

Artículo original

Dispositivo multiparamétrico de bajo costo basado en hardware abierto para el monitoreo fisiológico experimental en animales de laboratorio

Low-cost multiparametric device based on open-source hardware for experimental physiological monitoring in laboratory animals

Federico Gadea¹, Maximiliano Moyano¹, Joaquín Cogo Pagella^{2,3} y Claudio O. Cervino^{2,3}

¹Escuela Superior de Ingeniería, Informática y Ciencias Agroalimentarias (ESIICA), Universidad de Morón, Argentina.

²Escuela Superior de Ciencias Exactas y Naturales (ESCEyN, Universidad de Morón, Argentina.

³Instituto de Ciencias Básicas y Experimentales (ICByE-SeCyT), Universidad de Morón, Argentina.

Manuscrito recibido: 2 de diciembre de 2025; aceptado para publicación: 18 de marzo de 2026

Autor de Contacto: Dr. Claudio O. Cervino. Instituto de Ciencias Básicas y Experimentales (ICByE-SeCyT), Universidad de Morón. Machado 914, (1708) Morón, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. E-mail: ccervino@unimoron.edu.ar

Resumen

El monitoreo simultáneo de parámetros fisiológicos constituye una herramienta esencial en investigación experimental animal; sin embargo, los sistemas comerciales presentan altos costos y limitada adaptabilidad. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y ensayar conceptualmente un Dispositivo de Medición de Signos Vitales para Animales (DMSVA) basado en hardware abierto capaz de registrar múltiples variables fisiológicas en tiempo real. El sistema integra un microcontrolador ESP32 con sensores para electrocardiografía (ECG), frecuencia ventilatoria, temperatura corporal y saturación arterial de oxígeno (SpO₂), junto con un software de adquisición y análisis dedicado. El dispositivo opera con una tasa de muestreo de 1.000 Hz y permite visualización *on-line*, almacenamiento prolongado y análisis *off-line* de señales fisiológicas. Ensayos realizados en ratas Wistar anestesiadas demostraron estabilidad en la adquisición simultánea de señales cardiorrespiratorias y adecuada funcionalidad operativa. El bajo costo de implementación permitió la replicabilidad del sistema para ensayos simultáneos. Los resultados indican que el DMSVA constituye una herramienta válida, funcionalmente consistente en condiciones controladas y accesible para investigación fisiológica experimental y docencia en bioinstrumentación.

Palabras clave: bioinstrumentación, monitoreo fisiológico multiparamétrico, animales de laboratorio, hardware abierto, electrocardiografía experimental, sistemas embebidos biomédicos.

Abstract

The simultaneous monitoring of physiological parameters is an essential tool in experimental animal research; however, commercial systems are characterized by high costs and limited adaptability. The objective of this work was to develop and conceptually test a Vital Signs Monitoring Device for Animals (VSMDA) based on open hardware, capable of recording multiple physiological variables in real time. The system integrates an ESP32 microcontroller with sensors for electrocar-

diagraphy (ECG), respiratory rate, body temperature, and arterial oxygen saturation (SpO₂), along with dedicated acquisition and analysis software. The device operates at a sampling rate of 1,000 Hz and allows for on-line visualization, long-term storage, and off-line analysis of physiological signals. Trials conducted on anesthetized Wistar rats demonstrated stability in the simultaneous acquisition of cardiorespiratory signals and adequate operational functionality. The low implementation cost allowed for the replicability of the system for simultaneous trials. The results indicate that the VSMDA constitutes a valid tool, functionally consistent under controlled conditions, and accessible for experimental physiological research and bioinstrumentation teaching.

Keywords: *bioinstrumentation, multiparametric physiological monitoring, laboratory animals, open-source hardware, experimental electrocardiography, biomedical embedded systems.*

DOI: <http://doi.org/10.34073/444>

1. Introducción

El desarrollo de dispositivos de monitoreo fisiológico multiparamétrico constituye un área de creciente interés en el campo de la bioingeniería, particularmente en contextos de investigación experimental y docencia. El registro simultáneo y continuo de parámetros fisiológicos representa una herramienta fundamental en fisiología, farmacología y ciencias biomédicas, al permitir una caracterización integral del estado funcional de los organismos en condiciones controladas. En este escenario, la disponibilidad reciente de plataformas de hardware abierto ha impulsado la creación de sistemas de bajo costo capaces de registrar variables fisiológicas relevantes en tiempo real, favoreciendo la accesibilidad tecnológica y la reproducibilidad científica.

Tradicionalmente, los sistemas comerciales de monitoreo multiparamétrico se caracterizan por presentar altos costos, baja modularidad y limitada adaptabilidad a protocolos experimentales específicos, lo que restringe su implementación en laboratorios académicos y entornos con recursos limitados. En consecuencia, el desarrollo de dispositivos biomédicos basados en plataformas electrónicas abiertas ha emergido como una alternativa viable para democratizar el acceso a tecnologías de adquisición fisiológica.

La experimentación con animales de laboratorio y la práctica clínica veterinaria requieren el monitoreo continuo y el análisis riguroso de parámetros fisiológicos fundamentales. Entre estos, la actividad cardíaca —evaluada mediante electrocardiograma (ECG) y frecuencia cardíaca (FC)— y la frecuencia

respiratoria (FR) estimada a partir de los movimientos ventilatorios resultan esenciales para la evaluación funcional del organismo (Flores Chávez et al., 2002; Ho et al., 2011; Zehendner et al., 2013). De manera complementaria, el registro de la temperatura corporal (T^oC) y la saturación arterial de oxígeno (SpO₂) permite una caracterización fisiológica integral del estado del animal experimental.

El avance de la Electrónica y la Informática ha impulsado un desarrollo significativo en las técnicas de registro y procesamiento de señales biológicas, particularmente las fisiológicas. La cuantificación de estas variables implica un proceso general que comprende la transducción de la señal biológica en una señal eléctrica, su acondicionamiento mediante amplificación y filtrado, y su posterior adquisición y análisis digital (Brophy, 1974; Diefenderfer, 1984). Este esquema constituye la base conceptual de la bioinstrumentación moderna y sustenta el desarrollo de sistemas de monitoreo fisiológicos contemporáneos.

En los últimos años, los microcontroladores de arquitectura abierta, en particular la familia ESP32, han demostrado un alto potencial para aplicaciones biomédicas debido a su capacidad de procesamiento en tiempo real, conectividad integrada y bajo consumo energético. Diversos estudios han evidenciado su viabilidad para la adquisición continua de señales biológicas—incluyendo ECG, FC y parámetros hemodinámicos— con transmisión estable de datos y baja latencia en sistemas de monitoreo en tiempo real (Murali & Veerapandu, 2023; Mounika & Akram, 2026).

A pesar de estos avances, la mayoría de los dispositivos co-

merciales disponibles está orientada a la clínica humana, lo que dificulta su adaptación al trabajo con animales de laboratorio. Estos sistemas suelen presentar costos elevados, escasa flexibilidad experimental y limitaciones para el registro simultáneo de múltiples variables fisiológicas. Paradójicamente, aunque el registro electrocardiográfico posee más de un siglo de desarrollo tecnológico, los sistemas actuales han incrementado su complejidad y reducido su accesibilidad para laboratorios de investigación en fisiología y farmacología.

El empleo de sensores biomédicos asequibles ha permitido superar parcialmente estas limitaciones. Módulos como el AD8232 para adquisición electrocardiográfica y sensores ópticos como el MAX30100 para oximetría y FC posibilitan el diseño de sistemas integrados capaces de registrar múltiples variables fisiológicas simultáneamente. Estos transductores convierten variaciones biológicas —como señales eléctricas cardíacas, cambios volumétricos sanguíneos y temperatura del cuerpo— en señales eléctricas digitalizables, facilitando su procesamiento mediante algoritmos de filtrado, detección de picos y análisis temporal (Kumar & Singh, 2025).

En esta línea, el avance hacia sistemas multiparamétricos abiertos responde a una tendencia global en bioinstrumentación orientada al monitoreo continuo, portátil y reproducible. Investigaciones recientes han demostrado que las plataformas abiertas permiten integrar ECG, SpO₂, FR y T^oc en un único sistema, con visualización en tiempo real, almacenamiento digital y análisis posterior de señales fisiológicas complejas (Murali & Veerapandu, 2023). Desde una perspectiva metodológica, la adquisición confiable de señales biológicas requiere frecuencias de muestreo suficientes para preservar la morfología de las ondas fisiológicas. En este sentido, los sistemas basados en microcontroladores han alcanzado tasas de muestreo entre 250 y 500 Hz para señales cardiovasculares, garantizando integridad temporal y precisión analítica comparable a soluciones comerciales en contextos experimentales (Miranda-Vega et al., 2025).

El monitoreo simultáneo de estos parámetros adquiere especial relevancia en protocolos experimentales que involucran anestésicos y sedantes —como dexmedetomidina o ketamina— capaces de inducir efectos significativos sobre los sistemas cardiovascular y respiratorio (Laforé Antón, 2004; Belda et al., 2005; Fernández Moreno et al., 2007; Dyson, 2008; Short et al., 2018; Cervino et al., 2024). Asi-

mismo, en investigaciones neurocientíficas, particularmente en fisiología del sueño, el registro concurrente de actividad cardíaca y ventilatoria resulta fundamental para evaluar la función nerviosa autónoma (Affanni & Cervino, 2000).

En el Instituto de Ciencias Básicas y Experimentales (ICByE) de la Universidad de Morón se desarrollan ensayos con animales de laboratorio que requieren herramientas prácticas, específicas y replicables para el monitoreo fisiológico multiparamétrico. En este contexto, surge la necesidad de diseñar un dispositivo integrado —hardware y software— que sea simultáneamente simple, seguro y efectivo, capaz de registrar y analizar parámetros fisiológicos esenciales bajo condiciones controladas.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo multiparamétrico destinado al monitoreo de variables fisiológicas clave. Específicamente, se propone desarrollar y ensayar un Dispositivo de Medición de Signos Vitales para Animales (DMSVA) capaz de registrar de manera simultánea, en ratas de laboratorio, la actividad cardíaca (ECG y FC), la actividad ventilatoria pulmonar (FR), la T^oc y la SpO₂. El sistema integra diversos sensores con un microcontrolador, lo que permite la adquisición y visualización en tiempo real de las señales biológicas.

Se plantea como hipótesis que un sistema multiparamétrico basado en hardware abierto puede registrar parámetros fisiológicos en animales de laboratorio con estabilidad y precisión suficientes para investigación experimental, manteniendo un costo significativamente menor que los sistemas comerciales.

Si bien existen en el mercado numerosos equipos con altas prestaciones, su elevado costo y limitada flexibilidad constituyen barreras para su implementación en investigación básica. En este contexto, el DMSVA se inscribe dentro del paradigma de la bioinstrumentación abierta, proponiendo un sistema multiparamétrico reproducible, modular y de bajo costo, capaz de adquirir digitalmente parámetros vitales, visualizar la información en tiempo real y permitir el análisis posterior de la actividad fisiológica registrada. En consecuencia, resulta pertinente analizar el desempeño del dispositivo propuesto en relación con dichas soluciones.

2. Desarrollo del Dispositivo de Medición de Signos Vitales para Animales (DMSVA)

El diseño y desarrollo del dispositivo para el registro de parámetros fisiológicos en ratas se concibió como un sistema modular que integra la adquisición de señales biológicas, su acondicionamiento y procesamiento digital, y su posterior análisis mediante software. El prototipo está diseñado para medir y registrar simultáneamente los siguientes parámetros clave:

- *Actividad Cardíaca*: registro del electrocardiograma (ECG) y frecuencia cardíaca (FC en $\text{lat}\cdot\text{min}^{-1}$).
- *Actividad Respiratoria*: frecuencia ventilatoria o respiratoria (FR en $\text{resp}\cdot\text{min}^{-1}$).
- *Saturación Sanguínea de Oxígeno* (SpO_2 en %).
- *Temperatura Corporal* ($T^{\circ}\text{c}$ en $^{\circ}\text{C}$).

2.1. Hardware: diseño y componentes

El desarrollo del prototipo (*hardware*) se basó en herramientas accesibles de la comunidad Arduino, con un enfoque en la simplicidad y efectividad.

A. *Bloques Funcionales*. El dispositivo opera mediante una secuencia de tres bloques principales para la captura y procesamiento de datos (**Fig. 1**):

1. *Adquisición de Señales Biológicas*: Sensores colocados sobre los animales capturan las señales de actividad bioeléctrica cardíaca, movimientos ventilatorios, temperatura corporal y saturación sanguínea de oxígeno.

- *Actividad eléctrica cardíaca*: se implantaron electrodos metálicos fijados en ambos miembros superiores y en un miembro inferior. Para el registro del ECG, y posterior cálculo de la de la FC, se realizaron derivaciones bipolares y los electrodos se conectaron a la siguiente etapa (Cervino et al., 2024). Se fijó una impedancia entre electrodos $< 5 \text{ K}\Omega$. Las señales ingresan a un módulo ECG AD8232.
- *Movimientos ventilatorios*: para calcular la FR se registraron los cambios de longitud (deformación) de una banda resistiva fabricada *ad hoc* con cánula de silastic rellena de grafito, conectada a un potenciómetro utilizando una configuración de divisor resistivo. La banda se colocó a la altura del tórax donde

se observaba el movimiento ventilatorio, siendo este el que genera el cambio de longitud del transductor. Los animales ventilaron aire ambiente durante todo el procedimiento.

- *Temperatura corporal*: el registro de la temperatura rectal en ratas se realizó insertando suavemente una sonda con una termocupla tipo K cubierta por una vaina aislante de 0,5mm de espesor lubricada (2 mm de diámetro total) unos 40 mm en el recto (Dangarombizi et al., 2017). Las señales ingresan a un módulo de temperatura MAX6675.
- *Registro de la saturación arterial de oxígeno*: se realizó mediante un sensor no invasivo de pulso-oximetría (modelo MAX30100). El sensor se colocó típicamente en la cola o en una de las patas posteriores del sujeto experimental.

2. *Acondicionamiento y Conversión*: Las señales eléctricas de los sensores ingresan a un bloque de acondicionamiento encargado de amplificarlas (en el caso de ECG, del orden de los 300 mV de entrada a 3,3 V de salida mediante un amplificador operacional) y convertirlas a un formato digital (conversión analógica-digital, ADC). Los potenciales eléctricos de salida ingresaban directamente al conversor analógico digital que posee una resolución de 12 bits y una tasa de muestreo máxima de 27.000 Hz (el programa principal realiza 1.000 muestras por segundo, los 27.000 Hz corresponden a la tasa máxima de muestreo del conversor A/D).

Para la adquisición de las bioseñales, el sistema fue diseñado para capturar la señal cruda (*raw signal*) sin filtrado adicional implementado en el sistema, minimizando posibles distorsiones de fase o pérdida de componentes espectrales. No obstante, el módulo ECG AD8232 posee etapas internas de acondicionamiento y filtrado analógico, operando con un ancho de banda nominal de 0,5 Hz a 40 Hz, lo cual contribuye a la calidad de la señal registrada. La calidad de la señal y la discriminación del ruido dependieron exclusivamente de la resolución del conversor analógico-digital (ADC) integrado en el microcontrolador ESP32, procesando y visualizando las señales ventilatorias y cardíacas en su estado puro para un análisis posterior sin sesgos de procesamiento previo.

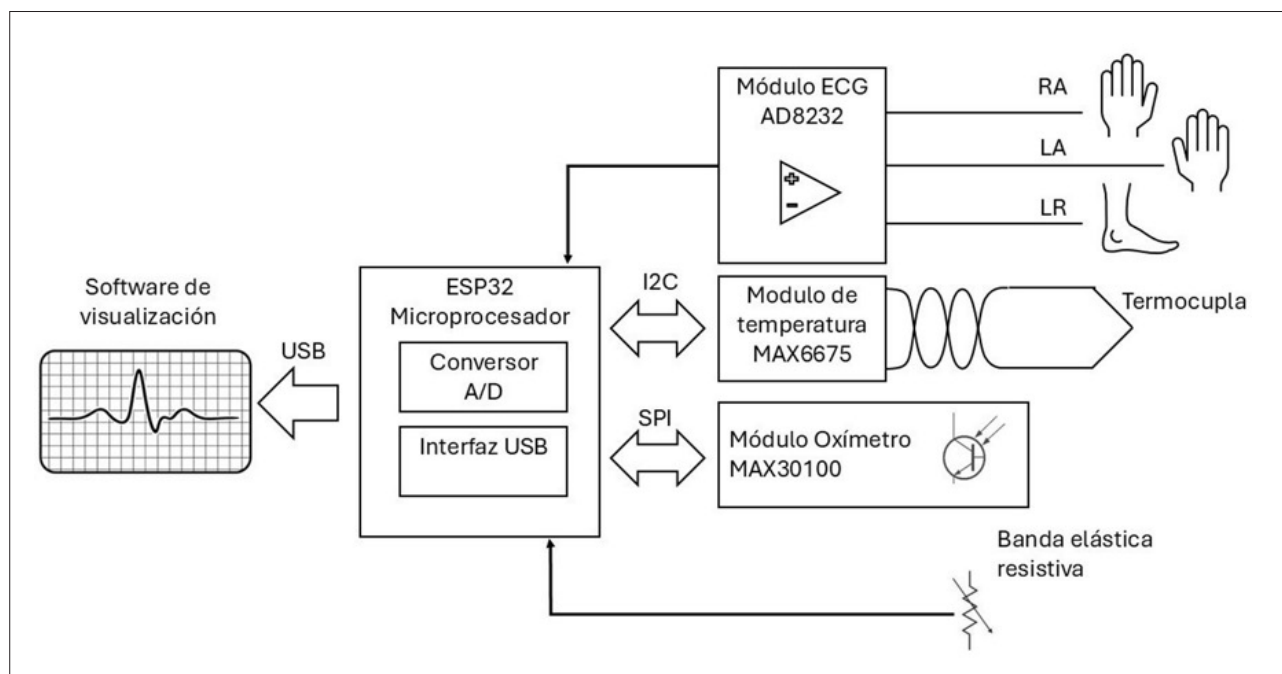


Figura 1. Diagrama de bloques que representa los componentes del dispositivo para el registro de parámetros fisiológicos. El microprocesador ESP32 concentra la información y la envía a la computadora para ser visualizada. Utiliza comunicación I2C y SPI para conectarse a los procesadores que transducen la señal, mientras que el ECG y la banda elástica (movimientos ventilatorios) son señales analógicas directamente capturadas del sensor.

3. *Procesamiento y Almacenamiento:* Un microcontrolador procesa las señales digitales y gestiona el almacenamiento de datos provisorio para enviarlo inmediatamente a la computadora. El almacenamiento masivo se realiza en la computadora mediante un software diseñado a medida, que luego se guarda en formato .xml.

B. *Estructura Electrónica.* El núcleo del dispositivo es una placa principal designada ESP32. Esta placa se conecta directamente a los módulos de sensores, los cuales actúan como dispositivos transductores que convierten la manifestación física (electricidad, temperatura, volumen) en la señal eléctrica utilizable.

Una vez que las señales son capturadas y pre-procesadas por la placa principal, son enviadas a una computadora mediante el puerto USB. El diálogo entre el ESP32 y la computadora se mantiene de forma regular y periódica con una tasa de muestreo de 1.000 Hz.

Se seleccionó una frecuencia de muestreo de 1.000 Hz fundamentada en criterios fisiológicos y técnicos. Para registros

pediátricos humanos, donde las frecuencias cardíacas (FC) son superiores a las del adulto, se recomienda una tasa mínima de 250 Hz (Kligfield et al., 2007). Dado que la FC en ratas es entre dos y tres veces mayor que en humanos, se estableció un margen de seguridad para garantizar la integridad de la señal. Desde la perspectiva del sistema, el software de visualización requiere intervalos de transmisión constantes, ya que los paquetes de datos carecen de marcas de tiempo (*timestamps*). En consecuencia, para asegurar la ejecución estable de los procesos internos y la sincronía de los datos, se determinó un tiempo de ciclo de escaneo de 1 ms, lo que equivale a una frecuencia de adquisición de 1.000 Hz. Para mitigar el efecto de aliasing, se utilizó una frecuencia de muestreo significativamente superior al mínimo de Nyquist. Siguiendo las recomendaciones de la American Heart Association para registros electrocardiográficos, se adoptó una tasa que duplica o triplica el mínimo teórico, compensando así las limitaciones de los intervalos de muestreo finitos (Bailey et al., 1990).

La seguridad del sistema se garantizó mediante una fuente

de corriente continua aislada, proporcionando un aislamiento eléctrico intrínseco respecto a la red de suministro. Para la protección del animal de experimentación, se estableció una referencia de tierra única y se verificó que las corrientes de polarización de los sensores se mantuvieran dentro de los límites de seguridad biológica. El diseño del hardware abierto siguió principios de bioinstrumentación para evitar interferencias electromagnéticas y asegurar la integridad física del espécimen conforme a los protocolos éticos institucionales.

2.2. Software: interfaz y análisis

El sistema se complementa con el diseño y desarrollo de una aplicación de software específica que actúa como interfaz entre el usuario y el dispositivo electrónico.

El software analizador está diseñado para ejecutarse sobre el sistema operativo Windows 7+ y ofrece las siguientes funcionalidades clave para el análisis en laboratorio:

- *Visualización On-line*: Permite la monitorización en tiempo real de las cuatro variables fisiológicas simultáneamente.
- *Registro Histórico (Almacenamiento)*: Permite grabar el muestreo de datos durante varias horas.
- *Análisis Post-Registro*: Incluye funciones de reproducción y zoom sobre los datos almacenados, permitiendo inspeccionar detalladamente el archivo en cualquier momento posterior a la adquisición.

Esta arquitectura integrada (*hardware* simple y *software* dedicado) facilita un sistema de registro y análisis práctico, efectivo y de bajo costo para el entorno de investigación experimental (**Fig. 2**).

Para validar la morfología de las señales de ECG y ventilación obtenidas por el DMSVA, se utilizó como estándar de comparación un amplificador Braintronic (Países Bajos). La señal se acondicionó con filtros FPA de 6 Hz, FPB de 40 Hz y notch

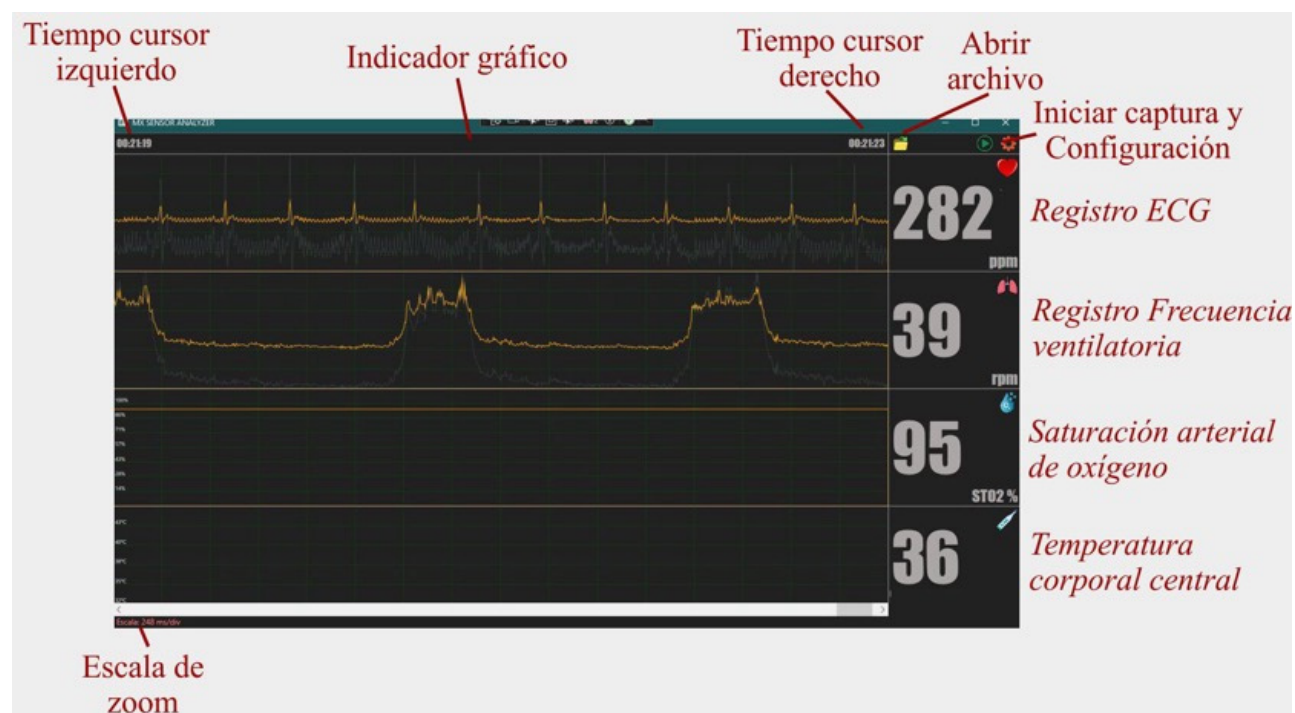


Figura 2. Software de adquisición de datos. El software cumple con los requisitos de visualización gráfica, punteros que indican el tiempo donde se encuentra la captura, valores numéricos calculados dentro del tiempo entre cursores, zoom, iniciar grabación y configuración. También posee función para abrir archivos capturados y poder visualizarlos.

de 50 Hz (Cervino et al., 2024), siendo digitalizada a una frecuencia de muestreo de 256 Hz. El procesamiento se efectuó mediante el programa RHYTHM 10.0d (Stellate Systems, Canadá).

2.3. Ensayo en Animales de Laboratorio

Para evaluar funcionalmente la eficacia y seguridad del dispositivo desarrollado, se aplicó un protocolo experimental siguiendo las metodologías previamente establecidas en nuestro laboratorio (Bello Caraballo et al., 2018a y b; Cogo Pagella et al., 2019a y b; Cogo Pagella et al., 2022; Cervino et al., 2024).

Para poner a prueba el DMSVA se emplearon cinco ratas Wistar macho (peso promedio: 200 ± 20 g). El tamaño de la muestra se determinó bajo criterios de validación técnica y operativa del dispositivo, priorizando la verificación del rendimiento del hardware/software sobre un análisis estadístico de variables fisiológicas. Los animales provinieron del Bioterio de la UM bajo un estricto régimen de iluminación de L:O 12:12, con inicio a las 07:00. La temperatura ambiental se controló entre 22° y 25° C. Se proporcionó alimentación (balanceado para ratas) y agua *ad libitum*.

El protocolo experimental fue aprobado por el CICUAL de la Universidad de Morón (Acta N° 5-19/3/2018). Los animales de experimentación fueron tratados siguiendo el Código Ético desarrollado por el *Canadian Council on Animal Care* como así también de acuerdo a las normativas argentinas.

Los animales fueron inyectados con una combinación anestésica de clorhidrato de ketamina (KETAMINA 50®, Lab. Holliday-Scott, dosis 35 mg/kg, intraperitoneal (IP)) y dexmedetomidina (Precedex®, Hospira Inc-EUA, 50 µg/kg, intraperitoneal (IP)) (Cogo Pagella et al., 2022).

Una vez implementados y validados los transductores, el *hardware* de registro y el *software* de adquisición y análisis, se llevó adelante el protocolo experimental, una vez que los animales ingresaban en el intervalo de anestesia general (Bello Caraballo et al., 2018b). El registro de animales bajo anestesia permitió obtener lecturas precisas.

A partir de los registros obtenidos, se realizó una evaluación detallada del ECG y los movimientos ventilatorios. Adicionalmente, se analizó la ocurrencia de eventos críticos inducidos por las drogas anestésicas, tales como arritmias (en el registro del ECG) o apneas (en el registro ventilatorio pulmonar)

(Primiano, 2009; Cervino et al., 2024). Estos registros fueron acompañados con el monitoreo de la $T^{\circ}C$ y de la SpO_2 .

3. Resultados

Los ensayos realizados en animales de experimentación evidenciaron un funcionamiento estable del sistema DMSVA (Fig. 3), permitiendo la adquisición simultánea y continua de múltiples variables fisiológicas en tiempo real.

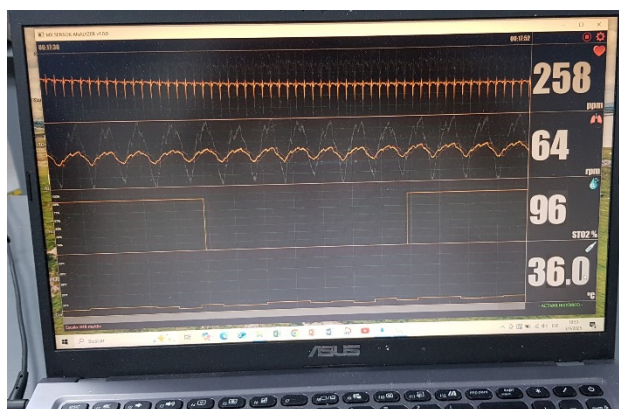
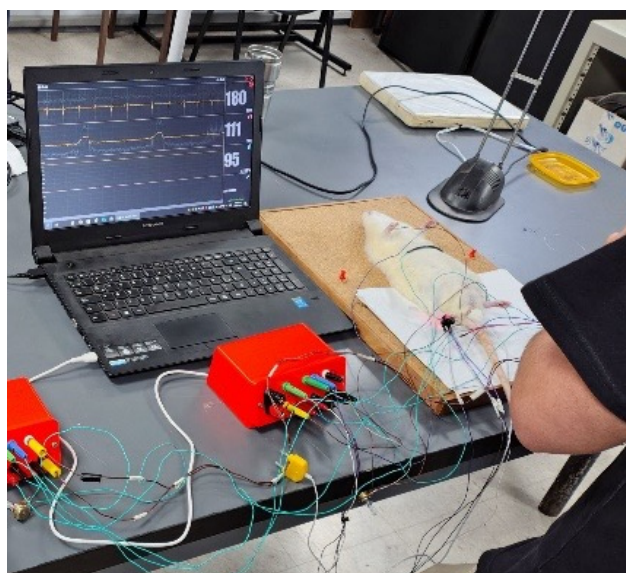


Figura 3. Dispositivo de Medición de Signos Vitales para Animales. El sistema permite realizar registros de variables funcionales que son fundamentales para un gran número de trabajos en fisiología. Arriba: disposición del equipo y del animal de experimentación durante un registro. Abajo: pantalla en donde se monitorean los registros.

La comparación cualitativa entre las señales de ECG y ventilación obtenidas mediante el DMSVA y el sistema de referencia (Braintronic-RHYTHM 10.0d) mostró una alta concordancia morfológica, preservando las características fundamentales de las señales fisiológicas, incluyendo complejos QRS identificables y patrones ventilatorios regulares. En ratas Wistar anestesiadas ($N = 5$), se registraron valores promedio de frecuencia cardíaca (FC) de $212,0 \pm 5,07$ lat·min⁻¹ y frecuencia respiratoria (FR) de $78,0 \pm 10,42$ resp·min⁻¹ al inicio del intervalo de anestesia quirúrgica. La saturación arterial de oxígeno (SpO₂) fue de $94 \pm 3,0$ %, mientras que la temperatura corporal rectal (T^oc) fue de $34,7 \pm 1,4$ °C.

Estos valores se mantuvieron estables durante los períodos de registro analizados, sin evidenciar artefactos significativos ni pérdida de señal, lo que sugiere un desempeño operativo consistente del sistema en condiciones experimentales controladas.

4. Discusión

Es importante destacar que el presente estudio constituye una validación funcional preliminar del dispositivo, orientada a verificar su desempeño técnico y su capacidad de registrar señales fisiológicas coherentes, más que a establecer una validación cuantitativa exhaustiva frente a sistemas de referencia. En este sentido, los resultados deben interpretarse como una prueba de concepto que demuestra la factibilidad del sistema en condiciones experimentales reales.

Los resultados obtenidos evidencian que el dispositivo desarrollado permite el registro en tiempo real de variables fisiológicas fundamentales, constituyendo una herramienta funcional para entornos experimentales. Sin embargo, su análisis requiere ser contextualizado dentro del estado del arte en sistemas de monitoreo fisiológico.

4.1. Viabilidad de sistemas abiertos y desempeño general

Diversos estudios han demostrado que los sistemas modernos de monitoreo cardíaco y multiparamétrico combinan múltiples señales fisiológicas (ECG, PPG, presión, entre otras) para mejorar la evaluación del estado cardiovascular, integrando además técnicas avanzadas de procesamiento digital

y aprendizaje automático (Jain & Tiwari, 2014). En este sentido, el desarrollo de dispositivos portátiles y de costo accesible constituye una línea activa de investigación, particularmente orientada a mejorar la accesibilidad tecnológica sin comprometer la funcionalidad básica (Ehresh et al., 2020).

Los resultados conseguidos con el DMSVA confirman la viabilidad de implementar sistemas multiparamétricos de monitoreo fisiológico basados en hardware abierto para investigación experimental animal. La estabilidad observada en la adquisición de señales y la capacidad de registrar múltiples variables simultáneamente coinciden con reportes recientes que destacan la confiabilidad del microcontrolador ESP32 como plataforma para monitoreo biomédico continuo y análisis fisiológico en tiempo real (Mounika & Akram, 2026). En este sentido, el dispositivo desarrollado demuestra que las arquitecturas abiertas pueden alcanzar niveles adecuados de desempeño experimental manteniendo accesibilidad tecnológica y bajo costo, aspectos particularmente relevantes en entornos académicos y laboratorios con recursos limitados.

El DMSVA, desarrollado y probado en la Universidad de Morón, representa un avance relevante en la capacidad de registrar y analizar parámetros fisiológicos fundamentales en investigación experimental, especialmente en estudios que involucran animales inmovilizados bajo sedación o anestesia. El sistema permite medir de manera integrada actividad cardíaca (ECG y FC), FR, T^oc y SpO₂, constituyendo un enfoque multiparamétrico alineado con las tendencias actuales del monitoreo fisiológico experimental.

Uno de los aportes centrales del DMSVA radica en la integración funcional completa del proceso experimental, desde la transducción fisiológica hasta la visualización y almacenamiento digital de los datos. Este enfoque coincide con la evolución contemporánea de los sistemas de monitoreo biomédico hacia arquitecturas integradas que combinan adquisición, procesamiento y análisis en una única plataforma, reduciendo costos operativos y aumentando la reproducibilidad experimental (Murali & Veerapandu, 2023).

4.2. Desempeño de sensores, adquisición de señales y análisis de datos

Desde el punto de vista técnico, el empleo del sensor AD8232

permitió obtener registros electrocardiográficos adecuados para el análisis de FC y la identificación de patrones rítmicos, en concordancia con estudios que demostraron su eficacia en sistemas portátiles mediante filtrado digital y algoritmos de detección QRS (Kumar & Singh, 2025). Asimismo, la incorporación del sensor MAX30100 amplía la evaluación fisiológica mediante la estimación de oxigenación sanguínea, lo cual resulta particularmente relevante en modelos experimentales que involucran anestesia, estrés fisiológico o intervenciones farmacológicas.

La medición de la FR continúa siendo un desafío técnico en experimentación animal, especialmente en especies de pequeño porte. Métodos tradicionales basados en sensores de CO₂ o resistencias termosensibles intranasales, aunque efectivos, pueden interferir con la dinámica respiratoria natural y alterar la precisión de los registros (Sato et al., 2018). En este contexto, el DMSVA propone una alternativa no invasiva basada en la detección de movimientos ventilatorios, permitiendo registros más fisiológicos y menos intrusivos. Respecto a la medición de la saturación arterial de oxígeno, debe considerarse que la oximetría periférica en roedores, particularmente mediante sensores caudales, puede verse influenciada por factores fisiológicos asociados al protocolo anestésico. Los agonistas α_2 -adrenérgicos como la dexmedetomidina inducen vasoconstricción periférica, reduciendo la perfusión tisular y afectando la calidad de la señal fotopletismográfica. Asimismo, la hipotermia observada durante la anestesia puede contribuir a variaciones en la amplitud de la señal y a posibles sesgos en la estimación de SpO₂. En consecuencia, los valores obtenidos deben interpretarse como estimaciones fisiológicamente plausibles dentro del contexto experimental, reconociendo las limitaciones inherentes a la oximetría periférica no invasiva en pequeños animales.

Desde una perspectiva metodológica, la capacidad de registrar datos durante períodos prolongados y reproducir posteriormente las señales constituye una ventaja significativa. El análisis *off-line* posibilita la aplicación de algoritmos avanzados de procesamiento de señales, detección de eventos fisiológicos y análisis temporal retrospectivo, práctica ampliamente recomendada en sistemas modernos de adquisición biomédica (Miranda-Vega et al., 2025).

4.3. Contextualización experimental y validación fisiológica

En el Instituto de Ciencias Básicas y Experimentales (ICByE-SeCyT) se desarrollan diversas líneas de investigación sobre combinaciones anestésicas (Zacharewicz et al., 2009; Bello Caraballo et al., 2018a,b; Cogo Pagella et al., 2019a,b; Cogo Pagella et al., 2022; Cervino et al., 2024), en las cuales el monitoreo continuo de parámetros fisiológicos resulta esencial. Los registros obtenidos durante la anestesia quirúrgica permiten contextualizar el desempeño del DMSVA dentro de parámetros fisiológicos esperables para ratas Wistar anestesiadas, aportando evidencia indirecta de la confiabilidad del sistema.

En animales anestesiados con ketamina (35 mg/kg) y dexmedetomidina (50 μ g/kg), los valores registrados al inicio del intervalo de anestesia quirúrgica (FC: $212,0 \pm 5,07$ lat.min⁻¹; FR: $78,0 \pm 10,42$ resp.min⁻¹; SpO₂: 94 ± 3 %; temperatura rectal: $34,7 \pm 1,4$ °C) se ubicaron dentro de los rangos fisiológicos descritos para roedores anestesiados en condiciones experimentales controladas. Diversos estudios indican que la FC en ratas anestesiadas suele oscilar entre 180 y 350 lat.min⁻¹, mientras que la FR se mantiene típicamente entre 60 y 100 resp.min⁻¹ dependiendo del protocolo anestésico y la profundidad anestésica (Gargiulo et al., 2012; Flecknell, 2016). Asimismo, la combinación ketamina–dexmedetomidina produce una disminución moderada de la actividad cardiorrespiratoria y una reducción progresiva de la T^oc debido a la depresión metabólica y a la alteración de los mecanismos termorreguladores inducidos por agonistas α_2 -adrenérgicos (Sinclair, 2003; Cervino et al., 2024). La concordancia entre los valores registrados y los rangos reportados en la literatura sugiere que el DMSVA fue capaz de capturar señales fisiológicas estables y biológicamente plausibles durante todo el monitoreo. Este aspecto resulta particularmente relevante considerando que el objetivo principal del trabajo no fue evaluar efectos farmacológicos, sino verificar la capacidad del dispositivo para registrar simultáneamente múltiples variables fisiológicas bajo condiciones experimentales reales.

En consecuencia, los resultados respaldan la validez funcional del sistema de adquisición desarrollado, demostrando que el dispositivo permite un monitoreo multiparamétrico confiable sin interferir con el estado fisiológico esperado del

animal anestesiado. Esto contribuye tanto a la calidad metodológica de los registros como al bienestar animal durante procedimientos experimentales, permitiendo prevenir situaciones de riesgo mediante el seguimiento continuo de parámetros cardiorrespiratorios.

4.4. Discusión comparativa con sistemas comerciales

Los monitores multiparamétricos comerciales se caracterizan por integrar el registro simultáneo de múltiples variables fisiológicas, tales como ECG multiderivación, SpO₂, FR, T^oc y presión arterial no invasiva (NIBP), incorporando en algunos casos capnografía (EtCO₂). Asimismo, estos sistemas incluyen funcionalidades avanzadas como almacenamiento de tendencias, sistemas de alarmas inteligentes y visualización multicanal de señales fisiológicas (Hung-Kee (China) Electronic Technology Co., Ltd., s. f.).

En términos económicos, el costo de implementación constituye una diferencia sustancial. Estudios recientes indican que los sistemas ECG comerciales pueden superar ampliamente los presupuestos disponibles en investigación académica, mientras que las soluciones basadas en microcontroladores permiten reducir los costos de desarrollo hasta veinte veces, manteniendo una funcionalidad experimental adecuada (Zishan et al., 2025). Esta característica favorece la replicabilidad del dispositivo propuesto y posibilita la construcción de múltiples unidades para ensayos simultáneos, incrementando la potencia experimental. En este contexto, el sistema desarrollado implementa un monitoreo funcional mediante sensores simples y arquitectura abierta, permitiendo registrar ECG, oximetría, temperatura y respiración. No obstante, si bien cubre variables esenciales, presenta limitaciones en la cantidad de parámetros disponibles y en el grado de sofisticación del procesamiento de señales en comparación con los sistemas comerciales.

Desde el punto de vista técnico, los dispositivos comerciales ofrecen ventajas significativas, tales como mejor relación señal/ruido, algoritmos avanzados de filtrado y detección de eventos, así como cumplimiento de normativas clínicas internacionales. Estas características se traducen en una mayor precisión diagnóstica, especialmente en entornos clínicos y de cuidados críticos.

Sin embargo, el dispositivo desarrollado presenta ventajas relevantes en términos de accesibilidad y flexibilidad, des-

tacándose por su bajo costo de implementación, su arquitectura abierta y modificable, el acceso a señales crudas y su alta adaptabilidad a diferentes protocolos experimentales. Este enfoque resulta consistente con las tendencias actuales en bioinstrumentación abierta y ciencia reproducible.

En cuanto a la aplicabilidad, los monitores comerciales continúan siendo la opción de referencia en contextos clínicos o en estudios que requieren alta precisión y validación normativa. En contraste, el dispositivo propuesto se posiciona como una alternativa viable para estudios exploratorios, actividades de docencia e investigación preclínica, donde la flexibilidad y el costo constituyen factores determinantes.

No obstante, al igual que en otros sistemas abiertos, persisten desafíos relacionados con la estandarización de la señal, el control del ruido eléctrico y la calibración entre dispositivos. Investigaciones previas señalan que la calidad del registro electrocardiográfico depende críticamente del diseño del sistema de adquisición, del filtrado analógico y digital, y de una adecuada puesta a tierra eléctrica (Kumar & Singh, 2025), aspectos que constituyen líneas prioritarias de optimización futura.

4.5. Limitaciones operativas y posicionamiento del sistema

Una limitación inherente del DMSVA es la necesidad de inmovilización del animal para garantizar la estabilidad de las señales registradas, condición habitual en sistemas de monitoreo basados en sensores externos. No obstante, este requisito no excluye aplicaciones futuras en animales despiertos sometidos a contención experimental. En comparación con los sistemas telemétricos implantables, que permiten monitoreo continuo en animales libres de movimiento, el DMSVA presenta menor complejidad quirúrgica, menor costo operativo y mayor accesibilidad experimental, aunque a expensas de una menor libertad comportamental del sujeto. De este modo, el dispositivo se posiciona como una alternativa intermedia entre los sistemas cableados convencionales y las plataformas implantables, particularmente útil en estudios agudos o protocolos anestésicos.

La integración de electrónica avanzada, sistemas informáticos y programación ha facilitado el desarrollo de dispositivos experimentales más simples, eficientes y accesibles. En este contexto, el DMSVA se proyecta como una herramienta ver-

sátel con aplicaciones potenciales en investigación básica, práctica veterinaria y enseñanza experimental, proporcionando datos fisiológicos precisos y visualización en tiempo real.

Como proyección futura, se plantea la optimización del procesamiento digital de señales, la incorporación de nuevos módulos de medición —como presión arterial—, el desarrollo de conectividad inalámbrica, la integración de algoritmos de análisis automatizado basados en inteligencia artificial y la validación del sistema frente a equipos de referencia. Estas mejoras permitirán ampliar su aplicabilidad hacia modelos experimentales más complejos y estudios longitudinales.

5. Conclusiones

El dispositivo multiparamétrico desarrollado constituye una solución tecnológica accesible capaz de registrar en tiempo real variables fisiológicas relevantes en animales de laboratorio. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad técnica del sistema y su capacidad para adquirir señales fisiológicas estables y coherentes bajo condiciones experimentales controladas.

Si bien el sistema presenta limitaciones en comparación con dispositivos comerciales —particularmente en términos de validación cuantitativa, robustez y estandarización—, sus principales fortalezas radican en su bajo costo, modularidad y flexibilidad experimental (Jain & Tiwari, 2014).

En este contexto, el DMSVA debe considerarse como una prueba de concepto funcional con potencial aplicabilidad en investigación básica y docencia, especialmente en entornos con recursos limitados. Estudios futuros orientados a la calibración, validación cuantitativa y mejora del procesamiento de señales permitirán consolidar su uso en aplicaciones experimentales más exigentes.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración del alumno de grado Juan Scatularo por su participación en el desarrollo de los experimentos. Parte de esta investigación fue financiada con fondos de la Fundación Universidad de Morón a través

del subsidio Código 80020220100066UM, PID 2023-2025. Resultados preliminares de este trabajo fueron presentados como: Gadea, F., Moyano, M., Cervino, C. O., & Cogo Pagella, J. (2025, 29 de octubre). Desarrollo de un dispositivo de uso experimental para el registro y análisis de parámetros fisiológicos en ratas. Ponencia presentada en el *I Simposio de Estudiantes Investigadores de la UM 2025, organizado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad de Morón, Morón, Argentina*.

Referencias Bibliográficas

- Affanni, J. M., & Cervino, C. O. (2000). Fisiología de la vigilia y del sueño. En A. Houssay & C. Cingolani (Eds.), *Fisiología Humana de Houssay* (7ma ed., pp. 1040-1074). El Ateneo.
- Bailey, J. J., Berson, A. S., Garson, A., Jr., Horan, L. G., Macfarlane, P. W., Mortara, D. W., & Zywiets, C. (1990). Recommendations for standardization and specifications in automated electrocardiography: Bandwidth and digital signal processing: A report for health professionals by an ad hoc writing group of the Committee on Electrocardiography and Cardiac Electrophysiology of the Council on Clinical Cardiology, American Heart Association. *Circulation*, 81(2), 730–739. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.81.2.730>
- Belda, E., Laredo, F. G., Escobar, M., Agut, A., Soler, M., & Lucas, X. (2005). Agonistas alpha-2 adrenérgicos en sedación y anestesia veterinaria. *Anales de Veterinaria (Murcia)*, 21, 23-33.
- Bello Caraballo, N., Cogo Pagella, J., Iodice, O., & Cervino, C. O. (2018a, 14–17 de noviembre). *Effects of combination of melatonin with ketamine on standard regimens of anesthesia in rats* [Póster]. Reunión Anual de la Sociedad Argentina de Fisiología (SAFIS), Mar del Plata, Argentina.
- Bello Caraballo, N., Cogo Pagella, J., Iodice, O., & Cervino, C. O. (2018b). Efectos de la combinación de melatonina con clorhidrato de ketamina sobre regímenes estándar de anestesia en ratas. *Revista Argentina de Anestesiología*, 76(2), 75-84. <https://doi.org/10.24875/RAA.18000022>
- Brophy, J. (1974). *Electrónica fundamental para científicos*. Reverté.

- Cervino, C. O., López, R., Rodríguez, M. F., & Cogo Pagella, J. (2024). Efectos de la anestesia inducida por ketamina/agonistas- α_2 sobre la respuesta cardiorrespiratoria en ratas de laboratorio. *Revista de Medicina Veterinaria*, 105(1), 70-79.
- Cogo Pagella, J., Rodríguez, M. F., Frisina, F., & Cervino, C. O. (2019a, 10–11 de noviembre). *Combined action of melatonin and alpha2 agonist for anesthesia in rats* [Poster]. Reunión Anual de la Sociedad Argentina de Fisiología (SAFIS), Rosario, Argentina.
- Cogo Pagella, J., Rodríguez, M. F., López, R., & Cervino, C. O. (2019b, 10–11 de noviembre). *Anesthetic effects in rats: interaction alpha2 agonists with ketamine hydrochloride* [Poster]. Reunión Anual de la Sociedad Argentina de Fisiología (SAFIS), Rosario, Argentina.
- Cogo Pagella, J., Rodríguez, M. F., López, R., & Cervino, C. O. (2022). Estudio comparativo de la anestesia inducida por agonistas- α_2 combinados con ketamina en ratas. *Revista Argentina de Anestesiología*, 76(1), 1-9. <https://doi.org/10.24875/RAA.21000011>
- Dangarembizi, R., Erlwanger, K. H., Mitchell, D., Hetem, R. S., Madziva, M. T., & Harden, L. M. (2017). Measurement of body temperature in normothermic and febrile rats: Limitations of using rectal thermometry. *Physiology & Behavior*, 179, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.06.002>
- Diefenderfer, J. (1984). *Instrumentación electrónica*. Interamericana.
- Dyson, D. H. (2008). Perioperative pain management in veterinary patients. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 38(6), 1309-1327.
- Ehresh, M., Abatis, P., & Schlindwein, F. S. (2020). A portable electrocardiogram for real-time monitoring of cardiac signals. *SN Applied Sciences*, 2(8), Artículo 1419. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3065-9>
- Fernández Moreno, L., Luque Gómez, M., & San Andrés, M. I. (2007). Dexmedetomidina y otros agonistas α_2 adrenérgicos en veterinaria. *Panorama Actual del Medicamento*, 31(306), 918-925.
- Flores Chávez, P. L., Infante Vázquez, O., Sánchez Torres, G., Martínez Memije, R., & Rodríguez Rossini, G. (2002). Detección de signos vitales en ratas mediante métodos no invasivos. *Veterinaria México*, 33(2), 179-187.
- Flecknell, P. (2016). *Laboratory animal anaesthesia* (4th ed.). Academic Press.
- Gargiulo, S., Greco, A., Gramanzini, M., Esposito, S., Affuso, A., Brunetti, A., & Vesce, G. (2012). Mice anesthesia, analgesia, and care, part I: Anesthetic considerations in preclinical research. *ILAR Journal*, 53(1), E55–E69. <https://doi.org/10.1093/ilar.53.1.55>
- González Chavarría, J. F. (27 de febrero de 2024). *Creación de un Monitor de Ritmo Cardíaco con Arduino y el Módulo AD8232: Una Guía Paso a Paso*. Tecneu. <https://www.tecneu.com/blogs/tutoriales-de-electronica/ad8232>
- Ho, D., Zhao, X., Gao, S., Hong, C., Vatner, D. E., & Vatner, S. F. (2011). Heart Rate and Electrocardiography Monitoring in Mice. *Current Protocols in Mouse Biology*, 1(1), 123-139. <https://doi.org/10.1002/9780470942390.mo100159>
- Hung-Kee (China) Electronic Technology Co., Ltd. (s. f.). Medical Veterinary Multiparameter Monitor With 2Temp SPO2 ECG. <https://www.chinax.com/portable-patientmonitors/pz6fb5a73-medical-veterinary-multiparameter-monitor-with-2temp-spo2-ecg.html>
- Kligfield, P., Gettes, L. S., Bailey, J. J., Childers, R., Deal, B. J., Hancock, E. W., van Herpen, G., Kors, J. A., Macfarlane, P., Mirvis, D. M., Pahlm, O., Rautaharju, P., & Wagner, G. S. (2007). Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram: Part I: The Electrocardiogram and Its Technology: A Scientific Statement From the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society. *Circulation*, 115(10), 1306–1324. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.180200>
- Kumar, A., & Singh, I. (2025). *Arrhythmia detection using AD8232 ECG sensor*. Delhi Skill and Entrepreneurship University. <https://www.researchgate.net/publication/395336619>
- Jain, P. K., & Tiwari, A. K. (2014). Heart monitoring systems—A review. *Computers in Biology and Medicine*, 54, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.08.014>
- Laforé Antón, E. (2004). *Evaluación de la anestesia inducida usando como preanestésico Clorhidrato de xilacina (Dormi-xyl 2) más Clorhidrato de ketamina (Ket-A-100) en caninos*. Agrovvetmarket. <https://www.agrovvetmarket.com/public/pdf/anestesticos/Dormi-xyl.pdf>
- MicrocontrollersLab. (13 de febrero de 2024). *MAX30100 Pulse Oximeter and Heart Rate Sensor with Arduino*.

<https://microcontrollerslab.com/max30100-pulse-oximeter-heart-rate-sensor-arduino-tutorial/>

- MicrocontrollersLab. (27 de enero de 2025). *ESP32 SPI Tutorial Master Slave Communication Example*. <https://microcontrollerslab.com/esp32-spi-communication-tutorial-arduino/>
- Miranda-Vega, J. E., Nuñez-Patrón, E. Y., Prieto-Avalos, G., Flores-Fuentes, W., Sergiyenko, O., García-González, W., Márquez-Ramírez, L. V., Castro-Contreras, R., & Ayala-Figueroa, R. I. (2025). ESP32-Powered PPG Signal Acquisition: Open-Source Hardware and Software for Research and Education. *Hardware*, 3(4), 15. <https://doi.org/10.3390/hardware3040015>
- Mounika, K., & Akram, S. V. (2026). Wireless IoT-based continuous ECG monitoring using ESP32 and ThingSpeak based performance analysis across age groups. *Sensors and Actuators A: Physical*, 399, Artículo 117392. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.117392>
- Murali, K., & Veerapandu, G. (2023). Integrated health monitoring system with ECG, SCG, SpO₂, and heart rate measurements using ESP32 and other biosensors. *JETIR Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 10(6), e431-e439.
- Omer Farooq, M., Ahmed Aiyaz Uddin, S., & Zain Abdul Wasay, M. (2023). Low power IoT based implementation ECG & health monitoring system. *Ciência & Engenharia*, 11(1), 1676–1687.
- Primiano, F. P. (2009). Respiratory Plethysmography. En J. W. & S. Inc (Ed.), *Medical Instrumentation Application and Design* (4.^a ed., p. 736). Wiley.
- Sato, M., Matsumoto, N., Noguchi, A., Okonogi, T., Sasaki, T., & Ikegaya, Y. (2018). Simultaneous monitoring of mouse respiratory and cardiac rates through a single precordial electrode. *Journal of Pharmacological Sciences*, 137(2), 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.jphs.2018.06.009>
- Short, B., Fong, J., Galvez, V., Grunstein, R., Lim, L., & Dowling, N. (2018). Side-effects associated with ketamine use in depression: a systematic review. *The Lancet Psychiatry*, 5(1), 65-78. [https://doi.org/10.1016/S2215-0366\(17\)30272-9](https://doi.org/10.1016/S2215-0366(17)30272-9)
- Sinclair, M. D. (2003). A review of the physiological effects of 2-agonists related to the clinical use of medetomidine in small animal practice. *Canadian Veterinary Journal*, 44(11), 885–897.
- Zacharewicz, L., Iodice, O., & Cervino, C. (2009, 15–16 de octubre). *Efecto de una dosis única de melatonina sobre regimenes estándar de anestesia en ratas* [Póster]. Reunión Anual de la Sociedad Argentina de Fisiología (SAFIS), La Plata, Argentina.
- Zehendner, C. M., Luhmann, H. J., & Yang, J.-W. (2013). A Simple and Novel Method to Monitor Breathing and Heart Rate in Awake and Urethane-Anesthetized Newborn Rodents. *PLoS ONE*, 8(5), e62628. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062628>
- Zishan, M. A. O., Shihab, H. M., Islam, S. S., Riya, M. A., Rahman, G. M., & Noor, J. (2024). Dense neural network based arrhythmia classification on low-cost and low-compute micro-controller. *Expert Systems with Applications*, 239, Artículo 122560. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122560>