



Comportamiento de la frecuencia cardiaca y gases arteriales basado en los sistemas dinámicos

Behaviour of heart rate and blood gas analysis based on dynamical systems.

Sandra Magaly Medina-Araujo,¹ Javier Oswaldo Rodríguez-Velásquez,² Signed Esperanza Prieto-Bohórquez³

Resumen

ANTECEDENTES: Las dinámicas no lineales han permitido el desarrollo de metodologías diagnósticas de la dinámica cardiaca y la evaluación del comportamiento de distintas variables hemodinámicas.

OBJETIVO: Caracterizar el comportamiento caótico de la frecuencia cardiaca y de parámetros del análisis de los gases de la sangre de pacientes de la unidad de cuidado intensivo en el marco de la teoría de los sistemas dinámicos.

MATERIAL Y MÉTODO: Estudio en el que se incluyeron reportes clínicos de gases sanguíneos y registros electrocardiográficos continuos de la unidad de cuidado intensivo. Se sistematizaron la frecuencia cardiaca, la presión arterial y venosa de dióxido de carbono (PaCO₂ y PvCO₂, respectivamente) y la saturación venosa de oxígeno (SvO₂). Luego se generaron atractores caóticos de esas variables en el mapa de retardo y se establecieron los valores máximos y mínimos de los atractores.

RESULTADOS: Se incluyeron 25 reportes clínicos. Los valores mínimos y máximos de los atractores de la saturación venosa de oxígeno se hallaron entre 22.1 y 97.3%. Los valores mínimos y máximos de los atractores de la PaCO₂ se encontraron entre 17 y 97.9 mmHg. Los valores mínimos y máximos de los atractores de la PvCO₂ variaron entre 14.4 y 64.1 mmHg. Los valores de la frecuencia cardiaca se hallaron entre 62 y 210 lat/min.

CONCLUSIONES: Fue posible caracterizar el comportamiento caótico de los parámetros de los gases sanguíneos y de la frecuencia cardiaca en el contexto de la teoría de los sistemas dinámicos.

PALABRAS CLAVE: Dinámica no lineal; análisis de los gases de la sangre; frecuencia cardiaca.

Abstract

BACKGROUND: Nonlinear dynamics have allowed the development of diagnostic methodologies of cardiac dynamics and the evaluation of the behavior of different hemodynamic variables.

OBJECTIVE: To characterize the chaotic behavior of the heart rate and parameters of the blood gases of patients of the intensive care unit within the framework of dynamic systems theory.

MATERIAL AND METHOD: A study was done including clinical reports of blood gases and continuous electrocardiographic records were selected from patients of the intensive care unit. Heart rate, pressure of arterial and venous carbon dioxide, and venous oxygen saturation were systematized. Then, chaotic attractors of these variables were generated in the delay map, and the maximum and minimum values of the attractors were established.

RESULTS: There were included 25 clinical reports. The minimum and maximum values of the attractors of venous oxygen saturation were between 22.1 and 97.3%. The minimum and maximum values of the attractors of PaCO₂ were between 17 and 97.9 mmHg. The minimum and maximum values of the attractors of PvCO₂ ranged from 14.4 to 64.1 mmHg. Heart rate values were found between 62 and 210 lat/min.

CONCLUSIONS: It was possible to characterize the chaotic behavior of the parameters of blood gases and heart rate, in the context of dynamic systems theory.

KEYWORDS: Nonlinear dynamics; Blood gas analysis; Heart rate.

¹ Grupo Insight. Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

² Grupo Insight. Línea de Profundización e Internado Especial: Física y Matemáticas Aplicadas a la Medicina, Universidad Militar Nueva Granada. Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, Bogotá, Colombia.

³ Grupo Insight. Universidad Militar Nueva Granada. Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, Bogotá, Colombia.

Recibido: 22 de marzo 2019

Aceptado: 26 de abril 2019

Correspondencia

Sandra Magaly Medina Araujo
grupoinight2025@yahoo.es

Este artículo debe citarse como

Medina-Araujo SM, Rodríguez-Velásquez JO, Prieto-Bohórquez SE. Comportamiento de la frecuencia cardiaca y gases arteriales basado en los sistemas dinámicos. Med Int Méx. 2020 marzo-abril;36(2):153-158.
<https://doi.org/10.24245/mim.v36i2.3042>

ANTECEDENTES

La teoría de los sistemas dinámicos permite estudiar el estado y la evolución de los sistemas que varían en el tiempo, con base en sus variables dinámicas.¹ Estas variables se grafican en espacios abstractos denominados espacios de fases, dando lugar a atractores.² En el caso de sistemas impredecibles, se originan atractores caóticos, que se caracterizan por su irregularidad. Tal característica imposibilita su medición a partir de la geometría euclidiana, por lo que se cuantifican a partir de la geometría fractal.²⁻⁴

La unidad de cuidado intensivo (UCI) cumple un papel fundamental en el restablecimiento de las funciones de los órganos afectados por las enfermedades que aquejan a los individuos en estado crítico.⁵ Entre los exámenes realizados en la UCI, está el análisis de los gases de sangre consistente en la medición de los gases en una muestra de sangre arterial o venosa y permite evaluar el intercambio gaseoso, la oxigenación, la ventilación y el equilibrio ácido-base, aspectos importantes en la toma de decisiones clínicas.⁶ Uno de los usos más recientes radica en la posibilidad de desarrollar medidas que ayuden a generar predicciones precisas de mortalidad, porque ayudaría a reducir la magnitud de este índice en las UCI.⁷

La creciente necesidad en fisiología de establecer caracterizaciones y diagnósticos de los fenómenos biomédicos ha dado lugar a su análisis desde perspectivas no lineales.⁸ Asimismo, se han desarrollado estudios en el marco de los sistemas dinámicos; tal es el caso de una investigación conducida por Goldberger y colaboradores,⁹ en la que se evidenció que los sistemas cardiacos patológicos exhiben dinámicas muy periódicas o muy aleatorias, mientras que los sistemas cardiacos normales exhiben dinámicas intermedias entre las dos mencionadas, contrario a lo planteado por la concepción homeostática de la fisiología.

En este contexto, en el ámbito médico se han desarrollado métodos diagnósticos y predictivos, objetivos y reproducibles, con base en teorías físicas y matemáticas. Tal es el caso de una metodología fundamentada en proporciones de la entropía de sistemas dinámicos cardiacos¹⁰ mediante la generación de atractores a partir de rangos de frecuencias cardiacas.

El propósito de esta investigación es caracterizar el comportamiento de la saturación venosa de oxígeno (SvO_2), la presión arterial de dióxido de carbono ($PaCO_2$), la presión venosa de dióxido de carbono $PvCO_2$ y frecuencia cardiaca en un mismo espacio geométrico, con el fin de evaluar y evidenciar su comportamiento caótico en el contexto de la teoría de los sistemas dinámicos.

MATERIAL Y MÉTODO

Estudio en el que se tomaron los resultados clínicos de gases sanguíneos que se obtuvieron con un analizador multiparamétrico de medición de gases sanguíneos COBAS b221 y los registros electrocardiográficos continuos, provenientes de 25 pacientes mayores de 21 años de bases de datos de la UCI de la Clínica del Country de Bogotá, Colombia.

Procedimiento

Se tomaron los valores de la SvO_2 , la $PaCO_2$ y la $PvCO_2$ de los reportes clínicos de la base de datos, en los que estaban consignados los valores de estas variables de determinado paciente en diferentes momentos de su hospitalización en la UCI. También se tomaron los valores de la frecuencia cardiaca máxima y mínima de los trazados electrocardiográficos.

La frecuencia de la toma de gases arteriales fue variable, ya que dependió del criterio de los expertos clínicos para cada paciente. Se encontraron casos con registros clínicos que se



analizaron en varias oportunidades en un mismo día, registros con periodicidad diaria y registros con intervalos de varias semanas luego de la última muestra sanguínea.

Luego, se generaron atractores en el mapa de retardo a partir de la ubicación de pares ordenados de los valores consecutivos en el tiempo de las variables dinámicas seleccionadas. Posteriormente se establecieron los valores máximos y mínimos de la SvO_2 , la $PaCO_2$, la $PvCO_2$ y la frecuencia cardiaca en los correspondientes mapas de retardo, evidenciando valores característicos de las variables hemodinámicas evaluadas.

El diagnóstico clínico de ingreso y egreso de la UCI de los pacientes pertenecientes al estudio se encuentra en el **Cuadro 1**.

Consideraciones éticas

Este estudio se categoriza como una investigación de riesgo mínimo, pues se realizan cálculos matemáticos sobre registros de bases de datos de exámenes prescritos previamente, protegiendo

el anonimato e integridad de los participantes, de acuerdo con la resolución 08430 de 1993 expedida por el Ministerio de Salud Colombiano. También se rige por la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial.

RESULTADOS

Los valores mínimos y máximos de los atractores de la saturación venosa de oxígeno se hallaron entre 22.1 y 97.3% (**Cuadro 2**). En el caso de los pacientes con egreso vivo de la UCI estos valores variaron entre 43.1 y 93.7%, mientras que esos valores se encontraron entre 22.1 y 76.5 para los de egreso muerto. Los valores mínimos y máximos de los atractores de la $PaCO_2$ se encontraron entre 17 y 97.9 mmHg. En los pacientes con egreso vivo de la UCI estos valores se hallaron entre 25.3 y 54.6 mmHg, mientras que dichos valores estuvieron entre 17 y 97.9 mmHg en los de egreso muerto. Los valores mínimos y máximos de los atractores de la $PvCO_2$ variaron entre 14.4 y 64.1 mmHg. En el caso de los pacientes con egreso vivo de la UCI estos valores estuvieron entre 21.6 y 56.6 mmHg, mientras que esos

Cuadro 1. Diagnóstico clínico de 14 de los 25 pacientes seleccionados para el estudio

Núm.	Sexo	Diagnóstico clínico	Egreso
1	Masc	Sepsis pleuropulmonar	Vivo
2	Fem	Sepsis de tejidos blandos. enfermedad pulmonar crónica	Muerto
3	Masc	Tumor maligno de las vías biliares extrahepática	Muerto
4	Fem	Hemorragia subaracnoidea	Vivo
5	Fem	Fibrilación y aleteo auricular	Vivo
6	Masc	Accidente cerebrovascular	Muerto
7	Fem	Neumonía	Vivo
8	Masc	Sepsis de origen pulmonar	Vivo
9	Masc	Sepsis de origen pulmonar	Vivo
10	Masc	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	Vivo
11	Masc	Disfunción orgánica múltiple	Muerto
12	Fem	Accidente vascular encefálico agudo no especificado como hemorrágico	Muerto
13	Masc	Sepsis de tejidos blandos	Muerto
14	Masc	Trastorno de disco cervical con mielopatía	Muerto

Cuadro 2. Valores máximos y mínimos calculados de los atractores de la frecuencia cardiaca, la saturación venosa de oxígeno (SvO₂), la presión arterial de dióxido de carbono (PaCO₂) y la presión venosa de dióxido de carbono PvCO₂

Núm.	Frecuencia cardiaca		SvO ₂ (%)		PvCO ₂ (mmHg)		PaCO ₂ (mmHg)		Salida
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
1	63	186	75.9	91.3	40.8	47	25.8	44.2	Vivo
2	104	183	40	92	19	40	23	49	Muerto
3	104	177	35.7	90.1	29.9	97.9	23.8	64.1	Muerto
4	65	187	66	77.9	39.5	49	31	42.9	Vivo
5	62	170	43.1	79.6	25.3	40.3	21.6	49.2	Vivo
6	86	180	61	89	17	43	19	31	Muerto
7	64	123	75	92	39	53	28	50	Vivo
8	65	167	66	91	40	48	30	54	Vivo
9	63	185	61.30	93.7	29.4	44.7	28.5	48.5	Vivo
10	64	210	59.7	88.9	33.3	54.6	33.5	56.6	Vivo
11	93	181	57	82.6	19.2	53.5	19.3	28.7	Muerto
12	105	180	58.1	76.5	33.8	50.5	30.1	48.9	Muerto
13	95	182	76.6	82.9	21.1	45.7	14.4	32.6	Muerto
14	82	183	22.1	92	23	38	24.2	52.1	Muerto

valores se hallaron entre 14.4 y 64.1 mmHg para los de egreso muerto. Los valores mínimos y máximos de los atractores de la frecuencia cardiaca se hallaron entre 62 y 210 lat/min. En los pacientes con egreso vivo de la UCI estos valores estuvieron entre 62 y 210 lat/min; estos valores variaron entre 82 y 183 lat/min para los de egreso muerto.

Se observó que el comportamiento caótico de la SvO₂ muestra un rango mayor para los pacientes con egreso vivo, en cambio, el rango disminuye para los pacientes con egreso muerto de la unidad de cuidado intensivo. El rango de valores para la PvCO₂ y PaCO₂ de los pacientes con egreso muerto fue mayor comparado con el de pacientes con egreso vivo. Los anteriores resultados revelan la posibilidad de establecer diferencias más precisas en el tiempo entre estas tres variables de interés en la UCI.

En cuanto a los rangos de valores de la frecuencia cardiaca, se observó que el rango es mayor en

los casos de pacientes vivos, comparado con los casos de pacientes muertos.

DISCUSIÓN

Éste es el primer trabajo en el que se caracterizan simultáneamente la SvO₂, la PaCO₂, la PvCO₂ y la frecuencia cardiaca, en el espacio geométrico generalizado de Box-Counting, en el contexto de la teoría de los sistemas dinámicos, evidenciando el comportamiento caótico de esas variables en pacientes de la UCI; tal comportamiento se entiende como un sistema dinámico que varía en el tiempo, observando el orden matemático que subyace al fenómeno y estableciendo medidas objetivas y reproducibles, al margen de la causa del diagnóstico del paciente y de consideraciones poblacionales o epidemiológicas.

Este trabajo no se fundamenta en la perspectiva fisiológica convencional ni obedece a la homeostasia; su sustrato es la teoría de los sistemas dinámicos, a partir de la que es posible caracteri-



zar el comportamiento matemático y geométrico de las variables a través de la construcción de atractores caóticos y los valores máximos y mínimos de dichas variables dinámicas.

En el ámbito médico, se han realizado estudios con respecto al análisis e interpretación de los gases sanguíneos¹¹⁻¹⁵ y su capacidad para evaluar el estado del paciente.^{11,12} Se han evidenciado limitaciones asociadas con aspectos como el sitio de punción^{11,12} o la jeringa usada;¹³ otras investigaciones han mostrado errores durante y después de realizado el análisis de la muestra sanguínea.¹⁴ También se ha planteado que el análisis adecuado de gases sanguíneos incide en el establecimiento del diagnóstico, nivel de deterioro, periodicidad del seguimiento y conducta a seguir.¹⁵

Este estudio muestra que es posible establecer parámetros objetivos que den cuenta del comportamiento de las variables de los gases sanguíneos en el tiempo, lo que tendría implicaciones importantes en el ámbito médico, porque podrían anticiparse condiciones clínicas desfavorables y estructurarse herramientas de ayuda diagnóstica que complementen el diagnóstico médico, que en ocasiones depende de la pericia del clínico y está ligado a la subjetividad.

Asimismo, el análisis de la dinámica cardiaca desde los sistemas dinámicos ha dado lugar a la nueva concepción de normalidad y enfermedad planteada por Goldberger,⁹ lo anterior ha dado pie al advenimiento de teorías físicas y matemáticas con validez en el ámbito médico. En el espacio geométrico generalizado de Box-Counting fue posible diferenciar dinámicas cardiacas normales de aquéllas con enfermedad aguda a partir de los espacios de ocupación.¹⁶ En este estudio se lleva a cabo una caracterización de diversas variables en este espacio generalizado.

La aplicación de teorías físicas y matemáticas a las dinámicas fisiológicas, como la teoría de los

sistemas dinámicos, ha permitido el desarrollo de metodologías con las que se pretende llegar a la adecuada interpretación de los fenómenos biomédicos.¹⁷⁻²² No obstante, aún se requieren más estudios que corroboren su utilidad clínica,²³ particularmente con los que incorporan análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca²⁴ porque su validez no se ha demostrado rigurosamente en la clínica.²⁵

En ese contexto, el pensamiento acausal de la física teórica moderna²⁶ se ha incorporado en la medicina, permitiendo el desarrollo de metodologías diagnósticas y predictivas con validez clínica, realizando medidas fractales y generalizaciones arteriales,²⁷ así como también se han desarrollado metodologías predictivas de unión de péptidos al HLA clase II²⁸ y predicciones en salud pública²⁹ e infectología.³⁰

Agradecimientos

Producto derivado del proyecto INV-CIAS-2309, financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada-Vigencia 2017 y de la Línea de Profundización, Internado Especial y Semillero Teorías Físicas y Matemáticas Aplicadas a la Medicina.

Agradecemos a la Universidad Militar Nueva Granada, especialmente al Fondo de Investigaciones de la Universidad, a la Vicerrectoría de Investigaciones y a la Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas. Agradecemos especialmente a la Doctora Yanneth Méndez, Vicerrectora académica, a la Ing. Marcela Iregui, Vicerrectora de Investigaciones, al Dr. Adrián Gómez, Director del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas y al Dr. Carlos Andrés Coy, Decano de la Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas.

También agradecemos al Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, especialmente

a los doctores Tito Tulio Roa, Director de Educación Médica, Jorge Alberto Ospina, Director Médico, y Alfonso Correa, Director del Centro de Investigaciones, por el apoyo a nuestro grupo de investigación.

REFERENCIAS

1. Devaney R. A first course in chaotic dynamical systems theory and experiments. Estados Unidos: Addison- Wesley, 1992.
2. Peitgen H, Jurgens H, Saupe D. Strange attractors, the locus of chaos. In: Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. Estados Unidos: Springer-Verlag, 1992;655-768.
3. Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. España, Freeman, 2000.
4. Mandelbrot B. ¿Cuánto mide la costa de Gran Bretaña? En: Los Objetos Fractales. España, 2000;27-50.
5. Parrillo J, Dellinger RP. Critical Care Medicine. Estados Unidos, Elsevier, 2019.
6. Mangas A, Oliver P, Casitas R, Laorden D. Indicaciones e interpretación diagnóstica de la gasometría arterial. *Medicine*. 2018;12:3849-3908. DOI: 10.1016/j.med.2018.10.025.
7. von Auenmueller K, Christ M, Sasko BM, Trappe HJ. The value of arterial blood gas parameters for prediction of mortality in survivors of out-of-hospital cardiac arrest. *J Emerg Trauma Shock* 2017;10:134-139. DOI: 10.4103/JETS.JETS_146_16.
8. Godoy MF. Nonlinear analysis of heart rate variability: A comprehensive review. *J Cardiol Ther* 2016;3:528-33.
9. Goldberger A, Amaral L, Hausdorff JM, Ivanov P, Peng CK, Stanley HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *PNAS*. 2002;99:2466-2472.
10. Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, Melo M, Mendoza F, Correa C, et al. Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. *J Med Med Sci* 2013;4:370-381.
11. Razi E, Nasiri O, Akbari H, Razi A. Correlation of arterial blood gas measurements with venous blood gas values in mechanically ventilated patients. *Tanaffos* 2012;11:30-35.
12. Masip J, De Mendoza D, Planas K, Páez J, Sanchez B, Cancio B. Peripheral venous blood gases and pulse-oximetry in acute cardiogenic pulmonary oedema. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care* 2012;1:275-280.
13. Treger R, Pirouz S, Kamangar N, Corry D. Agreement between central venous and arterial blood gas measurements in the intensive care unit. *Clin J Am Soc Nephrol* 2010;5:390-394.
14. Geoffrey B. Preanalytical considerations in blood gas analysis. *Biochem Med (Zagreb)* 2013;23:19-27.
15. Küme T, Rıza A, Solak A, Tuğlu B, Çinkooğlu B, Çoker C. The effects of different syringe volume, needle size and sample volume on blood gas analysis in syringes washed with heparin. *Biochem Med (Zagreb)* 2012;22:189-201.
16. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Domínguez D, Pardo J, Mendoza F, et al. Clinic application of a cardiac diagnostic method based on dynamic systems theory. *Res J Cardiol* 2017;10:1-7. DOI: 10.3923/rjc.2017.1.7.
17. Garfinkel A. A mathematics for physiology. *Am J Physiol* 1983;245:R455-R466.
18. Schumacher A. Linear and nonlinear approaches to the analysis of R-R interval variability. *Biol Res Nurs* 2004;5:211-21.
19. Barbieri R, Scilingo EP, Valenza G. Complexity and non-linearity in cardiovascular signals. Suiza: Springer, 2017.
20. Scaffeta N, Moon R, West B. Fractal response of physiological signals to stress conditions, environmental changes, and neurodegenerative diseases. *Complexity* 2007;12:12-17. <https://doi.org/10.1002/cplx.20183>.
21. Ghorbani M, Jonckheere EA, Bogdan P. Gene expression is not random: scaling, long-range cross-dependence, and fractal characteristics of gene regulatory networks. *Front Physiol* 2018;9:1446. DOI: 10.3389/fphys.2018.01446.
22. Satti R, Abid NUH, Bottaro M, de Rui M, Garrido M, Raufoy MR. The application of the extended poincaré plot in the analysis of physiological variabilities. *Front Physiol* 2019;10:116. DOI: 10.3389/fphys.2019.00116.
23. Voss A, Schulz S, Schroeder R, Baumert M, Caminal P. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. *Phil Trans R Soc* 2009;367A, 277-296.
24. Bishop DG, Wise RD, Lee C, von Rahden RP, Rodseth RN. Heart rate variability predicts 30-day all-cause mortality in intensive care units. *South Afr J Anaesth Analg* 2016;22(4):125-128. DOI: 10.1080/22201181.2016.1202605.
25. Wu, L, Jiang Z, Li C, Shu M. Prediction of heart rate variability on cardiac sudden death in heart failure patients: A systematic review. *Int J Cardiol* 2014;174(3):857-860. DOI: 10.1016/j.ijcard.2014.04.176.
26. Einstein A. Sobre la teoría de la relatividad y otras aportaciones científicas. Madrid: Sarpe; 1983;23-32.
27. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal P, Puerta G, Vitery S, et al. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. *BMC Medical Physics* 2010;10:1.
28. Rodríguez J. Binding to class ii HLA theory: probability, combinatorial and entropy applied to peptide sequences. *Inmunología* 2008; 27(4):151-166. DOI: 10.1016/S0213-9626(08)70064-7.
29. Rodríguez JO. Spatio-temporal probabilistic prediction of appearance and duration of malaria outbreak in municipalities of Colombia. *9 J Phys Conf Ser* 2019;1160:012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1160/1/012018.
30. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Melo M, Domínguez D, Olarte N, et al. Prediction of CD4+ cells counts in HIV/AIDS patients based on sets and probability theories. *Curr HIV Res* 2018;16:416-424. DOI: 10.2174/1570162X17666190306125819.