CO, with a Pearson's R of 0.401 (P < 0.001), followed by the Dehmer formula in sedated patients (R 0.393, P < 0.001) and in patients on MET (R 0.377, P < 0.001). Subgroup analysis revealed a strong correlation coefficient, averaging 0.82 (p < 0.001) among the six models studied for specific age ranges, body composition, heart rate, hemoglobin, and oxygen saturation (SaO<sub>2</sub>), although the sample size was an average of 17.83 ± 5.72 patients. **Conclusions:** Cardiac output measured using the modified Fick method was shown to correlate with that measured by transthoracic Doppler ultrasound. Age, body composition, heart rate, hemoglobin, and SaO<sub>2</sub> were found to have the greatest influence on the results.

Keywords: Fick, LaFarge, Bergstra, Dehmer, MET, cardiac output.

## **Dedicatorias**

Dedicado a mis padres, cuyo apoyo en todo momento a través de la licenciatura y posgrado ha sido fundamental para alcanzar este punto. Que sea esta investigación y las dificultades procedimentales superadas reflejo de sus enseñanzas y ganas de superarse.

## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a mi prometida, Esther Domínguez, cuyo apoyo durante la toma de muestras, obteniendo gasometrías arteriales y venosas en cada piso del Hospital General, así como sus ánimos en cada momento, fueron clave para la consecución de este trabajo.

Asimismo, agradezco a los residentes de mi propio servicio, en Medicina Interna, y a los residentes del servicio de Urgencias por su apoyo para detectar pacientes en estado de choque y facilitarme la obtención de gasometrías arteriales y venosas centrales, así como por su interés en la ecocardiografía, que más de una vez nos llevó a hallazgos de relevancia y al perfeccionamiento de su técnica.

## Índice

Contenido	Página
<u>Resumen</u>	i
<u>Summary</u>	ii
<u>Dedicatorias</u>	iii
<u>Agradecimientos</u>	iv
<u>Índice</u>	v
<u>Índice de cuadros</u>	vi
<u>Abreviaturas y siglas</u>	viii
<b>I. <u>Introducción</u></b>	1
<b>II. <u>Antecedentes / Estado del Arte</u></b>	3
<b>III. <u>Fundamentación teórica</u></b>	23
<b>IV. <u>Hipótesis</u></b>	28
<b>V. <u>Objetivos</u></b>	
V.1 General	29
V.2 Específicos	29
<b>VI. <u>Material y métodos</u></b>	
VI.1 <u>Tipo de investigación</u>	30
VI.2 <u>Población</u>	30
VI.3 <u>Muestra y tipo de muestreo</u>	30
VI.3.1 <u>Criterios de selección</u>	30
VI.3.2 <u>Variables estudiadas</u>	32
VI.3.3 <u>Técnicas e instrumentos</u>	33
VI.4 <u>Procedimientos</u>	34
VI.5.1 <u>Análisis estadístico</u>	36
VI.5.2 <u>Consideraciones éticas</u>	36
<b>VII. <u>Resultados</u></b>	40
<b>VIII. <u>Discusión</u></b>	51
<b>IX. <u>Conclusiones</u></b>	53
<b>X. <u>Propuestas</u></b>	54
<b>XI. <u>Bibliografía</u></b>	55
<b>XII. <u>Anexos</u></b>	59

## Índice de cuadros

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
Tabla VII.1.1	<u>Frecuencia según el sexo</u>	40
Tabla VII.1.2	<u>Promedios de variables somatométricas</u>	41
Tabla VII.1.3	<u>Frecuencia según el tipo de choque</u>	41
Tabla VII.1.4	<u>Determinación del gasto cardíaco por distintos métodos</u>	41
Tabla VII.2	<u>Correlación del gasto cardíaco con las distintas fórmulas del método de Fick modificado</u>	46
Tabla VII.3	<u>Nivel de correlación de Pearson en subgrupos seleccionados</u>	47
Tabla VIII.1	<u>Correlación con literatura previa</u>	52
Figura VII.1	<u>Dispersión del gasto cardíaco por las 4 fórmulas del Fick modificado</u>	42
Figura VII.2	<u>Diagrama de dispersión de LaFarge por GC Doppler</u>	43
Figura VII.3	<u>Diagrama de dispersión de Bergstra por GC Doppler</u>	43
Figura VII.4	<u>Diagrama de dispersión de Dehmer por GC Doppler</u>	44
Figura VII.5	<u>Diagrama de dispersión de Dehmer en sedación por GC Doppler</u>	44
Figura VII.6	<u>Diagrama de dispersión de Dehmer despierto por GC Doppler</u>	45
Figura VII.7	<u>Diagrama de dispersión de MET por GC Doppler</u>	45
Figura VII.8	<u>Diagrama de dispersión de LaFarge por GC Doppler</u>	48
Figura VII.9	<u>Diagrama de dispersión de Bergstra por GC Doppler</u>	48
Figura VII.10	<u>Diagrama de dispersión de Dehmer por GC Doppler</u>	49
Figura VII.11	<u>Diagrama de dispersión de Dehmer en sedación por GC Doppler</u>	49
Figura VII.12	<u>Diagrama de dispersión de Dehmer despierto por GC Doppler</u>	50
Figura VII.13	<u>Diagrama de dispersión de MET por GC Doppler</u>	50

## Abreviaturas y siglas

BO <sub>2</sub>	Transporte de oxígeno de la hemoglobina
CaO <sub>2</sub>	Contenido arterial de oxígeno
CI	Intervalo de confianza
CvO <sub>2</sub>	Contenido venoso de oxígeno
DO <sub>2</sub>	Entrega de oxígeno
ETE	Ecocardiograma transesofágico
ETT	Ecocardiograma transtorácico
FC	Frecuencia cardíaca
FiO <sub>2</sub>	Fracción inspirada de oxígeno
GC	Gasto cardíaco
IC	Índice cardíaco
ICC	Insuficiencia cardíaca congestiva
IMC	Índice de masa corporal
LVOT	Tracto de salida del ventrículo izquierdo
mCO <sub>2</sub> F	Método de Fick con dióxido de carbono
NYHA	New York Heart Association
PAD	Presión arterial diastólica
PAM	Presión arterial media
PAS	Presión arterial sistólica
SC	Superficie corporal
SvcO <sub>2</sub>	Saturación venosa central de oxígeno
SvO <sub>2</sub>	Saturación venosa mixta de oxígeno
UCI	Unidad de cuidados intensivos
VO <sub>2</sub>	Consumo de oxígeno
VTI	Integral velocidad - tiempo

## I. Introducción

Existe una importante proporción de pacientes en la atención hospitalaria que cursan con inestabilidad hemodinámica. Ya sea como motivo de ingreso, requiriendo ser estabilizados en área de choque, o como agravante de quienes ya se encontraban internados. Cualquiera que sea el escenario, estos pacientes son categorizados como críticos, y su atención llega a ser meritoria de estancia en cuidados intensivos. Para brindar la atención apropiada se requiere identificación y monitorización del tipo de choque que origina esta condición. Para ello existen diversas herramientas, unas más accesibles o simples que otras, dependiendo de la unidad de cuidados hospitalarios.

Un método de uso bastante extendido, conocido como principio de Fick modificado permite estimar el gasto cardíaco (GC) de forma moderadamente invasiva, a través de la obtención de muestras de sangre arterial y venosa central, o idealmente sangre venosa mixta y recolección de variables sociodemográficas como edad y sexo, y clínicas como el IMC, lo cual implica una facilidad relativa para su obtención ya que no se demanda habilidades técnicas especializadas o procedimentales para llevarlo a cabo.

Sin embargo, este método ha perdido importancia tras la introducción de métodos que permiten la medición directa del gasto cardíaco, como son la termodilución y la ecografía Doppler pulsado; los cuales suelen ser menos accesibles en la práctica médica de unidades de primer y segundo nivel de países en vías de desarrollo.

La tendencia al desuso en la práctica clínica del principio de Fick modificado es resultado de ensayos clínicos que lo comparan con estas técnicas nuevas para evaluar su precisión, demostrando en general un bajo nivel de correlación. Sin embargo, la literatura demuestra resultados variables, en poblaciones heterogéneas, y aunados al sesgo metodológico de que cada centro de investigación utiliza el modelo matemático de uso rutinario local para estimar el  $VO_2$ , que es parte de la fórmula necesaria para calcular el Fick modificado, no

tomándose en cuenta que existen al menos 4 modelos descritos en la literatura; las fórmulas de LaFarge, Bergstra, Dehmer y por equivalente metabólico de trabajo.

Al no existir antecedente de estudios en que se compraren estas 4 fórmulas predictivas de forma simultánea con métodos directos de medición del gasto cardíaco es que se busca a través de esta investigación establecer una comparación fidedigna, agotando todos los recursos predictivos para determinar si alguno de ellos se correlaciona con un método directo; la ecografía Doppler pulsado.

Este último ha demostrado una correlación equiparable al método de referencia actual, que es la termodilución, por lo que se seleccionó como punto de referencia de medición directa a partir del cual comparar con los modelos predictivos, además de que su uso se ha popularizado en centros con acceso a ultrasonido a pie de cama y con personal capacitado para utilizarlo.

La trascendencia de este estudio radica en que, si se consigue demostrar que alguna fórmula para predecir el consumo de oxígeno y entonces calcular el método de Fick modificado resulta equiparable con la ecografía Doppler, podrá validarse su utilidad en la monitorización hemodinámica sin llegar a requerir de ecocardiograma y un médico entrenado para la medición con técnica Doppler. O en su defecto, demostrar que el método es impreciso y que debería abandonarse su uso en las unidades hospitalarias.

## II. Antecedentes / Estado del Arte

El *shock* es la expresión clínica de la falla circulatoria que resulta en una utilización inadecuada del oxígeno celular. Esta condición es común en cuidados críticos, afectando aproximadamente a un tercio de los pacientes en la unidad de cuidados intensivos (UCI). Según Vincent (2013), el diagnóstico de shock se basa en tres componentes principales; hipotensión arterial, cuando la presión arterial sistólica es menor de 90 mm Hg o la presión arterial media es menor de 65 mm Hg, resultando a menudo en taquicardia. Segundo, signos clínicos de hipoperfusión tisular demostrados a través de ventanas cutánea (encontrando piel fría y húmeda, con vasoconstricción y cianosis), renal (encontrando producción de orina < 0.5 ml/kg/hora) y neurológica (con alteración del estado mental que puede incluir obnubilación y confusión). El tercer componente es la hiperlactatemia, la cual es indicativa de metabolismo celular anormal del oxígeno, con niveles de lactato en sangre superiores a 1.5 mmol/L en caso de falla circulatoria aguda.

Para Standl (2018) existen 4 tipos distintos de shock, los cuales se pueden clasificar en cuatro categorías principales, cada una relacionada con un sistema orgánico específico:

1. Shock hipovolémico: Es causado por pérdida de volumen intravascular. Se puede subdividir en cuatro categorías: Shock hemorrágico, que resulta de hemorragias agudas sin lesiones de tejidos blandos. Shock hemorrágico traumático: Hemorragia con lesiones de tejidos blandos y liberación de activadores del sistema inmune. Shock hipovolémico no hemorrágico: Pérdida crítica de volumen circulante sin hemorragia. Shock hipovolémico traumático: Pérdida de volumen debido a lesiones de tejidos blandos sin hemorragia.

2. Shock distributivo: Es un estado de hipovolemia relativa por redistribución patológica del volumen intravascular. Se subdivide en shock séptico: Respuesta desregulada a una infección. Shock anafiláctico: Mediada por

histamina y reacciones alérgicas. Shock neurogénico: Resultado de disfunción del sistema nervioso.

3. Shock cardiogénico: Disfunción cardíaca primaria que resulta en un inadecuado gasto cardíaco (GC).

4. Shock obstructivo: Bloqueo de la circulación debido a obstrucciones en los grandes vasos o el corazón.

Con el fin de identificar el tipo de shock se requiere iniciar monitoreo hemodinámico, el cual ha evolucionado pasando de métodos básicos a técnicas más avanzadas que incluyen medidas continuas de presión arterial, GC y oxigenación sanguínea. Según Suess (2015) puede utilizarse el ultrasonido, el cual es no invasivo y se ha convertido en una herramienta fundamental en la práctica de la UCI, o si es requerido, se puede iniciar monitoreo invasivo mediante catéteres arteriales y venosos centrales, y en algunos casos, catéteres de arteria pulmonar.

Como parte de las herramientas necesarias para realizar monitoreo hemodinámico se requiere cuantificar el GC. Según la revisión publicada por González (2020). Éste se define como la cantidad de sangre que expulsa el corazón en un minuto, expresándose como:  $GC = \text{Volumen sistólico} \times \text{Frecuencia cardíaca}$ . El índice cardíaco (IC) en cambio, se expresa:  $GC \times m^2$  de superficie corporal. Para que se pueda llevar a cabo esta expulsión de sangre, se tienen que considerar tres determinantes, las cuales son la precarga; que está relacionada con el llenado ventricular, el cual depende del retorno venoso. La poscarga, que es la resistencia al vaciamiento del corazón, y que se asocia inversamente con el GC. Y finalmente la contractilidad cardíaca, que es la capacidad intrínseca del miocardio para bombear sangre, influenciada por factores nerviosos y humorales. De forma aplicada, cada mecanismo de shock tiene características relativas al GC que permiten su identificación:

- Shock hipovolémico: Bajo GC, alta resistencia vascular sistémica y baja presión venosa central.

- Shock cardiogénico: Bajo GC, alta resistencia vascular sistémica y alta presión venosa central.
- Shock obstructivo: Disminución del GC con resistencia vascular variable.
- Shock distributivo: GC normal o alto con tono vascular perdido.

Para obtener de forma oportuna la cuantificación del GC existen distintas técnicas bastante heterogéneas entre sí, que según la revisión realizada por García (2011), se pueden clasificar en métodos invasivos, mínimamente invasivos y no invasivos. El método invasivo de referencia es la termodilución transcardíaca, la cual fue introducida en los años setenta y consiste en la colocación un catéter en la aurícula derecha y otro en la arteria pulmonar. Calcula el GC a partir de la temperatura de un trazador inyectado a la aurícula derecha y mide los cambios en la temperatura mediante un sensor distal en la arteria pulmonar. Tiene como limitaciones el riesgo de infección y arritmias. Dentro de los métodos mínimamente invasivos está la termodilución transpulmonar, introducida en los años noventa, la cual es similar a la termodilución transcardíaca pero se considera menos invasiva, usando un catéter venoso central y un catéter arterial axilar o femoral, a través de los cuales se inserta un termistor que permite la medición de temperatura de la sustancia administrada. Por este mismo motivo existe la limitante de que los cambios de temperatura inducidos por otros líquidos suministrados pueden inducir variaciones que dificulten la medición. Por ejemplo, inyecciones de suero frío a través de catéteres venosos cercanos al catéter arterial, uso de tratamientos de depuración extracorpórea que causen recirculación del indicador térmico causando artefactos, shunts intracardíacos que alteran el registro de la curva de termodilución. Otro método es la litiodilución, que utiliza cloruro de litio para medir el GC a través de un sensor en línea arterial, al no existir este elemento en el torrente sanguíneo a menos que el paciente tome sales de litio, esta técnica confiere la misma precisión que la termodilución. Existen métodos que se basan en el análisis del pulso sistólico, tales como el análisis del contorno de la presión de pulso sistólico, análisis de la potencia de pulso y análisis de la onda de pulso. Otro método no invasivo enlistado por De María (2000) es la

bioimpedancia/biorreactancia, que mide cambios en la impedancia eléctrica torácica durante el ciclo cardíaco. Es un método fácil de usar y con un potencial significativo para la monitorización continua del GC, ya que proporciona mediciones continuas y en tiempo real. Sus desventajas consisten en que la precisión y exactitud pueden ser variables dependiendo del estado del paciente y que requiere validación en comparación con métodos tradicionales más precisos.

En la práctica cotidiana para la atención de pacientes críticos, una forma de monitorización hemodinámica es mediante la medición de la saturación venosa de oxígeno obtenida de una vía central. Sánchez (2021), explica la diferencia entre dos tipos de parámetros: Saturación venosa mixta de oxígeno ( $SvO_2$ ) y la saturación venosa central de oxígeno ( $SvcO_2$ ), los cuales son reflejo de la oxigenación tisular y la perfusión. La  $SvO_2$  se mide en la arteria pulmonar y representa la saturación de oxígeno en la sangre venosa mixta, que proviene de la mezcla de sangre de las venas cavas superior e inferior, así como de la sangre que regresa del lecho capilar pulmonar. Es un reflejo del equilibrio entre los determinantes de la saturación venosa, que son la entrega de oxígeno ( $DO_2$ ) y el consumo de oxígeno ( $VO_2$ ). En cambio, la  $SvcO_2$  se mide en la vena cava superior y refleja la saturación de oxígeno de la sangre venosa central, que es menos influenciada por el retorno venoso de la parte inferior del cuerpo. Sin embargo, en pacientes críticos  $SvO_2$  y  $SvcO_2$  no difieren significativamente en su coeficiente de correlación como se demostró en un modelo experimental en perros con hipoxia o hipovolemia, guardando una tendencia paralela entre sí. (Carrillo, 2007). Por esta razón, en condiciones normales la  $SvcO_2$  es menor que la  $SvO_2$ , pero en estados de shock, puede ser mayor debido a un aumento en la extracción de oxígeno desde el cuerpo inferior (Sánchez, 2021).

Los determinantes de la saturación venosa actúan de forma dinámica y se reflejan en la  $SvO_2$  y  $SvcO_2$ . El  $DO_2$  es mayor que el  $VO_2$ , lo que asegura que los tejidos reciban suficiente oxígeno. El  $VO_2$  se adapta a las necesidades metabólicas de los tejidos. En situaciones de hipoperfusión o choque circulatorio, el  $VO_2$  puede mantenerse a expensas de una mayor extracción de oxígeno, lo que

se refleja en la disminución de la SvO<sub>2</sub> y SvcO<sub>2</sub>. Por otra parte, la extracción de oxígeno evalúa la oxigenación tisular. Un aumento en la extracción de oxígeno puede ser un signo de hipoperfusión, lo que resulta en un descenso de la SvO<sub>2</sub> y SvcO<sub>2</sub>. En condiciones críticas, la extracción de oxígeno se convierte en el principal determinante del VO<sub>2</sub> cuando el DO<sub>2</sub> es insuficiente. Por último, hay que tomar en cuenta las condiciones clínicas; donde tanto SvO<sub>2</sub> y SvcO<sub>2</sub> son particularmente útiles en el contexto de sepsis, insuficiencia cardíaca y trauma. En estos escenarios, su monitoreo puede guiar la terapia y ayudar a identificar la hipoperfusión oculta, lo que es crítico para la intervención oportuna y el manejo del paciente (Carrillo, 2007).

De esta forma, la medición de SvO<sub>2</sub> o SvcO<sub>2</sub> resulta una forma indirecta de medir el GC, ya que son determinantes del VO<sub>2</sub>. A partir de esta aproximación es que se puede formular si es posible una medición del GC mediante los gases de la sangre, lo cual es en realidad la forma más antigua de monitorizarlo.

Haciendo una pequeña revisión histórica, Valentinuzzi (2013) explica que el investigador Adolph Fick (1829–1901) introdujo en 1870 un método para medir el gasto cardíaco, aunque no pudo aplicarlo debido a la falta de tecnología comprobarlo. Su modelo matemático se basa en la relación entre la cantidad de oxígeno que un organismo absorbe y la diferencia en la concentración de oxígeno entre la sangre arterial y venosa. Fick explicó que, al medir la cantidad de oxígeno que un animal toma del aire y la que expulsa como dióxido de carbono, se puede determinar el volumen de sangre que pasa por los pulmones en un tiempo determinado. La fórmula resultante se expresa como:  $GC = VO_2 / [A - V]$ . Donde VO<sub>2</sub> representa el consumo neto de oxígeno, [A] y [V] son las concentraciones de oxígeno en la sangre arterial y venosa, respectivamente. Este método fue un referente en la medición del gasto cardíaco y se conoció como el método de Fick. Sería hasta 1929 que Werner Forssmann Realizara la primera cateterización del corazón humano, y en 1930 que Otto Klein utilizara el método de Fick en humanos, aunque su vida y carrera se vieron afectadas por su origen judío durante el régimen nazi.

El problema del método de Fick directo es que para determinar el GC se requiere no sólo de la cateterización de grandes vasos, con el riesgo que eso implica si no se encuentra clínicamente justificado, sino también de la medición de gases espirados con dispositivos especializados para medir el  $VO_2$ . Debido a estas condiciones surge la necesidad de estimarlo cuando no se puede realizar una medición directa. A esta forma estimativa de calcularlo se le conoce como método de Fick modificado.

En 1970 LaFarge y Miettinen realizaron el primer estudio para la estimación de la tasa de  $VO_2$  indizado a superficie corporal (SC), para su uso durante la cateterización cardíaca. Esta estimación se derivó de un análisis multivariado de covarianza aplicado a 879 pacientes, principalmente niños, con diversas enfermedades cardíacas. Se incluyeron pacientes que se sometieron a cateterización cardíaca entre el 1 de enero de 1961 y el 30 de noviembre de 1966, con edades entre 3 y 40 años. El  $VO_2$  se determinó recolectando el aire espirado del paciente durante un período de tiempo específico en una bolsa Douglas utilizando una válvula de dos vías y una boquilla. El volumen total de aire espirado se midió con un espirómetro Collins. Las presiones parciales de oxígeno en el aire ambiental y en el aire espirado se determinaron en duplicado mediante un analizador de  $pO_2$  de Beckman. En cambio, el cálculo del  $VO_2$  se realizó utilizando una fórmula modificada que toma en cuenta varios factores, incluyendo el volumen de aire espirado y las concentraciones de oxígeno en el aire inspirado y espirado, así como la presión barométrica. Se registraron datos sobre  $VO_2$ , altura, peso, sexo, frecuencia cardíaca y diferencia de oxígeno arteriovenoso. Las ecuaciones finales para estimar  $VO_2/SC$ : para hombres y mujeres se expresaron como:

- Para hombres:

$$VO_2/SC = [138 - 11.4 \ln(\text{edad}) + 0.378(FC)] \text{ (ml/min)/m}^2$$

- Para mujeres:

$$VO_2/SC = [138 - 17.04 \ln(\text{edad}) + 0.378(FC)] \text{ (ml/min)/m}^2$$

El estudio proporcionó un método para estimar  $\text{VO}_2$  en situaciones donde no se puede obtener una medición directa. Sin embargo, la precisión de las estimaciones se vio afectada por errores aleatorios en los coeficientes del modelo y por limitaciones inherentes al uso de la superficie corporal como medio de indización. Se concluye que las estimaciones deben aplicarse solo cuando no sea posible realizar mediciones adecuadas. Sin embargo, resalta que la mayor parte de la muestra de pacientes tenía entre 3 y 40 años de edad al momento de la cateterización cardíaca, siendo mayormente niños, aunque el documento no proporciona un número exacto de cuántos de esos pacientes eran específicamente de este grupo etario (LaFarge, 1970).

En 1982 vendría una respuesta al estudio de LaFarge y Miettinen, a cargo de Dehmer. Este admite que el estudio antecesor se basa en datos obtenidos principalmente de una población pediátrica, siendo que sus conclusiones pueden no ser aplicables a pacientes adultos, ya que el consumo de  $\text{O}_2$  puede variar significativamente con la edad y las condiciones fisiológicas. Este nuevo estudio analizó a 108 pacientes (69 hombres y 39 mujeres) con un promedio de edad de 49 años. Se encontró que el índice de consumo de oxígeno promedio fue de  $126 \pm 26$  ml/min/m<sup>2</sup> con una notable variabilidad en el rango (de 65 a 250 ml/min/m<sup>2</sup>), y se observó que el consumo no se veía afectado por la edad o el sexo, aunque se observó diferencia según el uso de sedación; 51 pacientes no recibieron sedación previa a la cateterización, y tuvieron un  $\text{VO}_2$  promedio de  $132 \pm 28$  ml/min/m<sup>2</sup>, los restantes 57 pacientes que sí recibieron sedación ligera tuvieron un  $\text{VO}_2$  promedio de  $121 \pm 22$  ml/min/m<sup>2</sup> (Dehmer, 1982).

Vendría otra respuesta en 1995, esta vez a cargo de Bergstra 1995, debido a diferencias en cuanto a la precisión de la fórmula predecesora. Se realizó un ensayo en el que se incluyeron 250 pacientes consecutivos (grupo de control) y 60 pacientes (grupo de validación) que presentaban enfermedades cardíacas congénitas así como adquiridas y que fueron sometidos a cateterización del corazón derecho e izquierdo. Dentro del grupo de control, se seleccionaron 130 pacientes (grupo de edad especial) que coincidían en rango de edad con la

población de LaFarge y Miettinen (de 4 a 40 años) para comparar los valores de consumo de oxígeno calculados con los obtenidos mediante la dilución de colorante. Además, se excluyeron pacientes con ritmos cardíacos irregulares, como fibrilación auricular o bloqueo auriculoventricular, y aquellos en quienes el shunt era demasiado grande para calcular flujos a partir de las curvas de dilución de colorante obtenidas. Se observó que el  $VO_2$  estimado según la fórmula de LaFarge y Miettinen era significativamente más bajo que el  $VO_2$  calculado a partir de la dilución de colorante, con una diferencia promedio de  $-21.8 \pm 29.3$  ml/min<sup>-1</sup> ( $p < 0.0001$ ). De esta manera se planteó la siguiente fórmula para estimar el consumo de oxígeno:

$$VO_2 = (157.3 \times SC + 10 \times \text{Sexo} - 10.5 \times \ln(\text{edad}) + 4.8) \text{ ml/min}^{-1}$$

Donde la variable de sexo es 1 en caso de hombres y 0 en caso de mujeres. Esta nueva fórmula se validó prospectivamente y mostró un mejor acuerdo con los valores reales de consumo de oxígeno en comparación con los obtenidos a través de la fórmula predecesora (Bergstra, 1995).

Existe otra manera de estimar el  $VO_2$  basada en el cálculo del consumo de oxígeno en reposo en individuos sanos. Kern (2014) explica que la equivalencia metabólica de trabajo (MET) cuyo valor estándar corresponde a 1, equivale a 3 - 3.5 ml/min/kg de  $VO_2$  en reposo. Sin embargo, esta afirmación no es precisa en comparación con mediciones directas en las que se mide el oxígeno exhalado en un laboratorio. Por lo que M. Kwan, J. Woo y T. Kwok (2004) realizaron un estudio en el que se midió el gasto energético en diferentes grupos de edad y sexo, especialmente en poblaciones ancianas. El objetivo principal fue determinar el valor energético de 1 MET en personas ancianas chinas en comparación con sujetos más jóvenes. Se llevó a cabo un estudio transversal con 208 participantes: 138 adultos jóvenes (88 mujeres y 50 hombres, con edades entre 16 y 64 años) y 70 adultos mayores (35 mujeres y 35 hombres, con edades entre 65 y 89 años). Los sujetos fueron sometidos a un ayuno nocturno de 10 horas y se les colocó en una cama en una sala tranquila para realizar la medición, donde el  $VO_2$  se

determinó mediante calorimetría indirecta. Los hallazgos más relevantes del estudio indican que el  $\text{VO}_2$  en reposo fue significativamente más bajo en los ancianos en comparación con los jóvenes, independientemente del sexo, de tal forma que se sugieren los siguientes valores para 1 MET: Para individuos mayores de 65 años: Hombres y mujeres: 2.8 ml/min/kg. Para individuos menores de 65 años: Hombres: 3.0 ml/min/kg, mujeres: 3.3 ml/min/kg. La investigación confirma que la edad tiene un efecto independiente sobre el  $\text{VO}_2$  en reposo, indicando que la definición estándar de 1 MET no es adecuada para todas las poblaciones, especialmente para los ancianos. A la par se hizo otro estudio un año antes por Marson (2003) para comparar el  $\text{VO}_2$  obtenido mediante el método de Fick directo y la calorimetría indirecta para estimar el  $\text{VO}_2$  en pacientes críticos. Se trató de un estudio prospectivo que involucró a pacientes críticos de ambos sexos, víctimas de trauma o sepsis, quienes requerían ventilación mecánica prolongada (más de 3 días) y monitoreo hemodinámico invasivo al ser admitidos en la UCI. Se excluyeron aquellos con contraindicaciones clínicas para la monitorización, edades menores de 15 o mayores de 80 años, necesidad de administrar una fracción inspirada de oxígeno ( $\text{FiO}_2$ ) mayor a 0.6, presión arterial media menor a 50 mmHg, frecuencia cardíaca fuera del rango de 50-140 lpm, presencia de fístula broncopleurales, shock circulatorio irreversible, muerte cerebral, y aquellos que se negaron a participar. Se incluyeron a 14 pacientes (10 hombres y 4 mujeres) con una edad media de  $39.4 \pm 5.4$  años, de los cuales 5 eran víctimas de trauma y 9 de sepsis. Todos los pacientes fueron sometidos a ventilación mecánica y monitoreo hemodinámico invasivo mediante un catéter Swan-Ganz. Se recolectaron los datos del  $\text{VO}_2$  obtenido mediante dos métodos: calorimetría indirecta utilizando un cartucho metabólico portátil Deltatrac II y el método de Fick directo. Las mediciones se llevaron a cabo en un entorno calmado, sin manipulación de las vías respiratorias o parámetros del ventilador durante al menos 30 minutos. Se registraron mediciones minuto a minuto del  $\text{VO}_2$ , y al final de cada periodo de 30 minutos, se calculó la media y la desviación estándar. Se encontró una buena correlación entre ambos métodos, con un coeficiente de

correlación de  $R=0.77$ . Sugiriendo que ambos métodos pueden ser utilizados para evaluar el consumo de oxígeno en pacientes críticos de manera efectiva.

Una vez comentadas las diversas formas de calcular el  $VO_2$ , el cual es el numerador del método de Fick, se puede proseguir a estudiar el denominador. Este consiste en la diferencia del contenido arterial y venoso de oxígeno, que se determina mediante una serie de constantes que se explican según la fisiología de la unión de oxígeno a la sangre. Yartsev (2015) explica que el oxígeno tiene una solubilidad muy baja en agua, especialmente a temperatura corporal. A  $37^\circ\text{C}$ , la constante de solubilidad es aproximadamente de  $0.03 \text{ ml/L/mmHg}$ , lo que equivale a  $0.003 \text{ ml/dL/mmHg}$ . Esto significa que en un litro de sangre saturada de oxígeno (con una presión parcial de oxígeno arterial de aproximadamente  $100 \text{ mmHg}$ ) solo hay alrededor de  $3 \text{ ml/L}$  de oxígeno disuelto, mientras que la cantidad de oxígeno almacenado en la hemoglobina puede ser de  $150\text{-}200 \text{ ml/L}$ . En términos simples, solo alrededor del  $1\text{-}2\%$  del contenido total de oxígeno está disuelto, aunque este porcentaje puede aumentar en condiciones extremas como la terapia hiperbárica. Por lo tanto, en la práctica clínica habitual, la fracción de oxígeno disuelto es generalmente insignificante al considerar la oxigenación de la hemoglobina. Aunque generalmente se ignora bajo condiciones normales, su importancia se manifiesta en situaciones críticas, donde un aumento en  $PaO_2$  puede incrementar la cantidad de oxígeno disuelto, afectando la  $SvO_2$  y la interpretación del gasto cardíaco. En cambio, La capacidad de transporte de oxígeno de la hemoglobina ( $BO_2$ ), se considera de aproximadamente  $1.39 \text{ ml/g}$ . Sin embargo, este valor puede variar entre  $1.30$  y  $1.39 \text{ ml/g}$  debido a diferentes mediciones y condiciones. El valor de  $1.34 \text{ ml/g}$  es comúnmente referenciado en la literatura, pero estudios más recientes sugieren que la capacidad real en condiciones fisiológicas podría ser un poco menor, alrededor de  $1.306 \text{ ml/g}$ .

El contenido total de oxígeno en sangre arterial o venosa se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$(\text{SO}_2 \times \text{ceHb} \times \text{BO}_2) + (\text{PaO}_2 \times 0.03)$$

Donde: ceHb es la concentración efectiva de hemoglobina, PaO<sub>2</sub> es la presión parcial de oxígeno en el gas arterial. 0.03 es el contenido de oxígeno disuelto por unidad de volumen de sangre. BO<sub>2</sub> es la cantidad máxima de oxígeno unida a la hemoglobina por unidad de volumen de sangre (normalmente 1.39 ml/g), SO<sub>2</sub> es la saturación de oxígeno. Para calcular el gradiente de consumo de oxígeno se sustituye esta fórmula con los valores de SO<sub>2</sub> y PaO<sub>2</sub> arterial menos los obtenidos de sangre venosa, de tal manera que se puede simplificar la operación de la siguiente manera:

$$((\text{SaO}_2 - \text{SvO}_2) \times \text{ceHb} \times \text{BO}_2) + ((\text{PaO}_2 - \text{PvO}_2) \times 0.03)$$

En cuanto a la práctica, el método de Fick se ha prestado a cuestionamiento en cuanto a su precisión y se ha sometido a numerosos estudios de comparación. Los primeros fueron realizados en animales, realizando mediciones directas. Uno de ellos fue llevado a cabo por Robert Seely en 1950, en el que se comparó el método de Fick con las mediciones obtenidas con un rotámetro; el cual se consideraba un estándar confiable para la medición del flujo sanguíneo. Se utilizaron perros anestesiados, administrando Nembutal (20-30 mg/kg intravenoso) o barbital (200 mg/kg intravenoso) después de la administración de morfina (30 mg). Posteriormente se midió el gasto cardíaco de forma simultánea mediante el método de Fick y el método del rotámetro durante un período de seis minutos con tórax abierto. Se tomaron muestras de sangre arterial y venosa mediante punciones en la arteria carótida y desde el lado de salida del rotámetro que medía el flujo a través de la arteria pulmonar. A la par se calculó el flujo medio por minuto mediante integración planimétrica del área bajo la curva y se comparó con el obtenido por el procedimiento de Fick. A partir de este experimento se observó que el procedimiento de Fick medía el gasto promedio del corazón con buena precisión, con variaciones que no excedieron el  $\pm 8\%$  en la mayoría de los casos. El estudio concluyó que el método de Fick puede ser considerado una herramienta válida para la determinación del gasto cardíaco en condiciones experimentales (Seely, 1950).

Existe otro estudio realizado por De Boode (2007) que se basaba en la medición del método de Fick usando dióxido de carbono ( $mCO_2F$ ) para medir el gasto cardíaco en corderos recién nacidos ventilados y compararlo con el flujo sanguíneo pulmonar medido de manera invasiva. Se manipuló el gasto cardíaco mediante la creación de hipotensión hemorrágica. Una vez alcanzado un estado estable, se midió el gasto cardíaco utilizando el método  $mCO_2F$ . Los corderos fueron anestesiados y ventilados artificialmente. Se colocaron catéteres intravasculares en la aurícula derecha (AD), la vena cava superior (VCS) y la vena cava inferior (VCI) para la recolección de muestras de sangre venosa. De esta forma se realizaron análisis de gases en muestras de sangre arterial y venosa calculando la diferencia de concentración de dióxido de carbono venoso y arterial. Además, se utilizó un monitor de flujo por ultrasonido para medir el flujo sanguíneo pulmonar. Los datos hemodinámicos de cada cordero mostraron cambios significativos en el gasto cardíaco y la presión arterial media (PAM) durante el experimento debido al descenso en el flujo sanguíneo asociado a la hipotensión inducida. Se midió el sesgo promedio del gasto cardíaco medido por el  $mCO_2F$  en comparación con el flujo pulmonar demostrando sólo pequeñas diferencias: AD: -0.082 L/min. VCS -0.085 L/min, VCI: -0.183 L/min. Los límites de acuerdo indicaron una buena concordancia entre los métodos, con un coeficiente de correlación alto (0.93) para todos los sitios de muestreo venoso. Los resultados sugirieron que el método  $mCO_2F$  es confiable y aplicable. Además, los hallazgos indican que la localización del muestreo venoso (AD, VCS o VCI) tiene un impacto menor en la precisión de la medición del gasto cardíaco.

A pesar de estas evidencias en escenarios controlados sobre animales, los estudios realizados en la práctica clínica reflejan imprecisión. Esto se debe a que la aplicación del método de Fick se ve obstaculizada por la necesidad de una medición directa de  $VO_2$  a través de muestras de sangre aórtica y de la arteria pulmonar, o en su defecto, a través de la cuantificación de las concentraciones de gas espirado y volúmenes ventilatorios. Debido a esto, Luks (2024) reflexiona que debido a la complejidad y el tiempo que se requiere para obtener estas variables es que se utilizan ecuaciones estimativas, las cuales a su vez se derivan de

cohortes pequeñas y poco representativas, induciendo sesgo al momento de aplicarlas en pacientes con condiciones como obesidad, diabetes o insuficiencia cardíaca. Además, es común que se utilice sangre venosa central en lugar de muestras venosas mixtas para calcular la diferencia de contenido de oxígeno arteriovenoso. Esto se ha vuelto habitual en un contexto donde el uso de catéteres de arteria pulmonar, necesarios para obtener sangre venosa mixta, ha disminuido. A manera de antítesis a los estudios realizados por De Boode, se ha visto que esta sustitución puede llevar a diferencias de hasta un 10% en la estimación del gasto cardíaco, especialmente en pacientes con shock o hipoxemia. Por estas razones se prefiere considerar métodos alternativos como la dilución de indicadores, termodilución, análisis de pulso o ultrasonido del tracto de salida del ventrículo izquierdo.

Existen antecedentes de ensayos clínicos para medir la precisión de algunas de las fórmulas para estimar el  $\text{VO}_2$ . Un ejemplo es el realizado por Narang (2014), donde se compararon las fórmulas de LaFarge, Bergstra y Dehmer con el método de Douglas en pacientes adultos que se sometieron a cateterismo cardíaco por razones clínicas. El estudio fue un análisis retrospectivo que incluyó a 535 pacientes adultos que se sometieron a cateterismo cardíaco entre 1996 y 2005. Para el método de Douglas se recolectó el aire exhalado de cada paciente durante un período de tiempo determinado. El volumen exhalado se midió con un espirómetro, y las concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono se determinaron mediante espectrometría de masas. Los resultados se compararon con las estimaciones realizadas mediante las tres fórmulas mencionadas. Se evaluaron diferentes variables clínicas, incluidos el índice de masa corporal (IMC), el sexo y la edad. Los hallazgos mostraron que las mediciones de  $\text{VO}_2$  diferían significativamente de las estimaciones de las tres fórmulas, con diferencias absolutas medianas entre 28.4 ml/min y 37.7 ml/min, dependiendo de la fórmula utilizada. En un 17-25% de los pacientes, las estimaciones diferían en más del 25% respecto a las mediciones reales. Las diferencias eran más pronunciadas en pacientes con obesidad severa (IMC > 40 kg/m<sup>2</sup>), donde la diferencia absoluta media era significativamente mayor (47.0 ml/min) en comparación con otros

grupos de IMC. Se concluyó que las fórmulas convencionales para estimar  $VO_2$  son inexactas, especialmente en individuos con obesidad severa. Otro ejemplo en el que se utilizaron las mismas tres fórmulas es el realizado por Grafton (2020), sobre pacientes con insuficiencia cardíaca congestiva (ICC), donde se compararon las mediciones con termodilución. Se evaluó el  $VO_2$  en pacientes control y en pacientes con ICC agrupados por clase funcional de la New York Heart Association (NYHA). Fue un estudio transversal que incluyó a 691 pacientes con ICC y 77 controles sanos. Se utilizó regresión lineal univariable y multivariable para evaluar la asociación entre la clase funcional de NYHA y el  $VO_2$ . Se ajustó por variables como edad, sexo y SC. Se encontró que el  $VO_2$  en reposo disminuye significativamente con el aumento de la clase NYHA, con una disminución de -36 ml  $O_2$ /min para la clase NYHA IV en comparación con los controles ( $P < 0.001$ ). Las estimaciones de  $VO_2$  utilizando fórmulas derivadas mostraron una divergencia significativa respecto a los valores medidos, especialmente en pacientes con clase NYHA IV. Se observó que en un 39% de los pacientes con insuficiencia cardíaca, el  $VO_2$  estimado por la fórmula de Dehmer difería en más del 25% respecto al medido. De esta forma se demostró que las fórmulas para estimar el  $VO_2$  no son equiparables a las mediciones directas en el contexto de la insuficiencia cardíaca, y se resalta la importancia de la medición precisa del  $VO_2$  para la evaluación clínica y la toma de decisiones en esta población de pacientes.

Otra variable que puede alterar el resultado de estas fórmulas desfavorablemente es el  $FiO_2$ . Existe como antecedente un estudio publicado en por Sheng-Yi Lin (2020), que tuvo como objetivo investigar cómo el  $FiO_2$  afecta la  $SvO_2$  y la precisión de la evaluación del GC basada en el principio de Fick en pacientes sometidos a cirugía cardíaca. Se incluyeron 42 pacientes adultos que se sometieron a cirugía cardíaca electiva. Fueron divididos aleatoriamente en dos grupos según sus niveles de  $FiO_2$ : uno con  $FiO_2 < 0.7$  y otro con  $FiO_2 > 0.85$ . Durante la anestesia general estable, se registraron valores de gasto cardíaco derivado por termodilución,  $SvO_2$ ,  $PvO_2$ , hemoglobina,  $SaO_2$ ,  $PaO_2$  y pH sanguíneo antes de la incisión quirúrgica. Los pacientes seleccionados debían tener 20 años o más y no presentar cortocircuitos intracardiacos. Tras la

intubación, la  $FiO_2$  se ajustó según el grupo asignado y se mantuvo la anestesia general con sevoflurano, fentanilo y cisatracurio. Los resultados mostraron diferencias significativas en los valores de  $FiO_2$  entre los grupos ( $0.56 \pm 0.08$  para el grupo  $<70\%$  y  $0.92 \pm 0.03$  para el grupo  $>0.85$ ;  $p < 0.0001$ ). Se observó que la  $SvO_2$ ,  $PaO_2$  y  $PvO_2$  eran significativamente más altas en el grupo con  $FiO_2 > 0.85$ , mostrando discrepancias mayores entre Fick y termodilución. Ambos grupos mostraron correlaciones moderadas, pero ninguno cumplió con el criterio de error porcentual  $<30\%$  en el análisis de Bland-Altman. Se llegó a la conclusión de que el aumento de  $FiO_2$  puede influir en la interpretación de  $SvO_2$  y exacerbar la estimación del Fick, lo que podría afectar la gestión clínica de los pacientes.

A propósito de la fórmula de LaFarge, existe otro estudio realizado por Rutledge (2010) con el fin de validar su función en pacientes con enfermedad cardíaca congénita menores de 3 años que se someten a cateterismo cardíaco con anestesia general, aunque la fórmula en sí misma fue desarrollada para pacientes mayores de 3 años. Se midió el  $VO_2$  directamente en 75 niños sedados, paralizados y ventilados mecánicamente en un laboratorio de cateterismo. La edad de los pacientes variaba de 0.13 a 24 años, con 40 niños menores de 3 años. Se calcularon los valores estimados de  $VO_2$  utilizando la ecuación de LaFarge y se compararon con los valores medidos con espectrometría de masas respiratorias obtenidas con método de Douglas en ambos grupos de edad. Se observó falta de correlación entre los valores medidos y estimados en ambos grupos de niños, situación que fue significativamente peor en los niños menores de 3 años, mostrando sobreestimación por parte de la ecuación de LaFarge ( $55 \text{ mL/kg/m}^2$ ) en comparación con el grupo mayor de 3 años ( $11 \text{ mL/kg/m}^2$ ). Se concluyó que la ecuación de LaFarge introduce un error significativo en la estimación de  $VO_2$  en pacientes ventilados con enfermedad cardíaca congénita de todas las edades, especialmente en niños menores de 3 años. Esto por la naturaleza logarítmica de la ecuación, que contribuye a una sobreestimación en este grupo etario.

Sherman (1997) por su parte, estudió pacientes con sepsis y otras condiciones críticas utilizando la misma fórmula. Se estudiaron 20 pacientes en

ventilación mecánica, con catéter colocado en la arteria pulmonar, que no estuvieran recibiendo más de 50% de FiO<sub>2</sub> debido a la imprecisión que esto deriva en el análisis metabólico. Se seleccionaron pacientes que se encontraban bajo anestesia para minimizar los cambios en el VO<sub>2</sub> y bajo una dosis estable de catecolaminas en las últimas 2 horas. El grupo con sepsis fue constituido por 10 pacientes, los cuales tenían evidencia clínica de infección, cultivos de sangre positivos, requerimiento de volumen minuto mayor a 10 litros, FC mayor a 90 lpm, temperatura corporal mayor a 38.3° o menor a 35.6°c y manifestaciones de perfusión orgánica alterada. El VO<sub>2</sub> se determinó por calorimetría indirecta, termodilución y por fórmula de LaFarge. Los resultados demostraron discrepancia entre los métodos medidos y los estimados, lo cual aumenta drásticamente en pacientes con sepsis, particularmente con la ecuación predictiva y con calorimetría indirecta.

Opotowsky (2017) también sometió termodilución y por Fick a un estudio de concordancia, aunque el manuscrito no especifica la fórmula o fórmulas utilizadas. Fue un estudio de cohorte retrospectivo en que se incluyeron más de 15,000 adultos sometidos a cateterismo cardíaco derecho y divididos en 2 cohortes; 12,232 realizados en el departamento de asuntos de veteranos y 3,391 en la cohorte de la universidad de Vanderbilt. Cada paciente fue sometido a un único cateterismo cardíaco, donde se estimó el GC mediante ambos métodos. El gasto cardíaco se indizó a la superficie corporal para todos los análisis. Los resultados mostraron una correlación moderada entre las estimaciones de GC por termodilución y por método de Fick en ambas cohortes ( $r = 0.65$ ). La diferencia media fue mínima ( $-0.02 \text{ L/min/m}^2$ ), pero con límites de acuerdo de hasta  $-1.31$  a  $1.27 \text{ L/min/m}^2$ . Un 38.1% de los pacientes mostró diferencias en las estimaciones de más del 20%. Por lo que se llegó a la conclusión de que la correlación entre las estimaciones es tan sólo modesta, y que la medición por termodilución es superior para predecir la mortalidad en la práctica clínica.

Posteriormente en 2023 se hizo un último experimento semejante, a cargo de Volodarsky, centrado en mediciones directas y estimadas para evaluar el GC y

la resistencia vascular pulmonar (RVP) en pacientes que se sometieron a cateterismo derecho del corazón. Una vez más no se especifica la fórmula o fórmulas utilizadas para calcular el Fick. Se realizó un estudio retrospectivo en el que se revisaron los registros en el Kaplan Medical Center durante un periodo de dos años. Se incluyeron pacientes que tenían mediciones de GC utilizando tanto el método de termodilución como el método indirecto de Fick. Se excluyeron pacientes con shunts significativos entre las cámaras del corazón, así como aquellos con regurgitación tricuspídea severa o estenosis mitral/aórtica severa. El GC se midió utilizando el método de termodilución según los protocolos estándar y el método indirecto de Fick, que se basa en la saturación de oxígeno y los niveles de hemoglobina. Se revisaron 131 registros de pacientes, de los cuales 55 cumplieron con los criterios de inclusión, resultando en 86 series de mediciones. Se encontraron discrepancias significativas en el  $VO_2$  entre los dos métodos; el 49% de los pacientes presentaron discrepancias de más del 10%. El estudio concluyó que el método de Fick indirecto tiende a clasificar erróneamente a pacientes con hallazgos patológicos, especialmente aquellos con presión media de la arteria pulmonar  $> 25$  mmHg (Volodarsky, 2023).

La evidencia a pesar de que aparenta ser contundente en contra de la estimación del  $VO_2$ , no refleja unanimidad en cuanto a las fórmulas utilizadas y los contextos en que se utilizaron. Si bien se sobreentiende que la medición directa es el estándar a tomar en cuenta para tomar decisiones clínicas, los escenarios a los que se han sometido las fórmulas predictoras no resultan acordes con aquellos con los que se habían validado.

Una alternativa para obtener el GC a través de medición directa sin requerir cateterización del paciente u obtención de muestras de sangre es el ecocardiograma. Betteridge (2024) explica que este se trata de un método no invasivo o semi-invasivo utilizado para evaluar tanto la anatomía como la función del corazón. Existen dos modalidades comunes en la práctica clínica: el ecocardiograma transtorácico (ETT), que implica colocar una sonda ultrasónica sobre la pared del pecho, y el ecocardiograma transesofágico (ETE), en el que se

introduce la sonda en el esófago. Ambas técnicas permiten medir diversas estructuras, como el área de la aorta ascendente, el tracto de salida del ventrículo izquierdo (LVOT) y el volumen del ventrículo izquierdo. Para la medición del GC por ultrasonido es necesario el uso del Doppler aórtico, el cual combina los principios de ultrasonido y el efecto Doppler, donde ondas sonoras de alta frecuencia se emiten y se reflejan en los glóbulos rojos en movimiento, permitiendo calcular la velocidad del flujo sanguíneo. Para calcular el GC, se estima el área de la sección transversal de la aorta y se multiplica por el volumen de sangre eyectada y la frecuencia cardíaca. Las limitaciones de esta técnica incluyen la dependencia de la posición del sensor, la estimación del área aórtica, el flujo turbulento, y la dificultad en pacientes despiertos. Para validar la funcionalidad de esta técnica se llevó a cabo un estudio en 1983 por Huntsman, el cual tuvo por objeto el uso de ultrasonido Doppler para determinar el gasto GC en humanos, comparando los resultados de las mediciones con los obtenidos a través del método de termodilución. Se utilizó un transductor Doppler supraclavicular para medir la velocidad del flujo sanguíneo en la aorta ascendente y se colocó un catéter en la arteria pulmonar para medir el gasto cardíaco. Se realizaron análisis de regresión lineal para evaluar la relación entre las mediciones de Doppler y termodilución, y se calcularon coeficientes de variación para evaluar la precisión de las mediciones en ambas técnicas. Las mediciones del índice Doppler mostraron una buena correlación con el gasto cardíaco por termodilución, reportando que ambos métodos, aunque diferentes, mostraron correlaciones fuertes y que el Doppler podría ser utilizado como un método no invasivo efectivo para el monitoreo de GC, especialmente en situaciones donde la termodilución podría ser riesgosa o incómoda para el paciente (Huntsman, 1983).

Posteriormente se llevaron a cabo metaanálisis, uno de ellos es el de Zhang (2019), en el que se estudió si la ecografía puede sustituir los métodos invasivos tradicionales, como la técnica de termodilución. Este estudio sistemático tuvo como objetivo analizar la consistencia y la intercambiabilidad de las mediciones del gasto cardíaco. Se realizaron búsquedas en cinco bases de datos electrónicas hasta junio de 2019 para identificar ensayos clínicos en los que se

midió el GC mediante técnicas de ecocardiografía y termodilución. Se identificaron un total de 68 estudios con 1996 pacientes como elegibles. No se encontraron diferencias significativas entre ecocardiografía y termodilución (modelo de efectos aleatorios: diferencia de media [MD] -0.14; intervalo de confianza [IC] del 95%: -0.30 a 0.02; P = 0.08). En el análisis de subgrupos, se observó que la única diferencia significativa fue en la medición en la aorta ascendente (AA) (MD -0.37; IC del 95%: -0.74 a -0.01; P = 0.05). La mediana del sesgo y los límites de acuerdo fueron -0.12 y  $\pm 0.94$  L/min, respectivamente; la mediana del coeficiente de correlación fue 0.827 (rango: 0.140–0.998). Este meta-análisis general mostró que no se observaron diferencias significativas entre estas dos técnicas, lo que sugiere que estas técnicas pueden ser intercambiables bajo ciertas condiciones.

Un estudio semejante se realizó el mismo año a cargo de Blancas (2019), cuyo objetivo fue evaluar la correlación entre la integral de velocidad tiempo (VTI) del LVOT y el índice de volumen sistólico calculado a través de métodos de termodilución en pacientes críticamente enfermos bajo ventilación mecánica. Se trató de un estudio prospectivo, descriptivo y multicéntrico, donde se incluyeron pacientes mayores de 17 años que requerían ventilación mecánica y monitoreo hemodinámico invasivo. Se compararon 156 mediciones emparejadas. La media del LVOT VTI fue de  $20.83 \pm 4.86$  cm y el índice de volumen sistólico fue de  $41.55 \pm 9.55$  mL/m<sup>2</sup>. El índice de correlación de Pearson mostró un valor de  $r = 0.644$  ( $p < 0.001$ ), indicando una correlación moderada. Las mediciones máximas de LVOT VTI correlacionaron con un índice de  $r = 0.62$  ( $p < 0.001$ ). Se observó que la correlación se debilitó en valores extremos, especialmente en aquellos con un LVOT VTI más alto. Por lo que se concluyó que el LVOT VTI podría ser una herramienta complementaria en la evaluación hemodinámica de pacientes seleccionados, pero no elimina la necesidad de monitoreo invasivo. La débil correlación entre ultrasonido y mediciones invasivas, especialmente en valores extremos, requiere una evaluación adicional en estudios más amplios para identificar los factores que influyen en esta discrepancia.

Sin embargo, no se puede pasar por alto una antítesis a esta aseveración, la cual consiste en el estudio realizado por Wetterslev (2016), que tuvo por objetivo evaluar la intercambiabilidad de la ecocardiografía con la técnica de termodilución para la medición del GC y sus cambios, utilizando el método de Bland-Altman para analizar la concordancia entre las dos técnicas. Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos electrónicas en agosto de 2015, incluyendo estudios que comparaban la medición ecocardiográfica del gasto cardíaco con la termodilución. Se incluyeron solo estudios que utilizaran el método de Bland-Altman y que evaluaran pacientes adultos hospitalizados. Se revisaron un total de 13,834 citas, de las cuales 24 estudios cumplieron con los criterios de inclusión. La mayoría de los estudios se centraron en estructuras del lado izquierdo del corazón y mostraron un sesgo pequeño, amplios límites de acuerdo y alto porcentaje de error entre ecocardiografía y termodilución. Solo dos estudios evaluaron la precisión de cada técnica antes de compararlas. La técnica de termodilución mostró precisiones de 4.8% y 8% en diferentes estudios, mientras que la ecocardiografía mostró precisiones de 8.6% y 16%. La evaluación del tracto de salida del ventrículo izquierdo mostró un sesgo y límites de acuerdo variables, con un porcentaje de error que osciló entre 16% y 69%. La mayoría de los estudios analizados mostraron que la ecocardiografía no es intercambiable con la termodilución para medir el gasto cardíaco. Aunque puede haber concordancia en el seguimiento de los cambios direccionales del gasto cardíaco, esto debe confirmarse en estudios de alta calidad y tamaño adecuado. Por lo que se concluyó que las decisiones de tratamiento no se deben basar únicamente en las mediciones de GC obtenidas por ecocardiografía.

### III. Fundamentación teórica

A partir de los estudios previamente citados, es notable que los ensayos clínicos para medir el GC no concilian un acuerdo en cuanto a las fórmulas sometidas a prueba y el método que los investigadores establecen como estándar de oro para realizar la comparación.

Cada fórmula validada fue en un principio acuñada con base en distintos grupos etarios, sexos y patologías; como es el caso de la propuesta por LaFarge (1970), donde sus observaciones fueron realizadas principalmente en niños con cardiopatías. La propuesta por Dehmer (1982) fue a partir de pacientes de en un promedio de 49 años, y que a pesar de ser la más popular es también la más mal entendida; ya que se suele representar como  $125 * SC$  (Volodarsky, 2023, Ragosta, 2017), siendo que en el manuscrito original la fórmula propuesta es  $126 * SC$  para la población en general, y se desglosa según el uso de sedación en  $132 * SC$  para los que no recibieron y  $121 * SC$  para los que sí. Por otra parte, la de Bergstra (1995) se desglosa en dos resultados distintos dependiendo del sexo del paciente. Y por último, la fórmula propuesta por Kern (2014) basada en la equivalencia metabólica de trabajo se limitó a una constante de consumo basal definida en 3 ml/min/kg, mientras que las observaciones de Kwan (2004) ya delimitaban distintas definiciones de consumo basal según la edad y sexo; siendo 2.8 ml/min/kg para hombres y mujeres mayores a 65 años, 3 ml/min/kg para hombres y 3.3 ml/min/kg para mujeres menores de 65 años, aunque todo esto en población china y sin tomar en cuenta el consumo de oxígeno basal en pacientes críticos. Es por esto que Luks (2024) señala las distintas limitaciones de las fórmulas predictivas, ya que no toman en cuenta poblaciones especiales de distinta etnicidad, o con características como obesidad, diabetes, insuficiencia cardíaca u otras enfermedades.

Los ensayos clínicos en que se comparan estas fórmulas predictivas con métodos directos demuestran justamente problemas con estas poblaciones especiales y no someten a prueba todas las fórmulas previamente descritas como

para agotar el tema. Se recapitulan los estudios encontrados, sintetizando los métodos aplicados y los hallazgos encontrados:

- Grafton (2020) comparó las fórmulas de Dehmer, LaFarge y Bergstra con la termodilución. Su ensayo en pacientes con insuficiencia cardíaca. Demostró que a una clase funcional más avanzada el  $\text{VO}_2$  disminuía, por lo que las fórmulas, particularmente la de Dehmer, diferían en más del 25% respecto al medido.
- Narang (2014) comparó las mismas 3 fórmulas con el método de Douglas en pacientes sometidos a cateterismo cardíaco, encontrando diferencias absolutas entre 28.4 ml/min y 37.7 ml/min, dependiendo de la fórmula utilizada y demostrando diferencias más pronunciadas ( $>47.0$  ml/min) en pacientes con obesidad severa ( $\text{IMC} > 40$  kg/m<sup>2</sup>).
- Volodarsky (2023) comparó mediciones de GC por termodilución y por Fick, sin especificar mediante cuál fórmula. Encontró discrepancias significativas especialmente en aquellos con presión media de la arteria pulmonar  $> 25$  mmHg.
- Sheng-Yi (2020) demostró discrepancia en el GC estimado en aquellos pacientes neumópatas, particularmente en aquellos que requerían un  $\text{FiO}_2 > 85$ , aunque utilizó como única fórmula predictiva la de LaFarge, comparándola con la termodilución.
- Opotowsky (2017) incluyó 15,000 adultos principalmente con insuficiencia cardíaca o valvulopatías. También comparó termodilución con Fick, pero no especifica cuál fue la fórmula utilizada. Los resultados mostraron una correlación moderada entre las estimaciones, con límites de  $-1.31$  a  $1.27$  L/min/m<sup>2</sup>. Un 38.1% de los pacientes mostró diferencias en las estimaciones de más del 20%.

- Rutledge (2010) estudió el GC de pacientes entre 0.12 y 24 años, comparando la fórmula de LaFarge con método de Douglas. Se concluyó que LaFarge era una fórmula inexacta, ya que inducía sobrestimación de hasta 55 mL/kg/m<sup>2</sup> en menores de 3 años, a comparación de 11 mL/kg/m<sup>2</sup> en los pacientes mayores de esa edad, tomando en cuenta que 40 de los 75 pacientes estudiados eran menores de 3 años. Esto en total desconocimiento de que en el artículo original publicado por LaFarge (1970) tener menos de 3 años era un criterio de exclusión para su muestra.
- Sherman (1997) también puso a prueba a LaFarge, comparándolo con calorimetría indirecta y termodilución. Estudió a 20 pacientes en ventilación mecánica, con FiO<sub>2</sub> <50%, anestesiados. También se encontró con discrepancia, particularmente en 10 de estos pacientes, los cuales se encontraban con sepsis.

Como podrá notarse, las conclusiones de la evidencia enumerada coinciden en cuanto a las discrepancias que presentan los métodos predictivos para la estimación del GC, pero pocos estudios utilizan más de una fórmula para hacer la comparación, uno presenta errores metodológicos y dos de ellos no especifican las fórmulas utilizadas. Además, salvo por el estudio de validación de Kwan (2014), no existen ensayos clínicos que utilicen el método de Fick según los MET en la práctica médica.

Con el fin de establecer cuál de estas fórmulas predictivas se aproxima más a la medición directa del gasto cardíaco se necesita establecer un método de referencia con el cual realizar la comparativa. Como podrá notarse en los estudios previamente citados, los métodos más socorridos son la termodilución, calorimetría y método de Douglas. Sin embargo, en esta tesis se estableció como referencia el ultrasonido Doppler basándose en los siguientes puntos:

- Betteridge (2024), describe ecocardiografía como un método no invasivo o semi-invasivo utilizado para evaluar tanto la anatomía como

la función del corazón. Para la medición del GC es necesario el uso del Doppler aórtico, que mide el flujo sanguíneo en la aorta a partir de la velocidad de los glóbulos rojos.

- Huntsman (1983) validó la funcionalidad del ultrasonido Doppler para determinar el gasto cardíaco (GC) comparando los resultados de las mediciones obtenida con este método con la termodilución. Se reportó que ambos métodos, aunque diferentes, mostraron correlaciones fuertes.
- Zhang (2019) mediante un metaanálisis analizó la consistencia y la intercambiabilidad de las mediciones del gasto cardíaco obtenidas con ultrasonido Doppler y por termodilución. Se identificaron un total de 68 estudios con 1996 pacientes elegibles. No se encontraron diferencias significativas entre ecocardiografía y termodilución: diferencia media: -0.14; intervalo de confianza del 95%: -0.30 a 0.02;  $P = 0.08$ ). Lo que sugiere que estas técnicas pueden ser intercambiables bajo ciertas condiciones
- Blancas (2019) realizó la misma comparación, pero en pacientes con ventilación mecánica. El índice de correlación de Pearson mostró un valor de  $r = 0.644$  ( $p < 0.001$ ), indicando una correlación moderada. Concluyó que la medición ultrasonográfica podría ser una herramienta complementaria en la evaluación hemodinámica de pacientes seleccionados, pero no elimina la necesidad de monitoreo invasivo. Esto debido a que los pacientes con requerimiento de soporte ventilatorio en valores extremos presentaban una correlación débil.
- Wetterslev (2016) plantea una antítesis, basándose en su metaanálisis en que se incluyeron 24 estudios en pacientes hospitalizados en que se estableció comparativa entre ultrasonido Doppler y termodilución con modelo de Bland-Altman. La técnica de termodilución mostró precisiones de 4.8% y 8% en diferentes estudios, mientras que la

ecocardiografía mostró precisiones de 8.6% y 16%. La evaluación del tracto de salida del ventrículo izquierdo mostró un sesgo y límites de acuerdo variables, con un porcentaje de error que osciló entre 16% y 69%. Concluyendo falta de correlación entre ambos métodos.

Es entonces con la evidencia dada que el método de Fick modificado, lejos de proscribirse de la práctica clínica es materia de investigaciones recientes, y que la metodología empleada en estas investigaciones deja áreas de conocimiento sin resolver, sin demostrar aún de forma rigurosa qué fórmula o fórmulas predictivas son más apropiadas para el monitoreo hemodinámico del paciente inestable.

#### **IV. Hipótesis**

H0: El gasto cardíaco medido por ultrasonido transtorácico Doppler no correlaciona con el estimado por método de Fick modificado según alguna de fórmulas para estimar el consumo de oxígeno en pacientes con inestabilidad hemodinámica.

H1: El gasto cardíaco medido por ultrasonido transtorácico Doppler correlaciona con el estimado por método de Fick modificado según alguna de fórmulas para estimar el consumo de oxígeno en pacientes con inestabilidad hemodinámica.

## **V. Objetivos**

### **V.1 Objetivo general**

Correlacionar entre el gasto cardíaco medido por ultrasonido transtorácico Doppler y el método de Fick modificado según las fórmulas para estimar el consumo de oxígeno en pacientes con inestabilidad hemodinámica.

### **V.2 Objetivos específicos**

1. Determinar el gasto cardiaco por ecocardiografía Doppler.
2. Determinar el gasto cardiaco por fórmula de LaFarge.
3. Determinar el gasto cardiaco por fórmula de Dehmer.
4. Determinar el gasto cardiaco por fórmula de Bergstra.
5. Determinar el gasto cardiaco por equivalente metabólico de trabajo.
6. Correlacionar el gasto cardiaco medido por ecocardiografía Doppler con el estimado por fórmula de LaFarge.
7. Correlacionar el gasto cardiaco medido por ecocardiografía Doppler con el estimado por fórmula de Dehmer.
8. Correlacionar el gasto cardiaco medido por ecocardiografía Doppler con el estimado por fórmula de Bergstra.
9. Correlacionar el gasto cardiaco medido por ecocardiografía Doppler con el estimado por equivalente metabólico de trabajo.
10. Describir características sociodemográficas de la población a estudiar; sexo y edad.
11. Describir características clínicas; peso, talla, índice de masa corporal, tensión arterial media, frecuencia cardíaca, temperatura, diámetro de vena cava, tipo de choque, fracción inspirada de oxígeno.

## **VI. Material y métodos**

**VI.1 Tipo de investigación:** Se trata de un estudio observacional, transversal, y correlacional.

**VI.2 Población:** Pacientes hospitalizados en los distintos servicios del Hospital General de Querétaro, identificados durante 6 meses en el año 2025

**VI.3 Muestra y tipo de muestreo:** El tamaño de la muestra ha sido calculado utilizando G\*Power 3.1.9.7, para la correlación de dos coeficientes de Pearson independientes, determinando un tamaño del efecto de  $(r) = 0.5$  para que este sea grande, nivel de significancia  $(\alpha) = 0.05$  y potencia estadística  $(1 - \beta) = 0.8$ . Dando un tamaño muestral de 132 pacientes. Se decidió muestreo no probabilístico por conveniencia.

### **VI.3.1 Criterios de selección**

- Criterios de inclusión:
  1. Pacientes mayores a 18 años.
  2. Pacientes que se encuentren en estado de choque, con lactato sérico mayor a 2, con requerimiento de vasopresores para mantener tensión arterial media por encima de 65 mmHg o más después de la administración de una carga de líquidos de 20 ml/kg en 60 minutos (Hernández, 2019).
  3. Estabilidad relativa al momento de la medición (sin cambios hemodinámicos bruscos en los últimos 30 min).
  4. Presencia de catéter venoso central.
  5. Sin contraindicaciones para la toma de muestra de sangre arterial y venosa.
  6. Pacientes que cuenten con consentimiento informado.

- Criterios de exclusión.
  1. Arritmias graves (ej. fibrilación auricular con respuesta ventricular rápida, taquicardia ventricular), que dificultan la medición del gasto cardíaco por ultrasonido.
  2. Inestabilidad hemodinámica severa (ej. paro cardiorrespiratorio en evolución, shock refractario con vasopresores en dosis máximas).
  3. Ventilación mecánica con PEEP > 10 cmH<sub>2</sub>O, ya que puede afectar la medición por ultrasonido y modificar la precisión del método de Fick.
  4. Deficiencias técnicas para el ultrasonido (ej. ventana ecocardiográfica inadecuada por obesidad mórbida o cirugía torácica reciente).
  5. Presencia de derivaciones intracardíacas significativas (ej. comunicación interauricular o interventricular), que afectan la precisión del método de Fick.
  6. Uso de dispositivos de asistencia circulatoria (ej. ECMO, balón de contrapulsación intraaórtico), que modifican el gasto cardíaco y alteran la comparación entre métodos.
  7. Enfermedad pulmonar grave con hipoxemia severa, que afecta la estimación del consumo de oxígeno en el método de Fick.
  8. Pacientes con fio<sub>2</sub> mayor a 80%
  9. Pacientes con contraindicación médica para realizar alguna de las mediciones.
  
- Criterios de eliminación
  1. Deterioro clínico que impide realizar una medición confiable (ej. requerimiento urgente de intervención invasiva).
  2. Datos incompletos (ej. medición fallida por mala calidad de imagen en ultrasonido).

### VI.3.2 Variables estudiadas

Las variables de estudio que se tomaron en cuenta fueron el gasto cardíaco medido por ultrasonido, el gasto cardíaco estimado por método de Fick indirecto, y este a su vez calculado por fórmula de Bergstra, de Dehmer, LaFarge, y por equivalente metabólico de trabajo. En cuanto a variables sociodemográficas y clínicas se tomó en cuenta la edad del paciente, su sexo, peso, talla, superficie corporal, frecuencia cardíaca, niveles de hemoglobina, saturación arterial y venosa de oxígeno, presión arterial y venosa de oxígeno, el tipo de choque que padece el paciente, su fracción inspirada de oxígeno y presión arterial media.

El gasto cardíaco medido por ultrasonido es el resultado de la multiplicación de la integral velocidad/tiempo, por área del anillo valvular aórtico por la frecuencia cardíaca. El gasto cardíaco estimado por método de Fick modificado se obtiene de la fórmula:  $VO_2 / (CaO_2 - CvO_2)$ . Donde por fórmula de Bergstra  $VO_2 = 138.1 - (11.49 \times \ln(\text{edad})) + (0.378 \times FC) \times SC$ ; para hombres, y  $VO_2 = 138.1 - (17.04 \times \ln(\text{edad})) + (0.378 \times FC) \times SC$ ; para mujeres. Por fórmula de Dehmer  $VO_2 = 126 \times SC$  en población general.  $VO_2 = 132 \times SC$  en pacientes sin sedación y  $VO_2 = 121 \times SC$  en pacientes con sedación. Por fórmula de LaFarge  $VO_2 = [138 - 11.4 \ln(\text{edad}) + 0.378(FC)] \times SC$ ; Para hombres, y  $VO_2 = [138 - 17.04 \ln(\text{edad}) + 0.378(FC)] \times SC$ ; Para mujeres. Por equivalente metabólico de trabajo  $VO_2 = 2.8 \times Kg$  si  $>64$  años,  $VO_2 = 3 \times Kg$  en hombres  $<65$  años y  $VO_2 = 3.3 \times Kg$  en mujeres  $<65$  años. La edad del paciente se definió como la cifra descrita por el paciente según su fecha de nacimiento. El sexo del paciente se registró como variable dicotómica (masculino/femenino), según lo declarado por el participante o lo registrado en el expediente clínico. El peso del paciente se midió en kilogramos (kg) utilizando una báscula calibrada, con el sujeto descalzo y con ropa ligera. La talla se midió en centímetros con una cinta métrica, con el sujeto descalzo, en posición decúbito, con la cabeza en el plano de Frankfurt. La superficie corporal se calculó a partir del peso y la talla mediante la fórmula de Dubois y Dubois. La frecuencia cardíaca se midió en latidos por minuto utilizando un monitor cardíaco o de forma manual mediante auscultación o palpación durante

60 segundos en reposo. Se registró al inicio del examen de ultrasonido. La hemoglobina se midió en gramos por decilitro (g/dL) mediante análisis de sangre en laboratorio, usando un hemograma completo. La saturación arterial y venosa de oxígeno se consideraron como el porcentaje estimado mediante gasometría de cada una de estas muestras de sangre. La presión de oxígeno arterial y venosa se midió en milímetros de mercurio (mmHg) mediante gasometría arterial, con una muestra tomada de una arteria (radial o braquial) o de catéter venoso central. El análisis se realizó en un equipo automatizado de laboratorio. El tipo de choque se clasificó como hipovolémico (Bajo GC, alta resistencia vascular sistémica y baja presión venosa central). Cardiogénico (Bajo GC, alta resistencia vascular sistémica y alta presión venosa central). Obstructivo (Disminución del GC con resistencia vascular variable), y distributivo (GC normal o alto con tono vascular perdido). La fracción inspirada de oxígeno se registró como proporción (por ejemplo, 0.21 para aire ambiente, 1.0 para oxígeno al 100%) según el dispositivo de administración (mascarilla, cánula nasal, ventilador mecánico) y el ajuste clínico documentado al momento del estudio. La presión arterial media (PAM) se calculó con la fórmula:  $PAM = (PAS + 2 \cdot PAD) / 3$  Donde: PAS = Presión arterial sistólica. PAD = Presión arterial diastólica. Se obtuvo mediante esfigmomanómetro automático.

### **VI.3 Técnicas e instrumentos**

La revisión de la literatura para dar sustento científico a esta investigación se realizó mediante la base de datos Prime de PubMed v2.8.48.748,tjv-s5rxi8f, así como en New England Journal of Medicine, con la cuenta 000102865801, y en The Lancet, con cuenta vigente hasta 12 de mayo de 2026, ambas pertenecientes al equipo de residentes de Medicina Interna del Hospital General de Querétaro.

Durante la investigación se utilizó un gasómetro GEM 3500 Premier 00028000000, número de serie 19081515 para el procesamiento de gasometrías arterial y venosa central.

Para estudiar el gasto cardíaco por ecografía Doppler se utilizó un ultrasonido Philips Affinity 70G No. USD22F0280.

Los datos recabados se vaciaron en una Lenovo Tab P11 Pro TB-J706F, número de serie HA1DRLRV y posteriormente analizados en una Laptop Acer Aspire E11, número de serie E3-112M-C8LD.

#### **VI.4 Procedimientos**

Posterior a la autorización por el Comité local de investigación en salud y el comité de ética en investigación, se acudió al Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025 para identificar pacientes de las distintas áreas de hospitalización que cumplieran con los criterios de inclusión antes señalados y que ameritaran medición del gasto cardíaco, durante los horarios matutino, vespertino y nocturno.

Previa firma de consentimiento informado, explicando las metas del estudio ya sea al paciente o en caso de deterioro neurológico a su familiar, se procedió a reunir los datos de las variables sociodemográficas y clínicopatológicas, las cuales se almacenaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel. Con técnica estéril se obtuvieron muestras de 2 ml de sangre venosa del catéter venoso central con jeringa heparinizada, preferentemente del lumen proximal. Se procesaron las muestras en gasómetro en tiempo no mayor a 15 minutos. Después, se obtuvieron muestras de sangre arterial radial previa maniobra de Allen para evaluar la circulación colateral de la mano. Se realizó aseo local de la piel de la foseta radial con torunda estéril, para posteriormente realizar punción con jeringa de insulina heparinizada y de esta manera obtener 2 ml de sangre arterial, realizando seguidamente hemostasia mediante compresión local durante 2 minutos y para luego procesar la muestra en gasómetro en no más de 15 minutos. Se comprobó el estado óptimo del gasómetro antes de llevar a cabo cada medición, de donde se obtuvieron los siguientes parámetros de relevancia para el estudio: presión arterial de oxígeno, presión venosa de oxígeno, saturación arterial de oxígeno, saturación venosa de oxígeno, y hemoglobina de gasometría central.

En un lapso no mayor a 10 minutos desde la obtención de las muestras de sangre arterial y venosa se midió del gasto cardíaco por ultrasonido transtorácico Doppler, con supervisión en todo momento del Co-Director de este estudio, quien es médico cardiólogo experto en la realización de esta técnica. Se comprobó de forma previa a cada medición la correcta función del aparato y del transductor. Se comprobó asimismo que no existan lesiones en el tórax que contraindiquen la aplicación del transductor a nivel local. Posteriormente con el transductor sectorial se realizó ventana cardíaca paraesternal longitudinal, con el fin de visualizar el tracto de salida de la aorta y medir su diámetro, para posteriormente calcular el área del anillo valvular de este vaso. Luego se realizó una ventana de 4 cámaras a nivel medio clavicular, quinto espacio intercostal, para identificar nuevamente el tracto de salida de la aorta y con ayuda de la técnica Doppler pulsado se midió la onda de eyección para estimar la integral velocidad/tiempo, cuyo valor se multiplicó por el tracto de salida de la aorta y por la frecuencia cardíaca, obteniendo de esta forma la medición del gasto cardíaco.

La información obtenida hasta este punto se anotó en una hoja de cálculo de Excel, la cual contenía las fórmulas para el cálculo de las variables a estudiar para determinar el gasto cardíaco por los modelos de Bergstra, Dehmer, LaFarge y MET. Una vez obtenidas las cifras de gasto cardíaco se interpretaron de acuerdo al contexto clínico del paciente y se notificó al médico tratante el estatus del choque del paciente, para de esta forma dirigir su tratamiento.

Una vez obtenida la información del total de la población muestra calculada, se vaciaron los datos de Excel al programa estadístico SPSS V29 para el procesamiento de las variables sociodemográficas y presentar los datos en medidas de tendencia central y para el procesamiento de las variables de estudio para establecer la correlación entre el gasto cardíaco medido por ultrasonido Doppler y por cada fórmula para estimar el Fick (Dehmer, LaFarge, Bergstra y MET) usando el coeficiente de correlación de Pearson y formando un dispersograma por cada una de las 4 correlaciones. Se estudió la fuerza de

asociación en cuanto a si esta es grande, mediana, pequeña o débil, y así por comprobar H1 o H0 para esta investigación.

### **VI.5.1 Análisis estadístico**

Para las variables cuantitativas se calculará el promedio y la desviación estándar. Para las variables cualitativas se medirán las frecuencias absolutas y relativas.

Para medir la correlación entre las variables, se aplicará la prueba de Pearson, con un nivel de confianza del 95%. Los resultados se presentarán en gráficos y cuadros.

Toda la información se descargará en excel y será procesada con el paquete estadístico SPSS V. 29.

### **VI.5.2 Consideraciones éticas**

En este estudio se contempla la reglamentación ética vigente al someterse a un comité de investigación local en salud, ante el cual se presentó para su revisión, evaluación y aceptación.

Dentro de la Declaración de Helsinki 2013. Se respeta el artículo 11 “En la investigación médica, es deber del médico proteger la vida, la salud, la dignidad, la integridad, el derecho a la autodeterminación, la intimidad y la confidencialidad de la información personal de las personas que participan en investigación. Así como el artículo 23 que refiere “deben tomarse toda clase de precauciones para resguardar la intimidad de la persona que participa en la investigación y la confidencialidad de su información personal y para reducir al mínimo las consecuencias de la investigación sobre su integridad física, mental y social.” Además, se respetan los siguientes postulados:

La investigación médica estuvo sujeta a normas éticas que sirven para promover y asegurar el respeto a todos los seres humanos y para proteger su salud y sus derechos individuales (postulado 7).

Es deber del médico proteger la vida, la salud, la dignidad, la integridad, el derecho a la autodeterminación, la intimidad y la confidencialidad de la información personal de las personas que participan en investigación (postulado 9).

La investigación médica en seres humanos sólo debe realizarse cuando la importancia de su objetivo es mayor que el riesgo y los costos para la persona que participa en la investigación (postulado 16).

Deben tomarse toda clase de precauciones para resguardar la intimidad de la persona que participa en la investigación y la confidencialidad de su información personal (postulado 24).

La participación de personas capaces de dar su consentimiento informado en la investigación médica debe ser voluntaria. Aunque puede ser apropiado consultar a familiares o líderes de la comunidad, ninguna persona capaz de dar su consentimiento informado debe ser incluida en un estudio, a menos que ella acepte libremente (postulado 25).

Si un participante potencial que toma parte en la investigación considerado incapaz de dar su consentimiento informado es capaz de dar su asentimiento a participar o no en la investigación, el médico debe pedirlo, además del consentimiento del representante legal. El desacuerdo del participante potencial debe ser respetado (postulado 29).

El proyecto y el método de todo estudio en seres humanos debe describirse claramente y ser justificados en un protocolo de investigación (postulado 22).

Se envió para consideración, comentario, consejo y aprobación al comité de ética de investigación pertinente antes de comenzar el estudio. Después que

termine el estudio, los investigadores deben presentar un informe final al comité con un resumen de los resultados y conclusiones del estudio (postulado 23).

También se conocen y respetarán los criterios para la ejecución de proyectos de investigación para la salud en seres humanos, establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SSA-2012, la cual menciona en el apartado 5.3: “La Secretaría, para el otorgamiento de la autorización de una investigación para la salud en seres humanos conforme al objetivo y campo de aplicación de esta norma, deberá corroborar que, en el proyecto o protocolo de investigación, prevalezcan los criterios de respeto a la dignidad del sujeto de investigación, la protección de sus derechos, principalmente el de la protección de la salud, así como el bienestar y la conservación de su integridad física”. Y en el apartado 5.5: “Toda investigación debe garantizar que no expone al sujeto de investigación a riesgos innecesarios y que los beneficios esperados son mayores que los riesgos predecibles, inherentes a la maniobra experimental”.

Además, se cubre lo contemplado en el artículo 17 de la Ley General de Salud acerca de la competencia del Consejo de Salubridad General en su fracción III. Opinar sobre programas y proyectos de investigación científica y de formación de 19 recursos humanos para la salud. De acuerdo al artículo 17 en el apartado 1 es un estudio sin riesgo.

Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud de acuerdo al DOF 02-04-2014.

Por las características del estudio se considera que no implica o provoca ningún riesgo para los pacientes ya que será únicamente revisión de expedientes, pero si se llegara a presentar algún factor que atentará contra la integridad de los pacientes, se atenderá de forma inmediata, en medida de lo posible. Se buscará en todo momento respetar y proteger la información de manera encriptada en la computadora personal del investigador principal, así como en las computadoras del área de la coordinación de investigación donde ningún otro investigador adjunto tendrá acceso.

Como investigador principal él se compromete a resguardar y mantener la confidencialidad de la información, a no hacer mal uso de los documentos, expedientes, reportes, estudios, actas, resoluciones, oficios, correspondencia, acuerdos, contratos, convenios, archivos físicos y/o electrónicos de información recabada, estadísticas o bien, cualquier otro registro o información relacionada con el estudio mencionado a su cargo, o en el cual participo, así como a no difundir, distribuir ni comercializar los datos personales contenidos en los sistemas de información desarrollados en la ejecución del mismo.

Beneficencia: beneficio para la institución y sus derechohabientes, el conocer los gastos hospitalarios y efectividad de tener una clínica de dolor.

No maleficencia: no hace ningún daño.

Autonomía: el presente estudio se realizó por los investigadores principales y asociados sin ser afectados en sus tomas de decisiones por influencias externas.

Justicia: todos los expedientes de acuerdo a los criterios de selección propuestos.

## VII. Resultados

Entre julio y agosto de 2025 se seleccionaron 132 pacientes de acuerdo al tamaño de la muestra previamente comentado.

Las características demográficas y clínicas basales de los participantes se resumen en la **tabla VII.1.1-4**. En el caso particular de la fórmula de Dehmer, ya que el manuscrito original propone una fórmula para estimar el GC en la población general, pero se desglosan 2 cohortes más conformadas por pacientes sedados y despiertos, se realizó el mismo desglose en 3 cohortes; el de la población total, aquellos que se encontraban sedados (98 participantes) y aquellos sin sedación (34 participantes).

La población estudiada fue masculina en un 56%, de una edad promedio de 55.1 años ( $\pm 16.34$ ), siendo la edad mínima 18 años y máxima de 89 años. El promedio de peso fue 69.4 kg, talla 163.42 cm, IMC 25.9, y SC de 1.74 m<sup>2</sup>. La gran mayoría de los pacientes afectados cursó con choque distributivo en un 95.45%. Sólo 4.54% tuvieron causa cardíaca. No se identificaron casos de choque obstructivo o hemorrágico.

Tabla VII.1.1 Frecuencia según el sexo

Sexo	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Masculino	74	56.06%
Femenino	78	43.94%
Total	132	100%

Fuente: Pacientes que ameritaron medición de gasto cardíaco, del Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025.

Tabla VII.1.2 Promedios de las variables somatométricas

VARIABLES SOMATOMÉTRICAS	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Peso	69.4	±16.85
Talla	163.42	±9.17
Superficie corporal	1.74	±0.22
Índice de masa corporal	25.93	±5.78

Fuente: Pacientes que ameritaron medición de gasto cardíaco, del Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025.

Tabla VII.1.3 Frecuencia según el tipo de choque

Tipo de choque	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Séptico	126	95,45%
Cardiogénico	6	4.55%
Total	132	100%

Fuente: Pacientes que ameritaron medición de gasto cardíaco, del Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025.

Tabla VII.1.4 Determinación del gasto cardíaco por los distintos métodos

GASTO CARDÍACO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Doppler	5.04	±2.06
LaFarge	5.49	±4.02
Bergstra	9.55	±7.39
Dehmer	8.62	±6.53
Dehmer bajo sedación	8.18	±6.25
Dehmer sin sedación	9.34	±6.88
MET	8.43	±7.57

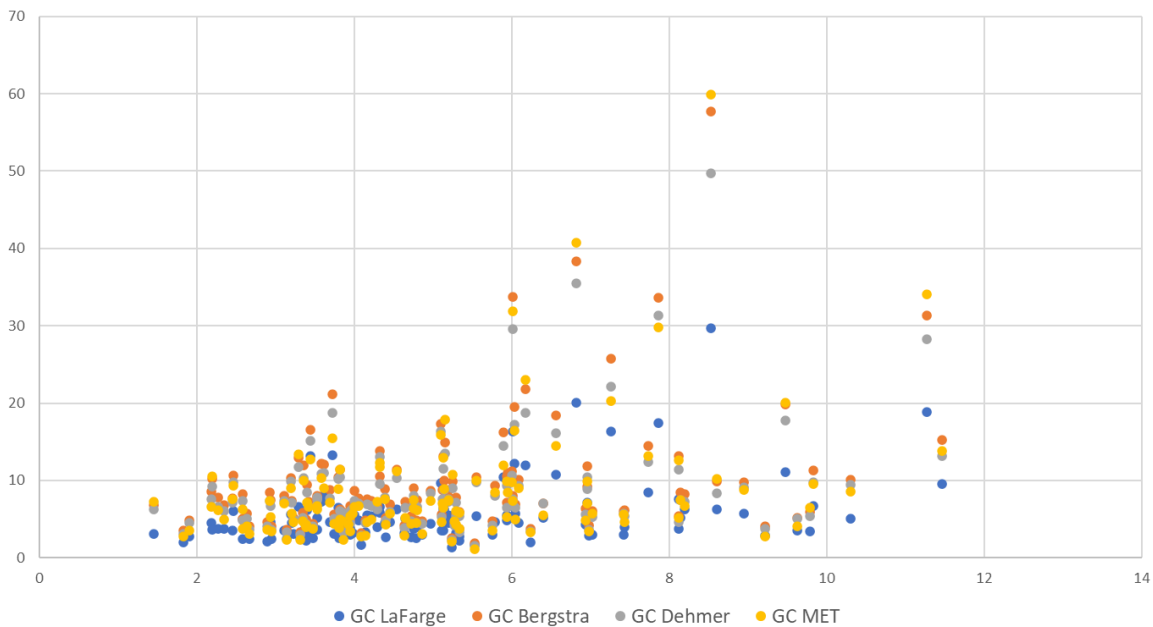
Fuente: Pacientes que ameritaron medición de gasto cardíaco, del Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025.

En cuanto a variables clínicas, se observó una frecuencia cardíaca promedio de  $88.21 \pm 20.41$ , hemoglobina  $10.29 \pm 2.73$ , tensión arterial media  $80.92 \pm 11.11$ , saturación de oxígeno arterial  $94.11\% \pm 69.93\%$ , saturación de oxígeno venosa  $69.93\% \pm 11.56\%$ , presión arterial de oxígeno  $83.16 \pm 24.71$ , presión venosa de oxígeno  $40.69 \pm 9.44$ , fracción inspirada de oxígeno  $40.25 \pm 18.65$ , dosis de norepinefrina  $0.14 \pm 0.15$ , área infundibular aórtica  $2.89 \pm 0.72$ , integral velocidad tiempo  $20.03 \pm 5.37$ .

Se estudió el coeficiente de correlación de Pearson de cada modelo matemático para identificar aquél que más se aproximara al GC obtenido por ultrasonido, encontrando una correlación positiva en todos los métodos, pero con distintos grados de la misma. En la **Figura VII.1**, se muestra un diagrama de dispersión de los modelos matemáticos con respecto al GC Doppler y posteriormente en las **Figuras VII.2-7** se muestran por separado los dispersogramas para cada modelo matemático.

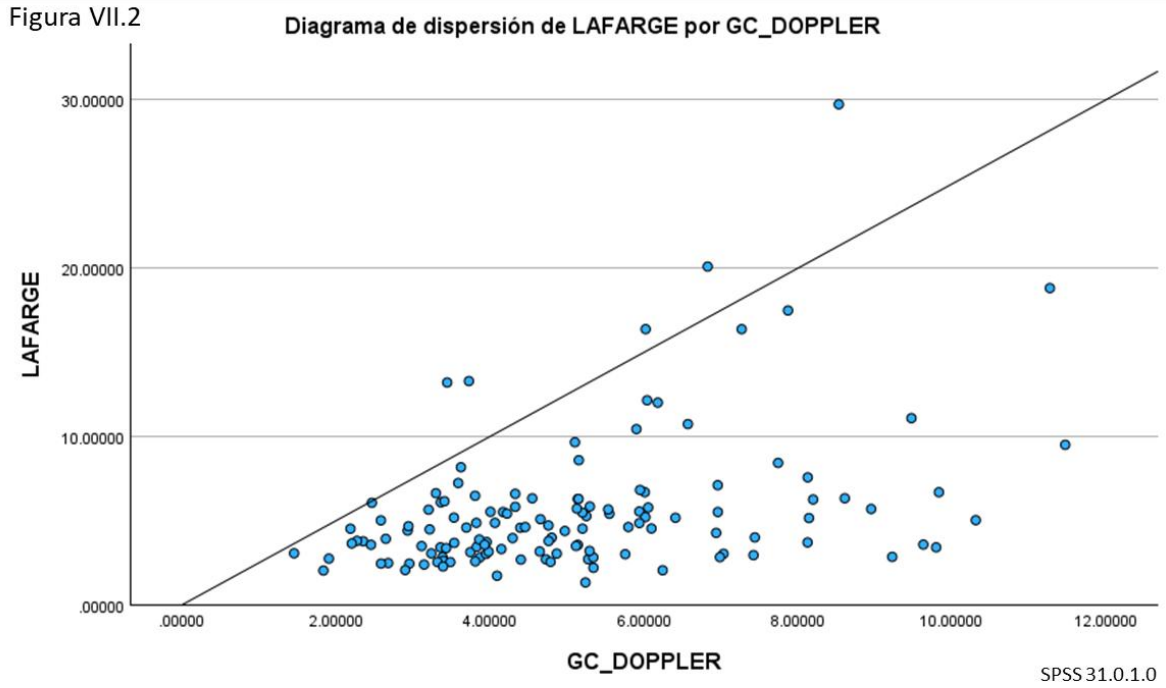
Figura VII.1

Dispersión del gasto cardíaco por las 4 fórmulas del Fick modificado



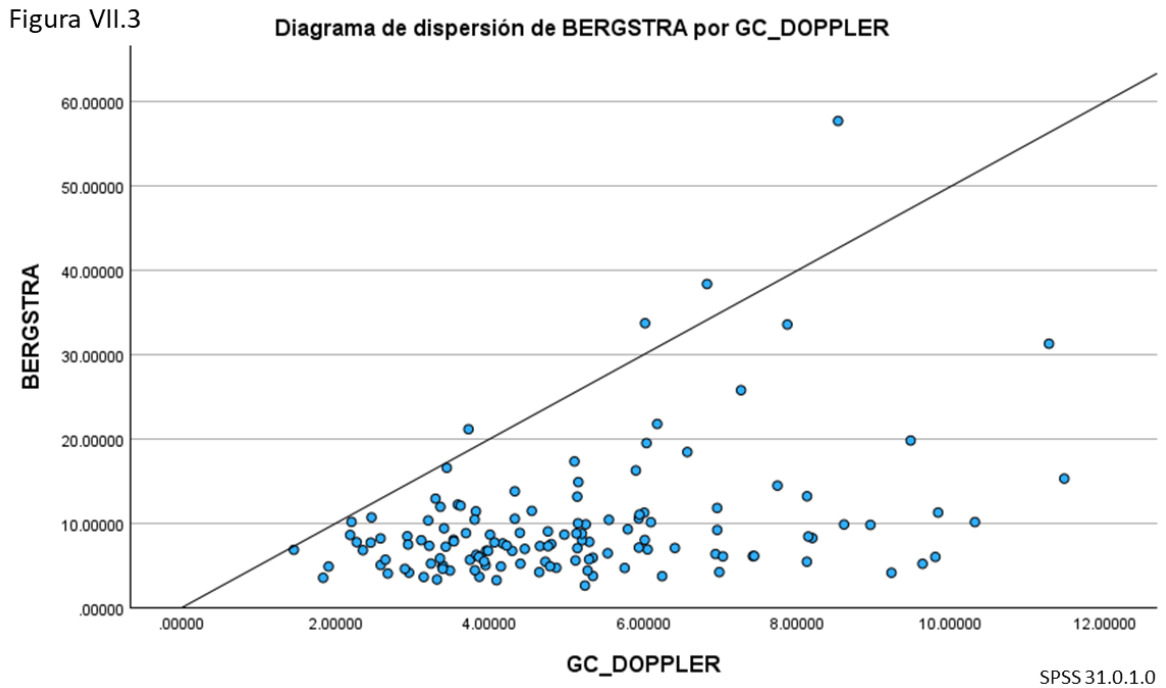
Fuente: Pacientes que ameritaron medición de gasto cardíaco, del Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025.

Figura VII.2



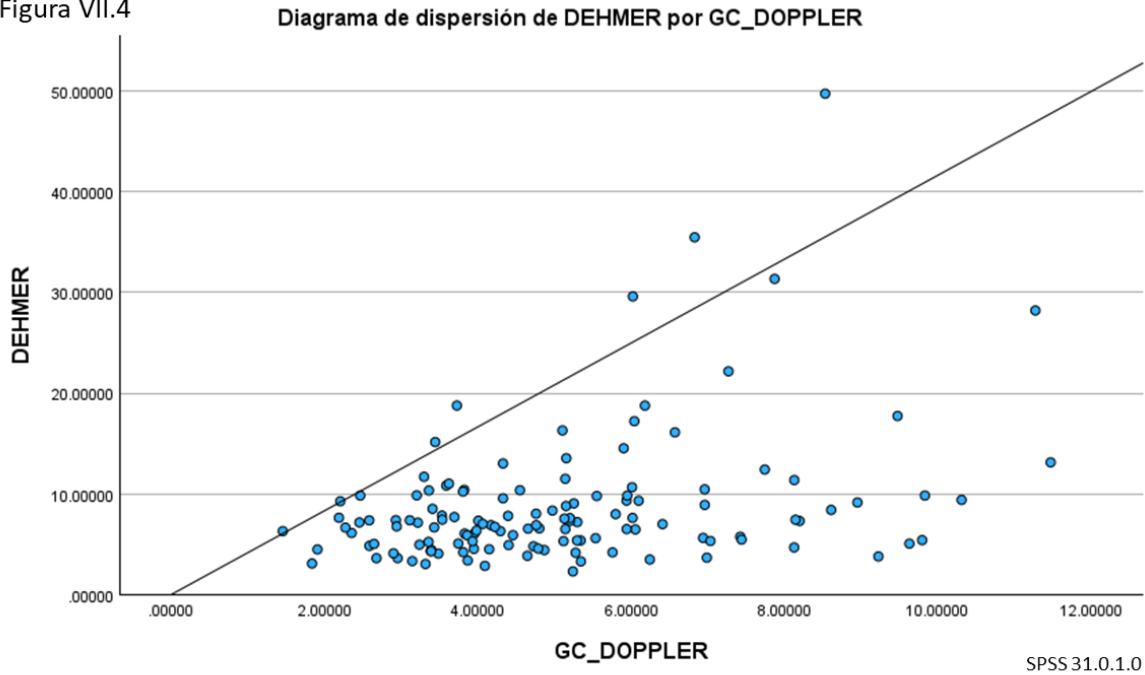
Correlación de Pearson entre fórmula de LaFarge y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  
 $R=0.401$ ,  $P= <0.001$ .

Figura VII.3



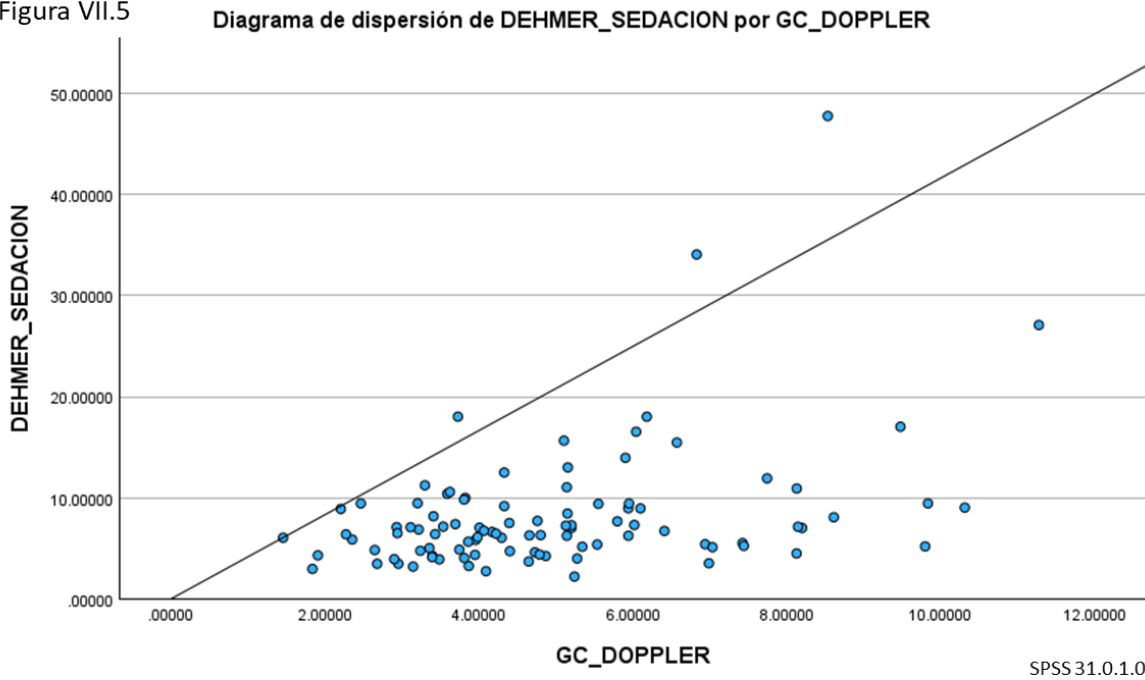
Correlación de Pearson entre fórmula de Bergstra y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  
 $R=0.366$ ,  $P= <0.001$ .

Figura VII.4



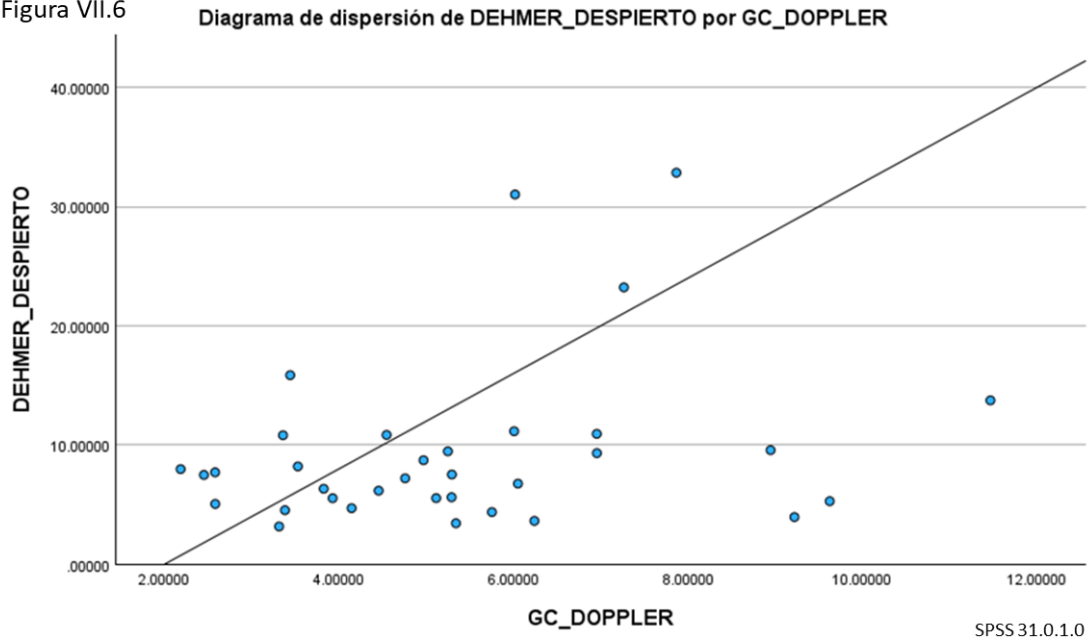
Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.361$ ,  $P < 0.001$ .

Figura VII.5



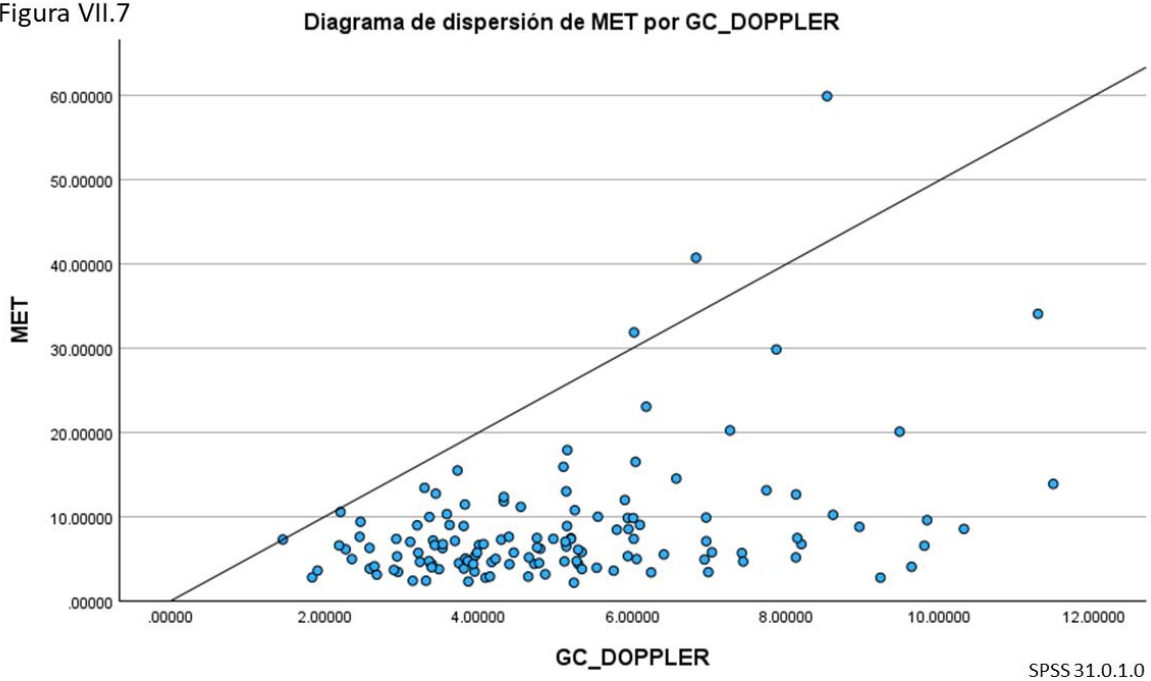
Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.393$ ,  $P < 0.001$ .

Figura VII.6



Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.273$ ,  $P= 0.118$

Figura VII.7



Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.377$ ,  $P= <0.001$

La fórmula de LaFarge fue el modelo predictivo que demostró mayor cercanía al GC Doppler, con un nivel de correlación de Pearson de 0.401 (CI 95% 0.264-0.567), categorizándose como nivel intermedio. El resto de resultados de cada fórmula se enlistan en la **Tabla VII.2**.

Tabla VII.2

Correlación del gasto cardíaco con las distintas fórmulas del método de Fick Modificado

Pearson con GC Doppler	Valor de R de Pearson	CI 95%	Significancia
LaFarge	0.401	0.264 – 0.567	<0.001
Bergstra	0.366	0.192 – 0.498	<0.001
Dehmer	0.361	0.195 – 0.499	<0.001
Dehmer con sedación	0.393	0.187 – 0.561	<0.001
Dehmer sin sedación	0.273	-0.3 – 0.136	0.118
MET	0.377	0.254 – 0.49	<0.001

Fuente: Pacientes que ameritaron medición de gasto cardíaco, del Hospital General de Querétaro, en los meses de mayo a octubre del 2025.

De esta manera se identificó que los modelos matemáticos tienen un coeficiente de correlación moderado a bajo con respecto al GC Doppler. Sin embargo, teniendo en cuenta que cada modelo fue acuñado originalmente en determinados contextos clínicos por los investigadores que les dieron nombre, fue que se diseñó un análisis por subgrupos. En el cual, los datos de cada variable tanto sociodemográfica como clínica fueron divididos en cuartiles, y filtrando los datos de la muestra para estudiar únicamente los correspondientes a cada cuartil se calculó un nuevo coeficiente de correlación de Pearson entre GC Doppler y GC Fick por cada modelo matemático. En caso de que un cuartil incluyera un gran intervalo de casos, o que el nivel de correlación fuera moderado a alto en 2 o más cuartiles seguidos, se dividió la variable en deciles, con el fin de identificar los intervalos con la máxima rentabilidad correlativa. Una vez identificados los cuartiles o deciles con una R moderada o alta dentro de cada variable, se combinaron las variables para observar en qué contextos clínicos podía aumentar el coeficiente de correlación de Pearson. Con estas combinaciones de intervalos entre variables clínicas y sociodemográficas se observó que las 6 fórmulas

predictivas pueden alcanzar un nivel de correlación muy alto, con  $p$  estadísticamente significativa. En la **Tabla VII.3** se enlistan los escenarios clínicos necesarios para obtener un máximo valor de R.

Tabla VII.3

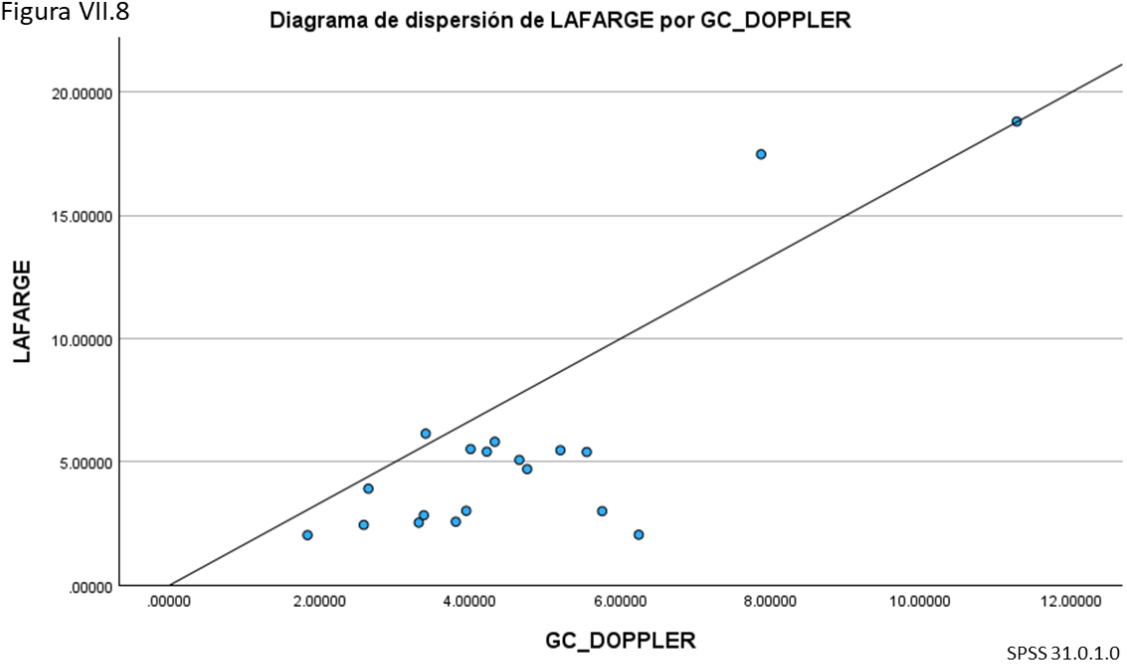
Nivel de correlación de Pearson en subgrupos seleccionados

Fórmula	Escenario clínico	R de Pearson	CI 95%	P	n total
LaFarge	Edad <= 66 años SC >= 1.4561 m <sup>2</sup> SC <= 1.957 m <sup>2</sup> Hb >= 9.91 mg/dl Hb <= 12.41 mg/dl	0.823	0.589 - 0.93	<0.001	19
Bergstra	Edad <= 66 años SC >= 1.4561 m <sup>2</sup> SC <= 2.033 m <sup>2</sup> Hb >= 9.91 mg/dl Hb <= 12.41 mg/dl	0.804	0.578 - 0.915	<0.001	22
Dehmer	Edad <= 66 años SC >= 1.51 m <sup>2</sup> SC <= 1.957 m <sup>2</sup> HB >= 9.91 mg/dl HB <= 12.41 mg/dl	0.808	0.505 - 0.934	<0.001	15
Dehmer en sedación	Edad <= 66 años SC >= 1.4561 m <sup>2</sup> SC <= 2.033 m <sup>2</sup> HB >= 9.31 mg/dl HB <= 12.41 mg/dl	0.859	0.664 - 0.945	<0.001	19
Dehmer sin sedación	Edad <= 66 años SC >= 1.4561 m <sup>2</sup> SC <= 2.033 m <sup>2</sup> FC <= 87 lpm SO2a <= 97%	0.842	0.243 - 0.976	0.017	7
MET	Edad <= 66 años SC >= 1.4561 m <sup>2</sup> SC <= 2.033 m <sup>2</sup> HB >= 9.9 mg/dl HB <= 12.4 mg/dl	0.833	0.654 - 0.924	<0.001	25

Microsoft Office Excel 2016

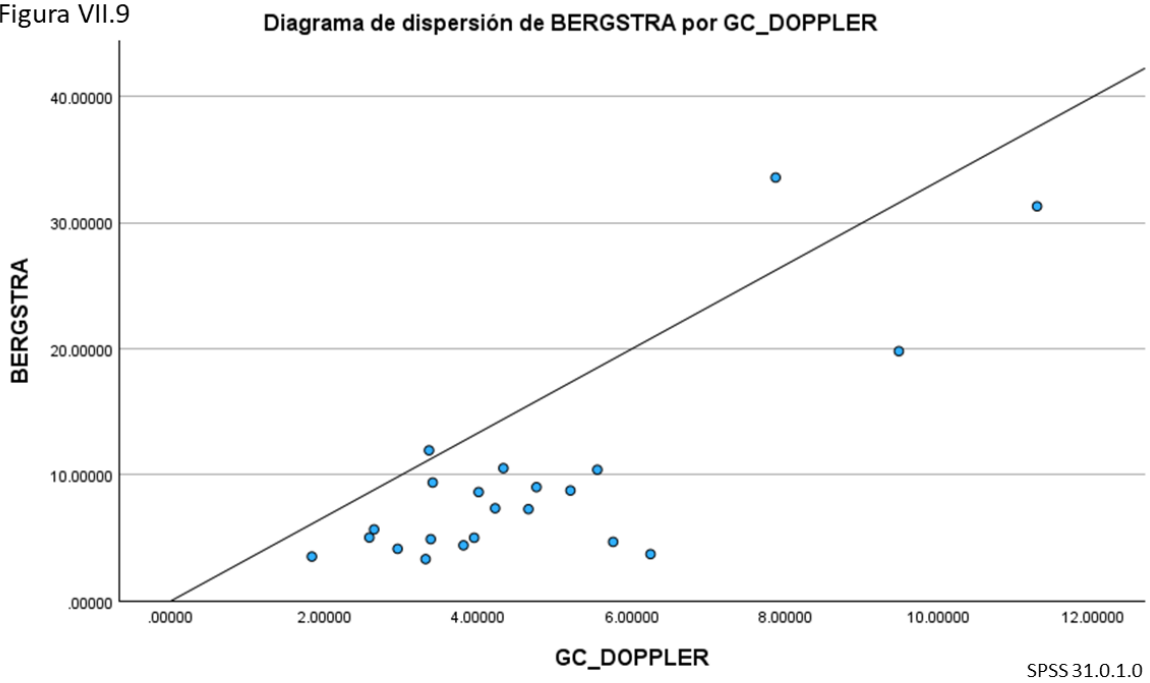
Las variables que influyeron en mayor medida en el nivel de correlación fueron la edad, superficie corporal, frecuencia cardíaca, niveles de hemoglobina y saturación de oxígeno arterial. Para demostrar de manera gráfica este subanálisis de variables se muestran en las **Figuras VII.8-13** los dispersogramas correspondientes a las nuevas correlaciones.

Figura VII.8



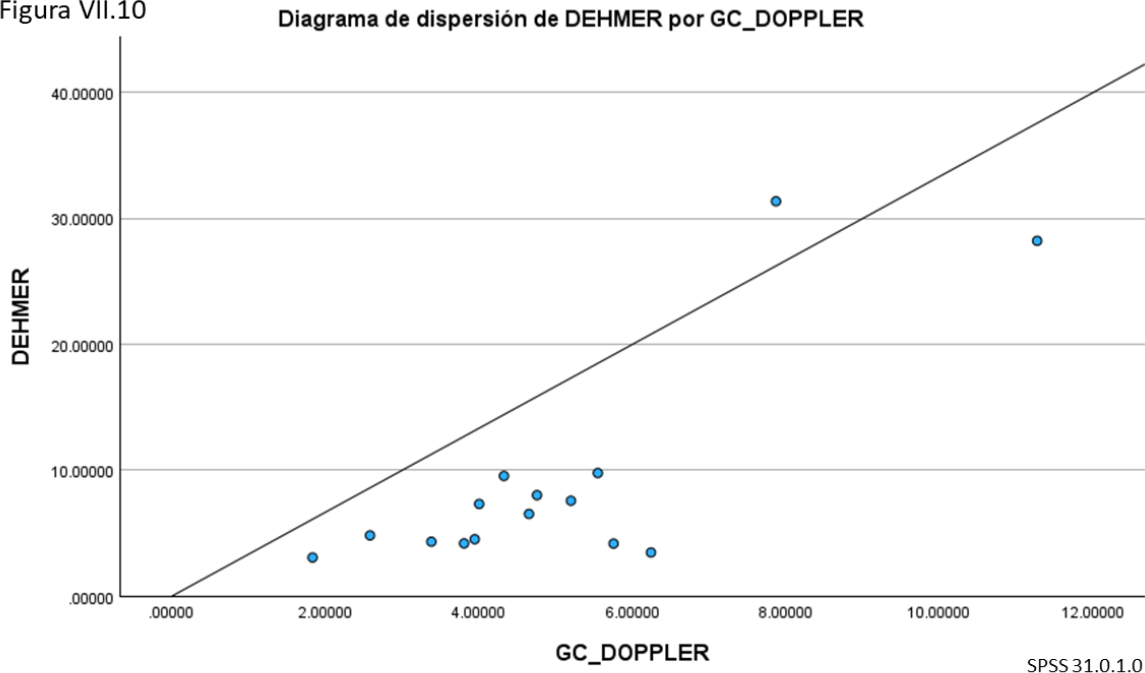
Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.823$ ,  $P= <0.001$

Figura VII.9



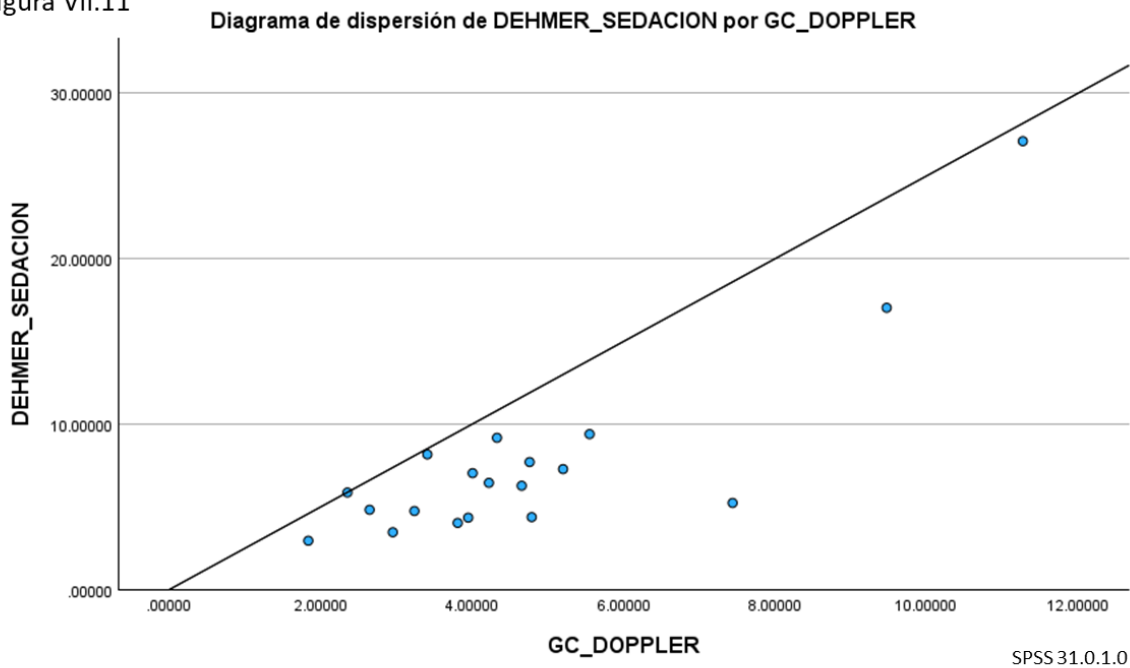
Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.804$ ,  $P= <0.001$

Figura VII.10



Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.808$ ,  $P= <0.001$

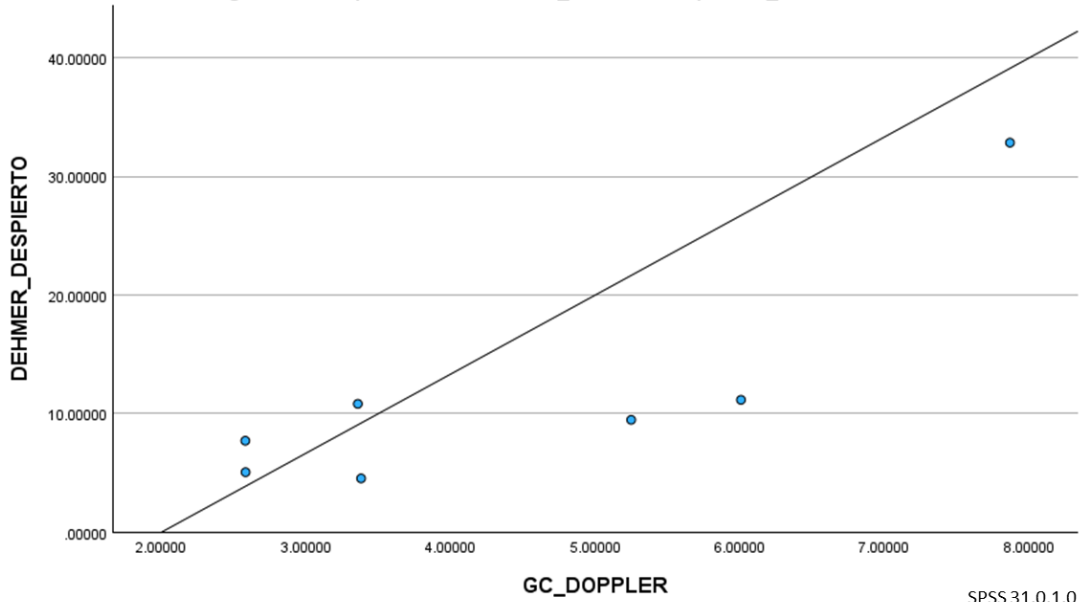
Figura VII.11



Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.859$ ,  $P= <0.001$

Figura VII.12

Diagrama de dispersión de DEHMER\_DESPIERTO por GC\_DOPPLER

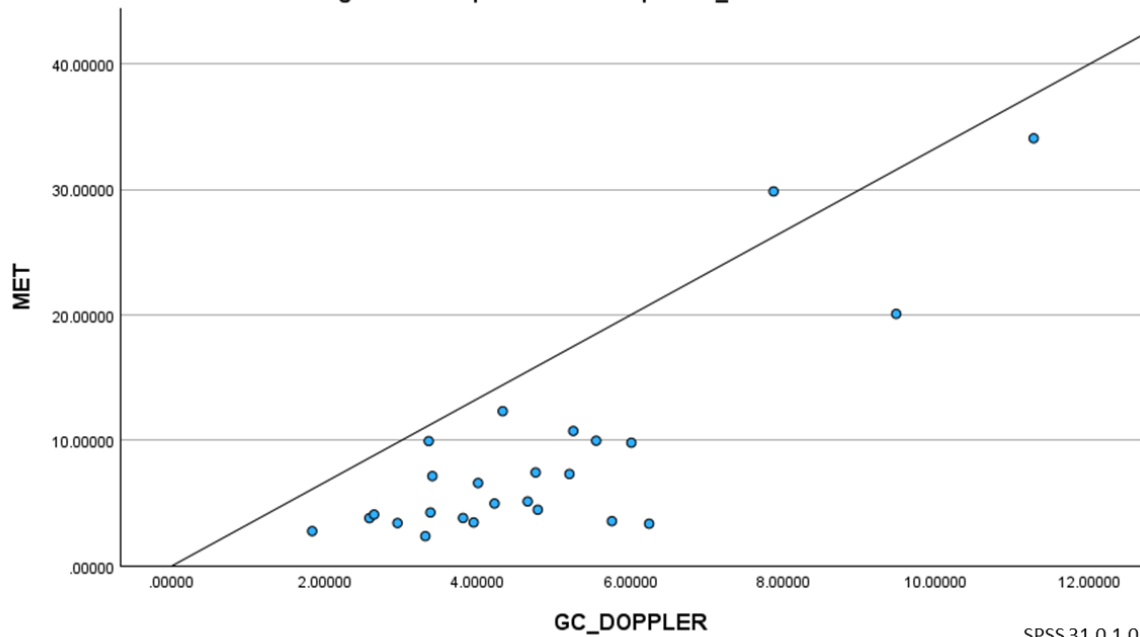


SPSS 31.0.1.0

Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.842$ ,  $P= 0.017$

Figura VII.13

Diagrama de dispersión de MET por GC\_DOPPLER



SPSS 31.0.1.0

Correlación de Pearson entre fórmula de Dehmer con sedación y Gasto cardíaco por ultrasonido Doppler.  $R=0.833$ ,  $P= <0.001$

## VIII. Discusión

El modelo propuesto por Adolph Fick para la medición del gasto cardíaco *per se* consiste en una observación física medible, reproducible y precisa, que fue comprobada en modelos animales en que se realizaron mediciones directas del volumen de sangre eyectado por el corazón tal como lo hizo Seely (1950) y De Boode (2007), pero cuya aplicación queda relegada al laboratorio de investigación debido a lo invasivos que eran los métodos utilizados para calcular el VO<sub>2</sub>. Por ello, las fórmulas de LaFarge (1970), Dehmer (1982), Bergstra (1995), y por MET (Kwan, 2004) se diseñaron para predecir el VO<sub>2</sub> en un contexto clínico real. Sin embargo, cada fórmula se diseñó con una población de pacientes particular: LaFarge se desarrolló en pacientes entre 3 y 40 años de edad, con una población mayormente pediátrica. Dehmer trabajó con una población de 49 años en promedio, mayoritariamente hombres, que mostraron un VO<sub>2</sub> promedio de 126 ml/min/m<sup>2</sup>, pero con una variabilidad en el rango amplia; entre 65 a 250 ml/min/m<sup>2</sup>. Bergstra validó su fórmula en pacientes cardiopatas, de una edad promedio de 34 años. La validación realizada por Marson para la predicción del VO<sub>2</sub> basado en MET se realizó en pacientes de edades de 15 a 80 años, con requerimiento de FiO<sub>2</sub> no mayor a 60%, con presión arterial media no menor a 50 mmHg, con FC entre 50-140 lpm.

Estas observaciones coinciden con los resultados de esta investigación, donde se observó que las variables de edad entre 18 y 66 años, SC entre 1.4561 y 2.033 m<sup>2</sup>, FC <88 lpm, hemoglobina entre 9.31 y 12.4 mg/dl y saturación arterial de oxígeno entre 71 y 97% fueron aquellas que influyeron positivamente en el nivel de correlación entre el GC Fick modificado y GC Doppler.

Al contrastar los estudios clínicos previamente citados en el apartado de antecedentes con la investigación actual se pueden detectar ciertos paralelismos, los cuales se enlistan en la **Tabla VIII.1**.

Tabla VIII.1

## Correlación con literatura previa

Estudio	Disparidad entre método predictivo y directo	Semejanza identificada en el estudio actual
Narang (2014)	Pacientes con IMC > 40 kg/m <sup>2</sup>	SC >2.0331 disminuye nivel de correlación de Pearson a un promedio de $0.158 \pm 0.269$
Lin (2020)	Pacientes con FiO <sub>2</sub> > 85%	SO <sub>2</sub> arterial de 98-100% disminuye nivel de correlación de Pearson a un promedio de $0.29 \pm 0.044$ . No se observaron cambios significativos en cuanto al nivel de FiO <sub>2</sub> (correlación promedio $0.3861 \pm 0.1815$ ) mientras no se tradujera en un estado de hiperoxigenación sérica.
Sherman (1997)	Pacientes con FC >90 lpm	FC >101 lpm disminuye nivel de correlación de Pearson a un promedio de $0.301 \pm 0.084$
Opotowsky (2017)	Correlación moderada entre las estimaciones de GC medido y estimado ( $r = 0.65$ ).	Los datos brutos muestran correlaciones (r) moderadas a débiles: Lafarge $r = 0.401$ , Bergstra $r = 0.366$ , Dehmer $r = 0.361$ , MET $r = 0.337$
Volodarsky (2023)	Discrepancias de más de 10% entre las estimaciones de GC medido y estimado.	

Microsoft Office Excel 2016

Todos los estudios previos se limitan a la observación del por qué el GC Fick modificado es inferior a algún método directo, sin delimitar aquellas variables que obligadamente inducirán error en la prueba. Variables que incluso pueden causar errores de medición de los mismos métodos directos. Por lo que el estudio realizado es pionero en observar en qué contextos sí puede correlacionar, asentándose en las conclusiones previas y excluyendo los rangos de las variables en que no es posible obtener una medición precisa.

## IX. Conclusiones

A partir de los datos obtenidos se ha conseguido demostrar H1, ya que el gasto cardíaco medido por ultrasonido transtorácico Doppler sí correlacionó con el estimado por método de Fick modificado por coeficiente de Pearson, según la fórmula de Lafarge de forma moderada (0.401), y de forma débil según las fórmulas de Bergstra (0.33), Dehmer (0.361) y MET (0.377) en pacientes con inestabilidad hemodinámica.

Al análisis de las variables clínicas y sociodemográficas se observó que la edad, SC, FC, hemoglobina y SaO<sub>2</sub> influyeron en mayor medida en los resultados de las correlaciones, lo cual es consecuencia directa de la definición fisiológica del gasto cardíaco (volumen sistólico x frecuencia cardíaca), y de los determinantes de la saturación de oxígeno (DO<sub>2</sub> y VO<sub>2</sub>). Teniendo en cuenta que DO<sub>2</sub> varía en función de la hemoglobina y la superficie corporal.

Al análisis por subgrupos se observaron contextos clínicos que muestran un coeficiente de correlación fuerte, alcanzando un promedio de  $0.82 \pm 0.019$  con  $p < 0.001$  entre los 6 modelos estudiados, aunque con una N promedio de  $17.83 \pm 5.72$  pacientes. De esta manera se abre un antecedente en la práctica clínica en el cual, en caso de realizarse estudios más grandes con pacientes que cumplan con las características enlistadas en la **Tabla VII.5** podría corroborarse la no inferioridad del GC Fick sobre el GC Doppler.

## **IX. Propuestas**

Es necesario realizar estudios de mayor escala para constatar que las variables clínicas que condicionaron un aumento del nivel de correlación de Pearson realmente son significativas y reproducibles para considerar que el método de Fick modificado no es inferior a la ultrasonografía Doppler.

La aplicación del método de Fick modificado puede ser considerado en la práctica clínica en pacientes cuyas características somatométricas y constantes vitales no se encuentran en límites extremos.

Debido a la gran cantidad de hallazgos clínicos obtenidos durante la realización de este estudio, al sistematizar la realización de un taller hemodinámico en todo paciente con inestabilidad hemodinámica, pero cuya índole excede las metas de investigación aquí planteadas, se hace hincapié en la necesidad de no sobreentender las causas de inestabilidad hemodinámica y sistematizar el abordaje de todo paciente en esta situación riesgosa que contribuye enormemente a las estadísticas de morbilidad y mortalidad.

## X. Bibliografía

- Bergstra, A., Van Dijk, R. B., Hillege, H. L., Lie, K. I., & Mook, G. A. (1995). Assumed oxygen consumption based on calculation from dye dilution cardiac output: An improved formula. *European Heart Journal*, 16(5), 698-703. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/16.5.698>
- Betteridge, N., & Armstrong, F. (2024). Cardiac output monitoring. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 26(1), 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2024.01.003>
- Blancas, R., Martínez-González, Ó., Ballesteros, D., Núñez, A., Luján, J., Rodríguez-Serrano, D., Hernández, A., Martínez-Díaz, C., Parra, C. M., Matamala, B. L., Alonso, M. A., & Chana, M. (2019). Lack of correlation between left ventricular outflow tract velocity time integral and stroke volume index in mechanically ventilated patients. *Med Intensiva*, 43(2), 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.medin.2017.11.012>
- Carrillo-Esper, R., Núñez-Bacarreza, J. J., & Carrillo-Córdova, J. R. (2007). Saturación venosa central. Conceptos actuales. *Revista Mexicana de Anestesiología*, 30(3), 165-171.
- De Boode, W. P., Hopman, J. C. W., Daniešls, O., Van der Hoeven, H. G., & Liem, K. D. (2007). Cardiac output measurement using a modified carbon dioxide Fick method: A validation study in ventilated lambs. *Pediatric Research*, 61(3), 279–283. <https://doi.org/10.1203/pdr.0b013e318030d0c6>
- De Maria, A. N., & Raisinghani, A. (2000). Comparative overview of cardiac output measurement methods: Has impedance cardiography come of age? *Congestive Heart Failure*, 6(2), 60-73.
- Dehmer, G. J., Firth, B. G., & Hillis, L. D. (1982). Oxygen consumption in adult patients during cardiac catheterization. *Clinical Cardiology*, 5(8), 436-440. <https://doi.org/10.1002/clc.4960050805>
- García, X., Mateu, L., Maynar, J., Mercadal, J., Ochagavía, A., & Ferrandiz, A. (2011). Estimación del gasto cardíaco. Utilidad en la práctica clínica. Monitorización disponible invasiva y no invasiva. *Medicina Intensiva*, 35(9), 552-561. <https://doi.org/10.1016/j.medin.2011.01.014>
- Gonzalez-Hermosillo, J. A., Palma-Carbajal, R., Rojas-Velasco, G., Cabrera-Jardines, R., Gonzalez-Galvan, L. M., Manzur-Sandoval, D., Jiménez-Rodríguez, G. M., & Ortiz-Solis, W. A. (2020). Hemodynamic profiles related to circulatory shock in cardiac care units. *Archivos de Cardiología de México*, 90(1), 48-55. <https://doi.org/10.24875/ACME.M20000094>
- Grafton, G., Cascino, T., Perry, D., Ashur, C., & Koelling, T. M. (2020). Resting oxygen consumption and heart failure: Importance of measurement for determination of cardiac output using the Fick principle. *Journal of Cardiac Failure*, 26(8), 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2019.02.004>

- Hernández, G., Ospina-Tascón, G. A., Damiani, L. P., Estenssoro, E., Dubin, A., Hurtado, J., Friedman, G., Castro, R., Alegría, L., Teboul, J.-L., Cecconi, M., Ferri, G., Jibaja, M., Pairumani, R., Fernández, P., Barahona, D., Granda-Luna, V., Cavalcanti, A. B., Bakker, J., & the ANDROMEDA-SHOCK Investigators. (2019). Effect of a resuscitation strategy targeting peripheral perfusion status vs serum lactate levels on 28-day mortality among patients with septic shock: The ANDROMEDA-SHOCK randomized clinical trial. *JAMA*, 321(20), 1975-1984. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.0071>
- Huntsman, L. L., Stewart, D. K., Barnes, S. R., Franklin, S. B., Colocousis, J. S., & Hessel, E. A. (1983). Noninvasive Doppler determination of cardiac output in man: Clinical validation. *Circulation*, 67(3), 593-602. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.67.3.593>
- Kern, M. (2014). Measurement of cardiac output in the cath lab: How accurate is it? *Cath Lab Digest*, 22(7), 4-8.
- Kwan, M., Woo, J., & Kwok, T. (2004). The standard oxygen consumption value equivalent to one metabolic equivalent (3.5 ml/min/kg) is not appropriate for elderly people. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 55(3), 179-182. <https://doi.org/10.1080/09637480410001725201>
- LaFarge, C. G., & Miettinen, O. S. (1970). The estimation of oxygen consumption. *Cardiovascular Research*, 4(1), 23-30. [https://doi.org/10.1016/S0008-6363\(70\)90102-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6363(70)90102-3)
- Lin, S.-Y., Chang, F.-C., Lin, J.-R., Chou, A.-H., Tsai, Y.-F., Liao, C.-C., Lin, Y.-C., & Chen, C.-Y. (2020). Increased FIO<sub>2</sub> influences SvO<sub>2</sub> interpretation and accuracy of Fick-based cardiac output assessment in cardiac surgery patients: A prospective randomized study. *Research Article*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-122677/v1>
- Luks, A. M., & Levine, B. D. (2024). All that is gold does not glitter. *Circulation*, 150(10), 1158–1160. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.124.069723>
- Marson, F., Martins, M. A., Coletto, F. A., Campos, A. D., & Basile-Filho, A. (2003). Correlation between oxygen consumption calculated using Fick's method and measured with indirect calorimetry in critically ill patients. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 81(1), 77-81. <https://doi.org/10.1590/S0066-782X2003000100008>
- Narang, N., Thibodeau, J. T., Levine, B. D., Gore, M. O., Ayers, C. R., Lange, R. A., Cigarroa, J. E., Turer, A. T., de Lemos, J. A., & McGuire, D. K. (2014). Inaccuracy of estimated resting oxygen uptake in the clinical setting. *Circulation*, 129(2), 203-210. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.113.003334>
- Opotowsky, A. R., Hess, E., Maron, B. A., Brittain, E. L., Barón, A. E., Maddox, T. M., Alshawabkeh, L. I., Wertheim, B. M., Xu, M., Assad, T. R., Rich, J. D., Choudhary, G., & Tedford, R. J. (2017). Thermodilution vs

estimated Fick cardiac output measurement in clinical practice: An analysis of mortality from the Veterans Affairs Clinical Assessment, Reporting, and Tracking (VA CART) program and Vanderbilt University. *JAMA Cardiology*, 2(10), 1090-1099. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2017.2945>

- Rutledge, J., Bush, A., Shekerdemian, L., Schulze-Neick, I., Penny, D., Cai, S., & Li, J. (2010). Validity of the LaFarge equation for estimation of oxygen consumption in ventilated children with congenital heart disease younger than 3 years—A revisit. *American Heart Journal*, 160(1), 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2010.04.003>
- Sánchez-Díaz, J. S., Peniche-Moguel, K. G., Rivera-Solís, G., Martínez-Rodríguez, E. A., Del-Carpio-Orantes, L., Pérez-Nieto, O. R., Zamarrón-López, E. I., & Guerrero-Gutiérrez, M. A. (2021). Hemodynamic monitoring with two blood gases: “A tool that does not go out of style.” *Colombian Journal of Anesthesiology*, 49(1), e928. <https://doi.org/10.5554/22562087.e928>
- Seely, R. D., Nerlich, W. E., & Gregg, D. E. (1950). A comparison of cardiac output determined by the Fick procedure and a direct method using the rotameter. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 73(3), 269-276. <https://doi.org/10.3181/00379727-73-18644>
- Sherman, M. S., Kosinski, R., Paz, H. L., & Campbell, D. (1997). Measuring cardiac output in critically ill patients: Disagreement between thermodilution-, calculated-, expired gas-, and oxygen consumption-based methods. *Cardiology*, 88(1), 19-25.
- Standl, T., Annecke, T., Cascorbi, I., Heller, A. R., Sabashnikov, A., & Teske, W. (2018). The nomenclature, definition and distinction of types of shock. *Deutsches Ärzteblatt International*, 115, 757–768. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2018.0757>
- Suess, E. M., & Pinsky, M. R. (2015). Hemodynamic monitoring for the evaluation and treatment of shock: What is the current state of the art? *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine*, 36(6), 890–898. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1564874>
- Valentinuzzi, M. E., & Leder, R. S. (2013). Cardiac output: Since when, who, and how? *IEEE Pulse*, 4(6), 50-65. <https://doi.org/10.1109/MPUL.2013.2279622>
- Vincent, J.-L., & De Backer, D. (2013). Circulatory shock. *The New England Journal of Medicine*, 369(18), 1726-1734. <https://doi.org/10.1056/NEJMra1208943>
- Volodarsky, I., Kerzhner, K., Haberman, D., Cuciuc, V., Poles, L., Blatt, A., Kirzhner, E., George, J., & Gandelman, G. (2023). Comparison between cardiac output and pulmonary vascular pressure measured by indirect Fick and thermodilution methods. *Journal of Personalized Medicine*, 13(3), 559. <https://doi.org/10.3390/jpm13030559>

- Wetterslev, M., Møller-Sørensen, H., Johansen, R. R., & Perner, A. (2016). Systematic review of cardiac output measurements by echocardiography vs. thermodilution: the techniques are not interchangeable. *Intensive Care Medicine*, 42(8), 1223–1233. <https://doi.org/10.1007/s00134-016-4258-y>
- Yartsev, A. (2015). Oxygen carrying capacity of whole blood. *Deranged Physiology*. Retrieved from <https://derangedphysiology.com/main/cicm-primary-exam/respiratory-system/Chapter-1111/oxygen-carrying-capacity-whole-blood>
- Zhang, Y., Wang, Y., Shi, J., Hua, Z., & Xu, J. (2019). Cardiac output measurements via echocardiography versus thermodilution: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(10), e0222105. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222105>

## XI. Anexos

### X1.1 Hoja de recolección de datos

GC METs			
GC Dehmer sin sedación			
GC Dehmer con sedación			
GC Dehmer			
GC Bergstra			
GC LaFarge			
GC ultrasonido			
Presión arterial media			
FiO <sub>2</sub>			
PO2 venoso			
PO2 arterial			
SO2 venoso			
SO2 arterial			
Hemoglobina			
Frecuencia cardíaca			
Índice de masa corporal			
Superficie corporal (Dubois)			
Talla			
Peso			
Sexo			
Edad			
Nombre del paciente	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3...

## XI.3 Carta de consentimiento informado.



SECRETARÍA  
DE SALUD - SESEQ



Hospital General de Querétaro / Universidad Autónoma de Querétaro

Consejo de investigación y posgrado y Consejo Académico de la facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Querétaro

### Carta de consentimiento informado

Carta de consentimiento informado para participación en protocolos de investigación.

Nombre del estudio	Correlación entre el gasto cardíaco medido por ultrasonido transtorácico Doppler y el método de Fick modificado según las fórmulas para estimar el consumo de oxígeno en pacientes con inestabilidad hemodinámica.
Lugar y Fecha:	Santiago de Querétaro Qro, José Antonio Jimeno 1000, Ex Hacienda la Capilla. Abril de 2025
Justificación y objetivo del estudio:	La finalidad de su participación en este estudio es conocer si la medición del gasto cardíaco por ultrasonido transtorácico Doppler correlaciona con el estimado por método de Fick modificado según las fórmulas de Bergstra, Dehmer, LaFarge y METs, en pacientes con inestabilidad hemodinámica.
Procedimiento:	Se acudirá al Hospital General de Querétaro, donde se buscarán pacientes mayores a 18 años, con indicaciones médicas para medición del gasto cardíaco mediante ultrasonido y método de Fick. En estado de choque, sin cambios hemodinámicos bruscos en los últimos 30 min, que se encuentren con catéter venoso central, y sin contraindicaciones para la toma de muestra de sangre arterial y venosa, que acepten participar en el estudio.
Posibles riesgos y molestias:	Los riesgos potenciales y molestias que implica su participación son los relativos a la manipulación del catéter venoso central que se encuentre colocado, así como los relativos a la punción de la arteria radial para la medición de los gases sanguíneos. La decisión de participar o no participar no afecta de ninguna manera la forma en cómo se relaciona con los servicios de salud, la participación es voluntaria.
Posibles beneficios que recibirá al participar en el estudio:	Identificar el origen del choque que pone en riesgo su supervivencia, en cuanto a si el tipo de choque es hipovolémico, distributivo, obstructivo o cardiogénico. Así como para identificar la correlación entre las distintas herramientas de medición que se valoran en este estudio.
Información sobre resultados y alternativas de tratamiento:	De acuerdo con los resultados será notificado su médico tratante sobre la causa de la inestabilidad hemodinámica permitiendo ajustar su tratamiento.
Participación o retiro:	El retiro no afectará la atención médica que recibe en el hospital.
Privacidad y confidencialidad:	Toda la información que usted nos proporcione para el estudio será de carácter estrictamente confidencial, será utilizada únicamente por los integrantes del estudio de investigación y para los fines establecidos en el mismo. Su información quedará encriptada o identificada con un número y no con su nombre. Los resultados de este estudio serán publicados con fines científicos, pero se presentarán de tal manera que no podrá ser usted identificado. El participante cuenta con la seguridad de que no se identificará su personalidad y se mantendrá la confidencialidad de la información relacionada a su privacidad. Se garantiza por medio de este escrito al participante que sus datos no podrán ser vistos o utilizados por otras personas ajenas al estudio, ni tampoco para propósitos diferentes a los que establece el documento que firma.
En caso de colección de material biológico (si aplica):	<input type="checkbox"/> No autoriza que se tome la muestra. <input type="checkbox"/> Sí autorizo que se tome la muestra solo para este estudio. <input type="checkbox"/> Sí autorizo que se tome la muestra para este estudio y estudios futuros.
Disponibilidad de tratamiento médico en derechohabientes (si aplica):	No aplica.
Beneficios al término del estudio:	Informar sobre los resultados obtenidos.

En caso de dudas o aclaraciones relacionadas con el estudio podrá dirigirse a: Dr. Diego Maximiliano García Flores, médico residente de Medicina Interna. Unidad de nombramiento: Hospital General de Querétaro. Cédula profesional: 12110624. Celular 4421416874. Correo: [dimaxgf@gmail.com](mailto:dimaxgf@gmail.com).

Nombre y firma  
del paciente.

Nombre y firma de  
quien obtiene el  
consentimiento.

Testigo.